



ДВАДЦАТАЯ
ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
**ФИЗИКА ПЛАЗМЫ
В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ**

10-14.02.2025



ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Пленарные доклады</i>	6
<i>Секции:</i>	
1. Теория и наблюдения Солнца	8
2. Солнечный ветер и гелиосфера	97
3. Ионосфера	129
4. Магнитосфера	171
5. Теория и наблюдения токовых слоев	214
6. Космическая погода	231
7. Волновые явления в космической плазме	280
8. Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли	324
9. Внешняя гелиосфера	357
10. Атмосферно-магнитосферные связи у планет Солнечной системы	362
11. Космическая погода и медицина	373
12. Нелинейность и самоорганизация в плазме	380

День недели, время		Конференц-Зал	Комната 202	Комната 200
10.02.2025 Понедельник	Утро	Ионосфера 09:00-10:30	Теория и наблюдения Солнца 09:00-10:30	
	10:30-11:00	кофе		
		Ионосфера 11:00-12:00	Теория и наблюдения Солнца 11:00-12:00	Внешняя гелиосфера 11:00-12:00
	12:00-12:15	Открытие конференции		
	Пленарный час 12:15-13:00	Шиндин А.В. НАГРЕВНЫЕ СТЕНДЫ: ИССЛЕДОВАНИЯ БЛИЖНЕГО И ДАЛЬНОГО КОСМОСА		
	Пленарный час 13:00-13:45	ПРОЕКТ ИОНОСФЕРА		
	13:45-14:00	Обсуждение пленарных докладов		
	14:00-15:00	обед		
	День	Ионосфера 15:00-16:30	Теория и наблюдения Солнца 15:00-16:30	Атмосферно-магнитосферные связи 15:00-16:30
	16:30-17:00	кофе		
	Вечер	Ионосфера 17:00-18:00	Теория и наблюдения Солнца 17:00-18:00	Атмосферно-магнитосферные связи 17:00-18:00
	Выставочный зал: открытие выставки, Ice-breaker			
11.02.2023 Вторник	Утро	Теория и наблюдения Солнца 09:30-10:30	Магнитосфера 09:00-10:30	Ионосфера 09:00-10:30
	10:30-11:00	кофе		
		Теория и наблюдения Солнца 11:00-12:30	Магнитосфера 11:00-12:30	Ионосфера 11:00-12:30
	Пленарный час 12:30-13:30	Jasmina Magdalenić Zhukov MODELING OF SOLAR WIND		
	13:30-14:30	обед		
	День	Теория и наблюдения Солнца 14:30-16:00	Магнитосфера 14:30-16:00	Нелинейность и самоорганизация 14:30-16:00
	16:00-16:30	кофе		
	Вечер	Теория и наблюдения Солнца 16:30-18:00	Магнитосфера 16:30-18:00	Космическая погода и медицина 16:30-18:00
Постерная сессия/просмотр кинофильма				

12.02.2023 Среда	Утро	Токовые слои 09:00-10:30	Теория и наблюдения Солнца 09:00-10:30	Солнечный ветер и гелиосфера 9:00 - 10:40	
	кофе				
		Токовые слои 11:00-12:30	Теория и наблюдения Солнца 11:00-12:30	Солнечный ветер и гелиосфера 11:00- 12:20	
	Пленарный час 12:30-13:30	Кузнецов В.Д., Франк А.Г С.И.СЫРОВАТСКИЙ – УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК (К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)			
	13:30-14:30	обед			
	День	Токовые слои 14:30-16:00	Теория и наблюдения Солнца 14:30-16:00	Солнечный ветер и гелиосфера 14:30-16:10	
	кофе				
	Вечер	Волновые явления 16:10-18:10	Теория и наблюдения Солнца 16:30-18:00	Солнечный ветер и гелиосфера 16:30- 17:50	
	Постерная сессия Концерт, 18:30				
	Утро	Космическая погода 09:00-10:30	Волновые явления 9:30-10:30	Воздействие космических факторов 09:00-10:30	
	кофе				
	Утро	Космическая погода 11:00-12:30	Волновые явления 11:00-12:30	Воздействие космических факторов 11:00-12:30	
Пленарный час 12:30-13:30	Красильников А.В. УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ				
13:30-14:30	обед				
День	Космическая погода 14:30-16:00	Волновые явления 14:30-16:10	Воздействие космических факторов 14:30-16:00		
кофе					
Вечер	Космическая погода 16:30-18:00	Волновые явления 16:30-18:10	Воздействие космических факторов 16:30-18:00		
18:10 - 19:00	Общая дискуссия о текущем состоянии солнечной активности				
19:00-21:00	Банкет				
Утро	Волновые явления 10:20-13:30	Космическая погода 09:00-13:30	Воздействие космических факторов 10:50-13:30		
13:30	Заккрытие конференции				
14.02.2023 Пятница					

Нагревные стенды: исследования ближнего и дальнего космоса

А.В. Шиндин

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
shindin@rf.unn.ru*

Нагревные стенды – это установки по воздействию на ионосферу Земли мощным радиоизлучением коротковолнового (КВ) и/или средневолнового диапазонов. Активное воздействие – это один из наиболее эффективных методов исследования ионосферной плазмы и единственный метод, позволяющий решать задачу создания в ионосфере контролируемых возмущений. Действующие нагревные стенды – среднеширотная уникальная научная установка СУРА (56,15° с.ш., 46.10° в.д., Нижегородская обл., экспериментально-опытная база «Васильсурск», максимальная эффективная излучаемая мощность – 300 МВт, диапазон рабочих частот – 4,3÷9 МГц), полярный стенд EISCAT (Тромсё, Норвегия, 69,59° с.ш. и 19,22° в.д., максимальная эффективная излучаемая мощность – 1,2 ГВт, диапазон рабочих частот – 3,8÷8 МГц) и приполярный стенд HAARP (Гакона, шт. Аляска, США, 62,39° с.ш. и 145.13° з.д., максимальная эффективная излучаемая мощность – 3,6 ГВт, диапазон рабочих частот – 2,8÷10 МГц).

Среди направлений исследований ионосферы, выполняемых с использованием нагревных стендов, выделяются фундаментальные вопросы физики плазмы и химии ионосферы, в том числе возбуждение искусственной ионосферной турбулентности (высокочастотных и низкочастотных плазменных волн), неоднородностей различных масштабов – от десятков см до десятков км, ускорение электронов плазменными волнами вплоть до энергий ~ 50 эВ, генерация электромагнитного излучения в диапазонах от крайне низкочастотного до оптического, дополнительная ионизация ионосферной плазмы вплоть до образования искусственных отражающих слоев; вопросы исследований динамики ионосферы; возможности воздействия на магнитосферу Земли, радарные исследования более удаленных объектов: Луны, Солнца и Юпитера, длинноволновые радиоастрономические исследования дальнего космоса.

Практическое значение инициированных мощным радиоизлучением исследований искусственных возмущений ионосферы заключается в исследовании возможностей управления распространением радиоволн различных диапазонов, в изучении их влияния на работу телекоммуникационных систем наземного и космического базирования, в создании новых методов диагностики и мониторинга ближнего космоса, в том числе ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения.

В докладе представлена краткая история создания всех основных нагревных стендов. Приведены их ключевые технические характеристики. Сделан краткий обзор конкретных научных работ, проводимых на нагревных стендах за последние 50 лет, а также приведены важнейшие результаты. Особое внимание уделено работам последнего времени и перспективам научной загрузки существующих и будущих нагревных стендов.

На новом витке развития приемо-передающих средств, средств автоматизации и контроля, вычислительных средств обработки данных в реальном времени нагревные стенды сохраняют несомненную востребованность в вопросах исследований околоземного космического пространства особенно при одновременном (комплексном) использовании различных средств диагностики.

Ключевые слова: нагревные стенды, ионосфера, КВ радиоизлучение, ближний и дальний космос.

С.И.СЫРОВАТСКИЙ – УЧЕНЫЙ И ЧЕЛОВЕК (К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Кузнецов В.Д., А.Г.Франк

ИЗМИРАН, г. Москва, г.Троицк, Россия, kvd@izmiran.ru

ИОФАН, г.Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

Сергей Иванович Сыроватский принадлежал к плеяде талантливых ученых, многие его научные работы стали классическими и вошли в анналы физики. Сергей Иванович прожил недолгую, но богатую и насыщенную жизнь. Он прошел войну, четыре раза был ранен и знал цену человечности. Его доброта, принципиальность и уважение к людям снискали ему любовь и уважение всех, кому посчастливилось его знать и с ним общаться. Академик Виталий Лазаревич Гинзбург, когда говорил о Сергее Ивановиче как об ученом, всегда наряду с его высоким профессионализмом подчеркивал его высокие человеческие качества.

После окончания в 1951 году физического факультета МГУ С.И. Сыроватский был принят в аспирантуру Теоретического отдела ФИАН, где его руководителем стал профессор С.З. Беленький. Первые научные работы С.И. Сыроватского были посвящены магнитной гидродинамике, новой и развивавшейся в то время области науки. В этой области С.И. Сыроватским был получен целый ряд важных и приоритетных результатов. Была проведена классификация типов поверхностей разрывов и ударных волн, исследована их структура и устойчивость.

Большой цикл работ С.И. Сыроватского совместно с В.Л. Гинзбургом был посвящен происхождению и физике космических лучей. В этих работах был предложен метод вычисления интенсивности магнитотормозного радиоизлучения с учетом диффузии, неоднородного распределения и энергетических потерь частиц, обоснована эффективная изотропизация распределения космических лучей за счет столкновений с магнитными неоднородностями среды, исследованы процессы ускорения частиц в галактических источниках, формирование спектров ядерной компоненты космических лучей.

С.И. Сыроватский внес значительный вклад в изучение проблем динамики высокопроводящей плазмы в сильных неоднородных магнитных полях и ускорения частиц применительно к солнечным вспышкам, оболочкам сверхновых звезд, нестационарным галактическим ядрам и квазарам. Им получены типы магнитогидродинамических течений, которые приводят к своеобразному кумулятивному эффекту в окрестности нулевой линии магнитного поля, где происходит формирование нейтрального токового слоя и концентрация избыточной магнитной энергии. Высвобождение энергии при быстром разрушении слоя должно сопровождаться генерацией импульсных электрических полей, ускоряющих заряженные частицы. Под руководством С.И. Сыроватского в ФИАНе проводились экспериментальные исследования динамики токовых слоев в лабораторных условиях, были подтверждены основные выводы теории и реализованы явления типа солнечных вспышек.

Научные работы С.И. Сыроватского получили мировое признание, его результаты вошли в курс теоретической физики Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица, во многие книги и обзоры.

С.И. Сыроватский, как профессор МФТИ, много сил и времени отдавал воспитанию научных кадров, что способствовало созданию исключительной творческой атмосферы в созданном им секторе Теоретического отдела ФИАН, а также успешной работе научного семинара под его руководством.

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца»

Понедельник, 10.02.2025 г., комната 202

Председатель: <u>Кузанын К.М.</u>			
Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада	
1	09.00 - 09.15	Шибает И.Г. и др.	Описание достоверных циклов методом главных компонент и оценка восстановленных циклов
2	09.15 - 09.30	Пипин В.В.	Потоки магнитной спиральности активных областей в модели солнечного динамо среднего поля
3	09.30 - 09.45	Старченко С.В. и др.	Доминирующие периодичности в годовых числах Вольфа и в им соответствующих знакопеременных рядах
4	09.45 - 10.00	Савиных Е.С. и др.	Можно ли решить Проблему тусклого молодого Солнца за счёт механизма Кризека-Сомера?
5	10.00 - 10.15	Фридрихсон А.И. и др.	К вопросу о едином генезисе плазменного внутреннего ядра Солнца и планет
6	10.15 - 10.30	Ишков В.Н.	Текущий 25 солнечный цикл в год максимума: солнечные активные явления и прогноз их развития на ветви спада.
10.30 - 11.00		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Ишков В.Н.</u>			
7	11.00 - 11.15	Гетлинг А. В. и др.	Вариации масштабов конвекции на различных глубинах подфотосферной зоны Солнца в 11-летнем цикле активности
8	11.15 - 11.30	Биленко И.А.	Проявление волн Россби в солнечных магнитных полях
9	11.30 - 11.45	Илларионов Е.А.	Машинное обучение в физике солнца: новые результаты, модели и базы данных
10	11.45 - 12.00	Киселюс В. и др.	Сравнение одношагового и многошагового подхода к прогнозированию индекса солнечной активности
12.00 - 12.15		Открытие конференции	
12.15 - 13.00		Пленарный доклад 1	
13.00 - 13.45		Пленарный доклад 2	
13.45-14.00		Обсуждение пленарных докладов	
14.00 - 15.00		Обед	
Председатель: <u>Соколов Д.Д.</u>			
11	15.00 - 15.15	Клиорин Н. и др.	Чем полезна лабораторная конвекция для понимания солнечной?
12	15.15 - 15.30	Кацова М.М. и др.	Поиск долговременных эффектов в воздействии планет на солнечную активность

13	15.30 - 15.45	Садыков А.М. и др.	Радиальные движения на начальном этапе развития областей солнечных активных
14	15.45 - 16.00	Андреева О.А.	Вариации некоторых индексов солнечной активности 25 цикла
16.00 - 16.30		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Струминский А.Б.</u>			
15	16.30 - 16.45	Костюченко И.Г. и др.	Эффект Гневьшева в вариациях площади солнечных пятен: роль крупных активных областей
16	16.45 - 17.00	Вернова Е.С. и др.	Дисбаланс положительных и отрицательных магнитных полей в северном и южном полушариях Солнца
17	17.00 - 17.15	Глатов А. Г.	Прогнозирование солнечных циклов по данным полярной и низкоширотной активности
18	17.15 - 17.30	Плеханов П.Г. и др.	Магнитосфера циклов активности и смены полярности Солнца
19	17.30 - 17.45	Григорьева И.Ю. и др.	К толкованию правила Гневьшева-Оля
20	17.45 - 18.00	Соколов Д.Д. и др.	Провал Гневьшева и крупномасштабное магнитное поле
18.00 - 18.30		Постерная сессия	

Доклады 1-ой постерной сессии секции «Теория и наблюдения Солнца»

- 1.1.1. Агапова Д.В. и др. Оценка влияния теплопроводности и теплового дисбаланса на точность определения параметров корональных структур
- 1.1.2. Яковлева С.В. и др. Статистика и характерные частоты годовых чисел вольфа, их производных и соответствующих знакопеременных полей
- 1.1.3. Лебедев Н.И. и др. Вероятные симпатические вспышки года максимума текущего 25 цикла солнечной активности
- 1.1.4. Абрамов-Максимов В.Е. и др. Симпатические явления на солнце по наблюдениям в радиодиапазоне
- 1.1.5. Якунина Г.В. Исследование спиральности магнитных полей в сверхактивных областях на Солнце
- 1.1.6. Старкова Л.И. Ваимосвязь компонент магнитного поля Солнца

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца»

Вторник, 11.02.2025 г., Конференц-зал

Председатель: <u>Завершинский Д.И.</u>			
Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада	
1	09.30 - 09.45	Жукова А.В. и др.	Системы классификации солнечных активных областей: сравнение и практическое применение
2	09.45 - 10.00	Алексеева Л.М.	Специфика перетяжечной пинчевой неустойчивости в условиях хромосферы Солнца
3	10.00 - 10.15	Куценко А.С.	Вариации продольного магнитного поля с высотой в активной области
4	10.15 - 10.30	Головка А.А.	Структура центров активности во вспышечно-продуктивных группах солнечных пятен
10.30 - 11.00		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Анфиногентов С.А.</u>			
5	11.00 - 11.15	Емельянов Н.А. др.	Альфвеновский импульс в неоднородной хромосферной магнитной трубке. Генерация супердрейсеровского электрического поля
6	11.15 - 11.30	Завершинский Д.И. и др.	Об использовании изотермической скорости звука и изотермической трубочной скорости для диагностики корональной плазмы
7	11.30 - 11.45	Рящиков Д.С. и др.	Использование аналитического решения линейного эволюционного уравнения для диагностики параметров корональной плазмы
8	11.45 - 12.00	Каракотов Р.Р. и др.	Анализ медленных магнитозвуковых колебаний в солнечной вспышке по микроволновым и ультрафиолетовым наблюдениям
9	12.00 - 12.15	Дертеев С.Б. и др.	Формирование волн сжатия в солнечной короне под действием неадиабатических эффектов
10	12.15 - 12.30	Овчинникова Н.Е. и др.	Применение методов факторного анализа в исследованиях тонкой структуры радиоизлучения короны Солнца
12.30 - 13.30		Пленарный час	
13.30 - 14.30		Обед	
Председатель: <u>Шарыкин И.Н.</u>			
11	14.30 - 14.45	Богод В.М. и др.	Структура короны по радионаблюдениям с высоким частотным разрешением
12	14.45 - 15.00	Феденёв В.В. и др.	Статистический анализ спектров гирорезонансного излучения солнечных активных областей по данным Сибирского радиогелиографа за 2023-2024 годы

13	15.00 - 15.15	Соловьев А.А. и др.	Бессиловые магнитные жгуты как вспышечные солнечные структуры
14	15.15 - 15.30	Смирнова В.В. и др..	Субтерагерцовое излучение солнечной вспышки SOL20220504T08:45 по данным многоволновых наблюдений и диагностика параметров корональной плазмы
15	15.30 - 15.45	Лысенко А.Л. и др.	Стереоскопические наблюдения залимбовых солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте KONUS-WIND в 1994-2024 гг.
16	15.45 - 16.00	Ахметьев П.М.	Combinatorial formula for the M-invariant of magnetic lines
16.00 - 16.30		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Лысенко А.Л.</u>			
17	16.30 - 16.45	Куприянова Е.Г. др.	Эффект бетатронного ускорения в симметрично осциллирующих плазменных неоднородностях
18	16.45 - 17.00	Шабалин А.Н. др.	Субминутные квазипериодические пульсации в жёстком рентгеновском излучении в солнечных вспышках: наблюдения и численное моделирование
19	17.00 - 17.15	Филатов Л.В. и др.	Ускорение и рассеяние нетепловых электронов при их согласованном взаимодействии с нестационарной турбулентностью вистлеров, генерируемой заданным внешним источником
20	17.15 - 17.30	Ахтемов З.С. и др.	Временные характеристики мягкого рентгеновского и Na -излучения вспышек разной мощности на фазе спада 24 цикла солнечной активности
21	17.30 - 17.45	Койнаш Г.В. и др.	Многоволновые наблюдения импульсной солнечной вспышки C2.8 класса в активной области NOAA 13256: продолжение исследований динамики источников и магнитной структуры
22	17.45 - 18.00	Шарыкин И.Н. и др.	Гелиосейсмический отклик солнечной вспышки C класса
18.00 - 18.30		Постерная сессия	

Доклады 2-ой постерной сессии секции «Теория и наблюдения Солнца»

- 1.2.1. Морозова Е.И. Динамика скорости меридиональных потоков и солнечная активность (21-24 солнечных циклы).
 1.2.2. Анфиногентов С.А., Шарыкин И.Н., Киселёв В.И., Зимовец И.В., Шабалин А.Н., Низамов Б.А., Моторина Г.Г. Многоволновый анализ сверхкороткого радиовсплеска перед солнечной вспышкой 23 января 2024
 1.2.3. Бакунина И.А., Мельников В.Ф., Шаин А.В., Кузнецов С.А., Абрамов-Максимов В.Е. Взаимное расположение магнитных жгутов и источников микроволнового излучения в эруптивных вспышках
 1.2.4. Горюнова В.Д., Анфиногентов С.А. Исследование микроволнового излучения солнечных активных областей в предвспышечном состоянии по данным Сибирского Радиогелиографа
 1.2.5. Yelagandula N. V. Estimation of the line of sight thickness of the coronal mass ejections using the time delay of the harmonics of the Type II solar bursts.
 1.2.6. Дмитриев В.А., Куприянова Е.Г. Методика детектирования квазипериодических бегущих быстрых волновых пакетов

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца»

Среда, 12.02. 2024 г., комната 202

		Председатель: <u>Зимовец И.В.</u>	
	Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада
1	09.30 - 09.45	Souvik Das, et al.	Helioseismic fluctuations in nonthermal solar plasmas
2	09.45 - 10.00	Рожкова Д. В. И др.	Результаты тестирования метода определения параметров плазмы по микроволновым спектрам солнечных вспышек с простой временной структурой
3	10.00 - 10.15	Нечаева А.Б. и др.	Связь незатухающих колебаний корональных солнечных петель во вспышечно-активных областях с мощными вспышками
4	10.15 - 10.30	Каракотов Р.Р. и др.	Анализ медленных магнитозвуковых колебаний в солнечной вспышке по микроволновым и ультрафиолетовым наблюдениям
	10.30 - 11.00	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Куприянова Е.Г.</u>			
5	11.00 - 11.15	Кашапова Л.К. и др.	Что мы можем увидеть в микроволновом диапазоне в начале импульсной фазы солнечных вспышек: нагрев или ускорение?
6	11.15 - 11.30	Зимовец И.В. и др.	Предвспышечные рентгеновские пульсации: некоторые новые результаты анализа наблюдений
7	11.30 - 11.45	Шамсутдинова Ю.Н. и др.	Использование сверточной нейронной сети для классификации наблюдений солнечных вспышек в микроволновом диапазоне
8	11.45 - 12.00	Кудрявцева А.В. и др.	Спектральные характеристики вспышки X1.1 23 марта 2024 года
9	12.00 - 12.15	Мотык И.Д. и др.	Анализ морфологии и возможности применения средних временных профилей излучения солнечных вспышек
10	12.15 - 12.30	Купряков Ю.А. и др.	Вспышка 2017-04-21: анализ излучения в линиях кальция и водорода, поиск свечения в линиях Mgi
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	13.30 - 14.30	Обед	
Председатель: <u>Кашапова Л.К.</u>			
11	14.30 - 14.45	Алтынцев А.Т., и др.	Процессы ускорения и переноса электронов в импульсной круговой ленточной вспышке
12	14.45 - 15.00	Малютин В. А. и др.	Модель вспышки 2017-04-21, построенная по излучению в линиях бальмеровской серии

13	15.00 - 15.15	Степанов А.В. и др.	Медленные и быстрые предвестники солнечных вспышек
14	15.15 - 15.30	Цап Ю.Т. и др.	О механизмах инжекции ускоренных протонов в солнечных вспышках
15	15.30 - 15.45	Чернов Г.М. и др.	Межпланетные всплески II типа
16	15.45 - 16.00	Моторина Г.Г.	Энергетический баланс в холодной солнечной вспышке 7 сентября 2017 года
	16.00 - 16.30	Перерыв на кофе	
		Председатель: Григорьева И.Ю.	
17	16.30 - 16.45	Киселёв В.И. и др.	Особенности вспышки и её нетипичного микроволнового излучения в солнечном событии 17 мая 2012 года, ответственного за GLE71
18	16.45 - 17.00	Садовский А.М. и др.	Масштабирование вспышек и корональных выбросов масс на Солнце для звезд главной последовательности
19	17.00 - 17.15	Глатов А.Г. и др.	Наблюдения Солнца на Горной Астрономической Станции ГАО РАН
20	17.15 - 17.30	Лобода И.П. и др.	Малоразмерные телескопы ВУФ диапазона для наблюдения Солнца
21	17.30 - 17.45	Тульников Е.Д. др.	Прогресс в калибровке научной аппаратуры "СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ"
22	17.45 — 18.00	Рева А.А. и др.	РЕФОС: рентгеновский спектрометр на борту наноспутника
	18.00 - 18.30	Постерная сессия	

Доклады 3-ей постерной сессии секции «Теория и наблюдения Солнца»

- 1.3.1. Лысенко А.Л., Дёмин А.Г., Ридная А.В., Уланов М.В. База данных солнечных вспышек в рентгеновском диапазоне, Зарегистрированных в эксперименте konus-wind в фоновом режиме
- 1.3.2. Низамов Б.А., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н. Рентгеновские наблюдения предвестников солнечной вспышки класса X2.8 14 декабря 2023 г.
- 1.3.3. Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А. Предвспышечные флуктуации радиоизлучения солнца по данным наблюдений сети радиотелескопов RSTN
- 1.3.4. Каламанов В.Г., Садовский А.М., Струминский А.Б. Моделирование скоростного поля коронального выброса массы с помощью метода трассерной визуализации.
- 1.3.5. Струминский А.Б., Ожередов В.А., Григорьева И.Ю., Садовский А.М. ускорение протонов во вспышках 28 октября 2003 г. (X17.2) и 8 декабря 2024 (X2.2)
- 1.3.6 Мерзляков В.Л. Параметры источника полоидального магнитного поля Солнца

ОПИСАНИЕ ДОСТОВЕРНЫХ ЦИКЛОВ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ И ОЦЕНКА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЦИКЛОВ

Шибаетов И.Г., Шибаетов А.И.

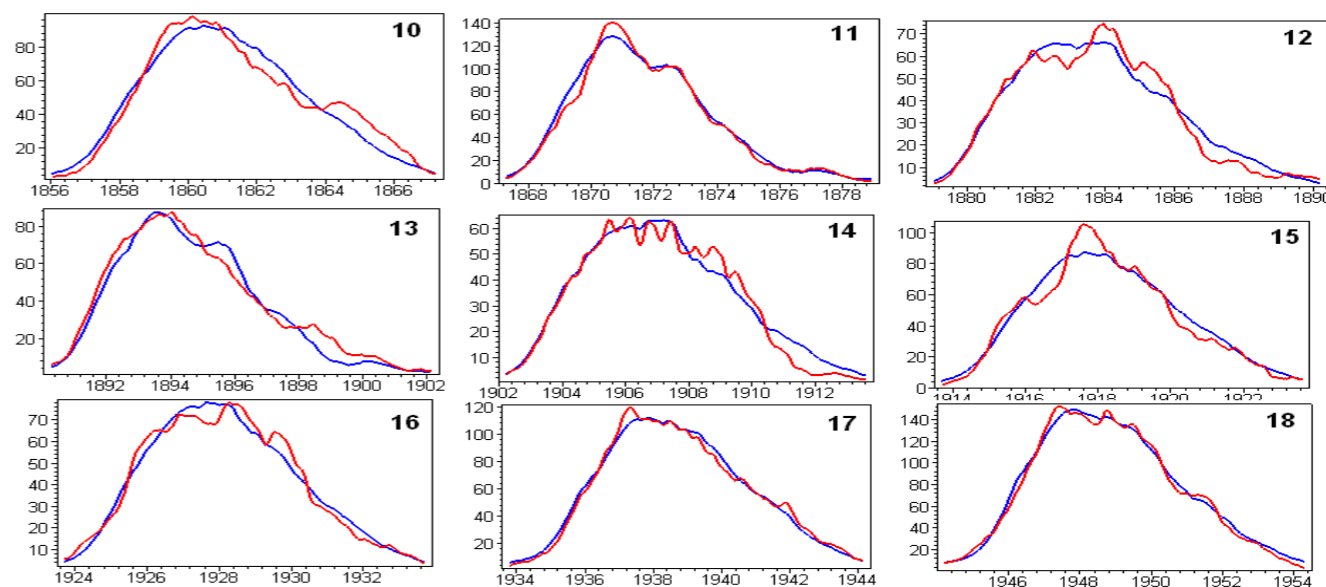
ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ishib@izmiran.ru

Метод главных компонент PCA (Principal Component Analysis) является полезным инструментом во многих областях науки, в том числе в сжатии данных и извлечении информации. Выражая объекты через признаки для дальнейшего анализа, часто получается описание высокой размерности. Исследовать объекты в многомерном пространстве сложно, но при наличии линейных связей между признаками удаётся найти подпространство значительно меньшей размерности при проецировании объектов в которое невязки между объектами и их проекциями будут небольшими. Приблизив объекты их проекциями, мы получаем их низкоразмерное представление. Метод главных компонент, опираясь на расположение данных в исходном многомерном пространстве, помогает найти это подпространство.

Если N - размерность пространства объектов, тогда, при наличии линейных связей между компонентами объектов, PCA находит новую систему координат размерностью K (K << N), в которой, почти без потери информации, объекты хорошо различаются.

В нашем случае, благодаря структуре циклов, достаточно несколько новых переменных чтобы описать цикл. Достоверные циклы 10 ÷ 23 ряда WSN выступают объектами, по которым выделяются главные компоненты, и PCA показал свою эффективность, так как всего первых двух главных компонент PC1 и PC2 (K=2) оказалось достаточно для хорошего приближения цикла i в виде: $W_i = W_{mean} + c_{1i} * PC1 + c_{2i} * PC2$ (учитывается > 90% дисперсии данных). Коэффициенты c_{1i}, c_{2i} ($10 \leq i \leq 23$) отражают индивидуальность циклов 10÷23, а PC1, PC2, W_{mean} – единые массивы формирующие эти циклы (примеры этого представления ниже).

Полученное представление даёт дополнительные возможности по прогнозированию и коррекции солнечных циклов. В работе проведена оценка характеристик восстановленных циклов при таком подходе.



ПОТОКИ МАГНИТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО СРЕДНЕГО ПОЛЯ

Пипин В.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, pip@iszf.irk.ru

В данной работе потоки магнитной спиральности биполярных активных областей исследованы на основе 3-х мерной модели динамо среднего поля, в которой появление активных областей на поверхности Солнца моделируется, как подъем наклонной или скрученной магнитной трубки, а источником формирования биполярных групп служит крупномасштабное тороидальное магнитное поле, генерируемое в солнечном динамо [1]. Наклон и скрученность магнитного поля биполярной группы моделируется при помощи турбулентной ЭДС вдоль тороидального магнитного поля (альфа эффект).

Численное моделирование показало, что поток магнитной спиральности, зависит от начальных и граничных условий, а также знака наклона/скрученности магнитного поля в биполярной области. Результаты показывают, что наиболее динамичные и амплитудные изменения потока магнитной спиральности связаны с наклоном/скрученностью магнитного поля. В данном случае абсолютная величина потока магнитной спиральности может достигать 10^{38} Мх²/с, что сопоставимо с эффектами дифференциального вращения и потоком спиральности вследствие диффузионного распада активной области. Однако этот источник потока магнитной спиральности ограничен временем появления биполярной области (3-4 дня в модели). Результаты модели показывают, что на длинных интервалах времени, сравнимых с периодом солнечного цикла, наибольший поток спиральности связан с эффектом дифференциального вращения, $\sim 10^{45}$ Мх²/day. Амплитуда турбулентной диффузии в модели составляет $\sim 10^{12}$ см²/с в верхней части конвективной зоны и $4 \cdot 10^{11}$ см²/с на поверхности области динамо (0.99R). Несмотря на относительно низкую турбулентную диффузию вблизи поверхности, диффузионный распад активных областей приводит к потоку $\sim 3 \cdot 10^{44}$ Мх²/day. Это больше чем на порядок превышает оценки этого вклада по моделям переноса потока [2] и показывает значимость радиальной структуры магнитных полей под поверхностью Солнца для потока спиральности.

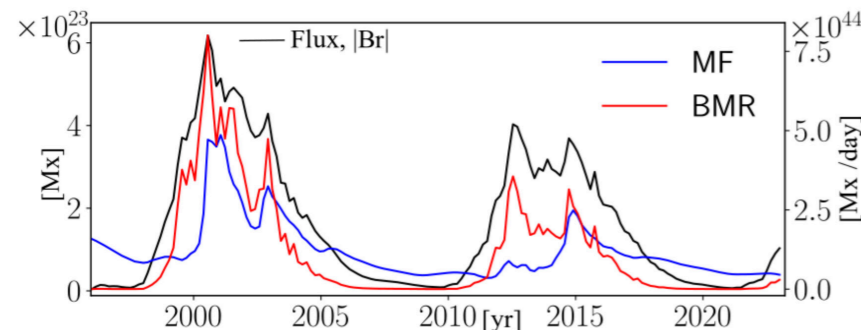


Рисунок показывает оценки амплитуды вариаций потока спиральности среднего магнитного поля Солнца (MF) и потока спиральности биполярных активных областей (BMR), а также амплитуду потока радиального магнитного поля (|Br|) в циклах 23 и 24. Поток спиральности за счет появления биполярных групп максимален во время пятенной активности, а поток спиральности среднего поля связанный с дифференциальным вращением преобладает на фазе спада и минимума активности пятен.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (проект №0278-2021-0008)

1. Pipin, V. V., Kosovichev, A. G., Tomin, V. E. // 2023, ApJ, **949**, 7.
2. Hawkes, G., Yeates, A. // 2019, A&A, **631**, A.138.

ДОМИНИРУЮЩИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ В ГОДОВЫХ ЧИСЛАХ ВОЛЬФА И В СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ РЯДАХ

С.В. Старченко, С.В. Яковлева

(ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия), sstarchenko@mail.ru

Уже более семидесяти лет [1] изучается ряд среднегодовых чисел Вольфа (W) и знакопеременный ряд (SQRT), являющийся (здесь по нашим энергетическим соображениям [2]) рядом квадратных корней из чисел Вольфа. В предлагаемой работе к ежегодным числам Вольфа за последние 256 лет (весь свободно доступный временной ряд), 128 лет и 64 года было применено быстрое преобразование Фурье (БПФ). Результат выявил явное доминирование гармонических спектральных мод с периодами от десяти до двенадцати лет. Следующей по значимости является мода с периодом 85 лет. Смотрите верхнюю часть Рисунка.

Предложенная гипотеза о том, что величина чисел Вольфа приблизительно пропорциональна энергии или, формально, квадрату переменного магнитного поля. Соответствующие переменные магнитные поля были получены и исследованы с помощью БПФ по той же схеме, что и числа Вольфа. Было получено еще более сильное доминирование гармонических спектральных мод с периодами около 21-го (плюс-минус несколько лет) года. В то же время спектральные моды со значительно более длинными и с более короткими периодами практически незначительны, смотрите нижнюю часть Рисунка.

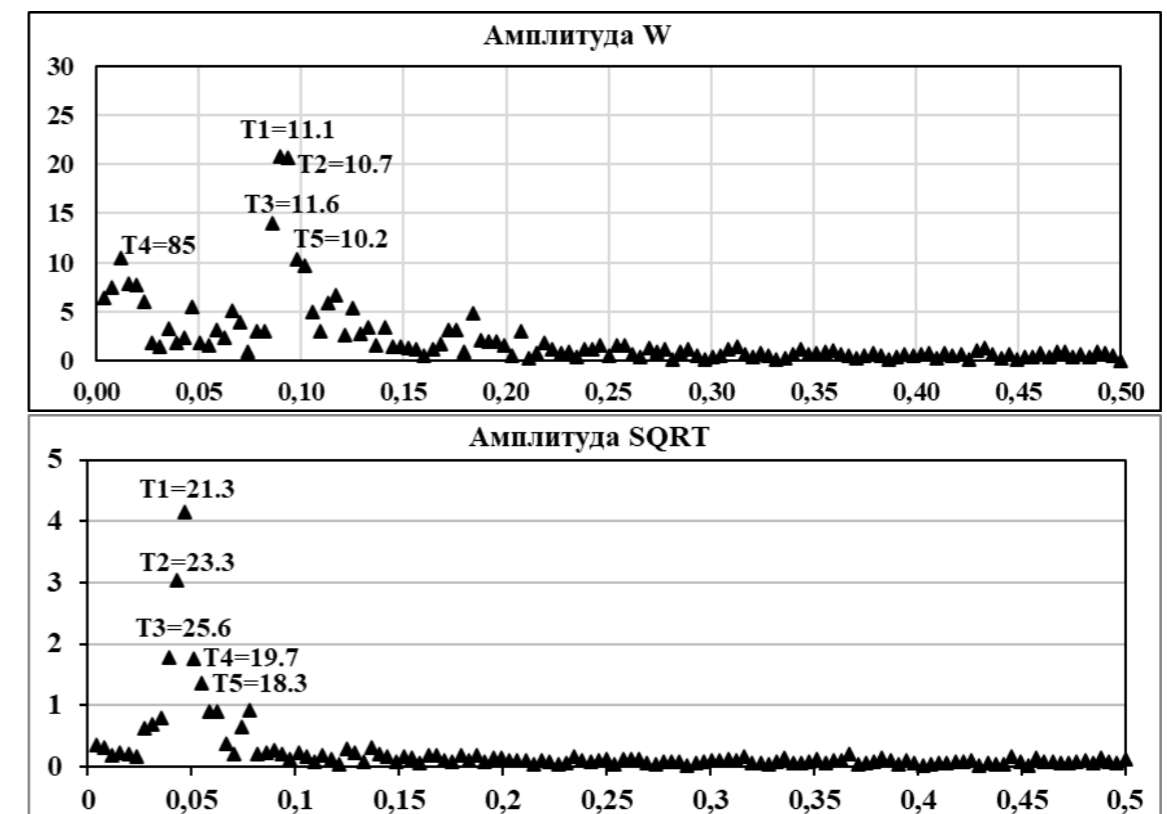


Рисунок. Графики зависимости амплитуды от частоты с нанесенными значениями периодов 5-ти наиболее значимых гармоник за 256 лет.

Литература

1. Bracewell R.N. The sunspot number series // Nature V.174 P. 649-650. 1953.
2. Старченко С.В., Яковлева С.В. Корреляция временных рядов чисел Вольфа и их производных // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 62. № 6. С. 693-701. 2022.

МОЖНО ЛИ РЕШИТЬ ПРОБЛЕМУ ТУСКЛОГО МОЛОДОГО СОЛНЦА ЗА СЧЁТ МЕХАНИЗМА КРИЗЕКА–СОМЕРА?

Савиных Е.С., Думин Ю.В.

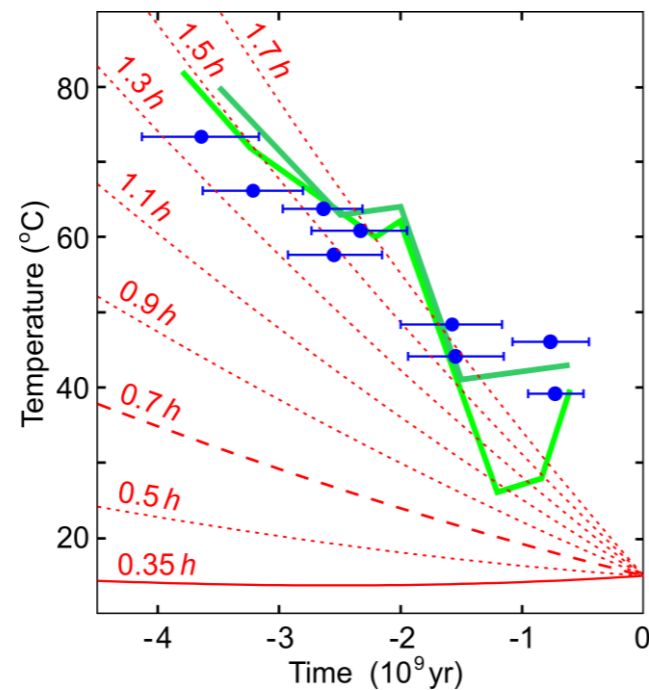
ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, z-0000001@hotmail.com

ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Одной из ключевых проблем при анализе условий возникновения жизни на Земле является существенно пониженная (примерно на 25-30%) светимость Солнца в то время, когда формировалась Земля. В результате этого в период от 2 млрд. лет назад и ранее вся вода должна была бы находиться в замороженном состоянии, что делает невозможным появление жизни и её последующую эволюцию [1,2]. Наиболее часто обсуждаемым путём решения этой проблемы является парниковый эффект [3], однако его влияние трудно оценить количественно из-за слишком скудной информации о параметрах ранней атмосферы Земли.

Принципиально новый подход к решению вышеупомянутой проблемы был предложен в недавних работах М. Кризека и Л. Сомера [4,5], которые предположили, что уменьшение светимости Солнца в прошлом могло бы быть скомпенсировано меньшим радиусом земной орбиты из-за локального эффекта Хаббла. В частности, ими было найдено, что при $H_0^{(loc)} \approx 0,35 h$ возникает так называемая “экосфера” – расширяющаяся сферическая оболочка вокруг Солнца, в которой плотность потока солнечного излучения остаётся стабильной с точностью порядка 1% в течение нескольких миллиардов лет. К сожалению, требуемое для этого значение локального параметра Хаббла $H_0^{(loc)}$ оказывается существенно меньше его стандартного межгалактического значения $H_0 \approx 0,7 h$ (где $h \equiv 100 \text{ км/с/Мпс} \approx 3,2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$).

С другой стороны, как вытекает из недавних результатов палеохимии (зелёные кривые на рисунке) и палеобиологии (синие кружочки с интервалами ошибок) [6], температура на ранней Земле вовсе не была постоянной, а могла достигать до 70-80°C, вместо современных 15°C. Этот факт приводит к необходимости уточнения механизма Кризека–Сомера, что и является предметом настоящего исследования. Как вытекает из нашего анализа, для обеспечения плотности солнечного потока, приводящей к вышеупомянутым значениям температуры, необходимо, чтобы $H_0^{(loc)}$ было примерно в два раза больше H_0 . Иными словами, возникает “перекосяк” уже в другую сторону по отношению к межгалактическим данным. В целом, можно констатировать, что Проблема тусклого молодого Солнца пока ещё далека от своего разрешения и, по-видимому, включает в себя комбинацию нескольких физических процессов различной природы.



К ВОПРОСУ О ГЕНЕЗИСЕ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА СОЛНЦА И ПЛАНЕТ

Фридрихсон А.И., Касаточкина М.А., Никифорова Е.С., Гололобов С.Ю., Гололобов Ю.Г., Васильева Л.С., Голубчиков Ю.Н. МГРИ, МГУ г. Москва, МАУ г. Мурманск, Россия, alkolukshev@mail.ru

Астрофизические объекты (АО) гравитационного генезиса - по Закону сохранения энергии и принципу наименьшего действия [1] трансформируют удельную энергию разности гравитационных потенциалов [2] поверхности исходного и сформированного АО в термо-барический, «плотностной» и гравитационный потенциалы; сумма этих потенциалов даёт максимальный гравитационный потенциал: $\frac{Y M_R}{R_0}$, где $R_0(M, \rho) < R$. Внутреннее ядро Земли, окруженное расплавом Внешнего ядра и из всего сейсмоспектра доступное лишь высокоамплитудным продольным волнам требует комплексирования с гравиметрией. Предлагаемая модель основана на принципах классической Теории поля и концепции Канта-Лапласа. При сжатии малоплотного газопылевого облака, максимум плотности возникает в периферии; максимум температуры - в центральной части, из-за концентрации теплоток. Рост теплового поля вызывает торможение и мощный инерционный сброс высокоплотной периферии в срединную часть АО с ударным ростом температуры в центральной области, формируя там высокотермическое Внутреннее ядро. Анализ по базовым принципам Теории поля [3] функции внутреннего гравитационного поля [4] Земли - приводит к выводу: после смены знака в максимуме (близ границы Астеносферы и Мантии) во Внешнем ядре гравитационное поле устремляется к минимуму и во Внутреннем ядре приближается к нулю с минимумом своей полной производной:

$$g_r = \frac{Y M_r}{r^2} \Rightarrow \frac{dg}{dr} = Y \left[\frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial M_r}{\partial r} \right) + M_r \frac{\partial (r^{-2})}{\partial r} \right] = 4\pi Y \frac{\partial M_r}{S_r \partial r} - \frac{8}{3} \pi Y \frac{M_r}{V_r} = 4\pi Y \left(\rho_s - \frac{2}{3} \rho_v \right)$$

В работе [5], было посчитано значение максимального абсолютного гравитационного потенциала Земли, учитывая данные по плотности, давлению и температуре внутри геоида. Решение прямой геофизической задачи дало максимальный гравитационный потенциал Земли: $\varphi_\infty = \frac{Y M_R}{R_0} = 1,1165 \cdot 10^8 \text{ Дж/кг}$; Решение обратной задачи - определения области плотностного максимума Земли R_0 — дало 3571 км от центра планеты и корреляцию с выявленным Сейсмозондированием - геослоем на границе Внешнего ядра и Мантии - D''. **Выводы:** Максимально плотной областью Земли является геослой D''. Внутреннее ядро Земли (ВЯЗ) - возможно, область плазмы с термогравитационным механизмом пульсации. Модель объясняет: Эффект сейсмодени ВЯЗ на угловой дистанции 125-147 градусов от источника (опыт открывшей Внутреннее ядро Инге Леманн); Меньшее время отраженной от ВЯЗ сейсмволны в Северном и Восточном полушарии относительно Южного и Западного (по данным китайских коллег) из-за смещения малоплотного ВЯЗ к более массивным полушариям, что определяет плавность вращения Земли; Не соосное, знакопеременное (вследствие электронно заряженных теплоток при расширении ВЯЗ и протонно-заряженных при его сжатии) магнитное поле. Объяснение этих феноменов позволяет применять модель к другим АО по критерию Внутреннего ядра: в зависимости от массы и плотности АО - это либо область высокотемпературного газа (Марс, Европа); либо область дотермоядерной плазмы (Земля, планеты-гиганты) - с глобальным магнитным полем и долгопериодными циклами термо-гравитационной пульсации Внутреннего ядра/

1. Feulner G. // Rev. Geophys. 2012. V. 50. P. RG2006.
2. Khranova E.G. // Solar Syst. Res. 2024. V. 58. P. S75.
3. Sagan C, Mullen G. // Science 1972. V. 177. P. 52.
4. Křížek M. // New Astron. 2012. V. 17. P. 1.
5. Křížek M., Somer L. // Grav. & Cosmol. 2015. V. 21. P. 59.
6. Gaucher E.A., Govindarajan S., Ganesh O.K. // Nature 2008. V. 451. P. 704.

- 1 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. // Теория поля, Принцип наименьшего действия 1973.
- 2 Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. // Теория полей, применяемых в разведочной геофизике, МГРИ-РГГРУ 2014.
- 3 Каринский А.Д. // Теория поля, МГРИ-РГГРУ 2018.
- 4 Огородова Л.В., Юзофевич А.П. // Гравиметрия 1980.
- 5 Fridrikhson A.I., Kasatochkina M.A. // The Earth's gravitation potential arXiv-Org 2009

Текущий 25 солнечный цикл в год максимума: солнечные активные явления и прогноз их развития на ветви спада.

В.Н. Ишков

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ishkov@izmiran.ru

В 2024 г. солнечная активность (СА) текущего 25 цикла второго солнечного цикла (СЦ) наступившей эпохи пониженной СА значительно увеличилась во все проявлениях солнечных активных явлений, в том числе и появляющихся активных областей, особенно вспышечно-активных, вызвав резкий рост количества и мощности значимых вспышечных событий, которые в свою очередь усилили воздействие на околоземное космическое пространство, что привело к осуществлению больших и увеличили количество средних по интенсивности возмущений космической погоды. СЦ25 уже занял своё место в семействе циклов средней величины, ещё раз подтвердив, что на статистике достоверных (10–24) СЦ внутри эпох СА, наблюдательные правила и закономерности развития отдельных СЦ неуклонно выполняются. Точку максимума текущий СЦ с большой вероятностью, прошёл в июне 2024 г., с одной вершиной, как и все известные достоверные СЦ средней величины, кроме переходного между эпохами СЦ23. Переполусовка началась с северного полушария и прошла довольно быстро – с июля 2023 г. по июль 2024 г., СЦ25 развивается согласно сценарию солнечной цикличности, который вытекает из достоверных СЦ. В 2024 г. по количеству значимых (рентгеновского класса $M \geq 1$) солнечных вспышек текущий СЦ 25 стал выше предыдущего низкого СЦ24 и переходного между эпохами СЦ23 (соответственно 179, 73, 145), но значительно ниже, чем SC21–22 эпохи повышенной СА (соответственно 222 и 383). В 2024 г. осуществились самые мощные по интенсивности рентгеновские вспышки ветви роста текущего цикла: X9 – 3.10, X8.79 – 14.05, X7.1 – 1.10, X6.37 – 22.02, X5.89 – 11.05. По количеству солнечных протонных событий (СПС) с потоками частиц >10 ч/см²·с стер ($E \geq 10$ МэВ) за одинаковый промежуток времени развития текущий СЦ заметно опережает СЦ24 (40) и СЦ23 (24). На ветви роста СЦ25 произвел 3 были класса S3 и 16 – S2, 14 из которых осуществились в в 2024 г. Самое интенсивное (1812 ч/см²·с стер) 9–10.10.2024 г. было связано событием со вспышкой X1.4 в AR13842 и с приходом к Земле межпланетного коронального выброса вещества от этой вспышки. Всего лишь 2 GLE наблюдалось в текущем СЦ. Первое (#73) было связано со вспышкой X1.0 28 октября 2021 г., связанное с ним СПС лишь класса S1 (29 ч/см²·с стер), но сопровождалось увеличением потока более энергичных протонов, как и 2-е GLE (#74) 11.05.2024 г. от вспышки X5.8 в AR13664 класса S1 (116 ч/см²·с стер). В геомагнитном поле зарегистрировано более 60 магнитных бурь (МБ): 1 экстремальная, 2 очень больших, 10 больших и 16 умеренных. Экстремальная МБ 10–11.05 2024 г. (G5, Ams=211 нТл, длит=48 ч по данным центра в Потсдаме) привела к тому, что среднемесячное значение Ap в мае 2024 г. достигло 23,56 нТл, самого высокого значения после января 2005 г. (23,74 нТл) и была 1-ым событием такого класса после МБ 29–30.10 2003 г., а полярные сияния наблюдались на низких широтах ($\pm 25^\circ$), Dst-индекс достиг –412 нТл, что вывело ее на 7 место с момента начала измерений в 1957 году, и на 2-ое место после 20.11.2003 г. (–422 нТл). Рекордсменом МБ по Dst-индексу является знаменитая экстремальная МБ 13–14.03.1989 г. (–589 нТл). Точку минимума текущего цикла следует ожидать в первой половине 2031. За развитием текущего СЦ можно следить на странице <http://www.izmiran.ru/saf>, где каждый первый понедельник месяца публикуются основные индексы солнечной и геомагнитной активности и все изменения в пятнообразовательной и вспышечной деятельности Солнца.

ВАРИАЦИИ МАСШТАБОВ КОНВЕКЦИИ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ ПОДФОТОСФЕРНОЙ ЗОНЫ СОЛНЦА В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ АКТИВНОСТИ

Гетлинг А. В.¹, Косовичев А.Г.²

¹НИИЯФ МГУ, Москва, Россия, A.Getling@mail.ru

²Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США., alexander.g.kosovichev@njit.edu

Характерные размеры супергранул и гигантских конвективных ячеек определяются по пространственным спектрам мощности дивергенции горизонтальной компоненты конвективного поля скоростей на различных глубинах в подповерхностном слое солнечной конвективной зоны толщиной около 20 Мм. Эти скорости определены методами локальной гелиосейсмологии, основанными на измерении времен пробега акустических волн (в англоязычной литературе time–distance helioseismology), по данным доплеровских измерений с помощью инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) орбитальной Обсерватории солнечной динамики (SDO). Спектры мощности получаются разложением поля дивергенции по сферическим гармоникам, и характерная длина волны находится по средневзвешенной степени гармоники. Эта длина волны обнаруживает положительную корреляцию с числом солнечных пятен, причем коэффициент корреляции максимален на глубинах 4–6 и 11–15 Мм под поверхностью фотосферы, достигая значений около 0.8. Обсуждается возможная связь этих измерений с особенностями стратификации конвективной зоны и с вариациями сейсмического радиуса Солнца.

ПРОЯВЛЕНИЕ ВОЛН РОССБИ В СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Биленко И.А.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, bilenko@sai.msu.ru

Представлены результаты исследования циклических вариаций глобального (ГМП) и локальных магнитных полей Солнца. Наблюдаемая структура магнитных полей сопоставлена с осцилляциями глобального и локальных магнитных полей определенных периодов. Показано, что колебания с периодами 81.83-163.65 дней связаны со структурами ГМП с временем жизни 10-20 Кэррингтоновских оборотов (КО). Они проявляются в виде отдельных импульсов роста интенсивности этих колебаний в максимумах солнечной активности. Колебания с периодами в диапазоне 163.652-463.680 дней связаны со структурами ГМП с временем жизни порядка 20-50 КО. Они соответствуют двум пикам в циклах активности. Колебания в диапазоне 1.270-5.231гг. формируются в период доминирования секторной структуры ГМП. Колебания в диапазоне 5.231-13.451 гг. являются наиболее интенсивными и их интенсивность снижается от 21 к 24 циклу, а сам диапазон волн сужается и смещается к более длинным периодам, вызывая соответствующие изменения колебаний в диапазоне 81.83 дня - 5.231 лет и соответствующих структурах ГМП. Они хорошо коррелируют с динамикой зональной структуры ГМП. Снижение магнитного поля к 24 циклу может быть вызвано уменьшением интенсивности этих колебаний.

Рассмотрены спектры колебаний в аналогичных диапазонах локальных магнитных полей. Результаты свидетельствуют, что общий ход циклических изменений локальных полей и соответствующих им спектров колебаний отличается от аналогичных в ГМП. Корреляционные зависимости между локальными и ГМП изменяются как в каждом цикле, так и от цикла к циклу. Корреляции минимальны вблизи фаз максимума и минимума активности в каждом цикле. Ряд колебаний в глобальном и локальных магнитных полях находятся в хорошем соответствии с периодами быстрых магнитных волн Россби. Циклические вариации глобального и локальных магнитных полей, а также реорганизации структур ГМП, могут быть результатом изменения режимов генерации волн Россби в зоне тахоклина.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ФИЗИКЕ СОЛНЦА: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ

Илларионов Е.А.

МГУ, г. Москва, Россия, egor.illarionov@math.msu.ru

Современные методы машинного обучения объединяют в себе комплекс задач, в которые входит создание специализированных баз данных, адаптация общих архитектур и моделей машинного обучения под особенности предметной области, разработка комплекса программ для эффективной реализации процедур обучения и тестирования моделей. Зачастую результат решения каждой из этих задач имеет самостоятельную ценность и затем переиспользуется в ряде других приложений, в том числе и не связанных с машинным обучением. За последние несколько лет вышел ряд обзоров, обобщающих накопленный опыт и демонстрирующих спектр возможностей, которые открывает машинное обучение в физике Солнца. Однако общий прогресс в машинном обучении идет настолько быстро, что такие обзоры имеет смысл актуализировать и обновлять ежегодно. В докладе будет рассказано о самых последних результатах и направлениях, которые развиваются машинном обучении в приложении к различным вопросам физики Солнца.

СРАВНЕНИЕ ОДНОШАГОВОГО И МНОГОШАГОВОГО ПОДХОДА К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ИНДЕКСА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Киселюс В., Илларионов Е.А., Степанов Р.А., Кузанын К.М.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, waclove@yandex.ru

В работе исследуются различные подходы к прогнозированию временных рядов на примере задачи прогноза ежемесячных значений индекса солнечной активности — числа солнечных пятен (Solar Sunspot Numbers). Рассматриваются три стратегии прогнозирования: итерации одношаговой модели, независимый одношаговый прогноз для каждого последующего месяца и единый многошаговый прогноз на весь горизонт. Для реализации прогнозов используются модели машинного обучения на основе нейронной сети, дополненные вспомогательным теоретическим рядом, построенным с применением физической модели солнечного динамо.

Полученные результаты показывают, что выбор подхода существенно влияет на поведение ошибки прогноза: многошаговый подход обеспечивает меньшую скорость роста ошибки по сравнению с итеративным методом, что делает выбор стратегии важным фактором для повышения точности долгосрочного прогноза.

Дальнейшие исследования, направленные на уточнение параметров физической модели динамо и оценку способности моделей машинного обучения компенсировать ошибки теоретического ряда, представляют собой ключевые шаги для построения более точных методик долгосрочного прогнозирования солнечной активности.

ЧЕМ ПОЛЕЗНА ЛАБОРАТОРНАЯ КОНВЕКЦИЯ ДЛЯ ПОНИМАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ?

Клиорин Н.^{1,2,3}, Степанов Р.А.², Кузанын К.М.^{1,2}, Васильев А.В.², Сухановский А.П.², Рогачевский И.³

¹ИЗМИРАН, Москва, Россия, kuzanyan@gmail.com

²ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия, rodion@icmm.ru

³Университет Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль, nat@bgu.ac.il

Проведена серия модельных экспериментов по изучению свойств турбулентной конвекции в прямоугольной ячейке при числах Рэлея порядка $10^8 - 10^9$ в воде с равномерно нагретой нижней твердой границей и открытой верхней поверхностью с квазистационарным тепловым потоком. Лабораторные измерения с использованием метода PIV (и стерео-PIV) позволяют исследовать длинные временные ряды для накопления статистических данных. Кроме того, численное моделирование дает трехмерные векторные поля скорости и температуры с высоким разрешением. Мы сравнили экспериментальные и численные результаты в перекрывающемся диапазоне параметров: лабораторные эксперименты с воздухом (Беер-Шева), водой (Пермь), численные эксперименты DNS и расчеты в рамках теории среднего поля. Продемонстрирована возможность формирования крупномасштабных долгоживущих конвективных ячеек при исчезающе малом турбулентном числе Рэлея, построенном на турбулентной теплопроводности и вязкости. При этом отношение горизонтального и вертикального масштабов в конвективной ячейке близко к 2. При увеличении горизонтального размера исследуемой области вдвое возникают две ячейки с тем же отношением масштабов, близким к 2. В значительной части вычислительного домена была обнаружена область устойчивой стратификации (положительный градиент температуры) за исключением приповерхностного и придонного слоев, что согласуется с расчетами в рамках теории среднего поля и лабораторными экспериментами с воздухом в Беер-Шеве.

Обнаружено, что в случае относительно малых чисел Рейнольдса почти всегда существуют медленные по сравнению с турбулентностью колебания, по-видимому связанные с устойчивой стратификацией в части исследуемой области. Этот эффект известен для атмосферной конвекции, но для астрофизических приложений он недостаточно исследован, поскольку теория длины пути перемешивания в принципе не может дать подобного градиента температуры из-за отсутствия в ней структур, отделенных от турбулентности.

Наши результаты имеют два важных следствия для физики Солнца. Одно касается обоснования метода построения крупномасштабной картины солнечной активности, связанной с солнечным циклом, из отдельных записей солнечных пятен и магнитограмм активных областей. Примером этого является известная диаграмма бабочек Маундера для солнечных пятен, формирующей крупномасштабную картину с типичным временем порядка периода солнечного цикла ~ 11 лет и типичным пространственным масштабом солнечного полушария ~ 100 Мм. В то же время пространственная протяженность отдельных солнечных пятен составляет порядка $\sim 3-10$ Мм, а типичное время 2-20 дней. Перед использованием данных для построения диаграмм бабочек используются средние значения (скользящее среднее по солнечной широте и времени) в масштабах солнечных пятен или групп солнечных пятен. Затем данные сглаживаются по масштабу одного крыла бабочки.

Другое следствие - возможное сосуществование внутренних гравитационных волн с фоновой турбулентностью (грануляцией) в зоне солнечной конвекции с периодом, превышающим характерное время основной грануляции под поверхностью Солнца. Его проявление - это 3-5 минутные колебания на Солнце в области с субадиабатическим градиентом температуры по крайней мере в части солнечной конвективной зоны. (Грант РФФ 21-72-20067, 2021-2024)

ПОИСК ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ЭФФЕКТОВ В ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАНЕТ НА СОЛНЕЧНУЮ АКТИВНОСТЬ

Кацова М.М., Обридко В.Н., Соколов Д.Д., Емельянов Н.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, mkatsova@mail.ru

Солнечная активность представляет собой процесс, обусловленный множеством независимых, но взаимосвязанных явлений. Если 11-летний цикл отражает работу механизма динамо, то причина более длительных, вековых вариаций не ясна. В поисках такой причины имело смысл проверить подход, учитывающий влияние планетной системы. Рассматривается действие всех планет солнечной системы, сведенное к воздействию единого барицентра. Приливная сила разлагается на радиальную и меридиональную составляющие. Радиальная приливная сила составляет слишком малую долю по сравнению с мощным радиальным притяжением Солнца. Меридиональная сила не компенсируется притяжением Солнца и зависит от широты. Поскольку широта барицентра меняется довольно медленно, знак этой составляющей меняется довольно медленно с характерным временем порядка 5 лет, в течение всего этого времени на поверхности Солнца существует постоянно действующее меридиональное ускорение. Это ускорение может привести в итоге к скоростям порядка нескольких метров в секунду, что в принципе может сильно изменить скорости меридиональных течений, участвующих в генерации магнитного поля. Однако, оказалось, что найденная вариация вычисленной скорости не согласуется с наблюдаемой цикличностью солнечной активности. Ранее была выполнен анализ соответствия периодов активности на звездах солнечного типа с периодами обращения экзопланет. Оказалось, что и в этом случае синхронизация не наблюдается. Таким образом, планетная причина долгосрочной модуляции солнечной активности не подтверждается.

РАДИАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Садыков А.М., Красоткин С.А.

НИИЯФ, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, sadykov.am19@physics.msu.ru

На сегодняшний день одной из самых популярных теорий, пытающихся объяснить процессы образования активных областей (АО), является гипотеза Паркера о всплытии магнитных трубок [1]. Несмотря на наличие некоторых недостатков, данная теория активно применяется в научных исследованиях для объяснения эволюции активных областей [2]. Это подчеркивает важность проверки обоснованности данной гипотезы на основе прямых магнитометрических и доплеровских измерений.

Цель нашего исследования заключается в проверке гипотезы всплывания магнитной трубки путем сравнения потоков радиальных скоростей подъема и опускания на начальных стадиях развития АО на солнечной фотосфере. Использовались данные глобальной сети телескопов GONG (Global Oscillations Network Group). В исследование включены 24 активные области за период с 2011 по 2022 год, соответствующие установленным критериям отбора. Данные рассматривались с временным интервалом в 4 часа на протяжении шести суток, вплоть до момента приближения пятен к западному краю солнечного диска.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии статистически значимой корреляции между магнитным полем и отрицательными скоростями движения вещества. Однако корреляция с положительными скоростями выражена слабее. Эти выводы опровергают существование всплывающих магнитных потоков, предполагаемых гипотезой. Кроме того, они указывают на то, что в формирующихся активных областях увеличение магнитного потока сопровождается усилением потока с отрицательной скоростью, причём эта связь носит почти линейный характер.

1. E.N. Parker // *Astrophys. J.* 1955. V. **121**. P. 491.
2. В.Н. Ишков // *Изв. РАН, серия физ.* 1998. Т. **62**. №9. С. 1835-1839.

ВАРИАЦИИ НЕКОТОРЫХ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР 25 ЦИКЛА

Андреева О.А.¹, Илларионов Е.А.²

КрАО РАН, Научный, Крым, Россия, olga@craocrimea.ru
МГУ, Москва, Россия, egor.mypost@gmail.com

11-летний цикл активности является доминирующей характеристикой Солнца. Солнце и солнечная активность (СА) – это комплекс сложнейших и взаимосвязанных явлений, инициируемых магнитным полем Солнца. Различная активность Солнца на протяжении цикла формируется взаимодействием магнитных полей разных характерных масштабов. Индексы СА – числовые величины, описывающие ее состояние в конкретный момент времени. В настоящее время существует целый ряд индексов, отражающих меру СА в разных ее проявлениях. Некоторые из них, наиболее известные это относительное число солнечных пятен, или число Вольфа, площади солнечных пятен, протуберанцев, флоккулов и корональных дыр (КД) и др. Этот индекс в какой-то мере отражает величину магнитного потока через поверхность Солнца, сосредоточенного в вышеуказанных образованиях. Применяется и много других различных индексов. Все они дают представление о том, как солнечное излучение влияет на магнитосферу Земли.

В данной работе рассмотрены вариации таких индексов СА как числа и площади солнечных пятен, а также площади и магнитные потоки КД в период с января 2020 по декабрь 2024 года (первые пять лет 25-го цикла). Данные для анализа индексов СА взяты с сайта <https://observethesun.com>. Магнитные потоки КД рассчитаны по синоптическим картам магнитных полей полученных инструментами HMI/SDO и STOP КГАС ГАО.

Анализ месячных значений чисел Вольфа и площадей солнечных пятен в полусферах выявил ярко выраженную асимметрию пятнообразования в указанный период в пользу Южного полушария. В работе показано, что в исследуемый период также наблюдалась выраженная асимметрия как по времени появления полярных и низкоширотных КД, так и по их амплитуде. На начальном этапе, в период с января 2020 года по апрель 2022, *основной* вклад в суммарную площадь вносили *полярные* КД. Затем, до конца рассматриваемого периода – *низкоширотные*, хотя в определенные моменты вклад обоих типов КД был значим. Так, например, увеличение площади *низкоширотных* КД в марте и июне 2021 года отразилось на суммарной площади КД начального этапа. А начиная с августа 2024 года рост *полярных* КД также способствовал увеличению суммарной площади КД на ветви роста СА.

Ввиду отсутствия возможности получения новых данных наблюдений HMI/SDO в настоящий период, в работе проанализирована альтернатива получения магнитных потоков КД используя *отечественные* источники. Выполнен сравнительный анализ магнитных потоков КД полученных по синоптическим картам магнитных полей инструментов HMI/SDO и STOP Кисловодской ГАС ГАО в период с 2014 по 2024 год. Динамика магнитных потоков КД показала достаточно хорошее согласие, что является существенным аргументом в пользу *регулярного* использования отечественных инструментов, в частности телескопа STOP.

ЭФФЕКТ ГНЕВЫШЕВА В ВАРИАЦИЯХ ПЛОЩАДИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН: РОЛЬ КРУПНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Костюченко И.Г., Вернова Е.С.

НИФХИ им.Л.Я.Карпова, г. Москва, Россия, irkost46@gmail.com

Временное ослабление активности в фазе максимума 11-летнего солнечного цикла (провал Гневьшева) и, как следствие, двухпиковая структура максимума наиболее выражено проявляется в корональных индексах солнечной активности, в энергии крупномасштабного магнитного поля Солнца на поверхности источника, в параметрах межпланетной плазмы, интенсивности галактических космических лучей. Это даёт основание полагать, что эффект Гневьшева создаётся вариациями крупномасштабного магнитного поля Солнца и, возможно, связан с процессом его переполюсовки.

В данной работе анализируются вариации суммарной по солнечному диску площади солнечных пятен как показатель эволюции мелкомасштабных сильных магнитных полей Солнца, наблюдаемых на поверхности фотосферы, в фазе максимума циклов 12-24. Использовались данные обсерватории Гринвич, а после 1976 года Кисловодской Горной Станции. Отдельно анализируется вклад в эти вариации двух категорий крупных групп пятен, а именно, тех, которые за время их наблюдения достигали площади 500 мдп и 1000 мдп. Поскольку одной из возможных причин появления двух-пиковой структуры максимума активности цикла предполагается различие во времени достижения максимума в разных широтных полушариях, вариации площади солнечных пятен анализировались также отдельно в каждом из широтных полушарий.

Мы обнаружили, что эффект Гневьшева наблюдается в индексе площади солнечных пятен в большинстве циклов 12-24. В каждом из широтных полушарий в большинстве циклов также наблюдается двух-пиковая структура максимума, но эти вариации не синхронны. Наиболее заметно эффект Гневьшева проявляется в эволюции площади групп пятен с площадью больше 500-1000 мдп. Именно эти группы дают основной вклад в эффект Гневьшева в суммарной площади пятен. Это соответствует сделанными ранее рядом авторов выводами, что обсуждаемая вариация более выражена в мощных проявлениях солнечной активности. Анализируются соответствующие вариации количества и средней площади больших активных областей. В эволюции площади более мелких групп, с площадью меньше 500 мдп, эффект Гневьшева не наблюдается или проявляется слабо.

Полученные результаты позволяют предположить, что временное уменьшение суммарной площади крупных активных областей в максимуме циклов может быть вызвано нарушением эффективности механизма, ответственного за формирование локальных сильных магнитных полей пятен, связанным с временным уменьшением энергии крупномасштабного магнитного поля Солнца и нестабильностью его конфигурации.

ДИСБАЛАНС ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СЕВЕРНОМ И ЮЖНОМ ПОЛУШАРИЯХ СОЛНЦА

Вернова Е.С., Тясто М.И., Баранов Д.Г.

ИЗМИРАН, СПб филиал, г. Санкт-Петербург, Россия, elenavernova96@gmail.com

Распределение магнитных полей разной полярности по поверхности Солнца подчиняется определенным временным и пространственным закономерностям, которые проявляются, например, в преобладании поля одного знака в полярных областях и смене этого знака около максимума солнечной активности – 22-летний магнитный цикл. В нашей работе для исследования дисбаланса магнитных полей были использованы синоптические карты фотосферного магнитного поля обсерватории NSO Kitt Peak (1978 – 2016).

Для выделения вклада слабых магнитных полей порог насыщения для синоптических карт был установлен на уровне 5 G. На основе преобразованных синоптических карт построена диаграмма широта-время. Проявлением дисбаланса магнитных полей являются потоки Rush-to-the-Poles (RTTP), которые имеют знак магнитного поля, совпадающий со знаком хвостовых пятен. Эти потоки дрейфуют от широты 30° до полюса и приводят к переполюсовке полярного поля. Циклическая структура распределения магнитного поля проявляется также в виде ряда потоков с чередующимися знаками поля (ripples), которые располагаются между двумя областями RTTP. Смена полярности происходит через 0.5 – 1 год, так что полный период изменения полярности составляет 1 - 2 года.

Потоки ripples создаются слабыми магнитными полями ($B < 15$ G) и дрейфуют от экватора вплоть до широт $\pm 50^\circ$. Большинство ripples располагаются попарно, по обе стороны от экватора, симметрично друг против друга. Мы показали, что есть данные, которые позволяют считать такую пару ripples, расположенных в двух полушариях, единой структурой с общим знаком магнитного поля ripples. Мы аппроксимировали противоположащую пару ripples полиномом 2-й степени. Оказалось, что такая аппроксимация вполне успешно описывает изменения поля сразу в двух полушариях, что говорит о тесной связи этих потоков. Об этом говорит также изгиб кривых, аппроксимирующих ripples, который симметричен и указывает на сходство дрейфа доминирующей полярности в направлении к обоим полюсам. Вычисление суммы магнитных полей вдоль линий аппроксимации показывает поочередное доминирование положительных и отрицательных полей. Связь дисбаланса двух полушарий имеет место, когда мы рассматриваем магнитные поля в масштабе нескольких лет. Однако при исследовании долгопериодических вариаций дисбаланса магнитных полей мы получили резкие различия между полушариями: знак дисбаланса, который изменяется с 22-летним периодом как для сильных, так и для слабых полей, для приэкваториальных и средних широт постоянно совпадает со знаком полярного поля в северном полушарии, что указывает на доминирование северного полушария.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНОЙ И НИЗКОШИРОТНОЙ АКТИВНОСТИ

Глатов А.Г.

ГАС ГАО РАН, г. Кисловодск, Россия, latov@mail.ru

В настоящее время используются различные методы для составления долгосрочных прогнозов солнечной активности. Одним из методов, который давал прогнозы в правильном диапазоне в течение последних нескольких солнечных циклов, является предвестники полярного поля. Метод полярного предвестника, основан на корреляции между амплитудой максимума солнечных пятен с мерой амплитуды магнитного поля вблизи полюсов Солнца в минимуме предыдущего цикла. В его основе причинно-следственная связь между тороидальным потоком и полоидальным потоком, который служит затравкой для генерации тороидальных полей путем закручивания линий поля в дифференциально вращающейся конвективной зоне. В настоящее время широко распространено мнение, метод полярного предвестника в настоящее время является наиболее надежным способом прогнозирования предстоящего солнечного цикла. Данные наблюдений магнитных полей вблизи полюсов регулярно наблюдаются на обсерватории Маунт-Вильсон с 1974 года, солнечной обсерватории Уилкоккс (WSO) с 1976 года, из Китт-Пик с 1976 года (с 2003 SOLIS), магнитографа СТОП в Кисловодске с 2014 г. Наиболее широко используемый набор прямых измерений магнитного поля в полярных областях Солнца является магнитограф WSO. Существуют косвенных данных для полярного магнетизма, охватывающих гораздо более длительные временные масштабы. Например, полярные факеле, которые в настоящее время считаются лучшими фотосферными прокси-данными для реконструкции полярного магнитного поля/потока.

С другой стороны, существуют указания, что амплитуда солнечных циклов связана с низкоширотной активностью. На основе моделирования переноса магнитного потока вблизи поверхности мы показали, что существует широта θ_1 , на которой магнитное поле из области ведущей полярности проникает в противоположное полушарие, и формируется дипольное магнитное поле Солнца. На основании этого мы пришли к выводу, что активные области с широтой $\theta < \theta_1$ важны для следующего цикла активности. Мы предложили прогностические индексы для прогнозирования амплитуды циклов активности на основе данных о солнечных пятнах в текущем цикле активности с коэффициентом корреляции $r > 0,8$.

ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ НАБЛЮДАЕМОЙ 11-ЛЕТНЕЙ АКТИВНОСТИ И СМЕНЫ ПОЛЯРНОСТИ СОЛНЦА

Плеханов П.Г. Михайлова Л.Н. Плеханов С.С.
Астрономическая лаборатория РАН, г. Самара, Россия. skb.smk@yangex.ru

В докладе выдвигается гипотеза о последовательном формировании в конвективной зоне циклов наблюдаемой 11-летней активности Солнца 23, 24 цикла и начала активности 25 цикла, В гипотезе приводятся модели магнитосферы формирования цикла в конвективной зоне Солнца и магнитосферы наблюдаемых явлений его активности:

1. Спокойного Солнца 24 цикла. В конвективной зоне около широты 30 градусов полушарий Солнца показаны активные тороидальные магнитные пояса активности Солнца 24 цикла, которые были сформированы одновременно с периодом спада 1-го максимума активности Солнца 23 цикла.
2. Начала активности Солнца, в которой показано усиление напряженности тороидальных магнитных поясов 24 цикла, наполнение магнитной плазмой и приближение их к экватору Солнца.
3. Роста и спада 1-го максимума активности Солнца 24 цикла, и процессы формирования в конвективной зоне около полюсов Солнца слабых полоидальных магнитных поясов противоположной полярности следующего 25 цикла. В конвективной зоне полушарий Солнца показаны по два магнитных пояса, которые приводят к не определенности полярности Солнца, что и наблюдаем.
4. Роста второго максимума активности Солнца 24 цикла и преобразование полоидальных магнитных поясов 25 цикла в тороидальные магнитные пояса около широты 30 градусов полушарий Солнца.
5. Спада второго максимума и окончания активности Солнца 24 цикла выправлением петель силовых линий его тороидальных магнитных поясов.
6. Спокойного Солнца с полярностью 25 цикла, максимум которого наблюдаем в настоящее время. Наблюдаемые сегодня явления активности 25 цикла подтверждают изложенные в гипотезе процессы активности Солнца 24 цикла.

Данная модель магнитосферы Солнца позволяет объяснить:

1. Физику закона Вольфа, закона Шперрера, закона Хейла и закона Джоя.
2. Преобразования полоидального магнитного поля в тороидальное магнитное поле.
3. Раздельную активность полушарий Солнца.
4. Нагрев короны Солнца.
5. Конвекцию плазмы в конвективной зоне.
6. Смену циклов активности и полярности Солнца.

Модель магнитосферы раскрывает новые направления исследования и прогнозирования следующих 26, 27 и т.д. циклов активности Солнца.

Литература:

1. Бэбкок (H.W. Babcock), *Astrophys. J.* 133, 572 (1961).
2. Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Турбулентное динамо в астрофизике (МНаука, 1980).
3. Плеханов П.Г. Солнечная активность (раздельная динамо-модель смены 11 и 22-х летних циклов). Монография, Издательство Инкома-пресс, г. Самара, 2011-52с.
4. Цзюньвэй Чжао, Р. С. Богарт (Обнаружение меридионального потока в направлении экватора и свидетельстве двухэлементной меридиональной циркуляции внутри)

К ТОЛКОВАНИЮ ПРАВИЛА ГНЕВЫШЕВА-ОЛЯ

(1) Григорьева И.Ю., (2) Ожередов В.А., (2) Струминский А.Б.

- (1) ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, irina.2014.irina@mail.ru
(2) ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Ранее, авторами была найдена вторая бифуркация динамики полярного магнитного поля (ПМП) Солнца в ходе исследования связи между моментом переполюсовки фильтрованных усредненных значений напряженности ПМП (Bpol, Willcox) и временным рядом ГКЛ (темпа счета нейтронного монитора (НМ) Москва). Это позволило высказать гипотезу, что несимметричность солнечной активности в четных/нечетных циклах (видимая в ПМП, ГКЛ и числах Rz — количество солнечных пятен в день, sidc.be SILSO) соответствует правилу Гневьшева-Оля [1]. Согласно этому правилу, сумма солнечных пятен в предшествующем четном цикле меньше, чем в последующем нечетном (см. [2] и ссылки там же).

В данной работе на примере подсчета Rz с 6-го по 24-й цикл показано, что *медианный прирост* числа пятен у нечетного цикла-фолловера по сравнению с четным циклом-лидером наиболее ярко выражен для временного интервала, соответствующего остатку цикла после второй бифуркации (медиана нужна для нейтрализации искажений, вносимых нестационарностью пятенной динамики). Наша работа приводит к возможности толкования правила Гневьшева-Оля на языке ПМП Солнца, что вносит физический смысл в статистику Rz в рамках модели стохастического динамо Бэбкока-Лейтона [3-5].

[1] Гневьшев М.Н., Оль А.И. // *Астрон. Журн.* 1948. Т.25. С.18.

[2] Hathaway D. H. *The Solar Cycle // Living Rev. Sol. Phys.* 2015.V. 12. P. 4. DOI: 10.1007/lrsp-2015-4

[3] Babcock, H. W. *The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. AphJ*, 1961. V. 133, № 2. P. 572—587. DOI:10.1086/147060.

[4] Leighton R.B. *Transport of magnetic fields on the Sun // AphJ.* V. 140. P. 1547–1562. DOI: 10.1086/148058.

[5] Leighton R.B. *A magneto-kinematic model of the solar cycle // AphJ.* V. 156. P. 1–26. 1969. DOI: 10.1086/149943.

ПРОВАЛ ГНЕВЫШЕВА И КРУПНОМАСШТАБНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Соколов Д.Д., Обридко В.Н., Шибалова А.С.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, sokoloff.dd@gmail.com

Провал Гневывшева был впервые выявлен в данных по излучению солнечной короны (зеленая линия). Позже он был изучен по данным о солнечных пятнах, в корональных и гелиосферных данных. Мы исследовали провал Гневывшева по данным о магнитном поле и пришли к выводу, что он отражает поведение крупномасштабного магнитного поля. Провал Гневывшева возникает при переполюсовке магнитного поля Солнца на уровне фотосферы. Наличие провала Гневывшева в данных о солнечных пятнах на уровне фотосферы маскируется неглобальными структурами, сохраняющими зависимость как от широты, так и от долготы. Однако он хорошо виден по данным магнитного поля на уровне фотосферы и еще более выражен на поверхности источника (т. е. в короне).

СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ: СРАВНЕНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Жукова А.В., Абраменко В.И.

КрАО РАН, пгт. Научный, Крым, Россия, anastasiya.v.zhukova@gmail.com

Вспышечная продуктивность, способность порождать геоэффективные события и другие важные характеристики солнечных активных областей (АО) связаны с конфигурацией магнитного потока в них и разнообразием топологии солнечных пятен. В качестве способа описания строения АО принято использовать системы классификации, некоторые из которых имеют более чем столетнюю историю и существуют, зачастую, в разных вариантах.

Наряду с традиционными классификационными системами – классификацией McIntosh (модификация более ранней системы Zurich) [1], классификацией Mount Wilson Observatory (MWO или Hale-class) [2] – в докладе рассматриваются менее распространенные классификационные схемы, предложенные Martres, Michard, and Soru-Iscovisci [3], Smith and Howard [4], а также разработанная недавно магнито-морфологическая классификация Крымской астрофизической обсерватории [5, 6]. Проводится сравнительный анализ признаков (критериев), лежащих в основе данных классификаций, соответствующих сильным и слабым сторонам каждой из рассмотренных систем, особенности их практического применения. Обсуждается соответствие либо отклонение изучаемых систем от общих правил, принятых при создании классификаций [7]. На примере классификации MWO проводится сравнение ее исторически сложившихся вариантов, особенностей их применения при создании различных рядов наблюдений, влияние выбора того или иного подхода (и соответствующего ряда) на результат статистических исследований. Рассматриваются характерные ошибки наблюдателей и систематические ошибки автоматических алгоритмов, применяющихся при создании рядов наблюдений. Обсуждается необходимость предварительной обработки существующих длительных рядов наблюдений при проведении статистических исследований, особенно, с применением машинного обучения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122022400224–7.

1. McIntosh P.S. // Solar Phys. 1990. V. **125**. 251.
2. Hale G.E., Ellerman, F., Nicholson, S. B. // Astrophys. J. V. **49**. 153.
3. Martres, M. J., Michard, R., Soru-Iscovisci // Annales d'Astrophysique. 1966. V. **29**, 245.
4. Smith S.F., Howard R. // IAUS 35. 1968. 33.
5. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomag. Aeron. 2018. V. **58**. 1159.
6. Abramenko V.I. // MNRAS, 2021, V. **507**, 3698.
7. Асмус В. Ф. Логика. Москва: Огиз Госполитиздат. 1947. С. 62–63.

СПЕЦИФИКА ПЕРЕТЯЖЕЧНОЙ ПИНЧЕВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ ХРОМОСФЕРЫ СОЛНЦА

Алексеева Л.М.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, l.m.alekseeva@yandex.ru

Для хромосферы характерно наличие множества разнообразных горизонтальных фоновых магнитных полей. Магнитная конфигурация, когда граничат похожие, но разнополярные магнитные области, аналогична (плоскому) лабораторному пинчу. Последний хорошо изучен, установлен присущий ему комплекс важных явлений.

Важно знать, как именно проявляется этот комплекс в условиях солнечной плазмы --- где, в отличие от лаборатории, во-первых, пинч погружен в плазменную среду и может развиваться свободно, не выбрасывая плазму на стенки установки, а во-вторых, неоднородности могут всплывать или тонуть из-за присутствия силы тяжести. Тогда хромосферные явления, которые воспринимаются как не зависящие друг от друга, возможно, выступают как разные составляющие комплекса пинчевых процессов, определяемого конкретным видом начальной пинчевой магнитной конфигурации.

Наш цикл работ представляет собою несколько шагов в этом направлении, сделанных аналитически и путем численного моделирования. Считая плазму столкновительной, полностью ионизированной, обладающей теплопроводностью, омической диссипацией и газовой вязкостью мы описываем ее с помощью полностью самосогласованной системы нелинейных МГД уравнений. Предполагаем, что вдоль силовых линий магнитного поля, которые принимаем за горизонтальные параллельные прямые, физические величины не меняются; то позволяет использовать двумерную версию системы. (Очевидно, такая 2D система не будет описывать процесс пересоединения, так как при последнем скорость вдоль силовой линии меняется, что запрещено данной 2D геометрией.)

Ранние работы [1,2] показали, что развитая погруженная перетяжка внезапно создает пару узких высокоскоростных потоков, направленных из центра пинчевой конфигурации вдоль ее оси наружу. (Поскольку МГД-поток есть поток протонов, можно говорить об этих концентрированных потоках как о пучках протонов.) Генерированию высокоскоростных потоков предшествует самопроизвольное формирование некой динамичной «крестообразной» фигуры. Процесс не обязательно увенчается выбросом пучков протонов: если параметр β достаточно велик, конфигурация разваливается раньше, чем происходит генерация пучков. В этих численных экспериментах не учитывалось влияние силы тяжести, и в этом смысле их надо назвать идеализированными. В более поздних работах оно было учтено, но численный эксперимент проводился с целью выявления действия эффекта Холла и, чтобы не отвлекаться на взрывные вспышечного типа процессы, было выбрано большое значение $\beta=7.5$.

Настоящая работа представляет исследование с учетом силы тяжести и эффекта Холла, когда значения β (несколько большие единицы) допускают вспышечные явления. Принципиально результаты не сильно отличаются от полученных в идеализированном эксперименте. Однако пространственные очертания возникающих транзитных фигур здесь менее четки, что связано с действием силы тяжести и силы Архимеда (потоплением и всплыванием частей самой конфигурации и возникающих на ней возмущений).

1. Алексеева Л.М., Кшевецкий С.П. О структурировании солнечной надфотосферной плазмы плоскосимметричным пинч-эффектом // *Астрофизический бюллетень САО РАН*, 2011, т. 66, № 1, с. 76-86.

2. Alekseeva L.M., Kshevetskii S.P. Numerical MHD Simulation of the Coupled Evolution of Plasma and Magnetic Field in the Solar Chromosphere. I. Gradual and Impulsive Energisation // *Solar Physics*, 2015, v. 290, № 11, p. 3295-3318

ВАРИАЦИИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ВЫСОТОЙ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Куценко А.С.

КрАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, alex.s.kutsenko@gmail.com

Вариации магнитных полей активных областей с высотой позволяют выявить трехмерную структуру магнитных силовых линий и присутствие электрических токов в разных слоях атмосферы Солнца. Наиболее надежный метод для такого исследования - измерение магнитных полей в разных спектральных линиях, формирующихся преимущественно на различных высотах в фотосфере и нижней хромосфере.

Для анализа были использованы наблюдения на солнечном спектрополяриметре БСТ-1 КрАО РАН. Прибор представляет собой щелевой эшелльный спектрограф высокого разрешения. В рабочий диапазон попадают десятки спектральных линий в зеленой области видимого спектра. Наблюдения проводились с июня по сентябрь 2024 г. Проводилась полная спектрополяриметрия ряда активных областей. Для измерения продольного магнитного поля использовался метод центра тяжести [1], подразумевающий измерение положения центров тяжести для $I+V$ и $I-V$ компонент вектора Стокса. Магнитное поле в этом случае пропорционально $B_z \sim \Delta\lambda/g\lambda_0^2$, где $\Delta\lambda$ - разность между центрами тяжести $I\pm V$ компонент, g - эффективный фактор Ланде спектральной линии, λ_0 - длина волны нерасщепленной линии.

В отличие от часто используемого приближения слабого поля, метод центра тяжести свободен от эффекта насыщения в сильных магнитных полях. Было проведено сопоставление продольного магнитного поля в активных областях, измеренного БСТ-1 и орбитальной обсерваторией SDO/HMI. Сравнение показало хорошую линейную связь между величинами до магнитных полей около 2 кГс, что делает возможным анализ вариации магнитного поля с высотой в том числе в тени солнечных пятен. Высота формирования спектральной линии в первом приближении может быть оценена из ее эквивалентной ширины: более «широкие» линии формируются выше. Такой подход использовался в работах [2] и [3].

На картах активных областей выделялись различные участки - тень, полутень, области сильной супергрануляционной сетки. Для каждого из участков строилась зависимость среднего продольного магнитного поля от эквивалентной ширины спектральной линии, использовавшейся для измерений. Анализ проведен для активных областей, находящихся на различных расстояниях от центрального меридиана. В докладе будут представлены результаты измерений. Установлено, например, что в тени пятен продольное магнитное поле вначале уменьшается с высотой, затем возрастает по модулю. Согласно рассуждениям в работе [3], такое поведение можно объяснить присутствием электрических токов на границе фотосфера-хромосфера.

1. Semel M. // *Annales d'Astrophysique* 1967 V. **30**, p.513-513

2. Semel M. // *Astron. Astrophys.* 1981. V. **97**, P. 75-78.

3. Гопасюк С.И. // *Известия КрАО* 1985. Т. **72**. С. 159-171.

СТРУКТУРА ЦЕНТРОВ АКТИВНОСТИ ВО ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНЫХ ГРУППАХ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Головко А.А.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, golovko@iszf.irk.ru

Наличие центров активности в развивающихся новых активных областях описано во многих работах. Установлено, что магнитное поле развивается из центра биполярной группы пятен – области, где соприкасаются обе полярности и достигает наибольшего значения горизонтальный градиент магнитного поля [1]. В мультиполярных группах картина более сложна, но подобные центры также наблюдаются. Примером может служить активная область №12673 по NOAA, где 5-7.09.2017 г. существовали два таких центра [2]. В них пространственное распределение магнитного поля и доплеровских скоростей имеет отчетливо выраженную перемежаемость. Аналогичная особенность наблюдалась и в активной области №13663 по NOAA в течение 3-6 мая 2024 г.

Во временном аспекте, в этих же центрах наблюдается быстро меняющаяся картина сильных турбулентных движений. Есть факты, указывающие на связь этих движений с МГД волнами. Для выявленных в них транзитных быстро эволюционирующих магнитных узлов, соотношение их времен жизни и магнитных потоков соответствует альфвеновской скорости в фотосфере. На диаграмме «магнитный поток – время жизни» [3,4] соответствующие точки продолжают ветвь областей нового магнитного потока с быстрой эволюцией (Рис.1).

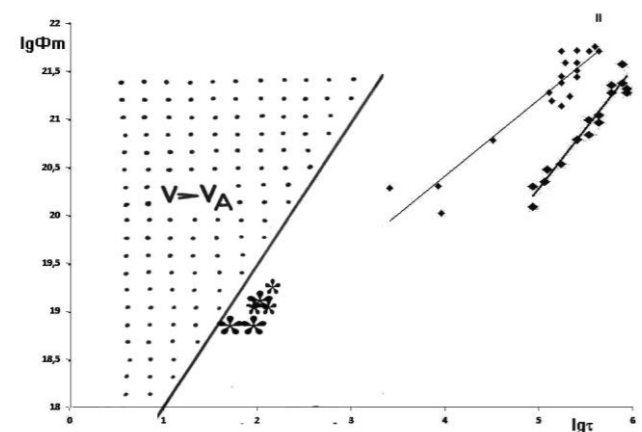


Рис. 1. Диаграмма «магнитный поток Φ – время жизни τ » по данным панорамного магнитографа ИСЗФ [3,4]. с двумя ветвями: регулярных активных областей (I) и областей с быстрой эволюцией (II). Поток Φ выражен в Мкс, τ – в секундах. Точечной штриховкой выделены зоны, где скорость распространения возмущений превышает альфвеновскую. Звездочки (*) соответствуют транзитным магнитным узлам, быстро эволюционирующим в течение вспышки

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (проект №0278-2021-0008).

1. Bumba V. et al. Structure and Development of Solar Active Regions, Kiepenheuer (ed.), 1968, pp. 13-24.
2. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. – Geomagnetism and Aeronomy, 2023, V.63, No. 7, pp. 113-121
3. Головко А.А. Астрон. журн. – 1998. – Т.75, №4. – С.618-625
4. Головко А.А. Солнечные данные – Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1986. – Бюлл. №4. – С.48-53:

Альфвеновский импульс в неоднородной хромосферной магнитной трубке. Генерация супердрайсеровского электрического поля

Емельянов Н.А., Кочаровский Вл.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, n.emelyanov@ipfran.ru

Генерация ускоренных частиц – один из основных каналов выделения свободной магнитной энергии во время солнечных вспышек [1]. Исследованию процесса ускорения частиц посвящено большое количество работ (см., например, [2]). Тем не менее, определение конкретного механизма, равно как и местоположения области ускорения до сих пор остается трудной задачей, далекой от окончательного решения. Кроме того, представляется весьма вероятным, что в различных солнечных вспышках могут действовать разные механизмы ускорения или несколько механизмов одновременно.

Наблюдения в радио и рентгеновском диапазонах излучения показывают, что в ряде вспышек в процесс ускорения вовлекается значительное число частиц, сопоставимое или даже превышающее общее число частиц, содержащееся в корональной области петли [3, 4]. Необходимым условием для такого ускорения является генерация сильного электрического поля, превышающего так называемый предел Драйзера. Интерпретация имеющихся данных в рамках стандартных моделей (см., например, [5]), где ускорение происходит в небольшой корональной области, встречается со значительными трудностями. Альтернативная возможность связана с ускорением частиц непосредственно в хромосфере, где концентрация плазмы значительно выше. Данное предположение подтверждается наблюдениями, свидетельствующими об инъекции хромосферной плазмы в корональные области петель и ее нагреве электрическими полями непосредственно в хромосфере [6]. Косвенным подтверждением также может служить наблюдение суб-терагерцового излучения от хромосферных оснований [7]. В работе [8] был предложен механизм генерации сильных электрических полей за счет распространения нелинейного альфвеновского импульса в основании магнитной петли. Однако в этой работе рассматривалась простейшая постановка задачи, не учитывающая ряд важных факторов, в частности, изменение сечения магнитной трубки.

В докладе обсуждается автомодельное решение для альфвеновского импульса, распространяющегося в хромосферной магнитной трубке переменного диаметра, полученное в рамках одножидкостной идеальной магнитной гидродинамики [9]. С использованием найденного автомодельного решения получено выражение для нелинейной компоненты электрического поля $E_{||}$, направленной вдоль образующей магнитной трубки и ответственной за ускорение частиц и/или инъекцию хромосферной плазмы в корональную область магнитной петли. Для характерных параметров хромосферной плазмы показано, что возникающая нелинейная компонента электрического поля может превышать предел Драйзера E_D , т.е. $E_{||}/E_D \gtrsim 1$, а геометрическое расширение магнитной трубки приводит к появлению дополнительного фактора, увеличивающего данное отношение во много раз, вплоть до $E_{||}/E_D \sim 10^2 - 10^3$. В результате установлено, что энергия частиц, ускоряемых в супердрайсеровском режиме, может достигать величин порядка 1 ГэВ.

Работа выполнена в рамках гранта BASIS № 24-1-1-97-5.

1. Benz A.O. // Living Rev Sol Phys 2017. V. 14. N.1 P. 2.
2. Aschwanden M. // Sp.Sc.Rev. 2002 V. 101. N.1 P. 1-227.
3. Hoynig P., Brown J.C., Frank B.H. // SolPhys 1976 V. 48. P. 197-254.
4. Fleishman G.D., Gelu M.N., Bin C. et al. // Nature 2022. V. 606. N.7915 P. 674-677.
5. Грицык П.А., Сомов Б.В. // УФН 2023. Т. 193. №5 С. 465-490.
6. Ji H., Cao W., Goode P.R. // Astrophys. J. Lett. 2012 V. 750. L25.
7. Kaufmann P., Raulin J.P., de Castro C.G. et al. // Astrophys. J. Lett. 2004 V. 603. L121-L124.
8. Zaitsev V.V., Stepanov A.V. // SolPhys 2016 V. 291. N.11 P. 3451-3459.
9. Emelyanov N.A., Kocharovskiy V.I. // [arXiv:2412.06463](https://arxiv.org/abs/2412.06463) [physics.plasm-ph]

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ТРУБОЧНОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Завершинский Д.И., Агапова Д.В., Молевич Н.Е.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, zavershinskiy.di@ssau.ru

Медленные магнитоакустические волны активно наблюдаются в различных магнитных структурах солнечной короны. Данный тип волн может проявлять себя в наблюдениях, например, как область повышенной интенсивности, перемещающаяся внутри корональной петли. Анализ меры эмиссии позволяет проследить за пространственно-временными вариациями плотности, которые соответствуют, наблюдаемым вариациям интенсивности. Для диагностики плазмы необходима математическая модель, которая позволит применить оцененные из наблюдений дисперсионные характеристики волн, такие как фазовая скорость, декремент затухания и т.д. для определения параметров среды.

Корональная плазма является неадиабатической средой и модели, построенные в предположении идеальной адиабатической плазмы, имеют ограниченную применимость для диагностики параметров среды. Корректный учёт влияния таких неадиабатических процессов, как нагрев, радиационное охлаждение и теплопроводность, а также учёт конечной ширины волновода при анализе дисперсионных свойств требует решения трансцендентных дисперсионных уравнений с гиперболическими или специальными функциями. Более удобным подходом является анализ дисперсии МГД - волн в приближении тонкой трубки или в приближении бесконечно сильного поля.

Для оценки периода волны часто используют данные о длине петли и о температуре плазмы, которая позволяет оценить адиабатическую скорость звука. Однако оценка фазовой скорости посредством адиабатической скорости звука применима на ограниченном диапазоне частот/длин волн и не всегда является корректной. В зависимости от частотного диапазона более корректным могут быть как изотермическая скорость звука и изотермическая трубочная скорость, так и скорость звука и трубочная скорость, определяемая процессами нагрева и охлаждения.

В данной работе было аналитически определено компактное выражение для длины волны/периода соответствующего максимуму дисперсии при переходе от изотермической к адиабатической скорости звука. Расчет данного пространственного/временного масштаба позволил выявить область параметров плотности и температуры плазмы, а также наблюдения медленных магнитоакустических волн/осцилляций для которых наиболее корректной оценкой фазовой скорости могут служить изотермическая скорость звука и/или изотермическая трубочная скорость. Аналогичным образом, выделена область параметров плотности и температуры плазмы, в которой фазовая скорость наиболее корректно описывается выражениями скорости звука и трубочной скорости, которые определяются процессами нагрева и охлаждения.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FFMR-2024-0017).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО ЭВОЛЮЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Рящиков Д.С., Завершинский Д.И.

СФ ФИАН, Самарский университет, г. Самара, Россия, ryashchikovd@gmail.com

МГД волны, осцилляции и конденсации, наблюдаемые в различных структурах солнечной короны, могут служить мощным инструментом для диагностики параметров корональной плазмы. В данной работе для этой цели используются возмущения интенсивности, наблюдаемые в корональных петлях. В качестве исходных данных для анализа с помощью линейного эволюционного уравнения [1] используются пространственно-временные диаграммы концентрации электронов вдоль оси петли, полученные на основе наблюдений SDO. Затем после вычитания фонового значения концентрации подбираются такие начальные значения амплитуд Фурье-гармоник в аналитическом решении уравнения [1], чтобы полученное решение при заданных свободных параметрах – скорости звука и коэффициенте теплопроводности – наилучшим образом описывало наблюдаемое пространственно-временное распределение концентрации. Далее подбираются такие значения скорости звука и коэффициента теплопроводности, при которых невязка между наблюдаемым и моделируемым распределением концентрации является минимальной.

Применение описываемого подхода к наблюдениям пространственно-временной динамики возмущений интенсивности внутри корональной петли показало, что уравнение [1] способно с большой точностью описывать не только бегущие звуковые волны, но также и нераспространяющиеся энтропийные волны, которые ранее могли лишь ограниченно использоваться для целей корональной сейсмологии. Кроме того, уравнение позволяет обнаруживать и описывать распространение целого спектра собственных мод резонатора в отличие от множества работ, в которых рассматривается лишь фундаментальная гармоника. Однако отметим, что на данный момент описываемый алгоритм реализован для уравнения, учитывающего только теплопроводность, в то время как в некоторых случаях необходимо учитывать тепловой дисбаланс, либо совместного влияние данных эффектов.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FFMR-2024-0017).

1. Zavershinskii D., Molevich N., Riashchikov D., Belov S. // Front. Astron. Space Sci. 2023. V. 10. P. 1167781.

АНАЛИЗ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Р.Р. Каракотов, А.А. Кузнецов, С.А. Анфиногентов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии Наук,
Иркутск, Россия, r.r.karakotov97@iszf.irk.ru

В работе рассматривается солнечная вспышка класса M3.0, произошедшая 2023-04-06 05:36:00-06:10:00 UT на юго-восточном лимбе. Используются данные наблюдений в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне в канале 131 Å (1 и 1.58 МК) прибора SDO/AIA и в микроволновом диапазоне на двух решетках Сибирского Радиогелиографа (СРГ, 3-6 и 6-12 ГГц).

Вспышечная область в УФ диапазоне представляла собой систему петель, из которых две пересекающиеся в проекции петли поочередно проявляли активность, визуально увеличивая свою яркость: сначала доминировала южная петля, потом на некоторое время загорелась более северная петля. Во время вспышки в указанных корональных петлях зафиксированы два эпизода медленных магнитозвуковых волн, проявившихся как УФ уярчения, распространяющиеся вдоль петель периодическим образом. Для каждого из этих случаев были определены параметры колебаний: длина петли (69.1 ± 2.7 и 61.3 ± 0.7 Мм, соответственно), период колебания (638 ± 12 и 478 ± 82 с), характерный временной масштаб затухания (864 ± 90 и 732 ± 66 с) и скорость его распространения (217 ± 13 и 264 ± 48 км/с). Обнаружено, что колебание во второй петле не проходило полный путь по петле (40% петли до первого отражения), т.е., возмущение, возникшее в основании петли, отражалось обратно ближе к середине петли. Положение одной из точек отражения колебаний (более близкой к основанию петли) менялось со временем. Также наблюдалось уменьшение скорости распространения колебаний со временем, что могло быть вызвано снижением температуры петли.

Наблюдения СРГ показали, что источники микроволнового излучения на низких частотах (2.8-3.2 ГГц) демонстрировали смещения со временем; данные смещения коррелировали с движением УФ уярчений. Заметные колебания потока радиоизлучения не были обнаружены; это могло быть обусловлено недостаточно высокой амплитудой МГД-волны и/или малым размером МГД-неоднородности в сравнении с размерами диаграммы направленности радиогелиографа.

ФОРМИРОВАНИЕ ВОЛН СЖАТИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Дертеев С.Б., Сапралиев М.Е., Шивидов Н.К., Михалыев Б.Б.

КалмГУ им. Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия, derteevsergei@mail.ru

Акустические волны могут объяснить природу и свойства распространяющихся возмущений интенсивности КУФ – излучения или волн сжатия, которые наблюдаются у основания солнечной короны на протяжении более 25 лет. Волны сжатия наблюдаются повсюду, в активных областях и корональных дырах, и являются одним из самых распространенных нестационарных явлений в короне. Они могут быть одним из наиболее удобных средств изучения короны, например методами корональной сейсмологии. Однако до настоящего времени вообще неясно, что такое волны сжатия как физическое явление.

Наш анализ основан на трех проблемах описания волн сжатия: скорость их распространения практически всегда меньше звуковой; они имеют широкий спектр, не характерный для обычной волны; наблюдается нерегулярность появления периодов в их спектре в течение всего времени наблюдения. Мы используем простую модель акустических волн, где все неадиабатические эффекты точно определены [1-2]. Берется постоянная удельная функция нагрева и аналитическая функция излучения, построенная интерполяцией по данным CHIANTI. Благодаря такому подходу удалось дать точное описание волн в условиях солнечной короны, определить роль неадиабатических эффектов, обнаружить появление двух максимумов в спектре локализованного импульса, что является характерным для волн сжатия. Результаты исследования показывают возможность переосмысления природы волн сжатия [3].

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2024-113.

1. Mikhalyaev B.B., Derteev S.B., Shividov N.K., Sapraliev M.E., Bembitov D.B. // Solar Phys. 2023. V. 298. 102.
2. Derteev S., Shividov N., Bembitov D., Mikhalyaev B. // Physics. 2023. V. 5. PP. 215-228.
3. Derteev S.B., Sapraliev M.E., Shividov N.K., Mikhalyaev B.B. // Solar Phys. 2024. V. 240. 141.

Применение методов факторного анализа в исследованиях тонкой структуры радиоизлучения короны Солнца

В работе представлено развитие нового подхода к анализу радиоизлучения Солнца по данным наблюдений на спектрополяриметрических комплексах высокого разрешения телескопа РАТАН-600 в диапазоне 1–18 ГГц (в перспективе с расширением диапазона до 40 ГГц). Многоазимутальный режим наблюдений позволяет получать в течение одного дня несколько наборов многоволновых данных. Каждый набор представляет собой матрицу, столбцами которой являются одномерные сканы Солнца на различных частотах. Наборы объединяются в кубы данных. Тензорное разложение такого куба методами факторного анализа позволяет осуществить спектральное разделение различных источников радиоизлучения на Солнце и корректно определить спектральную структуру слабых всплесков, происходящих на фоне изменений собственного излучения активных областей Солнца. Приводятся результаты применения данного подхода к наблюдениям активной области NOAA 13253 16 марта 2023 года. В этот день на фоне радиоизлучения активной области были зарегистрированы импульсы J-формы длительностью 0.5 с и шириной 200–300 МГц, которые совпали по времени с динамическим развитием корональных ярких точек, зафиксированных инструментом AIA на борту спутниковой обсерватории SDO. Корональные яркие точки представляют собой систему маломасштабных петель в низкой короне с усиленным излучением в крайнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Была предложена модель плазменного механизма излучения, при этом отдельно рассматривалась динамика изменения спектра теплового излучения самой активной области NOAA 13253.

Структура короны по радионаблюдениям с высоким частотным разрешением

Богод В.М., Лебедев М.К., Овчинникова Н.Е., Рипак А.М.

Изучение солнечной короны в дециметровом диапазоне является неудобным для детального анализа поведения многих слабых структур в короне Солнца. С одной стороны, этому мешает высокая яркостная температура снижающая чувствительность радиометров. С другой стороны, данный диапазон может быть применим только для наземных крупных инструментов ввиду широкой диаграммы антенны. И наконец для повышения чувствительности в наблюдениях при анализе тонких корональных структур нужны большая эффективная площадь, высокий динамический диапазон и равномерная пространственно-частотная характеристика антенны, что позволило бы выделять слабые сигналы на фоне мощного фонового сигнала Солнца. Сегодня, к таким требованиям наиболее приближен радиотелескоп РАТАН-600, в котором при пространственном разрешении в 1.5-2.5 угл.минуты, реализуется покрытие частотного диапазона 1-3 ГГц с динамическим диапазоном 90 дБ. Важные дополнительные качества в виде высокого частотного разрешения на уровне 10^{-5} и высокого временного разрешения на уровне 8 мксек/спектр делают эти наблюдения высоко эффективным инструментом для исследования тонкой структуры короны. В сообщении приводятся многочисленные примеры нестационарных событий в короне, такие как спектры явления “корональный дождь”, наличие температурных неоднородностей и др.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ГИРОРЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПО ДАННЫМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА ЗА 2023-2024 ГОДЫ

Феденёв В.В., Лесовой С.В., Анфиногентов С.А., Глоба М.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, fedenev@iszf.irk.ru

В конце 2023 года был введён в эксплуатацию Сибирский радиогелиограф (СРГ) [1] — уникальная установка, обеспечивающая регулярные наблюдения Солнца в трёх диапазонах частот: 3–6, 6–12 и 12–24 ГГц. Антенная решётка для последнего диапазона частот (12-24 ГГц) начала регулярные наблюдения с сентября 2023 года.

Исследование, представленное в докладе, направлено на выявление гармоник гирочастоты, дающих наибольший вклад в гирорезонансное излучение невопшечных активных областей. Работа является продолжением аналогичного анализа данных за конец 2023 – начало 2024 года. Период наблюдений расширен до конца 2024 года, и применена улучшенная методология получения спектров и обновлённые алгоритмы синтеза изображений (на момент начала 2025 года). Для выбранных активных областей построены радиоизображения во всех частотных диапазонах СРГ, из которых получены спектры яркостной температуры излучения.

На основе построенных спектров проведён статистический анализ соотношений частот исчезновения радиоисточников для необыкновенной и обыкновенной мод излучения. В докладе представлены результаты данного анализа в виде гистограмм. Интерпретация результатов выполнена с учётом аппаратных особенностей инструмента и программных средств обработки данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

1. Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. // Солнечно-земная физика 2020. Т. 6. № 2

БЕССИЛОВЫЕ МАГНИТНЫЕ ЖГУТЫ С ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКОЙ КАК ВСПЫШЕЧНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ СТРУКТУРЫ

Соловьев А. А., Киричек Е.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, СПб, Россия

FORCE FREE MAGNETIC FLUX ROPES WITH CURRENT SHELL AS SOLAR FLARE STRUCTURES

Solov'ev A. A., Kirichek E.A.

Central (Pulkovo) astronomical observatory of Russian Academy of Science,

Saint-Petersburg, Russia. solov@gaoran.ru

Модели бессиловых магнитных жгутов различаются по их внутренней токовой структуре: в одном случае сильные электрические токи сосредоточены на оси жгута, а в другом – в тонкой периферической оболочке. В данной работе проводится сравнительный анализ трех новых моделей второго типа, т.е. жгутов с токовыми оболочками. Все бессиловые магнитные жгуты, независимо от их внутренней токовой структуры, имеют одно общее физическое свойство, приводящее к вспышечному энерговыделению: при выходе вершины петельного жгута в разреженную атмосферу Солнца, внешнее давление, удерживающее жгут от бокового расширения, неуклонно падает; при некотором критическом его уменьшении продольное магнитное поле жгута стремится к нулю на поверхности смены знака токов, $B_z(kr_0) \rightarrow 0$. При этом плотность азимутального тока $j_\phi(kr)$ и бессиловой параметр $\alpha(kr)$, приближаясь к разрыву на этой поверхности, начинают неограниченно расти вблизи неё. Это приводит к возбуждению плазменной ионно-звуковой неустойчивости, резкому (на 6-7 порядков) понижению проводимости плазмы, быстрой диссипации магнитной энергии в жгуте и генерации в области энерговыделения супер-дрейсеровских электрических полей. Вращательный момент (torque) выравнивается вдоль оси жгута с конечной альвеновской скоростью (эффект Паркера), т.е. с задержкой, что вызывает квазипериодические пульсации излучения вспышки. Совокупность описанных процессов хорошо отражает физическую природу вспышечных событий.

Публикация: Соловьев А.А., Киричек Е.А. Магнитные жгуты с токовой оболочкой как вспышечные солнечные структуры. Письма в АЖ. – 2024. – Vol. 50. – № 9. – Pp. 50-58.

СУБТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ SOL20220504T08:45 ПО ДАННЫМ МНОГОВОЛНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Смирнова В.В.¹, Цап Ю.Т.¹, Моторина Г.Г.^{2,3}, Моргачев А.С.²

¹КРАО РАН, пгт. Научный, Россия, vsvid.smirnova@yandex.ru

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, g.motorina@yandex.ru

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

Происхождение роста потока субтерагерцового (суб-ТГц) излучения с частотой на разных фазах солнечных вспышек, до сих пор дискутируется. Локализация источников суб-ТГц излучения вспышек и их связь со структурами в короне и хромосфере Солнца также до конца не выяснена. В этой связи представляет интерес детальное исследование параметров плазмы источника вспышки с высоким пространственным и временным разрешением с помощью многоволновых наблюдений.

В настоящей работе проведен многоволновой анализ солнечной вспышки SOL2022-05-04T08:45 рентгеновского класса M5.7. На основе сравнения временных профилей рентгеновского, ультрафиолетового, H_α и микроволнового излучения сделан вывод о том, что источник суб-ТГц излучения находится в короне. Между тем расчет дифференциальной меры эмиссии (DEM) по данным AIA/SDO, и, соответственно, плотности потока и оптической толщины теплового источника излучения показал, что вклад корональной плазмы в микроволновое излучение с частотой > 15 ГГц является незначительным. Полученное противоречие свидетельствует о необходимости дальнейшего развития методики определения DEM. Обсуждаются возможные пути решения возникшей проблемы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ No.22-12-00308 (Цап Ю.Т., Моргачев А.С.), и Государственного задания No 0040-2019-0025, 122022400224-7, FFUG-2024-0002.

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗАЛИМБОВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ KONUS-WIND В 1994-2024 ГГ.

Лысенко А.Л., Свинкин Д.С., Фредерикс Д.Д., Ридная А.В., Цветкова А.Е., Уланов М.В., Зимовец И.В., Демин А.Г., Кашапова Л.К., Хадсон Х.С., Низамов Б. А., Козырев А.С., Головин Д.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Санин А.Б.

ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru

Залимбовыми называются вспышки, основания петель которых скрыты за солнечным лимбом на долготах до 45°, а для наблюдателя видны либо источники излучения, находящиеся в короне, либо источники в плотных слоях атмосферы, находящиеся на видимой стороне Солнца в удалении от породившей вспышку активной области. Наблюдаемые свойства подобных событий могут отличаться от типичных параметров вспышек, произошедших на видимой части диска Солнца. Например, для жесткого рентгеновского излучения залимбовых вспышек характерны более плавные временные профили, необычно низкие для гиротронного излучения пиковые частоты микроволнового спектра, а также слабый тепловой отклик, наблюдаемый в мягком рентгеновском диапазоне. Таким образом, залимбовые вспышки представляют собой уникальное проявление солнечной активности, исследование которого, в частности, затруднено редкостью подобных событий.

Эксперимент Konus-Wind проводит практически непрерывные наблюдения Солнца в жестком рентгеновском диапазоне (~20-1200 кэВ) с 1994 г. по настоящее время, что даёт хорошие возможности для ретроспективного поиска таких редких событий. В работе рассмотрены несколько вспышек, зарегистрированных Konus-Wind и находящихся за лимбом для земного наблюдателя, для которых имеются данные других экспериментов в рентгеновском диапазоне (Ulysses/GRB, MESSENGER/GRNS, Mars-Odyssey/HEND, SolarOrbiter/STIX), наблюдавших вспышку на видимой стороне Солнца. На основании стереоскопических наблюдений в рентгеновском диапазоне мы обсуждаем особенности излучения в залимбовых вспышках и возможные механизмы ускорения и эффекты распространения электронов, которые их вызвали.

COMBINATORIAL FORMULA FOR THE M-INVARIANT OF MAGNETIC LINES

Ахметьев П.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия pmakhmet@mail.ru

To solve MHD problems within the framework of the theory of two-scale mean fields, it is important to study the invariants of magnetic lines. Such invariants are constructed on the basis of invariants of classical links, which must satisfy the asymptotic property.

We choose the simplest asymptotic invariant M_3 of three-component links [1], which is not expressed in terms of the pairwise linking coefficients of the components. We check the asymptotic property based only on the combinatorial definition of the invariant and do not use the analytic integral. For simple examples, the proven formula is verified by calculation [2].

1. P. M. Akhmet'ev, On a higher integral invariant for closed magnetic lines, revisited, Journal of Geometry and Physics: 170 (2021) 104379

2. P.,M. Akhmet'ev, Combinatorial formula for the M invariant of magnetic lines, arXiv:2412.18246

ЭФФЕКТ БЕТАТРОННОГО УСКОРЕНИЯ В СИММЕТРИЧНО ОСЦИЛЛИРУЮЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

Куприянова Е.Г.^{1,2}, Шабалин А.Н.², Чариков Ю.Е.²

¹ ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Ускоренные электроны, захваченные в корональные магнитные структуры (плазменные неоднородности), делают их источником микроволнового гиротронного (ГС) излучения. Симметричные осцилляции корональных структур приводят к периодическому перераспределению параметров неоднородности и ускоренных электронов в них, что приводит к вариациям ГС излучения. Симметричные осцилляции плазменной неоднородности вызывают также осцилляции конуса потерь, формируя последовательно два варианта конфигурации осциллирующей неоднородности: фаза «ловушки» и фаза «рогатки» [1]. Возникающие при этом вариации магнитного поля вызывают бетатронное ускорение электронов, что приводит к динамическому перераспределению энергичных электронов по энергиям. В данной работе мы проводим параметрическое исследование найденного эффекта. В частности, получено, что в фазе «ловушки» происходит отбор энергии у электронов с энергиями выше 100 кэВ, в конце фазы ловушки. Затем, перед началом фазы рогатки ($V_{FP}/V_{LT} \geq 1$), происходит увеличение концентрации электронов с энергиями 100 кэВ — 10 МэВ примерно на 50–100%, в зависимости от периода МГД волны. Учитывая нелинейность ГС механизма, это может оказать существенное влияние на ГС излучение в области частот 17–34 ГГц. Моделирование симметричной МГД волны проводится в рамках аналитического решения системы линеаризованных МГД уравнений. Моделирование кинетики ускоренных электронов проводится в рамках численного решения нестационарного релятивистского уравнения Фоккера—Планка.

1. Куприянова Е.Г., Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е. // Труды конф. «ССЗФ-2024». С. 205.

СУБМИНУТНЫЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ В ЖЁСТКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Чариков Ю.Е.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, ShabalinAN@mail.ioffe.ru

В работе рассмотрены две солнечные вспышки (SOL2014-04-18 и SOL2014-10-22) с субминутными квазипериодическими пульсациями (КПП) в жёстком рентгеновском (ЖР) диапазоне. Используя метод нелинейной бессиловой реконструкции магнитного поля, выделены характерные магнитные структуры и проведена их ассоциация с областями ЖР излучения в диапазоне энергий 18—50 кэВ. Рассмотрена гипотеза формирования КПП структуры ЖР излучения в результате МГД колебаний при релаксации магнитных петель после магнитного пересоединения в области каспа / токового слоя. Результаты наблюдений КПП не соответствуют сценарию одиночной колеблющейся магнитной петли. Численное моделирование кинетики ускоренных электронов в рамках модели коллапсирующих ловушек показывает, что одиночная «осциллирующая ловушка» обеспечивает не более двух–трёх последовательных пиков ЖР излучения и не объясняет случаи с нарастающей серией импульсов. Однако суперпозиция нескольких последовательно осциллирующих магнитных петель обеспечивает серию квазипериодических пиков разной амплитуды. Сделан вывод о том, что в образовании ЖР КПП важны как возможные МГД-колебания отдельных петельных структур, так и пространственно разнесенные многократные акты ускорения электронов в разных петлях.

Работа Чарикова Ю.Е., Овчинниковой Е.П. выполнена в рамках Государственной программы FFUG-2024-0002. Работа Шабалина А.Н. выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 20-72-10158.

УСКОРЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИХ СОГЛАСОВАННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ ВИСТЛЕРОВ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ЗАДАНЫМ ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ

Филатов Л.В.¹, Мельников В.Ф.²

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, filatovlv@yandex.ru

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Резонансное взаимодействие нетепловых электронов с волновой турбулентностью во вспышечной петле солнечной короны является эффективным механизмом ускорения и питч-углового рассеяния этих электронов. Такое взаимодействие рассматривалось нами для случая турбулентности вистлеров с заданным видом частотного спектра и пространственным распределением вдоль вспышечных петель (Filatov & Melnikov, Ge&Ae 2017, 2022, 2024). Предполагалось, что эти распределения стационарны во времени. Было показано, что инжектированные в петлю электроны с энергиями в диапазоне от 30 до 10000 кэВ могут эффективно рассеиваться и ускоряться за счет энергии турбулентности. При этом изначально степенной энергетический спектр инжектированных электронов в зависимости от вида спектра вистлеров может сильно видоизменяться, «уплощаясь» или «укручаясь» на определенных энергетических интервалах.

Очевидно, что для поддержания стационарной турбулентности необходим внешний источник вистлеров, так как их турбулентность должна затухать при ускорении резонансных с ней электронов. Источником генерации вистлеровской турбулентности могут быть процессы, связанные с энергосвободением при вспышке и конверсии других волновых мод. Очевидно, что эти процессы, так же, как и процесс ускорения электронов во вспышке должны быть нестационарными и это должно быть учтено при моделировании.

В данном сообщении мы приводим результаты исследования более реалистичной нестационарной модели, в которой задаются характеристики (временной профиль, частотный спектр, локализация) нестационарного источника турбулентности вистлеров, а не распределения самой турбулентности. Была решена самосогласованная система, состоящая из уравнения Фоккера-Планка для электронов и уравнения переноса для плотности энергии вистлеров. Исследованы нестационарные распределения нетепловых электронов по времени, длине магнитной петли, питч-углам и энергиям, а также частотные спектры и распределения самой турбулентности вистлеров, в зависимости от параметров инжекции электронов и источника турбулентности вистлеров. Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации наблюдаемых спектров жесткого рентгеновского и микроволнового излучений и выбора модели турбулентности волн во вспышечной петле.

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И H_{α} -ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕК РАЗНОЙ МОЩНОСТИ НА ФАЗЕ СПАДА 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т.

КрАО РАН, пгт. Научный, azis@craocrimea.ru

По данным Solar-Geophysical Data исследованы временные задержки мягкого рентгеновского (GOES) и H_{α} -излучения для 1370 событий разной мощности, полученные за период с 2015 по 2017 гг. В активных областях Солнца проанализировано 186 сильных вспышек и 1184 слабых, характеризуемых соответственно потоками излучения $\geq 5E-6$ и $1E-7 - 4.9E-6$ Вт/м² в диапазоне 1-8 Å. Общее число событий, наблюдавшихся в линии H_{α} и мягком рентгене составило около 810. Обнаружено, что для большинства событий (84%) начало эмиссии в линии H_{α} на несколько минут задерживается относительно эмиссии в рентгене. Причем для сильных вспышек эта закономерность более ярко выражена. Между тем максимумы излучения хорошо коррелируют между собой, с небольшой тенденцией к опережению излучения в линии H_{α} , в первую очередь, для слабых событий. В рамках стандартной модели солнечных вспышек обсуждаются следствия полученных результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (№. 22-12-00308, Степанов А.В.) и Государственного задания (№.122022400224-7, Цап Ю.Т.).

МНГОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ C2.8 КЛАССА В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 13256: ПРОДОЛЖЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИНАМИКИ ИСТОЧНИКОВ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ

Койнаш Г.В., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., Иванов Е.Ф., Киселёв В.И., Низамов Б.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, greg.koynash@cosmos.ru

Солнечные вспышки C-класса, несмотря на их малую мощность, нередко демонстрируют сложность, характерную для вспышек более высокого класса. Вспышка класса C2.8, произошедшая 19 марта 2023 года в период с 02:12 до 02:19 UT в активной области NOAA 13256 (S23E58), выделяется многопиковой временной структурой с квазипериодическими пульсациями (КПП) в импульсной фазе с периодом $P \approx 12.3 \pm 2.5$ секунд [1, 2], а также наличием смены знака круговой поляризации микроволнового излучения в диапазоне частот 6.8–7.8 ГГц.

Данные многоволновых наблюдений получены с помощью следующих инструментов: SOLARSPeL и Сибирского Радиогелиографа (СРГ) (ИСЗФ, Бадары), NoRP (NAOJ, Nobeyama), SDO/AIA, SDO/HMI, GOES-18/XRS, Fermi/GBM, Wind/Konus, SolO/STIX, и ASO-S/HXI. Изображения и локализация источников микроволнового излучения были получены из данных СРГ на частотах 9.0 и 11.8 ГГц. Источники ультрафиолетового излучения анализировались по данным SDO/AIA на длинах волн 131 и 1600 Å, а источники рентгеновского излучения — по данным SolO/STIX и ASO-S/HXI. Для анализа структуры магнитного поля использовались магнитограммы SDO/HMI.

Результаты анализа показывают, что источники жёсткого рентгеновского излучения (>20 кэВ) пространственно совпадали с двумя вспышечными лентами, в то время как источник мягкого рентгеновского излучения располагался между ними. Центр яркости мягкого рентгена совпадал с центром яркости микроволнового источника, что может указывать на корональные части вспышечных петель, доминирующие в разных спектральных диапазонах. Анализ данных СРГ не позволил выявить значимых перемещений микроволнового источника от пульсации к пульсации – вариации расположения источника находятся в пределах разрешения инструмента. Проведенный анализ структуры коронального магнитного поля с использованием нелинейных бессиловых экстраполяций показал, что источники излучения и вспышечные ленты были локализованы в аркаде магнитных петель в полутени пятна. Визуально структура магнитного поля напоминает обычные крупные двухленточные вспышки. Стоит заметить, что для исследуемой слабой C-вспышки, вероятно, характерно перекрестное взаимодействие магнитных петель на разных высотах, приведшее к инициации вспышки.

В работе подробно рассматривается динамика рентгеновских спектров по данным GBM/FERMI в разных приближениях. Показано, что эпизоды ускорения электронов, несмотря на КПП, характеризовались стабильным спектральным индексом около 5, вариациями низкоэнергетической границы в пределах 20-50 кэВ и нагревом плазмы до высоких температур (~40 МК). Также в работе обсуждается изменение знака круговой поляризации микроволнового радиоизлучения в области 7 ГГц.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме ПЛАЗМА.

1. Койнаш Г.В., Шарыкин И.Н., Зимовец И.В., и др. // Modern astronomy: from the Early Universe to exoplanets and black holes, V. 1, P. 687-693.

2. Койнаш Г.В., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., и др. // Солнечная и солнечно-земная физика – 2024, Т. 1, С. 169-172.

ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ С КЛАССА

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivan.sharykin@phystech.edu

Известно, что солнечные вспышки С-класса, несмотря на их малую энергетику, показывают все те же самые физические явления, что и крупные солнечные вспышки. Однако на сегодняшний день не известно насколько слабые вспышки могут проявлять себя с точки зрения гелиосейсмической активности (солнцетрясения).

В данной работе мы обсуждаем наименее слабое гелиосейсмическое событие с точки зрения рентгеновского класса в активной области 11515. Нами обнаружена солнечная вспышка ~C2.5 с учетом рентгеновского фона, во время которой наблюдалось мощное солнцетрясение сравнимое с акустическими откликами во вспышках X класса.

В работе подробно рассматривается динамика энерговыделения вспышки, морфология вспышечной области и геометрия магнитного поля относительно распределения акустических источников солнцетрясения. В нашем исследовании используются данные SDO/AIA, SDO/HMI, GOES, KONUS/WIND и данные наблюдений микроволнового радиоизлучения сети e-Callisto и RSTN.

Пример слабого рентгеновского всплеска с мощным солнцетрясением позволяет глубже понять природу гелиосейсмичности солнечных вспышек в целом. Вероятно, что топология магнитного поля и распределение его величины в пространстве определяют гелиосейсмическую эффективность того или иного вспышечного события.

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 23-72-30002.

HELIOSEISMIC FLUCTUATIONS IN NONTHERMAL SOLAR PLASMAS

Souvik Das and Pralay Kumar Karmakar

Department of Physics, Tezpur University, Napaam, Assam 784028, India, souphys97@gmail.com

A rich plethora of collective waves, instabilities, and oscillations is ubiquitously excitable in the entire solar plasma system [1]. A local helioseismic instability exploration associated with the nonthermal viscoturbulent solar plasma is theoretically performed. A linear perturbation analysis [2] is methodically carried out on the viscoturbulent spherically symmetric kappa(κ)-modified [3] inhomogeneous solar plasmas. The plasma turbulence effects are properly incorporated via the Larson logbarotropic equation of state [4]. The multi-parametric dispersion signatures sensitively depend on the nonthermality spectral index, solar electron temperature, plasma dynamic viscosity, thermal conductivity, and geometrical curvature effects. Diverse modal features of the standard helioseismic modes, such as the g -mode and p -mode, are explored analytically. The g -mode dominates only in the deeper constituent concentric layers of the SIP. The p -mode propagates throughout the Sun and its complex atmosphere. The existence of the solar five-minute oscillations is theoretically confirmed. The radially outward photospheric p -mode energy flux density is estimated as $10^3 - 10^5 \text{ W m}^{-2}$. It is demonstrated that these p -modes contribute significantly to the generation of chromospheric spicules through longitudinal-to-transverse mode conversion processes. The plasma nonthermality spectral index, thermal conductivity, and temperature play mode accelerating roles against the viscosity. The reliability of our phenomenological analyses is well-contrasted in the judicious framework of manifold helioseismic observations and predictions extensively found in the literature.

1. Stix M. *The Sun*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
2. Das S, Atteya A, Karmakar PK. A theoretic analysis of magnetoactive GES-based turbulent solar plasma instability. *Mon Not R Astron Soc* 2023;**523**:5635–60.
3. Vasyliunas VM. A survey of low-energy electrons in the evening sector of the magnetosphere with OGO 1 and OGO 3. *J Geophys Res* 1968;**73**:2839–84.
4. Larson RB. Turbulence and star formation in molecular clouds. *Mon Not R Astron Soc* 1981;**194**:809–26.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ СПЕКТРАМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С ПРОСТОЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Рожкова Д. В., Кашапова Л. К.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, dariarozhkova@mail.iszf.irk.ru

Наблюдения Сибирского Радиогелиографа (СРГ) в диапазоне 3–24 ГГц дают возможность не только локализовать положения событий в микроволновом диапазоне, но и, за счет высокой чувствительности инструмента, предоставляют наблюдения даже слабых солнечных вспышек с высоким спектральным разрешением. В настоящее время с мая 2023 года по июнь 2024 года с помощью алгоритма автоматически отобраны уже более полутора тысяч событий различной мощности. Наличие наблюдений с высоким спектральным разрешением, открывает новые возможности для статистического анализа процессов, происходящих во время вспышек, и открывает еще одну возможность для исследования процессов нагрева верхних слоев солнечной короны. Методом, позволяющим делать оценку параметров вспышечной плазмы, является фиттирование микроволновых спектров численными моделями, описывающими генерацию излучения. Однако большое число параметров плазмы, определяющих форму микроволнового спектра вместе со неоднозначности получаемых результатов. Мы представляем результаты тестирования и сравнения работы двух наиболее популярных методов. Первый метод использует формулы из работы [1], а второй использует быстрый гиротронный код, представленный в работе [2]. Результаты тестирования пакета программ, созданных на основании двух подходов, для наблюдений лимбовой вспышки 5 февраля 2023 года показали близкие результаты, совпадающие с оценками параметров вспышечной плазмы, полученные в предыдущих исследованиях. Обсуждаются результаты, полученные для нескольких быстрых вспышек, наблюдавшихся на СРГ в широкой полосе микроволнового излучения. Проводится сравнение с параметрами плазмы, полученными для этих событий в рентгеновском диапазоне, а также анализируются границы применения каждого из подходов для быстрой оценки параметров вспышечной плазмы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24–22–00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>.

СВЯЗЬ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ КОРОНАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ ВО ВСПЫШЕЧНО-АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ С МОЩНЫМИ ВСПЫШКАМИ

Нечаева А.Б., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nechaeva.workspace@gmail.com

В данной работе изучаются незатухающие изгибные колебания солнечных корональных петель и изменения в их поведении перед мощными вспышками (M-, X-класса), которые происходили в активных областях, где эти петли зарождались. Корональные петли можно рассматривать как приближение линий магнитного поля в активных областях Солнца. Мы провели предварительный анализ 14 вспышек, в некоторых из которых наблюдались осцилляционные паттерны в нескольких петлях в родительской активной области. Для каждого события были загружены и проанализированы 171 Å и 94 Å изображения AIA/SDO с шагом в 12 секунд для интервала времени от 4 часов до вспышки до 40 минут после нее. Поскольку незатухающие колебания имеют очень низкую амплитуду (1-2 пикселя AIA/SDO), мы использовали технику Motion Magnification для усиления амплитуды этих колебаний. По обработанным изображениям в канале 171 Å были построены карты время-расстояние, из которых «вручную» были извлечены колебательные паттерны. Для проверки наличия изменений в периоде осцилляций перед вспышкой был проведен вейвлет-анализ. Систематических изменений обнаружено не было. Таким образом, мы пришли к предварительному выводу, что изгибная скорость в высоких корональных петлях (с высотой вершины около 200-300 Мм) недостаточно чувствительна к локальным вариациям магнитных и плазменных параметров в активных областях, эволюционирующих перед мощными вспышками.

1. Ramaty R. // ApJ 1969. V. 158. P. 753
2. Fleishman G. D., Kuznetsov A. A. // ApJ 2010. V. 721. P. 1127

АНАЛИЗ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Р.Р. Каракотов, А.А. Кузнецов, С.А. Анфиногентов

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии Наук,
Иркутск, Россия, r.r.karakotov97@iszf.irk.ru

В работе рассматривается солнечная вспышка класса М3.0, произошедшая 2023-04-06 05:36:00-06:10:00 UT на юго-восточном лимбе. Используются данные наблюдений в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне в канале 131 Å (1 и 1.58 МК) прибора SDO/AIA и в микроволновом диапазоне на двух решетках Сибирского Радиогелиографа (СРГ, 3-6 и 6-12 ГГц).

Вспышечная область в УФ диапазоне представляла собой систему петель, из которых две пересекающиеся в проекции петли поочередно проявляли активность, визуально увеличивая свою яркость: сначала доминировала южная петля, потом на некоторое время загорелась более северная петля. Во время вспышки в указанных корональных петлях зафиксированы два эпизода медленных магнитозвуковых волн, проявлявшихся как УФ уярчения, распространяющиеся вдоль петель периодическим образом. Для каждого из этих случаев были определены параметры колебаний: длина петли (69.1 ± 2.7 и 61.3 ± 0.7 Мм, соответственно), период колебания (638 ± 12 и 478 ± 82 с), характерный временной масштаб затухания (864 ± 90 и 732 ± 66 с) и скорость его распространения (217 ± 13 и 264 ± 48 км/с). Обнаружено, что колебание во второй петле не проходило полный путь по петле (40% петли до первого отражения), т.е., возмущение, возникшее в основании петли, отражалось обратно ближе к середине петли. Положение одной из точек отражения колебаний (более близкой к основанию петли) менялось со временем. Также наблюдалось уменьшение скорости распространения колебаний со временем, что могло быть вызвано снижением температуры петли.

Наблюдения СРГ показали, что источники микроволнового излучения на низких частотах (2.8-3.2 ГГц) демонстрировали смещения со временем; данные смещения коррелировали с движением УФ уярчений. Заметные колебания потока радиоизлучения не были обнаружены; это могло быть обусловлено недостаточно высокой амплитудой МГД-волны и/или малым размером МГД-неоднородности в сравнении с размерами диаграммы направленности радиогелиографа.

ЧТО МЫ МОЖЕМ УВИДЕТЬ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ В НАЧАЛЕ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: НАГРЕВ ИЛИ УСКОРЕНИЕ?

Кашапова Л.К., Шамсутдинова Ю.Н. Жмуркина А.Д.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, lkk@iszf.irk.ru

Существует два сценария, описывающих начальные этапы развития процессов энерговыделения во время вспышки: предварительный нагрев плазмы, переходящий в ускорение частиц, и постепенное развитие процессов ускорения частиц, начиная с самых ранних этапов. Первый сценарий получил название hot-onset или «горячее начало», и его связывают с температурой плазмы чуть выше 10 МК. Так как порог чувствительности современных приемников рентгеновского излучения не позволяет диагностировать малые объемы ускоренных электронов, то именно микроволновое излучение становится способом обнаружить присутствие ускоренных электронов на ранних стадиях развития вспышки. Поэтому в пользу второго сценария обычно свидетельствуют появление микроволнового излучения гиротронной природы на ранних стадиях развития вспышки. Однако, гиротронное микроволновое излучение возникает при взаимодействии электронов как тепловой, так и нетепловой природы с магнитным полем источника, что, проявляется в форме микроволнового спектра. Таким образом мы получаем дополнительный индикатор первого или второго сценария.

Мы представляем наблюдательные примеры реализации двух сценариев на примере событий наблюдавшихся Сибирским Радиогелиографом. Верификация природы электронов проводилась как на основании формы микроволнового спектра, так с использованием информации о параметрах плазмы, полученных с помощью анализа рентгеновских наблюдений. Обсуждается возможная связь между типом сценария и топологией вспышки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>.

ПРЕДВСПЫШЕЧНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ: НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА НАБЛЮДЕНИЙ

Зимовец И.В., Низамов Б.А., Шарыкин И.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivanzim@cosmos.ru

В диапазонах радио и рентгеновского излучения перед солнечными вспышками обнаруживаются пульсации, рассматриваемые в качестве одного из видов предвестников вспышек. Наблюдения и изучение этих пульсаций могут быть полезным для понимания механизмов накопления и выделения энергии в активных областях (АО), а также для прогнозирования вспышек и КВМ.

В качестве основных механизмов предвспышечных пульсаций рассматриваются: (а) магнитогидродинамические (МГД) осцилляции корональных арок (петель), (б) осцилляции электрического LRC контура, которым могут представляться арки с продольным током, (в) последовательность эпизодов пересоединения в эволюционирующей АО. Однако применимость этих механизмов пока не доказана и необходимы дальнейшие исследования.

В этом докладе мы представляем свидетельства в пользу механизма (в) на примере детального анализа двух событий: (1) рентгеновские пульсации (период ~5-10 мин) перед вспышкой класса M1.9 в АО 11675 17 февраля 2013 г. и (2) рентгеновские пульсации (период ~5-10 мин) перед вспышкой класса X2.8 в АО 13514 14 декабря 2023 г.

Подробный анализ события (1) ранее уже представлялся (например, [1]). Здесь мы показываем только новые результаты дополнительного анализа данных: обнаружение групп дрейфующих радиопульсаций в дециметровом диапазоне по данным ORFEEES во время рентгеновских предвестников (данные RHESSI), а также появление нулевых точек магнитного поля в окрестности источников излучения перед предвестниками. Эти факты указывают на возможность пересоединения и генерации популяций нетепловых электронов во время рентгеновских предвестников.

По событию (2) результаты нами представляются впервые. Они получены на основе анализа данных наблюдений инструментов: SoHO/STIX и GOES/XRS в рентгеновском диапазоне, SDO/AIA в УФ и ВУФ диапазонах, векторных магнитограмм SDO/HMI и экстраполяции магнитного поля в корону в нелинейном бессиловом приближении (NLFFF). Методика и детали анализа представляются в отдельном докладе [2]. Во-первых, спектральный анализ рентгеновского излучения показывает появление “горячей” (~6-20 МК) и “сверхгорячей” (>25 МК) плазмы или нетепловых электронов во время предвспышечных пульсаций. Во-вторых, рентгеновские источники пульсаций появляются в АО перед вспышкой в разных местах вдоль комплексной нейтральной линии (НЛ) магнитного поля. С появлением рентгеновских источников ассоциируется возникновение поярчений в ВУФ диапазоне в виде отдельных компактных петель или нитей более крупной вытянутой вдоль НЛ структуры. Проекционное сопоставление источников излучения с силовыми линиями экстраполированного магнитного поля указывают на то, что предвспышечное энерговыделение происходит в сложной трехмерной магнитоплазменной системе, а пульсации могут представлять собой проявление эпизодов магнитного пересоединения в ней, приводящих к формированию/эволюции неустойчивого магнитного жгута, эрупция которого происходит во время основной вспышки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-10158).

1. Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., Нечаева А.Б., Низамов Б.А. // Восемнадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, 6-10 февраля 2023, ИКИ РАН
2. Низамов Б.А., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н. // Двдцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, 10-14 февраля 2025, ИКИ РАН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Шамсутдинова Ю.Н., Кашапова Л.К., Рожкова Д.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, yulia@iszf.irk.ru

Сочетание различных по скорости и мощности процессов энерговыделения, работающих во время солнечных вспышек, проявляется в многообразии динамики, наблюдаемой в широком диапазоне электромагнитного спектра – от простых и быстрых вспышек до событий, где наблюдаются квазипериодические колебания различной природы. Помимо подробного индивидуального анализа, необходимо проведение анализа набора статистически значимого числа событий, позволяющего понять общие законы взаимодействия механизмов энерговыделения различных типов вспышек. Последняя задача подразумевает работу с большим объемом данных, охватывающих широкие спектральные и временные диапазоны. Мы представляем первые результаты применения сверточной нейронной сети (CNN) для распознавания и классификации излучения солнечных вспышек в микроволновом диапазоне. Цель работы заключается в разработке и тестировании возможности применения подходов машинного обучения для повышения эффективности обработки больших объемов данных, получаемых Сибирским Радиогелиографом (СРГ) в диапазоне частот 3-24 ГГц. В работе использовались два типа входных данных: одномерные временные профили и двумерные солнечные радиоспектры (частота-время). В докладе проводится анализ и сравнение результатов, полученных с использованием различных типов входных данных и методов предварительной обработки, с целью достижения оптимального результата.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>.

Спектральные характеристики вспышки X1.1 23 марта 2024 года

Кудрявцева А.В.¹, Мышьяков И.И.¹, Анфиногентов А.С.¹, Дашинимаева С.А.²

¹ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, kudryavtseva@iszf.irk.ru

²ИГУ, г. Иркутск, Россия

В работе рассматривается солнечная вспышка рентгеновского класса X1.1, произошедшая 23 марта 2024 года. Примечательной особенностью данного события является вовлеченность во вспышечный процесс сразу двух активных областей (АО) – NOAA 13614 и NOAA 13615, соединенных трансэкваториальной петлей. При помощи двумерных многоволновых данных Сибирского радиогелиографа, наблюдающего Солнце в диапазоне 3 – 24 ГГц, было выделено три радиоисточника во вспышечных областях. Изучены временные и пространственные характеристики микроволнового излучения в каждом из выделенных источников. Проведен сравнительный анализ их спектров излучения до и во время вспышки. Также была проведена оценка степени поляризации.

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ-СРЕДНИХ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Мотык И.Д., Кашапова Л.К., Рожкова Д.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, motykilya@iszf.irk.ru

Средние временные профили излучения солнечных и звёздных вспышек и аналитические функции, полученные на их основе, могут быть эффективным инструментом как при анализе общих законов развития вспышек, так и использоваться для исследования сложных событий. В настоящее время были получены средние временные профили для излучения солнечных вспышек в ультрафиолетовом диапазоне, а для звёздных вспышек на красных карликах в белом свете.

В данной работе переведены результаты реконструкции микроволновых средних временных профилей солнечных вспышек, полученные с использованием наблюдений в диапазоне 3-24 ГГц Сибирского Радиогелиографа. Для создания среднего временного профиля были отобраны 116 вспышек с простой (элементарной) формой временного профиля, при этом имеющих широкополосный гиротронный спектр нетепловой природы. Этот критерий важен для разделения излучения оптически толстого и тонкого источников, которые формируются вблизи вершины вспышечной петли и основания, соответственно, и могут эволюционировать по-разному. Сравнение средних временных профилей полученных для оптически тонкого и оптически толстого источников показало, что эти профили идентичны. Анализ средних временных профилей показал, что доминирующий вклад в формирование излучения даёт процесс высыпания ускоренных электронов, нежели тепловые процессы. Получено аналитическое описание среднего временного профиля функциями, описывающими фазы роста и спада микроволнового излучения. Показана возможность применения вышеупомянутых профилей и аналитических функций для анализа солнечных вспышек на примере события C1.2 (GOES) 03.02.2022. Обсуждается возможность использования средних временных профилей микроволнового излучения и описывающих их аналитических функций для анализа как солнечных так и звёздных вспышек.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>

ВСПЫШКА 2017-04-21: АНАЛИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИНИЯХ КАЛЬЦИЯ И ВОДОРОДА, ПОИСК СВЕЧЕНИЯ В ЛИНИЯХ MgI

Купряков Ю.А.^{1,2}, Бычков К.В.¹, Малютин В.А.¹, Горшков А.Б.¹, Белова О.М.¹

¹Астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic, kupry@asu.cas.cz

Спектр солнечной вспышки достигает пиковых значений в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах, что делает солнечную хромосферу доминирующим источником излучения в солнечной вспышке [1]. Хромосфера - это место, где электроны, ускоренные во вспышках, теряют свою энергию, и она также может играть роль в их ускорении. Тем не менее, несмотря на очевидную важность, наблюдательные знания об этой области относительно скудны. Существует настоятельная необходимость вернуться к хромосфере, чтобы продвинуться в понимании солнечных вспышек.

Мы наблюдали вспышку класса B6.2 и активной области NOAA 12651 на спектрографе HSFA обсерватории Ondřejov в спектральных линиях кальция и водорода. Одновременно мы ставили задачу по обнаружению линий MgI. Эти линии играют важную диагностическую роль, дополняя резонансные линии MgII, которые теперь регулярно наблюдаются спутником IRIS. Предыдущие наши попытки обнаружить свечение в MgI, даже в более сильных вспышках на диске солнца не дали результата. Хотя в случае лимбовых вспышек мы обнаружили свечение в линиях 5572.68 и 5483.60 Å [2].

После обработки спектров были определены интегральные потоки излучения в линиях H α , H β , H γ , H CaII, IR CaII, а затем в рамках модели нагретого газа выполнен теоретический расчет параметров плазмы с учётом физических условий в хромосфере, включая самопоглощение в спектральных линиях. Методика расчетов подробно рассмотрена в работе [3]. Для объяснения наблюдаемых потоков потребовалось рассмотреть 2 газовых слоя, ориентированных поперек луча зрения, со своими индивидуальными параметрами. Один из них очень плотный, а другой прозрачный. Наличие высокого бальмеровского декремента, а так же отношение потоков в линиях кальция ($F_{3968\text{Å}}/F_{8542\text{Å}} = 5.93$) возможна только в предположении, что на щель попали области вспышки существенно разные по плотности, т.е. плазма во вспышке очень неоднородна. Концентрация плазмы слоев варьируется в пределах $5.0 \cdot 10^{10}$ - $2.3 \cdot 10^{11}$ см⁻³, высота слоев от 600 до 3000 км, температура 3900 - 7200 К, турбулентная скорость от 0 до 90 км/с.

1. Neidig, D. F., // 1989, Sol. Phys. 121, 261
2. Heinzel P., Kupryakov Yu., Schwartz P., // Cent. Eur. Astrophys. Bull. vol (2016) 1, 1.
3. Ю. А. Купряков, К. В. Бычков, О. М. Белова и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2024, Т. 79, № 2, С. 2420801.

ПРОЦЕССЫ УСКОРЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ИМПУЛЬСНОЙ КРУГОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ ВСПЫШКЕ

Алтынцева А.Т., Анфиногентов С.А., Жданов Д.А., Мешалкина Н.С., Мышьяков И.И.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, altyntsev@iszf.irk.ru

Обсуждаются ускорение и перенос электронов во время круговой вспышки SOL2024-03-25T06:37:00 рентгеновского класса M4.4, отличающейся рекордно короткой длительностью импульса жестких излучений. Используются радиоданные в диапазоне 0.1 — 40 ГГц, включая изображения вспышечной области в диапазоне частот Сибирского Радио Гелиографа. Структура с круговой лентой вокруг вкрапления северного магнитного поля в область южного поля AO 13615 наблюдалась в течение четырех дней с 23 по 26 марта 2024 г. Вспышка 25 марта произошла во время дефрагментации вкрапления и проявлялась во всех UV и EUV диапазонах SDO/AIA. Во время вспышки наблюдался выброс плазмы, заполняющей крупномасштабные петли с удаленными основаниями, находящимися на расстоянии до 250 угл. сек от ядра вспышки. Наиболее энергичным компонентом вспышки являлся импульс микроволнового (до 40 ГГц) и жесткого рентгеновского излучения (100 – 300 кэВ), генерируемого в компактной петле внутри магнитного домена. Во время импульса длительностью менее 5 с происходит перестройка магнитной структуры, приводящая к обращению знака поляризации наблюдаемого микроволнового излучения на частотах выше 7 ГГц. Обращение знака поляризации и быстрый спад жесткого рентгеновского и высокочастотного микроволнового излучения указывает на разрушение магнитной конфигурации во время выброса плазмы. Тепловая активизация вспышки начинается за 35 с до импульсной стадии, потоки нетепловых электронов появляются через 16 с. Вспышка сопровождается флуктуациями микроволнового излучения, которые ярко проявляются на частоте 1 ГГц. До максимума импульса наблюдаются характерные периоды флуктуаций 3.2 -3.6 с, а после - около 6 с. Удаленный микроволновый источник был широкополосным и наблюдался во всем диапазоне SRG картографирования, причем на низких частотах его относительная яркостная температура была порядка яркости источника в ядре вспышки. Пик излучения широкополосного удаленного источника задержан ~ 5 с относительно пика импульса в ядре вспышки, т.е. скорость распространения излучающих электронов к удаленному источнику была около трети скорости света. Отличительной особенностью удаленного источника являлась высокая степень круговой поляризации его излучения. Впервые полученная совокупность пространственных, спектральных и поляризационных характеристик микроволновых источников обсуждается в контексте известных к настоящему времени результатов о природе круговых ленточных вспышек.

МОДЕЛЬ ВСПЫШКИ 2017-04-21, ПОСТРОЕННАЯ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ В ЛИНИЯХ БАЛЬМЕРОВСКОЙ СЕРИИ

Малютин В.А.¹, Бычков К.В.², Купряков Ю.А.^{2,3}, Горшков А.Б.², Белова О.М.¹

¹Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия, malyutin@list.ru

²ГАИШ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³Astronomical institute, Academy of sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic

В настоящей работе мы восстанавливаем параметры излучающего газа во время вспышки 21 апреля 2017 года по наблюдаемым потокам в трех линиях водорода: H α , H β и H ϵ . В H α значение потока, приведенное к поверхности Солнца, не превышает $6 \cdot 10^6$ эрг/см²/с. В качестве входных величин для модельных слоев газа рассматриваются температура, концентрация, толщина слоя, турбулентная скорость. Число слоев и их параметры подбираем таким образом, чтобы значения теоретических и наблюдаемых потоков совпали сразу для трех линий.

Использован разработанный нами метод расчёта, учитывающий свойства хромосферного газа по отношению к излучению. А именно, газ прозрачен в непрерывном спектре оптического диапазона, но возможно самопоглощение в спектральных линиях. Рассматривается влияние фотосферного излучения в рамках чернотельного приближения. В отличие от известных пакетов программ, нами учитывается число возбуждённых уровней K , достаточное для уверенного определения состояния ионизации. Так, по критерию Инглиса-Теллера у водорода при электронной плотности менее $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³ реализуется более тридцати дискретных уровней. Принимаемая в расчётах величина K зависит от конкретных условий и определяется до начала расчётов. В рассматриваемой задаче нами принято $K=18$, поскольку большие K не приводят к изменению состояния ионизации и теоретического потока в спектральных линиях водорода [1]. Учёт рассеяния в частотах линий выполнен в рамках модели вероятности выхода фотона. Для вычисления вероятности произведены собственные расчёты свёртки доплеровского и хольцмарковского контуров. Для поиска населенностей дискретных уровней и состояния ионизации решалась система уравнений баланса [2].

Расчёты показали, что наблюдаемые потоки нельзя объяснить в рамках модели однородного слоя газа. Большое отношение потоков в линиях H α и H β (более 3.0) характерно для полупрозрачного в линиях разреженного газа, в то время как относительно большая величина отношения потоков H ϵ и H β (более 0.4), наоборот, свидетельствует о плотном газе с самопоглощением. Излучение в линиях удалось объяснить в двухслойной модели газа: излучающая область состоит из плотного холодного ядра с концентрацией частиц более 10^{12} см⁻³ и температурой около 4000 К; ближе к наблюдателю по лучу зрения расположен разреженный слой газа с концентрацией менее 10^{11} см⁻³.

1. Белова О.М., Бычков К.В. // *Астрофизика* 2017. **60**, выпуск 1. С. 127.
2. Белова О.М., Бычков К.В. // *Астрофизика* 2018. **61**, выпуск 1. С. 119.

МЕДЛЕННЫЕ И БЫСТРЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Степанов А.В.¹, Зайцев В.В.²

¹ ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, ² ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

Медленные (часы, дни) предвестники солнечных вспышек в радио [1] и рентгеновском [2] диапазонах связывают обычно с ростом амплитуды и периода квазипериодических осцилляций фотосферно-хромосферной плазмы различной природы. С другой стороны, недавно обнаружено явление быстрого (~ 10 с) нагрева хромосферных оснований корональных магнитных петель до температур 10-15 МК перед импульсной фазой вспышек [3], которое получило название hot onset precursor event (НОРЕ). Нами предложено, что явление НОРЕ обусловлено резким возрастанием продольного электрического тока при развитии в хромосферных основаниях петель неустойчивости Рэлея–Тейлора. Показано, что если величина импульсного тока превышает 10^{11} А, то темп джоулевого нагрева плазмы опережает темп ионизации. Поэтому в хромосферной плазме сохраняется относительно большое количество нейтралов, на два порядка превышающее количество нейтралов в квазистационарной короне. Указанное обстоятельство обеспечивает быстрый нагрев области предвестника за счет увеличения скорости диссипации тока при сопротивлении Каулинга, связанного с ионно–атомными столкновениями.

1. Кобрин М.М., Коршунов А.И., Пахомов В.В. // *УФН* 1973. **109**. 773.

<https://doi.org/10.3367/UFNr.0109.197304n.0773>

2. Tan Baolin et al. // *ApJ* 2016. **833**. 206. <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/206>

3. Hudson H.S. et al. // *MNRAS* 2021. **501**. 1273. [doi:10.1093/mnras/staa3664](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3664)

О МЕХАНИЗМАХ ИНЖЕКЦИИ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г.

КрАО РАН, нгт. Научный, yur_crao@mail.ru

Проведен анализ моделей инжекции квазитепловых протонов стохастическими и регулярными механизмами в режим ускорения, которые связаны соответственно с альфвеновскими волнами и квазистационарными электрическими полями. Показано, что в условиях вспышечной корональной плазмы эти механизмы сталкиваются со следующими трудностями. (1) В случае возбуждения высокочастотных ($\omega > \omega_i$) альфвеновских волн, необходимых для ускорения квазитепловых протонов на ионно-циклотронном резонансе, в предположение каскадного процесса и спектра Колмогорова должен происходить значительный рост плотности энергии нелинейных волн при переходе от мелкомасштабных к крупномасштабным возмущениям магнитного поля. (2) Ускорение протонов электрическими полями порядка драйсеровского до релятивистских энергий представляется проблематичным из-за их большой массы. Отсюда следует необходимость детального анализа проблемы инжекции квазитепловых ионов в область плазмы с низкочастотной турбулентностью, где происходит их ускорение до высоких энергий МГД волнами.

В приближении Спитцера с учетом сдвига в фазовом пространстве функции распределения электронов под действием электрического поля исследованы кулоновские потери энергии пробного квазитеплого протона, обусловленные столкновениями с частицами фоновой плазмы. Показано, что достаточно сильные квазистационарные электрические поля могут выступать в роли эффективных инжекторов быстрых протонов в область ускорения. Обсуждаются следствия полученных результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственного задания (No.122022400224-7, Цап Ю.Т.).

IP type II bursts

Межпланетные всплески II типа

Чернов Г.П. Фомичев В.В.

ИЗМИРАН, 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, Эл. Почта gchernov@izmiran.ru

Основная цель работы состояла в том, чтобы выяснить, почему не все метровые всплески II типа переходят в декаметровый диапазон (межпланетные всплески). Большая часть известных статистических работ лишь частично касалась поставленного вопроса. Как правило, рассматривались всплески II типа, как сопровождающие эффекты, сопровождающие корональные выбросы массы (КВМ). Многие авторы исходили из условия, что все ударные волны являются поршневыми, и лишь высокочастотные всплески II типа (с начальными частотами в полосе 300 – 800 МГц) могут быть связаны со взрывными ударными волнами, выходящими высоко в корону раньше КВМ. Однако они затухают прежде, чем выйдут в межпланетное пространство. Возможно, что нарушаются условия для генерации излучения всплесков II типа, одно из которых – нарушение строгой перпендикулярности ударного фронта к внешнему магнитному полю. Однако авторы не рассматривали детально механизм генерации. Мы просмотрели десятки известных крупных всплесков II типа и обнаружили, что условия для генерации сохраняются, если ударный фронт не имеет никаких препятствий для распространения на границе перехода от частот около 20 МГц к диапазону меньше 14 – 16 МГц, и излучение может уже регистрироваться на спектрах КА WIND/Wave и STEREO. Сравнительный анализ интересного явления 3 ноября 2003 г. с другими крупными всплесками (вспышка Бастилии 14 июля 2000 г., 3 ноября 1997 г. и другими) показал, что основное препятствие заключается в распространении ударного фронта через тело КВМ за его передним краем. Условия взаимодействия сильно различаются в разных явлениях. Излучение может продолжаться на отдельных участках ударного фронта, где сохраняются условия для генерации: превышение числа Маха критического значения и строгая перпендикулярность ударного фронта, не нарушающаяся более, чем на 2° . Эти условия могут объяснять клочковатую структуру полос излучения II типа на частотах 16 – 6 МГц. Эти выводы хорошо согласуются с бунемановской неустойчивостью излучения. При прохождении ударного фронта через КВМ скорость фронта может как понижаться, так и увеличиваться, при этом излучение полос II типа может усиливаться (явления 20.01.2001 и 10.06.2000). (Reiner et al. 2003 и Gopalswamy et al. 2001 соответственно).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС В ХОЛОДНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 7 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

Моторина Г.Г.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, g.motorina@yandex.ru

Солнечные вспышки демонстрируют значительное разнообразие в распределении энергии между тепловой, нетепловой и кинетической компонентами. Так называемые "холодные" солнечные вспышки, для которых характерна значительная нетепловая составляющая и практически отсутствие тепловой компоненты, особенно хорошо подходят для изучения прямого воздействия нетепловых электронов на нагрев плазмы. Таким образом, настоящая работа направлена на анализ соотношения тепловой и нетепловой энергии и их эволюции в солнечной вспышке SOL2017-09-07T184140 (C4.5). Данная вспышка является первой холодной вспышкой, для которой есть наблюдения EOVSA, и, следовательно, для нее возможно динамическое измерение коронального магнитного поля и других параметров в месте локализации вспышки. Для оценки тепловой компоненты был проведен анализ дифференциальной меры эмиссии по данным SDO/AIA. С помощью фитирования данных Fermi/GBM были произведены оценки компоненты горячей плазмы и нетепловой компоненты. Для проверки гипотезы о морфологии вспышки была создана 3D-модель с использованием GX-симулятора на основе данных SDO/HMI, а также по данным микроволнового (EOVSA) и рентгеновского (Fermi/GBM) излучения. Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что выделенной во время микроволнового всплеска нетепловой энергии достаточно для теплового отклика вспышки, аналогично другим холодным вспышкам.

Работа выполнена при поддержке РФФ No. 20-72-10158.

ОСОБЕННОСТИ ВСПЫШКИ И ЕЁ НЕТИПИЧНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ СОБЫТИИ 17 МАЯ 2012 ГОДА, ОТВЕТСТВЕННОГО ЗА GLE71

В.И. Киселёв¹, В.В. Гречнев¹, А.М. Уралов¹, Н.С. Мешалкина¹, А.Л. Лысенко²

¹ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, valentin.kiselev@iszf.irk.ru

²Институт Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

Большие околоземные протонные возрастания обычно происходят после крупных эруптивных солнечных вспышек, сопровождающихся мощными микроволновыми всплесками с типичной частотой спектрального максимума выше 10 ГГц, а потока выше 10^4 сеп. Наземные возрастания интенсивности космических лучей (GLE) – наиболее энергичная часть протонных событий, и, казалось бы, связанные с ними микроволновые всплески должны следовать этой закономерности. Но в отдельных событиях, ответственных за GLE, наблюдались лишь умеренные микроволновые всплески. Так, в событии 17 мая 2012 г., ответственном за GLE71, частота спектрального максимума всплеска не превышала 10 ГГц, а поток был ниже 10^3 сеп. Установлено, что временной профиль всплеска соответствовал сглаженной скорости магнитного пересоединения, отставая от него на ~50 с, а свойства всплеска определялись: а) асимметрией магнитной конфигурации; б) гиросинхротронным излучением всей вспышечной аркады и компактной области над тенью пятна. Эти особенности, ранее косвенно выведенные для схожего события 26 декабря 2001 г., ответственного за GLE63, непосредственно наблюдались. При этом имело место известное несоответствие между оценками электронного спектра, полученными по жёстким рентгеновским и микроволновым данным. Но ужесточение спектра захваченных электронов, привлекаемое для объяснения этого расхождения, в этом событии не подтверждается. Обсуждаются указания на связь между вспышечными процессами и ускорением протонов до высоких энергий.

МАСШТАБИРОВАНИЕ ВСПЫШЕК И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС НА СОЛНЦЕ ДЛЯ ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Садовский А.М., Струминский А.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, a.sadovski@cosmos.ru

Согласно наблюдениям, вспышки на других звездах происходят регулярно, причем их количество практически неизменно — от карликовых до горячих звезд. На Солнце за вспышками могут следовать корональные выбросы массы (КВМ), которые также могут возникать и на других звездах. Построена масштабная модель, в рамках которой сделаны оценки магнитного поля в фотосферах звезд главной последовательности, без использования деталей солнечной и звездной активности. Для Солнца данные оценки дают результаты, отличающиеся от наблюдаемых не более, чем в 2–3 раза. Сделаны оценки энергий вспышек и масс КВМ, а также возможных энергий ускоренных частиц в активных областях. Данные оценки дают разумные значения минимальных и максимальных энергий вспышек, масс КВМ и величин ускорения для различных типов звезд. Проведено сравнение с известными энергиями вспышек для различных звезд.

НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА НА ГОРНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ГАО РАН

Глатов А.Г., Березин И.А., Гусева С.В., Дормидонтов Д.В., Скорбеж Н.Н, Шрамко А.Д.

ГАС ГАО РАН, г. Кисловодск, Россия, lglatov@mail.ru

Мониторинг солнечной активности является ключевым фактором для обеспечения прогнозов космической погоды (КП), которые могут дать возможность различным пользователям время среагировать на надвигающиеся возмущения. Понимание условий на Солнце, которые приводят к КВМ, вспышечной активности или солнечным протонным событиям, зависит от прогресса в научном понимании солнечных процессов, новых солнечных моделей и улучшенных солнечных наблюдений. Прогнозирование КП может быть реализовано на основе данных мониторинга Солнца и солнечного ветра с помощью технических средств как космического, так и наземного базирования.

На ГАС выполняются следующие виды наблюдений солнечной активности:

1. Наблюдения в белом свете и обработка солнечных пятен. Кисловодский ряд групп солнечных пятен (площади) является самым стабильным и однородным в мире (с 1954 г.).
2. Наблюдение солнечной короны в линиях 5303 и 6374А. Этот ряд является уникальным в мире по длительности и стабильности системы (с 1957 г.).
3. Наблюдения волокон в линии Н-альфа (с 1957 г.).
4. Наблюдения протуберанцев в линии Н-альфа (с 1957 г.).
5. Наблюдения флоккул в линии CaIIК (с 1958 г.).
6. Наблюдения интенсивности радиоизлучения на радиотелескопах на волнах 2.9 и 4.9 см. (с 1962 г.). Выполняются 1 раз в день во время калибровки.
7. Наблюдения крупномасштабного магнитного поля на магнитографе СТОП (с 2014 г.).
8. Патруль солнечных вспышек на радиотелескопах на волнах 2.9 и 4.9 см.
9. Наблюдения вариаций магнитного поля Земли (с 2012 г.).
10. Патрульные наблюдения интенсивности и поля скорости в линии CaIIК (с 2012).
11. Патрульные наблюдения интенсивности и поля скорости в линии Н-альфа (с 2016).

Наблюдения 2, 8, 10, 11` являются уникальными в мире. Поэтому есть основания считать что по числу, длительности наблюдения и качеству полученных данных ГАС является лучшей наземной синоптической солнечной обсерваторией в мире.

По режиму наблюдательной программы наблюдения можно разделить на два типа. Наблюдения, проводимые один раз в сутки. Это наблюдения пп. 1-7. Непрерывные наблюдения в течение всего наблюдательного времени пп. 8-11.

В сообщении приводятся характеристики наблюдательных программ, рядов данных, получаемых по данным наблюдений и возможное практическое их применение для прогнозирования КП и фундаментальных исследований.

МАЛОРАЗМЕРНЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ ВУФ ДИАПАЗОНА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА

Лобода И.П.¹, Кузин С.В.^{1,2}, Перцов А.А.², Богачёв С.А.¹, Рева А.А.¹, Кириченко А.С.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivan.loboda@cosmos.ru

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

Наблюдения Солнца в узких спектральных диапазонах вакуумного ультрафиолета (ВУФ), центрированных возле ярких линий излучения короны, являются одним из наиболее информативных источников данных об активных процессах, протекающих в его атмосфере. В настоящее время такие наблюдения ведутся рядом крупных специализированных космических обсерваторий, а также вспомогательными инструментами в составе отдельных метеорологических спутников. Запуск такого рода аппаратов, однако, сопряжён со значительными временными и материальными затратами, что не позволяет своевременно заменять вышедшие из строя инструменты, срок службы многих из которых уже многократно превысил расчётный период работы, а также существенно ограничивает возможность внедрения и отработки новых технических средств.

Одним из способов преодолеть указанные ограничения является разработка миниатюризированных телескопов для размещения на сверхмалых космических аппаратах (наноспутниках), которые имеют существенно более короткий цикл разработки и позволяют, как следствие, оперативно замещать вышедшие из строя наблюдательные приборы и развёртывать крупные группировки идентичных аппаратов на околоземной орбите за счёт ограниченных средств выведения. Несмотря на несколько худшее качество наблюдений, неизбежно связанное с ограниченными габаритами таких приборов, простота и скорость разработки делает их одним из наиболее перспективных направлений космической техники гелиофизического назначения.

В Лаборатории солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ, помимо проектирования более крупных гелиофизических комплексов, ведутся разработки малоразмерных инструментов для наблюдения Солнца, массово-габаритные характеристики которых позволяют использовать их в качестве полезной нагрузки для наноспутников, в т.ч. формата кубсат [1-3]. В частности, в 2023 г. был выведен на орбиту телескоп широкого поля зрения СОЛ в составе наноспутника НОРБИ-2, угловое разрешение которого около 12" позволяет наблюдать крупномасштабную структуру центров активности, а также динамику корональных выбросов массы вплоть до пяти радиусов Солнца. В настоящее время прорабатывается также проект малоразмерного телескопа с угловым разрешением 3.4" в поле зрения 1°×1°, т.е. по качеству изображений соответствующий телескопам ряда крупных гелиофизических обсерваторий (STEREO, ТЕСИС). При этом основными ограничивающими факторами, влияющими на объём и качество получаемой информации, остаются точность работы системы стабилизации и ширина канала связи спутниковой платформы.

В докладе рассматриваются основные принципы функционирования солнечных ВУФ телескопов, технические сложности их миниатюризации и методы оптимизации оптических схем телескопов, а также приводятся характеристики конкретных лётных и проектируемых образцов малоразмерных телескопов ВУФ диапазона.

1. Kuzin S., Bogachev S., Pertsov A. et al. // Appl. Opt. 2023. V. 62. P. 8462.
2. Перцов А.А., Дятков С.Ю., Ерхова Н.Ф. и др. // ПТЭ 2022. Т. 2. С. 131-137.
3. Кузин С.В., Богачёв С.А., Ерхова Н.Ф. и др. // ЖТФ 2022. Т. 91(10). С. 1441-1447.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>.

ПРОГРЕСС В КАЛИБРОВКЕ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ»

Тульников Е.Д., Махмутов В.С., Филиппов М.В.

ФИАН, г. Москва, Россия, e.tulnikov@lebedev.ru

В работе описаны основные научные задачи проекта «Солнце-Терагерц», в рамках которого в ФИАН проводится изготовление научной аппаратуры (НА) для установки на Российском сегменте МКС.

Для экспериментальной калибровки изготавливаемой научной аппаратуры используется имитатор черного тела (ИЧТ). Для определения калибровочных коэффициентов сравнивалась проходящая через систему фильтров интенсивность излучения от ИЧТ, которая была получена методами численного интегрирования, с полученным экспериментально откликом прибора на излучение ИЧТ. Для проверки качества проведённой калибровки производилось восстановление исходного спектра ИЧТ.

Для анализа экспериментальных данных в будущем необходима разработка методических вопросов обработки результатов измерений. В данной работе рассмотрен один из методов - метод «оптимизации» системы фильтров. Идея этого метода заключается в том, что каждый частотный канал НА «Солнце-Терагерц» производит измерение энергии проходящего электромагнитного излучения во всём спектре. Это означает, что сигналы всех каналов несут информацию об излучении на центральной частоте друг друга. Поэтому для каждой центральной частоты возможно нахождение такой линейной комбинации сигналов с разных каналов, что доля интересующего нас излучения в ней будет превосходить долю этого излучения в оригинальном канале.

РЕФОС: РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР НА БОРТУ НАНОСПУТНИКА

Рева А.А., Кузин С.В., Кириченко А.С., Лобода И.П., Богачев С.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, reva.antoine@gmail.com

В данной работе мы описываем устройство, а также первые результаты эксперимента РЕФОС (РЕНТГЕНОВСКИЙ ФОТО СПЕКТРОМЕТР). РЕФОС это спектрофотометр регистрирующий интегральный спектр Солнца в мягком рентгеновском диапазоне. РЕФОС был запущен на борту спутника Импульс-1 24 июня 2023 года. РЕФОС обладает спектральным диапазоном 1.2 – 30 кэВ, номинальным спектральным диапазоном 0.123 кэВ (полуширина на полувысоте) и интервалом регистрации спектров в 16 с. Мы иллюстрируем наблюдательные возможности прибора на примере X5.0 вспышки, произошедшей 31 декабря 2023 года в 21:55 UT. Для этой вспышки, РЕФОС регистрировал значимый сигнал во всем своем рабочем спектральном диапазоне. Во время импульсной фазы вспышки инструмент может четко различить нетепловую компоненту излучения. Во время пика вспышки в ее спектре наблюдаются признаки немаксвелловского распределения электронов. Наблюдаемый непрерывный спектр вспышки является удобным средством для диагностики ее температуры. В то время как наблюдаемые интенсивности спектральных линий могут быть использованы для измерения абсолютных значений обилий Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe и Ni.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 23-72-30002).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООВОГО ДИСБАЛАНСА НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Агапова Д.В., Завершинский Д.И., Молевич Н.Е.

*СФ ФИАН, г. Самара, Россия, d.agapova@lebedev.ru
Самарский университет, г. Самара, Россия*

В различных астрофизических средах, таких как межзвёздный газ, газопылевые туманности и, в частности, в солнечной короне, неадиабатические процессы, такие как нагрев, охлаждение и теплопроводность, играют ключевую роль в формировании пространственно-временных структур. Эти процессы зависят от температуры и плотности среды, оказывая значительное влияние на возникновение различных типов волн, включая акустические, магнитоакустические (МА) и альфвеновские волны. Для моделирования тепловыделяющих астрофизических сред в приближении оптически тонкой среды вводится обобщённая функция или обобщённый источник теплотер, который представляет собой разность нагрева и охлаждения. Однако не менее важным является теплопроводность, которая влияет на распределение температуры в плазме, что, в свою очередь, приводит к изменениям её динамических свойств. Эти изменения особенно важны для МА волн, которые обладают высокой чувствительностью к физическим условиям солнечной короны. Эти волны могут как усиливаться, так и затухать в зависимости от состояния плазмы, а их свойства, включая скорость распространения и амплитуду, напрямую связаны с термодинамическими параметрами. Благодаря этой чувствительности, МА волны становятся ценным инструментом для диагностики процессов, происходящих в солнечной атмосфере.

Исследования воздействия теплопроводности и теплового дисбаланса на медленные магнитоакустические (МА) волны при сильном магнитном структурировании показали, что фазовая скорость волн зависит от двух типов дисперсии: геометрической, обусловленной конечной шириной плазменного слоя, и дисперсии, связанной с неадиабатическими процессами. В длинноволновой области спектра влияние теплового дисбаланса определяется модифицированным выражением для адиабатической трубчатой скорости, учитывающим мощность нагрева и охлаждения плазмы. В коротковолновой области фазовая скорость определяется только теплопроводностью, а изотермическая звуковая скорость становится ее пределом.

В данной работе было проведено сравнение значений фазовой скорости с учетом теплового дисбаланса и без него. Результаты исследования показали, что использование классического выражения трубчатой скорости для длинных периодов и высокочастотной звуковой скорости для коротких периодов приводит к значительным ошибкам в определении температуры и магнитного поля плазмы. Полученные данные свидетельствуют о том, что ошибки могут достигать 30-40% для коротких периодов и 50% для длинных периодов при слабых магнитных полях. Для сильных магнитных полей ошибки в оценке температуры составляют 30% в области коротких волн и 40% в области длинных, тогда как для магнитного поля ошибки могут превышать 80% в обеих областях.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FMR-2024-0017).

СТАТИСТИКА И ХАРАКТЕРНЫЕ ЧАСТОТЫ ГОДОВЫХ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА, ИХ ПРОИЗВОДНЫХ И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЕЙ

С.В. Яковлева*, С.В. Старченко**

(ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия)

* svyakov@inbox.ru, ** sstarchenko@mail.ru

Уже давно [1] изучается ряд среднегодовых чисел Вольфа (W) и знакопеременный ряд (Q), являющийся, по энергетическим соображениям [2], рядом квадратных корней из чисел Вольфа со знаками Q, меняющимися в соответствии с фазой полного магнитного цикла. В этой работе статистически и частотно исследованы ряды W и Q, их временные производные W' и Q', а также и характерные частоты S, представляющие, по определению, отношение временной производной рядов W или Q к самим величинам W или Q.

Вероятностное распределение W преимущественно экспоненциальное с наиболее вероятным значением, равным 18, при существенно от него отличающихся: среднеквадратичном 100, медианном 65 и среднем 79. Для знакопеременного ряда характерны значения: среднее -0.04, медиана 2, среднеквадратичное отклонение 8.9 и наиболее вероятное значение 4.3.

Меньше от нормального распределения отклоняются временные производные от W с наиболее вероятным 24/год, медианным -5.9/год, средним 0.4/год, среднеквадратичным 33/год, минимумом -74/год и потенциально недостоверным максимумом 112/год. Для знакопеременного ряда характерны значения: среднее (-0.05), медиана -0.3, среднеквадратичное отклонение 2.7 и наиболее вероятное значение -2.3.

Информацию к размышлению дает полученное распределение характерных частот $S_W = W'/W$ и $S_Q = Q'/Q$, которые отрицательны если W или Q убывает и положительны при росте.

Для чисел Вольфа S_W характеризуется средним, равным 0.05 год^{-1} , медианой -0.12 год^{-1} , среднеквадратичным отклонением 0.73 год^{-1} и наиболее вероятным (за исключением незначимой нулевой моды) значением -0.25 год^{-1} . Обратная величина $1/S_W$ дает времена: 20 лет, -8 лет, 1.4 года и -4 года соответственно. Эти времена, по-видимому, согласуются с периодом полного (с учетом знака) цикла, периодами спада активности, флуктуациям и фазе роста.

Для знакопеременного ряда S_Q характеризуется средним, равным 0.08 год^{-1} , медианой -0.03 год^{-1} , среднеквадратичным отклонением 0.61 год^{-1} и наиболее вероятным значением -0.15 год^{-1} . Соответствующие времена: 12.5 лет, 33 года, 1.6 лет и -7 лет.

Интересно отметить некоторое «родственное пересечение» полученных времен, когда времена, полученные для W, в немалой степени, физически соответствуют Q, а полученные для Q значимо соответствуют W.

Литература

1. Bracewell R.N. The sunspot number series // Nature. V.174. P. 649-650. 1953.
2. Старченко С.В., Яковлева С.В. Корреляция временных рядов чисел Вольфа и их производных // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 6. С. 693–701. 2022.

Вероятные симпатические вспышки года максимума текущего 25 цикла солнечной активности

Лебедев Н.И., Лебедев М.Н., Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, lebedev@izmiran.ru

С вероятным наступлением максимума текущего 25 солнечного цикла в 2024 г. существенно возросла вспышечная активность. К примеру, годовое количество солнечных вспышек класса M1 и выше превысило тысячу. Соответственно, резко возросло и количество одновременных вспышек, то есть ряда из двух и более последовательных вспышек в разных активных областях, в которых начало каждой последующей вспышки происходит до окончания предыдущей.

Предполагается, что в некоторых из одновременных событий вспышки не являются независимыми, а имеют физическую связь. Такие события принято называть симпатическими вспышками. К настоящему времени предложено несколько возможных механизмов подобного взаимодействия: через корональные арочные системы, через крупномасштабные униполярные структуры, через подфотосферные связи и др.

Нами был проведен анализ по всему массиву вспышечных событий класса M1 и выше, имевших место в 2024 г., с целью выделения одновременных вспышек, максимально подходящих под определение симпатических. Критерием отбора являлось удовлетворение анализируемых событий хотя бы одному из возможных механизмов взаимосвязи.

СИМПАТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА СОЛНЦЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В РАДИОДИАПАЗОНЕ

Абрамов-Максимов В.Е.¹, **Кашапова Л.К.**²

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, beam@gaoran.ru

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

Симпатическими явлениями на Солнце называют события (вспышки, всплески), происходящие с небольшим интервалом по времени в активных областях (АО), удаленных друг от друга на значительные расстояния (до 10^6 км и более). Считается, что инициирующая вспышка при помощи возмущающего агента вызывает вторичную вспышку. Малый интервал времени между событиями в удаленных на большое расстояние друг от друга АО указывает на большую скорость распространения возмущения.

Симпатические явления на Солнце были обнаружены в 30-е годы прошлого века из анализа статистики оптических вспышек. Долгое время реальность этих явлений подвергалась сомнениям. Однако последующие исследования свидетельствуют о реальности явлений.

Для объяснения симпатических явлений предлагались различные механизмы распространения возмущений: МГД-волны, потоки быстрых частиц, волны Моретона, подфотосферные возмущения.

В данной работе представлено несколько событий, которые, предположительно, могут рассматриваться как симпатические. Используются изображения, полученные на радиогелиографе Нобеяма (17 ГГц) и Сибирском радиогелиографе (12.2 ГГц). Эти два инструмента обладают параметрами, подходящими для исследований симпатических явлений в радиодиапазоне. Сделаны оценки скорости распространения возмущения между активными областями.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СВЕРХАКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ НА СОЛНЦЕ

Якунина Г.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, yakunina45@yandex.ru

Исследуются сверхактивные области, в которых наблюдались мощные солнечные вспышки, приведшие к сильным геомагнитным бурям. Анализируется связь между характеристиками солнечной активности и геомагнитной эффективности. Особую группу составляют активные области (АО), представляющие собой большие δ -острова (АО- δ), когда ядра противоположной полярности расположены в общей полутени. Имеются многочисленные исследования АО- δ . Как известно, кроме больших δ -конфигураций наиболее продуктивными являются АО, обладающие магнитной конфигурацией типа $\beta\gamma\delta$. Данные о вспышках и других характеристиках брались из SGD (Solar Geophysical Data), Интернета (<http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP> и <http://www.sec.noaa.gov>) и научных публикаций.

В северной полусфере наблюдается отрицательная (левосторонняя, против часовой стрелки) завихренность, а в южной – положительная (правосторонняя) завихренность. Эта закономерность в случае АО выражается в том, что большинство АО подчиняются так называемому правилу спиральности, а именно АО, расположенные в северном полушарии, имеют $\alpha < 0$, а для АО, расположенных в южном полушарии, $\alpha > 0$.

ВЗАИМОСВЯЗЬ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Старкова Л.И.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, starkova@izmiran.ru

Исследовалась взаимосвязь между тороидальной и полоидальной компонентами магнитного поля Солнца. В качестве индикаторов мощности генерации изучаемых компонент были взяты соответственно число Вольфа и напряженность полярного поля по измерениям обсерватории WSO. Использовались данные за 21 – 25 солнечных циклы. Были найдены функциональные зависимости между максимальными значениями используемых индикаторов в солнечном цикле. Оказалось, что функциональная связь между числом Вольфа и предшествующей максимальной напряженностью полярного поля была стабильной за указанный период. В случае зависимости величины напряженности полярного поля от предшествующего числа Вольфа наблюдался сбой, а сама зависимость была слабой с показателем степени 0.02. Найденные особенности указывают на определяющую роль полоидальной компоненты в циклической вариации магнитного поля Солнца. А тороидальная компонента является пассивным отражением колебательного процесса полоидального поля и может возникать за счет дифференциального вращения.

Динамика скорости меридиональных потоков и солнечная активность (21-24 солнечных циклы).

Морозова Е.И., Безродных И.П., Петрукович А.А.

Институт космических исследований РАН, morozova.evgeniya2014@yandex.ru

Дифференциальное вращение Солнца и меридиональная циркуляция формируют динамику магнитного поля Солнца. В работе для 21-24 циклов вычислена средняя скорость меридиональных потоков для фазы спада и роста активности. Широтный профиль скорости меридионального потока (в кэррингтоновой системе координат) был рассчитан по формуле

$$V_{mer}(Q) = (d \sin Q + e \sin^3 Q) \cos Q, \quad d = 29.7 \pm 0.3 \text{ м/с}, \quad e = -17.7 \pm 0.7 \text{ м/с}.$$

Динамика скорости тороидальных потоков (меридиональная циркуляция) определяет процесс формирования солнечного цикла. На рис.1 представлена взаимная динамика поверхностного тороидального поля B_{tor} и числа солнечных пятен SSN.

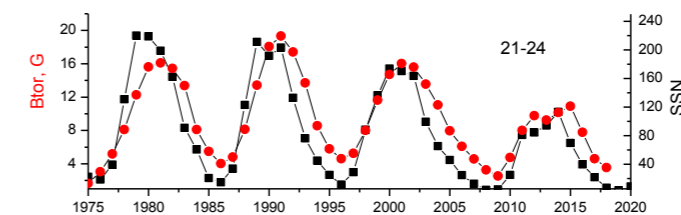


рис.1

На рис.2 представлена взаимная динамика скорости дрейфа пояса солнечных пятен и скорости меридиональной циркуляции для фазы роста и спада солнечной активности, которая традиционно определяется динамикой числа солнечных пятен. Красным цветом отмечены данные для фазы роста активности.

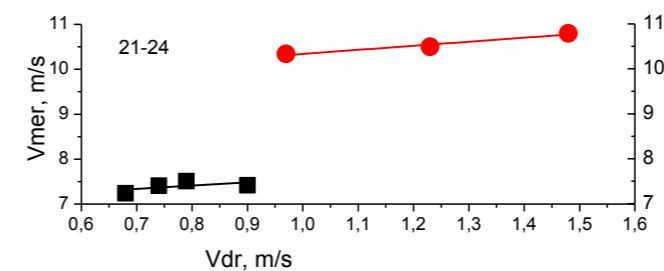


рис.2

На рис. 3 представлена взаимная динамика градиента полярного магнитного поля grB_{pol} и градиента меридиональной скорости. Красным цветом отмечены данные для фазы роста активности.

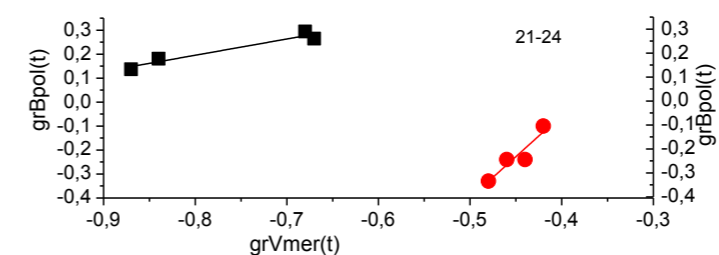


рис.3

МНОГОВОЛНОВЫЙ АНАЛИЗ СВЕРХКОРОТКОГО РАДИОВСПЛЕСКА ПЕРЕД СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКОЙ 23 ЯНВАРЯ 2024

Анфиногентов С.А.^{1,2}, Шарыкин И.Н.², Киселёв В.И.^{1,2}, Зимовец И.В.², Шабалин А.Н.^{3,2}, Низамов Б.А.^{4,2}, Моторина Г.Г.^{5,2}

¹ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

⁵ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Мы представляем подробный анализ короткого микроволнового всплеска, наблюдавшегося в активной области NOAA 13559 23 января 2024 года в 02:34 UT за час до солнечной вспышки класса M5.1 в той же активной области. Радиовсплеск наблюдался Сибирским радиогелиографом (СРГ) как компактный источник микроволнового излучения с яркостной температурой около 100 000 К в течении 20 с. Поток радиоизлучения на пиковой частоте достигал 12 с.е.п.. Всплеск также наблюдался спектрополяриметром 4–8 ГГц радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН и был зарегистрирован в одном из каналов спектрополяриметра Nobeyama. К сожалению, из-за маленькой интенсивности всплеска данные спектрополяриметров не позволяют извлечь достаточное количество информации о событии. Радиогелиограф же обладает большей чувствительностью по потоку что позволило не только детально изучить спектр всплеска в диапазоне 3-24 ГГц, но и определить его местоположение на диске Солнца.

На основе многоволновых наблюдений на 48 частотах в диапазоне 3-24 ГГц мы реконструировали динамический спектр всплеска и обнаружили признаки дрейфа частоты в сторону более высоких частот. Сам спектр имеет характерную для гиросинхротронного излучения форму с максимумом вблизи 8 ГГц. Помимо микроволнового излучения данное событие наблюдалось в рентгеновском диапазоне космическими аппаратами STIX и Fermi GBM, а также в крайнем ультрафиолете аппаратом SDO/AIA. Проанализировав все доступные данные, мы пришли к выводу, что наблюдаемый радиовсплеск имеет гиросинхротронную природу и излучается ускоренными электронами, движущимися по плазменной петле в сторону поверхности Солнца. Поскольку рассматриваемое событие произошло в той же активной области, что и следующая за ним вспышка, его можно рассматривать как предвестник солнечной вспышки.

Данное исследование выполнено при поддержке проекта Российского научного фонда 20-72-10158-Р.

ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЖГУТОВ И ИСТОЧНИКОВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭРУПТИВНЫХ ВСПЫШКАХ

Бакунина И.А.¹, Мельников В.Ф.², Шаин А.В.², Кузнецов С.А.², Абрамов-Максимов В.Е.²

¹НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия, rinbak@mail.ru

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе исследованы особенности положения и ориентации магнитных жгутов в общей пространственной структуре магнитного поля активной области в связи с пространственной структурой и поведением микроволновых источников (17 ГГц) и излучением в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (КУФ) (94 Å и 131 Å) при возникновении эруптивных вспышек. На выборке из 15 рентгеновских вспышек класса М показано, что корональные выбросы массы возникают в событиях с «открытыми» магнитными жгутами, реконструированными в приближении NLFFF. Магнитные жгуты совпадают с максимумами радиояркости на частоте 17 ГГц. За несколько часов до вспышки в области магнитных жгутов наблюдается свечение петель в КУФ, в некоторых событиях это - светящиеся X-структуры. Здесь же затем наблюдается максимальная радиояркость вспышки. В эруптивных событиях наблюдаются флуктуации радиоизлучения с периодами от 10 до 100 минут в течение нескольких часов до начала вспышки.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ПРЕДВСПЫШЕЧНОМ СОСТОЯНИИ ПО ДАННЫМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

Горюнова В.Д.¹, Анфиногентов С.А.².

¹ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», г. Иркутск, Россия, veronic-g@mail.ru

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

В данном докладе представлено исследование микроволнового излучения солнечных активных областей в предвспышечном состоянии по данным Сибирского Радиогелиографа (СРГ) в диапазоне частот 3-24 ГГц. Мы провели анализ многоволновых радиоизображений Солнца, полученных с помощью СРГ за 1-3 суток до солнечных вспышек М и Х классов для нескольких активных областей. Для сравнения мы выбрали наблюдения спокойных активных областей, в которых в течение 5 дней не происходило вспышек М-класса или выше. Для каждого набора данных были построены спектры яркостной температуры и потока микроволнового излучения в диапазоне 3-24 ГГц. В ходе сравнительного анализа спектров активных областей с вспышками и спокойных областей мы смогли выделить ряд характеристик, отличающих микроволновое излучение активных областей в предвспышечном состоянии.

Анализ спектров микроволнового излучения областей со вспышками М и Х классов и активных областей без вспышек выявил следующие признаки предвспышечного состояния активных областей:

- Наибольшая частота, на которой наблюдается гирорезонансное излучение, превышает 16 ГГц, что свидетельствует о повышенных значениях магнитного поля в переходной зоне между хромосферой и короной по сравнению со спокойными активными областями.
- Повышенная яркостная температура гирорезонансного излучения (более 1 МК на 6 ГГц) указывает на более высокую температуру в короне вспышечно продуктивных активных областей.

Результаты данного исследования в будущем возможно использовать для краткосрочного прогноза солнечных вспышек по их наблюдениям в микроволновом диапазоне.

Estimation of the line-of-sight thickness of the coronal mass ejections using the time delay of the harmonics of the Type II solar bursts.

Naga Varun. Y

SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Russia, naga.varun@gmail.com

Type II solar radio bursts are quite often observed during the coronal mass ejections and they appear usually in the spectral range from 50 MHz to 500 MHz. These radio bursts unlike the Type III radio burst have a rather slow drift in frequency with time. The drift rate suggests that the velocity characteristic to the burst is of the order of 1000 km/s typically. The burst itself is caused due to the relativistic electrons which are generated due to the expanding shock from the coronal mass ejection that permeates the heliosphere. Fermi's second order acceleration is the attributed mechanism that leads to the formation of these relativistic electrons which in turn result in the bump on tail instability in the erupted plasma. Such an instability causes Langmuir oscillations at the local plasma frequency which couple with electromagnetic radiation to give the observed burst as an intense band at the specific plasma frequency $\omega_p = \sqrt{4\pi N e^2 / m_e}$ (here the symbols retain their usual meaning). One of the frequent characteristics of the Type II radio burst is the manifestation of the second harmonic, which is a consequence of the nonlinearity of the coupling between the Langmuir oscillations and the electromagnetic radiation. In what follows we use the observational data obtained by the solar spectral radio polarimeter – YAMAGAWA [1] due to the excellent quality of the data. It has been observed that the second harmonic usually supersedes the first harmonic in time. This characteristic of the Type II burst has been found to be consistently obeyed in the majority of the bursts that were analyzed in the data given from YAMAGAWA. We use this observed characteristic of the Type II burst with the second harmonic to concoct a method to estimate the line-of-sight thickness of the erupted mass at the time of the burst. The gist of the method is as follows:

We know that in a tenuous plasma the group velocity of an electromagnetic wave is given by $v_g = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \times C$. The burst occurs due to the relativistic electrons formed at the rear edge of the moving eruption and the group velocity of the first harmonic whose frequency is ω_p is effectively zero, but the second harmonic travels at the group velocity $(\sqrt{3}/2)C$, which is sufficiently fast. The interplanetary plasma has a very low electron density because of which it plays a very feeble role in the delay of the signal, whereas the eruption itself has several orders of magnitude greater electron density along the line of sight implying that the delay predominantly occurs in the erupted plasma itself. Estimating the excess of the first harmonic denoted here by f over the local plasma frequency ω_p , from the observations of YAMAGAWA and similarly noting the time delay between the arrival moments of the second harmonic and the first harmonic denoted here by δt , we can derive the required formula for the line-of-sight thickness as $L = \sqrt{\frac{2f}{\omega_p}} \cdot C \cdot \delta t$. We used this to estimate the line-of-sight thickness of the coronal mass ejections in many cases and it tallies quite well with the observations of SOHO LASCO.

1. Iwai K. et al. OCTAD-S: DOI 10.1186/s40623-017-0681-8.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания CAO РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

МЕТОДИКА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ БЕГУЩИХ БЫСТРЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ

Дмитриев В.А.¹, Куприянова Е.Г.^{1,2}

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, st069138@student.spbu.ru

² ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru

В излучении большинства солнечных вспышек наблюдаются квазипериодические пульсации (КПП), исследование которых позволит ввести необходимый, но пока отсутствующий временной масштаб в стандартную модель солнечной вспышки. Отсутствие однозначной взаимосвязи между многообразием наблюдаемых форм КПП и многообразием известных физических механизмов, их вызывающих, требуют проведения классификации КПП на большом массиве данных. Исследование одного из типов, а именно, затухающих квазигармонических КПП в кривых блеска вспышек в белом свете на звёздах по данным КА Kepler, проведено в работе [1]. В нашей работе мы исследуем другой тип КПП — квазипериодические бегущие волновые пакеты быстрых магнитозвуковых волн. Данный тип пульсаций имеет характерный вид вейвлет спектра в виде "головастика" или, в более общем случае, «бумеранга» [2]. Задачей данного этапа работы является создание автоматической системы детектирования КПП типа "головастик". Для решения задачи планируется создание и верификация нейронной сети, обучение которой будет проводиться на синтетических кривых блеска солнечных вспышек. В докладе представлена методика создания синтетических кривых блеска, их первичной обработки и подготовки для обучения нейронной сети.

1. Belov et al. // *Astrophys. J. Supp. Ser.* 2024. V. 274. P. 31.

2. Kolotkov et al. // *MNARS* 2021. V. 505. P. 3505.

БАЗА ДАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ KONUS-WIND В ФОНОВОМ РЕЖИМЕ

Лысенко А.Л., Дёмин А.Г., Ридная А.В., Уланов М.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru

Созданный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН рентгеновский и гамма-детектор Konus на борту космического аппарата Wind проводит непрерывные наблюдения транзиентных событий в жёстком рентгеновском диапазоне с 1994 г. по настоящее время. Konus-Wind находится за пределами магнитосферы Земли, в точке Лагранжа L1, и не подвержен помехам со стороны радиационных поясов и затенениям Землёй. Это делает инструмент своего рода аналогом рентгеновских сенсоров GOES/XRS, только в более жёстком диапазоне. За всё время наблюдений Konus-Wind зарегистрировал около 15,000 солнечных вспышек в фоновом режиме, предоставляющем временные профили в трёх широких каналах G1 (20–80 кэВ), G2 (80–300 кэВ), G3 (300–1200 кэВ) с временным разрешением около 3 с. Данные Konus-Wind актуальны и по сей день, поскольку диапазон новых телескопов SolO/STIX, ASO-S/HXI и Aditya-L1/HEL1OS ограничен сверху энергиями 150-300 кэВ.

База данных солнечных вспышек, зарегистрированных инструментом Konus-Wind в фоновом режиме, доступна по адресу http://www.ioffe.ru/LEA/kwsun_waiting и дополняет базу данных солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте Konus-Wind в триггерном режиме <http://www.ioffe.ru/LEA/kwsun>. В докладе представлено описание фоновых данных инструмента и проиллюстрированы их возможности на примере некоторых интересных событий.

Работа поддержана грантом РФФ 25-22-00288.

РЕНТГЕНОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ КЛАССА X2.8 14 ДЕКАБРЯ 2023 Г.

Низамов Б.А., Зимовец И.В., Шарькин И.Н.

ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nizamov@physics.msu.ru

Вспышка класса X2.8 14 декабря 2023 г. произошла в активной области NOAA 13514 в 16:47UT. Эта вспышка интересна в частности тем, что ей предшествовала заметная активность на протяжении около двух часов, которая сопровождалась небольшими всплесками в рентгеновском диапазоне и общим плавным нарастанием рентгеновской яркости. В течение около часа перед вспышкой эти всплески представляли собой квазипериодическую последовательность с характерным временем между всплесками около 8 мин. В докладе представлен анализ рентгеновских наблюдений активной области в течение двух часов до вспышки. Используются данные с телескопа STIX на борту КА Solar Orbiter. Во время вспышки этот инструмент находился на расстоянии 0.91 а.е. от Солнца и наблюдал его с близкого к Земле направления (разность позиционных углов 12.3 градуса). Это позволяет совместить рентгеновские изображения с изображениями в вакуумном ультрафиолете (ВУФ), полученными инструментом AIA на борту КА SDO, так что эффекты проекции не должны оказаться очень существенными. Наш анализ включает в себя как моделирование спектральных данных, так и собственно построение изображений. В ходе обработки спектральных данных мы выяснили, что на фазе предвестников в окрестности минимумов излучения спектр хорошо аппроксимируется однокомпонентной моделью (тепловое излучение однотемпературной плазмы), а в окрестности максимумов - двухкомпонентной моделью, где один из компонентов - это также однотемпературное тепловое излучение, а другой компонент - либо тепловой с большей температурой, либо нетепловой (мы применили модель толстой мишени). В большинстве случаев два спектральных компонента доминируют в разных областях энергии, что позволило нам для соответствующих интервалов времени построить изображения в двух диапазонах энергии, в каждом из которых доминирует лишь один из компонентов. Таким образом, мы получили эволюцию в пространстве и во времени, с одной стороны, горячего теплового источника, который присутствовал в течение всей фазы предвестников, а с другой стороны, второго источника, который представляет собой либо сверхгорячую плазму, либо область излучения нетепловых электронов. Сравнение с изображениями в ВУФ-диапазоне показало, что первый источник, в основном, связан с крупной комплексной аркадой магнитных петель (в которой происходит основная вспышка), а второй тяготеет к местам локальных энерговыделений внутри этой аркады, в частности к отдельным более мелким системам петель с различной ориентацией относительно линии инверсии магнитной полярности, возгорания которых ответственны за квазипериодические всплески в рентгене и ВУФ. Другие аспекты анализа этих квазипериодических всплесков приводятся в докладе [1].

1. Зимовец И.В., Низамов Б.А., Шарькин И.Н. // Двадцатая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе”, 10-14 февраля 2025, ИКИ РАН.

ПРЕДВСПЫШЕЧНЫЕ ФЛУКТУАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ СЕТИ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ RSTN

Абрамов-Максимов В.Е.¹, Бакунина И.А.²

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, beam@gaoran.ru

²НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Проанализирован ряд вспышечных событий на Солнце по данным многочастотных наблюдений сети радиотелескопов RSTN. Целью анализа было выявление предвестников солнечных вспышек. Во всех рассмотренных случаях выявлены предвспышечные квазипериодические флуктуации (КПФ) радиоизлучения. Длительность предвспышечных цугов составляет 6-20 минут. Цуги состоят из 3-5 импульсов. КПФ на более низких частотах (200-600 МГц) начинаются позднее, чем на высоких частотах, на 2-6 минут. КПФ на частотах 2695-8800 МГц происходят практически синхронно. Наибольшая амплитуда КПФ наблюдается на частоте 4995 МГц. Наблюдаемые КПФ могут быть объяснены моделью бессилового магнитного жгута (Соловьев А.А., Киричек Е.А. Письма в АЖ, 49, 353). Согласно этой модели, перед вспышкой, во время которой происходит выделение большого количества энергии во всем объеме магнитной петли, несколько раз может возникать плазменная неустойчивость в узком слое. Из-за малого объема этого слоя каждый раз выделяется небольшое количество энергии, которое оказывается заметным только в радиодиапазоне. Это и проявляется как повторяющиеся радиовсплески перед вспышкой.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНОГО ПОЛЯ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ ПРИ ПОМОЩИ PIV МЕТОДА.

Каламанов В.Г., Садовский А.М., Струминский А.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kvg.aeroastro@gmail.com

Моделирование коронального выброса массы для вычисления параметров солнечной вспышки и коронального выброса массы представляет значительный интерес, так как дает возможность описать поведение плазмы солнечного ветра. Необходимы методы диагностики поведения плазмы, не требующие больших затрат по времени. Одним из таких методов, применяющихся в других областях, и доказавших свою состоятельность, является метод трассерной визуализации — PIV метод.

PIV метод нашел широкое применение в медицине, геофизике, авиационном двигателестроении и других сферах. Он позволяет определить гидродинамические параметры потока жидкости, фокусируясь на конкретных светящихся точках, фиксируя их положение на последовательных кадрах медиафайла. В результате, формируется вектор изменения положения для последующего анализа методом цифровой обработки.

В качестве тестовой программы была выбрана компьютерная программа PIVLab. PIVLab в качестве исходных данных принимает видео или фотоматериал с интересующим событием. Затем, программа позволяет настроить фильтры и, при необходимости, выделить зону повышенного интереса. После этого, программа исследует медиафайл методом трассерной визуализации при помощи быстрых преобразований Фурье. Наконец, после проведения калибровки по заранее известной величине (в данном случае, радиусу Солнца), программа вычисляет и визуализирует серию гидродинамических параметров для последующего анализа.

Была подобрана серия видеоматериалов корональных выбросов массы различной интенсивности в экстремальном ультрафиолетовом диапазоне (длина волны 30.4 нм) для последующего анализа в PIVLab. Были получены скорости от 1.5×10^8 до $2.5 \times 10^8 \frac{м}{с}$.

Причины, по которым программа фокусируется на подобных образованиях, может заключаться в принципе работы метода трассерной визуализации, а именно тенденции к фокусировке на отдельных, наиболее интенсивно светящихся областях в потоке жидкости. Захватывая их для последующего анализа, PIVLab, судя по всему, игнорирует другие составные элементы коронального выброса массы, и, поэтому, в ходе исследования не были зафиксированы скорости, близкие к скорости солнечного ветра, характерные для солнечной плазмы при вспышках.

В ходе исследования были обнаружены интересные явления, сопровождающие корональный выброс массы, такие как обратный заброс плазмы и слоистость структуры КВМ, говорящей о наличии зоны повышенного давления в очаге коронального выброса массы.

УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ ВО ВСПЫШКАХ 28 ОКТЯБРЯ 2003 г. (X17.2) И 8 ДЕКАБРЯ 2024 (X2.2)

Струминский А.Б.¹, Ожередов В.А.¹, Григорьева И.Ю.², Садовский А.М.¹

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия *astrum@cosmos.ru*

² ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Сравнение солнечных вспышек X2.2 8 декабря 2024 г. и X17.2 28 октября 2003 г., а также последующих за ними протонных возрастаний, позволяет достаточно точно оценить характеристики процесса ускорения протонов. Детектор ACS SPI в обоих событиях регистрировал как первичные солнечные HXR излучение, так и вторичные HXR, возникшее в теле детектора в результате взаимодействия солнечных протонов >100 МэВ. В этой паре событий максимумы HXR по данным ACS SPI были сопоставимыми, но в разы отличалась длительности HXR излучения. Потоки протонов >10 МэВ вблизи Земли различались примерно на 5 порядков, они были 8 декабря 2024 г на уровне фона протонного детектора GOES. ~ 0.2 PFU, но в максимуме события 28 октября 2003 г. достигали ~29500 PFU.

События рассматривались относительно нулевого времени (0 мин) – начала регистрации RSTN радиоизлучения на частоте 15.4 ГГц (появления суб-релятивистских электронов в короне Солнца). Единственными «маркерами» ускорения протонов в плазме являются ядерные гамма линии ($E_p > 30$ МэВ, $P_p > 239$ МВ) и линия распада π^0 -мезона ($E_p > 279$ МэВ, $P_p = 775$ МВ). Напряженность ускоряющего электрического поля можно оценить как, по наблюдению задержки линии распада π^0 -мезона относительно ядерных гамма-линий, так и по времени первого прихода протонов на орбиту Земли. Во событии X17.2 28 октября 2003 г, котором наблюдались [1] как ядерные (135 с после нуля) гамма линии, так и пионная гамма линия (задержана на ~2 мин относительно ядерных), это можно сделать обоими методами, а в событии X2.2 9 декабря 2024 г. - только вторым методом.

Считая, что «молчащие» протоны ($E_p < 10$ МэВ, $P_p < 137$ МВ) уже были ускорены до нулевого момента, то для появления протонов 30 МэВ (239 МВ) на 135 с средняя напряженность поля должна быть $2.6 \cdot 10^{-5}$ В/см, а после же 135 с - $1.5 \cdot 10^{-4}$ В/см (протоны ускорились за 2 мин от 30 МэВ (239 МВ) до 279 МэВ (775 МВ)), т. е. условия ускорения могли меняться в ходе развития вспышки. Найденные выше величины поля согласуются с оценками, сделанными по началу протонного возрастания на Земле, которые дают $7.6 \cdot 10^{-5}$ - $1.3 \cdot 10^{-4}$ В/см по началу GLE возрастания на +13 мин. Если первые протоны пришли на +7.5 мин после X2.2 8 декабря 2024 г, то средняя напряженность поля должна была быть больше $2.5 \cdot 10^{-4}$ - $3.5 \cdot 10^{-4}$ В/см. Не исключено, что в событии 28 октября 2003 г первые солнечные протоны могли прийти орбиту Земли также на +7.5 мин, но это было скрыто в данных ACS SPI под фоном HXR излучения. Наши оценки опровергают вывод [1] о практически мгновенном ускорении протонов в электрическом поле эруптивных вспышек от единиц до десятков В/см.

Работа поддержана субсидиями по теме «Плазма» ИКИ РАН (АБС, ВАО и АМС) и «Многоволновая активность Солнца» ГАО РАН (ИЮГ).

1. Kurt V.G. et al., A&A, 686, A195 (2024) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202349130>

ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА ПОЛОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Мерзляков В.Л.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, mvl@izmiran.ru

Изучались свойства источника полоидального магнитного поля Солнца. Наблюдаемая конфигурация полярного магнитного поля позволяет аппроксимировать изучаемый источник соленоидом. Свойства этого соленоида были изучены для эпох минимума 1986 г. и 1996 г. с использованием данных измерений обсерватории WSO. На основе модели "магнитных зарядов" была найдена протяженность соленоида в северной и южной полусфере $0.625 R_{\odot}$ (радиусов Солнца), различие между полусферами составляло 1.5%. Величина тока полоидального источника в минимуме 1986 г. оценена как $2 \cdot 10^{11}$ А. В минимуме 1996 г. величина тока в южной полусфере уменьшилась на 3.5%, а в северной на порядок больше 34%. Такое различие указывают на широтную неоднородность плотности тока источника.

СЕКЦИЯ «Солнечный ветер и гелиосфера»

Среда, 12.02.2025 г., Комната 200

Председатель: <u>Анфиногентов С.А.</u>			
	Время	Ф.И.О. докладчика	Название доклада
1			
2	9:20-9:40	Ковалев И.И. и др.	Спектры и пространственное распределение ускоренных протонов 11 мая 2024г. (GLE74)
3	9:40-10:00	Павлов Д. А. и др.	Численное моделирование коротирующих областей взаимодействия в гелиосфере с двумя видами граничных условий
4	10:00-10:20	Крайнев М.Б. и др.	Моделирование долготного распределения интенсивности ГКЛ, обусловленного коротирующими областями взаимодействия в гелиосфере
5	10:20-10:40	Петухов И.С. и др.	Метод численного расчета пространственного распределения частиц при нестационарной диффузии в безграничной области
	10.40 - 11.00	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Крайнев М.Б.</u>			
6	11:00-11:20	Зверев А.С. и др.	Мониторинг геоэффективных возмущений солнечного ветра и результаты прогноза в 2024 году
7	11:20-11:40	Дмитриев А.В. и др.	Солнечные энергичные протоны в межпланетной среде и в околоземном пространстве в мае 2024 г.
8	11:40-12:00	Анфиногентов С.А., Рубцов А.В.	Регистрация межпланетного коронального выброса масс вблизи орбиты Земли по данным IMAGE/EUV
9	12:00-12:20	Хохлачев А.А. и др.	Анализ внутренней структуры ICME с помощью метода минимума вариаций
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	13.30 - 14.30	Обед	
Председатель: <u>Рязанцева М.О.</u>			
10	14:30-14:50	Лукманов В.Р. и др.	Наблюдение и моделирование комплексной транзиентной структуры в гелиосфере перед магнитной бурей 10-12 мая 2024 г.
11	14:50-15:10	Сапунова О.В. и др.	Исследование спектров флуктуаций модуля и компонент магнитного поля плазмы солнечного ветра на обратных ударных волнах
12	15:10-15:30	Кузнецов А.А., Зайцев В.В.	Оценка возможности генерации радиоизлучения ускоренными электронами на ударной волне экзопланеты HD 189733b
13	15:30-15:50	Сухарева Н.А. и др.	Проекционные отображения для 3D матрицы числа реализаций межпланетного магнитного поля
14	15:50-16:10	Зуев Н.В. и др.	Распределение Берра в анализе экстремальной статистики межпланетного магнитного поля
	16.10 - 16.30	Перерыв на кофе	

Председатель: Моисеенко Д.А.

15	16:30-16:50	Рахманова Л.С. и др.	Развитие турбулентности в магнитослое в периоды взаимодействия ICME с магнитосферой Земли
16	16:50-17:10	Тревес Т.В. и др.	Роль токовых слоев в формировании спектра турбулентных флуктуаций в солнечном ветре
17	17:10-17:30	Дуканов И. А. и др.	Трансформация турбулентных спектров солнечного ветра в рамках оболочечного подхода
18	17:30-17:50	Рязанцева М.О. и др.	Эволюция турбулентного каскада при распространении солнечного ветра.
Постерная сессия			

Доклады постерной сессии секции «Солнечный ветер и гелиосфера»

- 6.1 Бородкова Н.Л., Сапунова О.В., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Исследование низкочастотных колебаний магнитного поля и потока ионов солнечного ветра, возникающих перед рампом межпланетной ударной волны
- 6.2 Голубчина О.А., Яркие температуры и электронные концентрации сантиметрового радиоизлучения отдельных областей северной полярной области Солнца, открытой во время наблюдений максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006
- 6.3 Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Герасимова С.К., Модернизация метода глобальной съемки: учет динамики энергетических спектров вариаций космических лучей
- 6.4 Гололобов П.Ю., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Исследование динамики энергетического спектра солнечно-суточных вариаций космических лучей в 20-25 циклах солнечной активности методом скрещенных телескопов
- 6.5 Калинин М.С., Крайнев М.Б., 3D и 2D транспортное уравнение галактических космических лучей в современных моделях гелиосферы.
- 6.6 Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Рязанцева М.О., Ермолаев М.Ю., Хохлачев А.А., Каталоги типов солнечного ветра и их роль в солнечно-земной физике
- 6.7 Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е., Жесткости геомагнитного обрезания космических лучей во время магнитной бури 23-24 марта 2023 г: корреляция с параметрами солнечного ветра и геомагнитной активности и широтные эффекты
- 6.8 Петухова А.С., Петухов И.С., Петухов С.И., Влияние винтовой структуры магнитного поля магнитного облака на характеристики форбуш-понижения
- 6.9 Белова Е.А., Белов А.В., Абунина М.А, Шлык Н.С., Янке В.Г., Оленева В.А., Солнечно-суточная анизотропия за 71 год наблюдений
- 6.10 Guliyev A.S., Qasimov A.A., Anomaly comet tails and 11 years cycle of solar activity
- 6.11 Высикайло Ф.И., Дуальные кумулирующие к Солнцу и убегающие от Солнца потоки электронов в гелиосфере - кулоновской потенциальной яме для электронов с потоком положительных ионов в солнечном ветре

ЗВЕЗДНО-СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ГЕЛИОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ < 300 ГэВ

Гололобов П.Ю., Герасимова С.К.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия, gpete@ikfia.ysn.ru

Работа посвящена исследованию звездно-суточных вариаций (ЗСВ) интенсивности галактических космических лучей наблюдаемых наземными детекторами в области энергий < 300 ГэВ. Существование ЗСВ обусловлено совокупностью или сочетанием ряда факторов, основными из которых являются - особенности структуры гелиосферы и анизотропия пространственно-углового распределения галактических космических лучей в межзвездной среде. Известно, что ЗСВ характерны для энергий выше ТэВ и в среднем имеют амплитуду около 0.01 % и фазу 0-5 ч. Тем не менее, многочисленные экспериментальные измерения показывают, что и в области энергий 1-100 ГэВ также наблюдаются устойчивые ЗСВ с такой же по порядку амплитудой, но с фазой около 19 ч.

На основе анализа данных измерений современного Якутского спектрографа космических лучей им. А.И. Кузьмина определены параметры ЗСВ за 2009-2023 гг. и определен ее характерный энергетический спектр этих вариаций. Установлено, что ЗСВ наблюдаемые в области энергий < 300 ГэВ образуются в результате существования в межпланетной среде тензорной анизотропии космических лучей. Произведено сопоставление ожидаемых звездно-суточных вариаций с наблюдаемыми на южных и северных станциях мировой сети мюонных телескопов. Полученные результаты обсуждаются.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2021-0012).

СПЕКТРЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕННЫХ ПРОТОНОВ 11 МАЯ 2024 г. (GLE74)

Олемской С.В., Ковалев И.И., Кравцова М.В., Сдобнов В.Е.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Наземное возрастание интенсивности космических лучей (GLE) является результатом кратковременного увеличения интенсивности вторичных частиц космических лучей, обнаруженных наземными детекторами. Изучение GLE дает информацию о механизмах ускорения частиц и процессах межпланетного переноса. Нами проведено исследование GLE74 (11 мая 2024 г.). Это третье GLE в 25-м солнечном цикле. Оно было связано с солнечной вспышкой класса X5.8 и скоростным корональным выбросом массы, и наблюдалось на фоне восстановления Форбуш-эффекта. Для анализа были использованы данные наблюдений космических лучей на мировой сети станций нейтронных мониторов, обработанные методом спектрографической глобальной съемки, и данные космического аппарата GOES-16. В рамках модели модуляции космических лучей регулярными электромагнитными полями гелиосферы получены дифференциальные жесткостные спектры ускоренных протонов и их пространственное распределение. Оценена предельная жесткость ускоренных частиц, которая составила ~ 5–6 ГВ. Проведен краткий сравнительный анализ полученных дифференциальных спектров и анизотропии космических лучей во время GLE74 с анализируемыми нами ранее похожими событиями.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОТИРУЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ГЕЛИОСФЕРЕ С ДВУМЯ ВИДАМИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Павлов Д. А.¹, Крайнев М. Б.², Калинин М. С.², Кодуков А. В.¹, Ло Си³

¹ СПбГТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия, dapavlov@etu.ru

² ФИАН, г. Москва, Россия

³ Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), г. Цзинань, Китай

Представлены МГД-симуляции КОВ на расстояниях от Солнца 0.1 а. е. (внутренняя граница гелиосферы) до 20 а. е. в двух вариантах: (1) карта магнитного поля на фотосфере определяется из детальной синоптической карты; (2) магнитное поле на фотосфере представлено наклонным диполем; при этом токовый слой на внутренней границе является большим кругом, наклонённым под углом α к экватору.

На внутренней границе радиальная компонента скорости вычисляется с помощью модели WSA по геометрии силовых линий, в свою очередь определяемых с помощью моделей PFSS и SCS. Во втором варианте расчёта величина скорости фактически является функцией углового расстояния от наклонного токового слоя, а радиальное магнитное поле вычисляется по среднему модулю B_r на орбите Земли за данный оборот Солнца.

Собственно МГД-моделирование осуществляется с помощью программного пакета PLUTO [1] по методике, описанной в [2]. Исследуемым периодом времени в обеих симуляциях является КО 2066 (январь-февраль 2008 г.), причём граничные условия предполагаются стационарными в течение нескольких оборотов Солнца. Проведено сравнение механизмов образования и эволюции КОВ с расстоянием в двух моделях.

1. Mignone A., Bodo G., Massaglia S., Matsakos T., Tesileanu O., Zanni C. // *ApJSS* 2007. V. 170, p. 228

2. Shen F., Yang Z., Zhang J., Wei W., Feng X. // *ApJ* 2018. V. 866. P. 18

Моделирование долгого распределения интенсивности ГКЛ, обусловленного коротирующими областями взаимодействия в гелиосфере

Крайнев¹ М.Б., Калинин¹ М.С., Luo² X., Potgieter³ M.S.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China

³Institute for Experimental and Applied Physics, Christian Albrechts University, Kiel, Germany

Для моделирования методом стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) долгого распределения интенсивности протонов ГКЛ на орбите Земли используется МГД-симуляция коротирующих областей взаимодействия (КОВ) до расстояний 30 а. е. МГД-моделирование проводится на основе наблюдений солнечных магнитных полей и т. н. WSA-связей между скоростью солнечного ветра и формой силовых линий магнитного поля в короне для кэррингтоновского оборота 2066 (январь-февраль 2008 г.). Чтобы выделить основные закономерности образования и эволюции КОВ, при их моделировании учитываются лишь дипольные члены в разложении магнитного поля по сферическим функциям.

По результатам СДУ-моделирования сопоставляются долголетние зависимости относительных изменений $(\delta f = (f - \langle f \rangle) / \langle f \rangle * 100$, где $\langle f \rangle$ - усредненное по долготе значение f) всех гелиосферных и ГКЛ характеристик, что является стандартным форматом для обсуждения 27-дневных (или рекуррентных) вариаций характеристик. Кроме того, для некоторых долгот будут рассчитаны и обсуждены траектории псевдочастиц (в 4D пространстве - r , θ , ϕ и импульс p) от их проникновения в гелиосферу до орбиты Земли, а также их зависимость от общей полярности гелиосферного магнитного поля (A). Это может прояснить причины зависимости интенсивности протонов ГКЛ от долготы, также наблюдаемой разницы этой зависимости для протонов и электронов.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИФФУЗИИ В БЕЗГРАНИЧНОЙ ОБЛАСТИ.

Петухов И.С., Петухова А.С., Петухов С.И., Пинигин-Сосин Д.Д.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, i_van@ikfia.ysn.ru

Генерация солнечных космических лучей (СКЛ) происходит в солнечной атмосфере, тогда как их регистрация производится в межпланетном пространстве, в большинстве событий на орбите Земли. Для установления связи между регистрируемой интенсивностью СКЛ и интенсивностью в источнике необходимо учитывать ее изменение при инжекции и распространении в межпланетном пространстве. При диффузионном распространении частиц в случае нестационарного источника происходит сильное изменение пространственного распределения частиц, что затрудняет применение численных методов решения. Предложен метод решения, основанный на использовании квазиавтомодельной переменной.

Сформулированы рецепт получения квазиавтомодельной переменной и недостающее краевое условие, гарантирующее сохранение общего числа диффундирующих частиц. Сопоставление полученного численного решения с известным точным решением при импульсном во времени точечным источником показывает достаточную точность за исключением небольшой окрестности источника. Решена задача в случае нестационарного точечного источника. Баланс между общими количествами инжектированных и диффундирующих частиц в зависимости от времени показывает достаточную точность решения.

Полученные численные решения подтверждают адекватность метода для расчета нестационарного уравнения переноса частиц в безграничном пространстве.

Работа проводится при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FWRS-2021-0012).

МОНИТОРИНГ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА В 2024 ГОДУ

Зверев А.С., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, ZverevAS@ikfia.ysn.ru

В ИКФИА СО РАН с 2013 г., на основе использования данных международной базы NMDB и метода глобальной съемки в реальном времени [1], ведется непрерывный мониторинг пространственно-углового распределения космических лучей за каждый час измерений. Для этого рассчитываются 9 параметров космических лучей, обусловленных первыми двумя угловыми моментами функции пространственного распределения частиц в межпланетном пространстве. Проведенные исследования изменений поведения компонент функции распределения космических лучей показали [2], что перед началом большинства интенсивных геомагнитных бурь с амплитудой Dst ниже – 50 нТл, происходит резкое увеличение (превышение установленных критических значений) амплитуд зональных (северо-южных) компонент и это может служить предиктором начала геомагнитных возмущений с заблаговременностью от нескольких часов до 1-2 суток. Эффективность прогноза при таком подходе составляет величину не меньше 70%. В данной работе приводятся результаты мониторинга по прогнозу больших геомагнитных бурь наблюдавшихся в апреле-ноябре 2024 года. Из наблюдавшихся 16 возмущений геомагнитного поля, предикторы в анализируемых параметрах космических лучей проявились у 12. Также показано, что появление отдельных предикторов, при используемой методике, связано с попаданием Земли в крупномасштабные возмущения солнечного ветра без последующего проявления геомагнитных эффектов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FWRS-2021-0012). Мы выражаем благодарность базе данных NMDB [<http://www.nmdb.eu>], созданной в рамках программы Европейского Союза FP7 (контракт № 213007) за предоставление данных.

1. http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html
2. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Мониторинг геомагнитных возмущений на основе метода глобальной съемки в реальном времени // Солнечно-земная физика, Т. 5, №3, С.110-115, 2019. (Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Yu. Monitoring of geomagnetic disturbances using the global survey method in real time // Solar-terrestrial physics, V.5, no. 3, P. 93-97, 2019).

СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГИЧНЫЕ ПРОТОНЫ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ И В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В МАЕ 2024 г.

Дмитриев А.В.¹, Базилевская Г.А.², Власова Н.А.¹, Гинзбург Е.А.³, Дайбог Е.И.¹, Капорцева К.Б.^{1,4}, Логачев Ю.И.¹, Мягкова И.Н.¹, Суворова А.В.¹

1. НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, dalex@srd.sinp.msu.ru

2. ФИАН, г. Москва, Россия

3. ИПГ, г. Москва, Россия

4. Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия

Рассматривается поведение энергичных солнечных частиц во время экстремальной солнечной активности в мае 2024 г., когда на Солнце в активной области 13664 наблюдалось большое количество рентгеновских вспышек М и X классов, сопровождавшихся несколькими корональными выбросами масс (КВМ) типа гало. Солнечные протоны с $E > 10$ МэВ наблюдались в околоземном пространстве с 9 по 20 мая 2024 г. Основные солнечные протонные события (СПС) были связаны с эрупциями 9, 11 и 13 мая. Распространение солнечных протонов в событиях 9 и 11 мая происходило на фоне сильно возмущенной межпланетной среды. Сравнение особенностей временного профиля потоков частиц, измеренных на орбите Земли и в окрестностях точки либрации L1, позволило выделить некоторые характеристики, связанные с генерацией частиц на Солнце или вблизи него и с модуляцией потоков частиц структурами солнечного ветра. В докладе мы обсуждаем замедленный рост потоков протонов в начале СПС 9 мая, влияние на потоки протонов межпланетной ударной волны и межпланетного переходного слоя 10 мая и особенности временного хода протонов разных энергий в СПС 11 мая 2024 г., когда наблюдалось наземное возрастание СПС – GLE 74, вызванное протонами с $E > 1$ ГэВ.

Работа выполнена в рамках темы г/б НИР НИИЯФ 2.1, № г/р 122071200023-6.

Регистрация межпланетного коронального выброса масс вблизи орбиты Земли по данным IMAGE/EUV

Анфиногентов С.А., Рубцов А.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

В этом исследовании мы проанализировали изображения околоземного космического пространства, полученные инструментом EUV космического аппарата IMAGE 9 января 2005 г. на длине волны 304 Å, и обнаружили распространяющееся возмущение, которое мы связали с межпланетным корональным выбросом массы (КВМ).

Космический аппарат IMAGE был разработан для изучения плазмосферы Земли. Инструмент EUV получал изображения плазмосферы в линии 304 Å, которая формируется благодаря резонансному рассеянию солнечного излучения на ионах гелия. Таким образом, распределение яркости на изображении соответствует пространственному распределению концентрации однократно ионизированного гелия в околоземном пространстве. Спутник IMAGE находился в эксплуатации в 2000-2005 годах.

Обнаруженное нами событие наблюдалось 9 января 2005 года в виде нескольких ярких фронтов, движущихся на фоне Земли в направлении от Солнца. Яркость этих возмущений сравнима с яркостью излучения плазмосферы Земли. Если бы наблюдаемый объект находился в околоземном пространстве, то это означало бы, что концентрация гелия в нем близка к плазмосферной. Нами было выдвинуто предположение, что наблюдаемые возмущения распространяются в межпланетном пространстве и связаны с магнитным жгутом в составе коронального выброса масс, зарегистрированного космическим аппаратом SOHO/LASCO 5 января 2005 года. Кроме того, данный КВМ, а также входящий в его состав магнитный жгут, был зарегистрированы вблизи орбиты Земли космическими аппаратами WIND и ACE 9 января 2005 года. Мы провели совместный анализ изображений, полученных IMAGE/EUV, вместе с in situ наблюдениями WIND и ACE с учетом расположения всех трёх космических аппаратов, орбитального движения и ориентации спутника IMAGE, а также предполагаемого направления распространения КВМ. По изображениям объекта, полученным в разные моменты времени, нам удалось оценить расстояние до него, как 0.2 астрономических единиц. На основании проведённого анализа мы делаем вывод, что возмущение, наблюдаемое аппаратом IMAGE, распространялось за пределами магнитосферы Земли и, скорее всего связано с наиболее плотной частью КВМ — магнитным жгутом. Также отметим, что КВМ, наблюдавшийся SOHO/LASCO 5 января 2005 г. оказался единственным, который мог бы попасть в поле зрения IMAGE/EUV в исследуемый промежуток времени, а данные WIND и ACE хорошо согласуются с этой гипотезой.

Примечательно, что, проанализировав все доступные наблюдения IMAGE/EUV, мы не обнаружили других подобных явлений. Пока не ясно, почему это наблюдение настолько уникально, учитывая, что в 2000-2005 годах произошло много КВМ.

АНАЛИЗ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ICME С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА МИНИМУМА ВАРИАЦИЙ

Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Рязанцева М.О., Рахманова Л.С.

Институт космических исследований (ИКИ) РАН, г. Москва, Россия, aleks.xaa@yandex.ru

Работа посвящена исследованию особенностей внутренней структуры межпланетных проявлений выбросов корональной массы ICME, которые являются одним из крупномасштабных типов течений в солнечном ветре. По сравнению с другими типами течений эти события характеризуются повышенным содержанием дважды ионизированных ионов гелия, которое может достигать 10-15%. В работах [1,2] было предположено и статистически обосновано, что данная особенность может быть связана с электрическим током в центральной части ICME, насыщенным ионами гелия. Основной целью данной работы является проверка гипотезы о существовании подобных токов в ICME альтернативным способом при помощи метода минимума вариаций магнитного поля, который позволяет определить моменты приближения точки наблюдения к токовому слою.

В ходе работы проводился анализ временного хода параметров плазмы и межпланетного магнитного поля для подтипов ICME – магнитных облаков и событий типа Ejecta, отобранных согласно каталогу крупномасштабных явлений ИКИ (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>) за период 1976-2020 гг. Анализ выполнялся на основе двух наборов данных: среднечасовых значений параметров из базы данных OMNI и 3-секундных измерений на космическом аппарате WIND. Внутри отобранных событий были выделены интервалы времени с максимальным сближением космического аппарата с предполагаемым токовым слоем. Эти интервалы сопоставлялись с изменениями параметров солнечного ветра, в том числе относительным содержанием ионов гелия. В результате были обнаружены области вблизи токового слоя, для которых характерно повышенное содержание ионов гелия. Такие структуры наблюдаются в магнитных облаках, однако отсутствуют в событиях Ejecta. Существование подобных структур согласуется с проверяемой гипотезой об обогащенном гелием электрическом токе внутри ICME.

1. *Yermolaev Y.I. et al. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. 4. Helium abundance. // J. Geophys. Res. 2020. V. 125(7). e2020JA027878.*

2. *Khokhlachev A.A. et al. Helium Abundance Decrease in ICMEs in 23–24 Solar Cycles. // Universe. 2022. V. 8(11). 557.*

НАБЛЮДЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ТРАНЗИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ В ГЕЛИОСФЕРЕ ПЕРЕД МАГНИТНОЙ БУРЕЙ 10 - 12 МАЯ 2024 Г.

Лукманов В.Р., Родькин Д.Г., Слемзин В.А., Чашей И.В.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, lukmanov@prao.ru

Исследование комплексных структур типа КВМ/МКВМ в солнечном ветре, часто возникающих в гелиосфере в результате взаимодействия двух или более КВМ, очень важно из-за их повышенной геоэффективности, но их моделирование затруднено из-за отсутствия данных наблюдений за пределами солнечной короны. Яркое свидетельство такой сложной структуры было получено 10-12 мая 2024 года, когда сильнейшая с марта 1989 года магнитная буря была вызвана серией корональных выбросов массы, произошедших в одной и той же активной области 13664. Комплекс, образовавшийся из первых четырех КВМ серии, вызвал падение Dst-индекса до -412 нТл. Целью данного исследования является рассмотрение распространения этих МКВМ в гелиосфере с использованием наблюдений на трех этапах: в начальной точке, наблюдаемой с помощью коронографа LASCO C3, в средней гелиосфере методом межпланетных мерцаний и в солнечном ветре (СВ) в точке L1 с помощью космического аппарата ACE. Наблюдения межпланетных мерцаний были проведены 9 и 10 мая на радиотелескопе БСА ФИАН в Пушинской Радиоастрономической Обсерватории, который позволяет строить в режиме сканирования 2D-карту индекса мерцаний m^2 , связанного с повышенной интегральной по лучу зрения плотностью плазмы в диапазоне гелиоцентрических расстояний 0,4–0,8 а.е. Эволюция МКВМ в гелиосфере была описана с использованием модели конуса в автомобильном приближении и кинематики в соответствии с моделью, основанной на магнитодинамическом торможении МКВМ при взаимодействии с фоновым СВ. Первоначальные пространственные распределения плотности у основания конуса были определены по полученным LASCO C3 изображениям КВМ на высотах примерно 20 радиусов Солнца, а затем были масштабированы в соответствии с радиальными расстояниями до положения, соответствующего времени наблюдений на БСА ФИАН. Было показано, что смоделированное распределение интегральной плотности комплекса МКВМ по гелиоцентрическому расстоянию согласуется с распределением m^2 . Некоторые расхождения могут характеризовать изменение структуры плотности внутри комплекса из-за взаимодействия МКВМ. Смоделированная средняя объемная плотность плазмы МКВМ

Исследование спектров флуктуаций модуля и компонент магнитного поля плазмы солнечного ветра на обратных ударных волнах

Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н.

Институт космических исследований ИКИ РАН, sapunova_olga@mail.ru

Были рассмотрены колебания значений модуля и компонент межпланетного магнитного поля плазмы солнечного ветра вблизи фронта быстрой обратной ударной волны по данным спутника WIND с частотой опроса 11 Гц.

Было показано, что наклон спектров колебаний модуля межпланетного магнитного поля меняется как в МГД, так и на переходных масштабах, хотя и в разной степени. На переходных масштабах различие может быть значительным. Был проведен поиск быстрых обратных ударных волн, зарегистрированных спутниками THEMIS-B/C для сравнения спектров флуктуаций на разных спутниках.

Была определена частота излома спектра (0,7 – 1,2) Гц, показано, что она соответствует масштабу инерционной длины протона. Однако в ряде событий форма спектра указывает на влияние частоты гирорадиуса протона, которая обычно равна 0,05 – 0,15 Гц.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ НА УДАРНОЙ ВОЛНЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ HD 189733b

Кузнецов А.А., Зайцев В.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kuznetsov.alexey@ipfran.ru

Анализ радиоизлучения от экзопланет может стать эффективным способом изучения их плазменных оболочек. В докладе обсуждается возможность эффективной генерации радиоизлучения в области головной ударной волны экзопланет типа «горячий юпитер». В качестве источника энергичных электронов предложен дрейфовый механизм ускорения на квазиперпендикулярной ударной волне. Быстрая магнитозвуковая ударная волна сопровождается сжатием магнитного поля, поэтому выступает в качестве движущегося магнитного зеркала, от которого электроны однократно отражаются и ускоряются. Этот механизм широко обсуждается при исследовании ускорения электронов на земной головной ударной волне [1], межпланетных ударных волн и корональных ударных волн, порождающих радиовсплески II типа [2]. Отраженные от ударной волны и ускоренные ею электроны распространяются в сравнительно плотной и слабозамагниченной плазме звездного ветра, возбуждая плазменные волны. Поэтому сделано предположение о генерации радиоволн посредством плазменного механизма [3].

В докладе на примере экзопланеты HD 189733b с одной стороны оценена плотность кинетической энергии W потока электронов, ускоряемых при отражении от экзопланетной ударной волны. С другой стороны, оценена плотность энергии возбуждаемых ускоренными электронами плазменных волн W , необходимая для генерации посредством плазменного механизма достаточно интенсивного для регистрации радиоизлучения. Из условия $W \gg W$ в докладе оценивается область параметров звездного ветра, при которых обнаружение радиоизлучения из области экзопланетной ударной волны энергетически возможно. Также оценен диапазон частот, в котором генерируется радиоизлучение.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-22-00014.

1. Wu C. S. A fast Fermi process: Energetic electrons accelerated by a nearly perpendicular bow shock // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1984. Oct. Vol. 89, A10. P. 8857–8862.
2. Mann G., Klassen A. Electron beams generated by shock waves in the solar corona // Astronomy and Astrophysics. 2005. Sept. Vol. 441, no. 1. P. 319–326.
3. Zaitsev V., Stepanov A. The plasma radiation of flare kernels // Solar Physics. 1983. Oct. Vol. 88, no. 1/2.

ПРОЕКЦИОННЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ 3D МАТРИЦЫ ЧИСЛА РЕАЛИЗАЦИЙ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Сухарева Н.А.^{[1],[2]}, Антонов Ю.А.^[1], Захаров В.И.^{[1],[3]}, Мягкова И.Н.^[2], Шугай Ю.С.^[2]

^[1] МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, suhareva@physics.msu.ru

^[2] Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

^[3] Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН

Для описания эволюции магнитного поля Солнца рассмотрен статистический ансамбль состояний гелиосферы и определены основные количественные меры ансамбля на выбранном интервале наблюдений. Координаты каждой из ячеек пространства состояний исследуемой системы индексируются тремя значениями, определяющими позицию регистрируемого вектора магнитного поля в системе координат GSE. Фактически описываемая матрица соответствует 3D-гистограмме с единым масштабом отображения параметров компонент временного ряда. При работе со сложными профилями матрицы числа реализаций результативны методы, оперирующие проекциями матрицы на набор плоскостей, образуемых ортами системы координат GSE или какими-либо информативными для исследуемого процесса направлениями. Рассмотрим пример отображения на плоскости, ортогональные осям X, Y, Z , которые содержат принадлежащие им орты -- $(YZ), (XZ), (XY)$. Пусть задано распределение числа реализаций для каждого из узлов регистрируемого массива $N_{x,y,z}$ и выполнено проецирование вдоль направления Z на плоскость (XY) . В результате получим три 2D распределения числа реализаций в проекции на три выбранных взаимно ортогональных плоскости. Каждое из распределений может быть в полиномиальном разложении аппроксимировано рядом пространственных центральных статистических моментов. В зависимости от степени используемой аппроксимации, – симметричной квадратичной (эллиптическое приближение), асимметричной третьего порядка, симметричной четвертого порядка, определяем статистические метрики анализируемых распределений. Для эллиптического приближения в каждой из трех плоскостей проекции такими метриками будут два диаметра аппроксимирующего эллипса и угол наклона большей оси к направлению проецирования распределения.

Пример эллиптической аппроксимации выборки длительностью 50000 отсчетов с шагом дискретизации в 1 минуту и шагом квантования 1 нТ представлен на Рис.1. Каждая из трех проекций характеризуется шестью мерами – двумя диаметрами, углом наклона большего диаметра к оси X в GSE, и вектором смещения центра распределения в системе GSE.

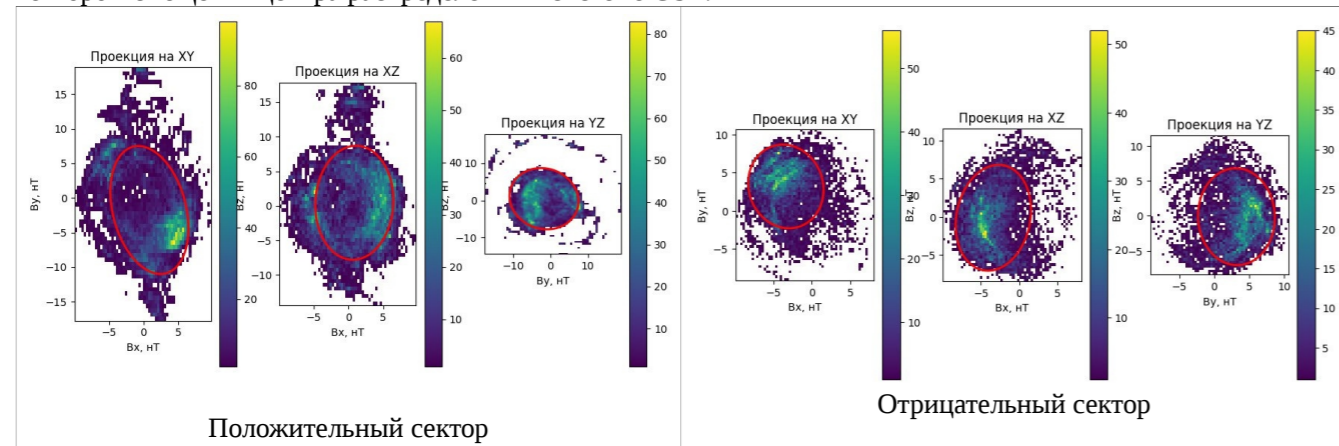


Рис.1. Примеры эллиптической аппроксимации проекций числа реализаций в режимах положительной и отрицательной полярности магнитного поля Солнца.

Отобранные меры для описания структуры матрицы числа реализаций состояний имеют одинаковую вычислительную сложность, наследуя от исходного распределения типы симметрии, и важное для решаемых задач свойство суперпозиции структурных компонент.

Работа выполнена в рамках Государственного задания 115041410195 «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве».

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЕРРА В АНАЛИЗЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ СТАТИСТИКИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Звев Н.В., Королев В.Ю., Сухарева Н.А., Хайдапашич Р.М.

МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, zuev.nv17@physics.msu.ru

Исследуется представимость распределения Бёрра в виде смеси распределений Вейбулла с целью обоснования его полезности для моделирования статистических закономерностей экстремальных значений, регистрируемых в нестационарных потоках информативных событий, прежде всего ММП.

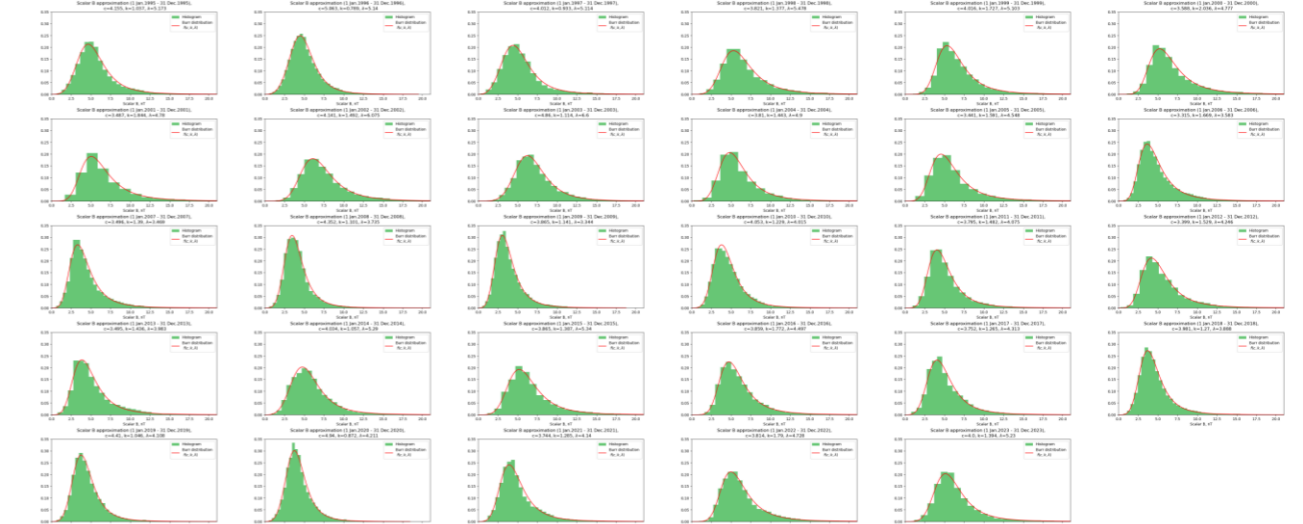


Рис.1 Асимптотика годовых выборок МПП с 1995 по 2024 годы и контур аппроксимации

Ранний результат улучшен путем расширения области допустимых значений параметров, обеспечивающих представимость обобщенного распределения Бёрра в виде масштабной смеси распределений Вейбулла. Этот результат позволяет рассматривать распределение Бёрра в качестве модели статистических закономерностей экстремальных значений, регистрируемых в пределах умеренных регулярных интервалов времени, например, ежедневных (краткосрочных) экстремумов (Рис.1). В свою очередь, если нас интересуют статистические закономерности поведения абсолютного экстремального наблюдения за длительный период, например, столетие (долгосрочный экстремум), то можно отметить, что ежедневные экстремальные значения образуют выборку распределенных по Бёрру случайных величин.

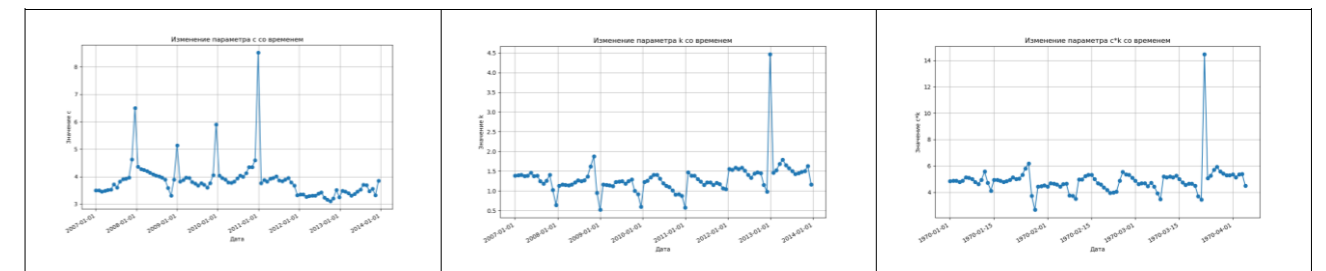


Рис.2 Вариация аппроксимирующих параметров распределения Берра

Представленные результаты иллюстрируются на примере аппроксимации распределения Бёрра как для данных, представляющих экстремальные значения характеристик межпланетного магнитного поля так и для первичных временных рядов (Рис.2). Обсуждается постановка задачи прогноза состояния ММП на основе исследуемых асимптотик.

1. Bening V., Korolev V., Sukhareva N., Hong Xiaoyang, Khaydarparshich R. The Burr distribution as an asymptotic law for extreme order statistics and its application to the analysis of statistical regularities in the interplanetary magnetic field //Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2024. – Т. 39. – №. 2. – С. 61-74..

РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В МАГНИТОСЛОЕ В ПЕРИОДЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ICME С МАГНИТОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rakhnud@gmail.com

Известно, что основными источниками глобальных магнитосферных возмущений являются межпланетные проявления корональных выбросов массы (ICME), включая области сжатия перед ними. Однако, даже в периоды наблюдения ICME на орбите Земли магнитосферные возмущения наблюдаются не всегда или их амплитуда сравнительно невелика. Как правило, при анализе взаимодействия крупномасштабных структур солнечного ветра с магнитосферой не учитывается присутствие перед магнитопаузой возмущенной переходной области - магнитослоя, - в которой происходит поджатие магнитных силовых линий, изменение направления магнитного поля, а также существенное увеличение мощности флуктуаций всех параметров. Процессы, происходящие в магнитослое, могут вносить вклад в отклик магнитосферы на межпланетные возмущения, и их исследование представляет особый интерес для понимания солнечно-земных связей.

Как показал ранее статистический анализ изменений характеристик турбулентности плазмы на околоземной ударной волне и при распространении в магнитослое, существуют особенности развития турбулентного каскада для различных типов возмущенных и невозмущенных потоков солнечного ветра. В настоящей работе на основе ряда событий рассматривались изменения свойств турбулентного каскада в магнитослое в периоды воздействия ICME на магнитосферу Земли. Были проанализированы как ICME, сопровождающиеся значительным откликом магнитосферы, так и те, при которых индексы геомагнитной активности изменялись слабо. Рассмотрено, как изменяется скейлинг флуктуаций магнитного поля на МГД и кинетических масштабах на основе одновременных измерений спутников Wind в солнечном ветре и THEMIS в магнитослое, а также одновременное изменение индексов геомагнитной активности. Таким образом, особенности развития турбулентного каскада вблизи границ магнитосферы определены для наиболее геоэффективных явлений в межпланетной среде.

РОЛЬ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ФОРМИРОВАНИИ СПЕКТРА ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Тревес Т.В.¹ Рязанцева М.О.², Хабарова О.В.^{3,1}, Рахманова Л.С.²

¹ *ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия, timothy.treves@gmail.com*

² *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

³ *Raymond & Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel*

Работа направлена на изучение роли токовых слоев (ТС) в формировании спектра турбулентных флуктуаций и в механизмах диссипации в солнечном ветре. Локальный неадиабатический нагрев и ускорение заряженных частиц является одной из наиболее актуальных задач в современных исследованиях межпланетного космического пространства. Наиболее популярные теоретические подходы связывают эти эффекты с турбулентным нагревом, часто ассоциированным с магнитным пересоединением в маломасштабных когерентных структурах солнечного ветра, таких как ТС и магнитные жгуты. В работе проведена идентификация ТС, наблюдаемых на расстоянии 1 а.е. по данным спутника WIND в различных типах солнечного ветра, в том числе вблизи и внутри межпланетного коронального выброса массы (ICME), и одновременно проведен анализ соответствующих характеристик спектров турбулентных флуктуаций межпланетного магнитного поля. Установлено, что в областях повышенной вероятности наблюдения ТС, наблюдаются ярко выраженные изменения спектров флуктуаций, что может привести к локальным нарушениям передачи энергии вдоль турбулентного каскада. Анализ спектров в окрестности областей с максимальным числом ТС показывает их укрупнение на МГД-масштабах и уплощение на кинетических масштабах, что в ряде случаев фактически приводит к исчезновению излома на спектре. В более широкой окрестности областей с максимальным числом ТС параметры спектров флуктуаций могут претерпевать резкие изменения, однако не удается выявить какую-то закономерность характера этих изменений. Статистический анализ показывает четкую корреляцию между частотой излома спектра флуктуаций и количеством ТС. Эти результаты согласуются с концепцией турбулентного пересоединения в ТС, определяющей характер диссипации в потоках их содержащих. Также установлено, что частота появления ТС статистически связана с увеличением температуры.

ТРАНСФОРМАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СПЕКТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАМКАХ ОБОЛОЧЕЧНОГО ПОДХОДА

Дуканов И. А.^{1,2}, Юшков Е. В.^{1,3}, Соколов Д. Д.^{1,2}

dukanov.ia21@physics.msu.ru

1 - Физический Факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия; 2 - ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия; 3 - ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Солнечный ветер – одно из важнейших связующих звеньев в системе Солнце-Земля, однако ни физика его формирования, ни физика эволюции еще до конца не ясны. Этот факт стал основной причиной запуска в 2018 году спутниковой миссии Parker Solar Probe (PSP), сконцентрированной на исследовании солнечного ветра. За первые пять лет работы эта миссия обеспечила огромный приток новых данных с высоким временным разрешением и большой вариацией гелиоцентрических расстояний. В частности, она позволила детально изучить спектры флуктуаций полей солнечного ветра: поля скорости и магнитного поля, и по-новому взглянуть на турбулентный каскад, формирующийся в межпланетной плазме [1].

Данные PSP подтвердили ранее обнаруженное наличие в картине спектральной плотности флуктуаций энергии магнитного поля двух изломов, первый из которых расположен вблизи субионного масштаба, а второй – на левом конце инерционного интервала, то есть в области вихрей большого масштаба. Единого мнения на счет эволюции этих маркеров пока не сложилось, поэтому на данный момент изучение динамики этих изломов является ключевым. И если для описания околорассеивающего излома необходимым кажется привлечение кинетического подхода, то эволюцию крупномасштабного излома, видимо, можно описать, оставаясь в рамках МГД-парадигмы. Кроме этого, по-прежнему открытым остается вопрос, какие числа Рейнольдса [2] наблюдаются в плазме солнечного ветра, как они влияют на баланс энергии, и какую роль играет то или иное соотношение спиральностей.

Для описания турбулентного каскада мы используем оболочечную или, по-другому, каскадную модель из работы [3]. Класс оболочечных моделей для систем гидродинамического типа [4] представляет из себя Фурье-образы системы МГД-уравнений, в которых образы нелинейных слагаемых приближены суммой квадратичных нелинейностей так, чтобы в бездиссипативном случае выполнялись законы сохранения трехмерной МГД. При этом непрерывная спектральная шкала заменяется набором дискретных оболочек, а в нелинейных слагаемых учитывается обмен энергией только между соседними оболочками. В таком подходе мы используем данные PSP вблизи Солнца как входные и изучаем в процессе свободного вырождения турбулентного каскада возможную эволюцию спектров и динамику движения крупномасштабного излома. Полученные результаты каскадного моделирования сравниваются с данными PSP на оси Солнце-Земля и на основании сравнения делается вывод о применимости оболочечного анализа и гипотезы свободного вырождения.

Авторы хотели бы выразить искреннюю благодарность П. Г. Фрику за полезные советы и предоставленную модель, а также команде Parker Solar Probe и CDAWEB за предоставленные спутниковые данные.

1. Chen C. H. K. et al. The evolution and role of solar wind turbulence in the inner heliosphere //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2020. – Т. 246. – №. 2. – С. 53.

2. Wrench D. et al. What is the Reynolds Number of the Solar Wind? //The Astrophysical Journal. – 2024. – Т. 961. – №. 2. – С. 182.

3. Мизёва И. А., Степанов Р. А., Фрик П. Г. Влияние перекрестной спиральности на каскадные процессы в МГД-турбулентности //Доклады Академии Наук. 2009. – Т. 424. – №. 4. – С. 479-483.

4. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели.– 2003.

ЭВОЛЮЦИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА.

Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Ермолаев Ю.И., Хохлачев А.А., Застенкер Г.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, m.riazantseva@cosmos.ru

Сравнение характеристик турбулентных флуктуаций на различных расстояниях от Солнца дает возможность проследить развитие турбулентного каскада в гелиосфере. Интерес к этой проблематике обусловлен возможным вкладом турбулентного нагрева в различие между измеренными и предсказанными в адиабатическом приближении значениями температуры солнечного ветра в зависимости от расстояния до Солнца. Актуальность исследований свойств солнечного ветра и его вариаций на пути от Солнца к Земле также определяется задачей прогнозирования космической погоды. Работа посвящена анализу характеристик спектров флуктуаций межпланетного магнитного поля по одновременным наблюдениям на космических аппаратах SolO (Solar Orbiter) и WIND в различных крупномасштабных типах течения солнечного ветра. WIND проводит постоянные измерения в окрестности точки либрации L1, SolO движется по сложной орбите вокруг Солнца. Для анализа выбраны примеры длительных рядов данных с радиальным расположением космических аппаратов вблизи линии Солнце-Земля и с различными расстояниями между ними. При сравнении измерений на двух космических аппаратах отслеживаются одни и те же плазменные пакеты с учетом времени их распространения. Такой подход позволяет напрямую проследить эволюцию турбулентности в локальном объеме плазмы, в отличие от косвенного сопоставления по результатам статистического анализа, часто приводимого в литературе. В работе показано, что на МГД масштабах Колмогоровский скейлинг спектров флуктуаций наблюдается на 0.5 а.е, и далее при распространении плазмы к орбите Земли остается практически неизменным. На кинетических масштабах спектры флуктуаций заметно круче на 0.5 а.е, уплощаются и приходят в соответствие с теоретическими описаниями в окрестности точки либрации L1. Таким образом, развитие турбулентного каскада, вероятно, идет в несколько этапов, и окончательное формирование спектра флуктуаций происходит ближе к орбите Земли. Выявлено, что эволюция турбулентных флуктуаций в гелиосфере универсальна и слабо зависит от типа солнечного ветра. Показано, что мощность флуктуаций, зависящая от расстояния от Солнца, является более важным фактором для формирования турбулентного каскада, чем крупномасштабный тип течения солнечного ветра.

Исследование низкочастотных колебаний магнитного поля и потока ионов солнечного ветра, возникающих перед рампом межпланетной ударной волны

Бородкова Н.Л.*, Сапунова О.В., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н.

Институт космических исследований РАН

* - borodkova_nl@cosmos.ru

По данным плазменного спектрометра БМСВ, измеряющего энергетические спектры ионов солнечного ветра, дополненных измерениями магнитного поля, исследовались цуги колебаний магнитного поля и потока ионов солнечного ветра, возникающих перед рампом межпланетной ударной волны. Показано, что колебания магнитного поля перед рампом межпланетной ударной волны сопровождаются колебаниями потока ионов солнечного ветра. Проведен подробный анализ отдельных событий и представлены результаты статистического исследования.

Показано, что все цуги колебаний магнитного поля имели правостороннюю круговую или эллиптическую поляризацию, что согласуется с характеристиками магнитозвуковых колебаний, соответствующих низкочастотной части вистлеровских колебаний. Получено, что средние значения углов распространения вистлеровских волн относительно среднего направления магнитного поля $\theta_{кв}$ и нормали к фронту $\theta_{кн}$ составляли 31° и 40° , соответственно. Полученный результат указывает на то, что волновые пакеты перед рампом межпланетной ударной волны распространялись преимущественно наклонно как по направлению к нормали к фронту ударной волны, так и к магнитному полю.

Получено, что, в среднем, с ростом угла распространения вистлеровских волн относительно нормали к фронту ударной волны $\theta_{кн}$ уменьшается угол между волновым вектором и направлением магнитного поля, $\theta_{кв}$.

Яркие температуры и электронные концентрации сантиметрового радиоизлучения отдельных областей северной полярной области Солнца, открытой во время наблюдений максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 ©.

Голубчина О.А.

СПб Ф САО РАН

golubchina_olga@mail.ru

Наблюдение солнечного затмения 29.03.2006 г. выполнено в сантиметровом диапазоне длин волн на радиотелескопе РАТАН-600. В работе дан краткий обзор полученных физических характеристик отдельных областей радиоизлучения открытой северной полярной области Солнца при прохождении Солнца и Луны через диаграмму направленности антенны РАТАН-600 во время максимальной фазы солнечного затмения ($\Phi = 0.998$). Обсуждаются результаты наблюдения открытого серпа западного лимба Солнца, протуберанца полярной области Солнца, активной солнечной группы, восходящей из-за восточной части солнечного лимба. Обсуждаются полученные распределения электронной концентрации сантиметрового радиоизлучения ($\lambda = 1.38 - 30.7$) см открытого западного лимба Солнца. Приводятся данные о возможной нижней границе формирования солнечного ветра открытой полярной корональной области Солнца во время максимальной фазы солнечного затмения (29.03.2006 г.) на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА СОЛНЕЧНО-СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 20-25 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ МЕТОДОМ СКРЕЩЕННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

Гололобов П.Ю., Герасимова С.К., Григорьев В.Г.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru

Известно, что наблюдаемые наземными детекторами солнечно-суточные вариации (ССВ) космических лучей обнаруживают зависимость от цикла солнечной активности испытывая амплитудно-фазовые изменения. Так, амплитуда ССВ изменяется с 11-летней периодичностью положительно коррелируя с солнечной активностью, а фаза обнаруживает 22-летнюю цикличность смещаясь на раннее время в минимуме солнечной активности в период положительной полярности общего магнитного поля Солнца. Подобное поведение нередко приписывается к изменению характера дрейфа КЛ в гелиосфере при переполюсовках магнитного поля Солнца. С другой стороны, такое поведение может быть частично связано с изменением энергетического спектра ССВ.

Для решения этой задачи предложен подход с использованием скрещенных направлений телескопов, разность фаз и отношения амплитуд которых позволяют производить количественную оценку динамики энергетического спектра ССВ в циклах солнечной активности. Для анализа были использованы данные измерений скрещенных северных и южных направлений станций мюонных телескопов Якутск, Нагоя, Сао-Мартиньо и Хобарт за 1972-2023 гг. Полученные результаты сопоставляются с расчетными значениями. Показано, что в минимумах солнечной активности в периоды положительной полярности общего магнитного поля Солнца наблюдается значительное смягчение спектра. Полученные результаты обсуждаются.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2021-0012).

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ: УЧЕТ ДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Герасимова С.К.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru

Метод глобальной съемки, разработанный в 1960-х гг. в ИКФИА СО РАН, предназначен для мгновенного определения динамики пространственно-углового распределения космических лучей (КЛ) по данным регистрации мировой сети нейтронных мониторов за каждый час измерений. Ранее при реализации метода нами использовались статические энергетические спектры вариаций интенсивности КЛ, определенные ранее на основе долговременных измерений. Такой подход применялся вследствие недостатка информации о динамике спектров. С другой стороны известно, что во время возмущений межпланетной среды энергетические спектры часто испытывают достаточно значительные изменения. Поэтому, их определение является важной и актуальной задачей, которая позволяет повысить достоверность результатов глобальной съемки и изучать различные физические механизмы модуляции КЛ во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра (СВ). В данной работе представлены первые результаты определения динамики пространственно-углового распределения КЛ с учетом изменений энергетических спектров во время возмущений СВ. Полученные нами результаты сопоставляются с результатами, полученными другими авторами, которые используют другие методы исследования КЛ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2021-0012).

3D и 2D ТРАНСПОРТНОЕ УРАВНЕНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЯХ ГЕЛИОСФЕРЫ.

М.С. Калинин, М.Б. Крайнев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

e-mail: kalininms@lebedev.ru

В работе приводятся результаты редукции полного трёхмерного по пространственным координатам транспортного уравнения галактических космических лучей. Показано, что полученное осесимметричное уравнение не сводится к априорному уравнению, в котором долготная составляющая скорости дрейфа частиц выпадает из рассмотрения. В общем виде проводится связь между 3D решением транспортного уравнения и его 2D редуцированного аналога. Показано, что 3D скорость дрейфа в части дрейфа вдоль гелиосферного токового слоя сохраняется в 2D редуцированном уравнении, а регулярный дрейф приобретает множитель F , $0 < F < 1$, зависящий от широты и имеющий смысл усреднённой по долготе полярности гелиосферного магнитного поля. Подробно анализируются условия на 3D глобальном гелиосферном токовом слое, влияние которого на 3D решение при численных подходах обычно описывается только качественно. Анализ проведён в рамках современной модели гелиосферы, использующейся в 3D подходах для описания данных измерений. Основные результаты демонстрируются рисунками.

Каталоги типов солнечного ветра и их роль в солнечно-земной физике

Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Рязанцева М.О., Ермолаев М.Ю., Хохлачев А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yermol@iki.rssi.ru

Реакция магнитосферы на межпланетные драйверы зависит от их вида. Надежность их идентификации влияет на выводы анализа связей между солнечным ветром и магнитосферой. В данной работе мы анализируем список умеренных и сильных геомагнитных бурь и их межпланетных источников за период 2009 - 2019 гг, представленных в работе Qiu et al. Показано, что часть событий в этом списке была определена неправильно, и их интерпретация отличается в ~20% случаев от нашего каталога Ермолаев и др. (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/>) для типов солнечного ветра Sheath, ICME и CIR, и в ~28% случаев от каталога Richardson and Cane для ICME. Использование нескорректированного списка Qiu et al. может приводить к неправильной идентификации межпланетных драйверов магнитных бурь и ошибочным выводам. Рекомендуется использовать классификацию межпланетных событий из каталогов событий, принятых научным сообществом в качестве эталонных.

По мере поступления новых данных в базе OMNI2 (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni), каталог обновляется и дополняется новыми результатами идентификации различных типов солнечного ветра.

Продолжается работа по развитию и дополнению каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра, который расположен на сайте <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni>.

В 2025 году идентифицировано:

- 29 магнитных бурь (среднее значение Dst индекса = -82,9 нТл),
- 27 межпланетных проявлений выброса корональной массы (ICME), из которых 9 магнитных облаков и 18 Ejecta,
- 16 областей сжатия Sheath,
- 22 областей сжатия перед быстрыми потоками CIR.

5й год 25 солнечного цикла находится в максимальной фазе. Анализ данных показывает, что динамика солнечного ветра и, как следствие, динамика магнитосферных возмущений в первые 5 года 25-го солнечного цикла, развиваются по сценарию похожем на аналогичные периоды 23 и 24 солнечных циклов эпохи ослабленного солнечного ветра (Yermolaev et al., JGR, 2021).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-12-00227.

ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 23-24 МАРТА 2023 Г: КОРРЕЛЯЦИЯ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ШИРОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е.

СПбФИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия, mdl1555@mail.ru

Под действием геомагнитного поля заряженные частицы галактических космических лучей меняют свою траекторию. Часть из них, с жесткостью ниже характерного для пункта их измерения порогового значения (называемого жесткостью геомагнитного обрезания, R) не доходят до земной поверхности. Из-за экранирующего характера магнитного поля Земли на экватор проникает существенно меньше частиц, чем на высокие широты. Во время геомагнитных возмущений внутри магнитосферы формируются глобальные токи, которые подавляют геомагнитное экранирование.

В данной работе во время сильной магнитной бури 23-24 марта 2023 г. R были рассчитаны двумя методами: (1) спектрографической глобальной съемки по наблюдательным данным регистрации космических лучей мировой сетью станций (R_{CGS}) и (2) методом, в котором траектории частиц космических лучей вычисляются численно в модельном магнитном поле магнитосферы Ts01 ($R_{\text{эф}}$). ΔR определялись как разности между значениями жесткостей, рассчитанными для каждого часа в период бури, и жесткостями в спокойный период перед бурей — 12 марта 2023 г. Жесткости геомагнитного обрезания определялись для девяти разноширотных станций космических лучей, которые в спокойное время охватывают большую полосу жесткостей обрезания от 11 до 2 ГВ.

Далее были рассчитаны корреляции вариаций жесткостей геомагнитного обрезания ΔR_{CGS} и $\Delta R_{\text{эф}}$ с магнитными и динамическими параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности Dst и Kp .

Выявлено, что значения изменения жесткостей геомагнитного обрезания для данной бури, вычисленные обоими методами, наиболее сильно коррелируют с Dst и магнитными параметрами солнечного ветра. Сколь-нибудь существенной корреляции с динамическими параметрами не наблюдается. Анализ показал, что реакция ΔR_{CGS} на контролируемые магнитные параметры и Dst меняется с широтой станции наблюдения: корреляция достигает наибольших значений на средних широтах и значительно падает к экватору. Корреляции $\Delta R_{\text{эф}}$, вычисленные с помощью модели, не показывают широтной зависимости.

1. Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 2, с. 160–171. 2021.
2. Tsyganenko N.A. // J.Geophys. Res. V. 107. No. A8. P.1176. 2002.
3. Dvornikov, V.E. and Sdobnov, V.E. //Int. J. Geomagn. Aeron., 2002, V. 3, pp. 217–223.

ВЛИЯНИЕ ВИНТОВОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАГНИТНОГО ОБЛАКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ

Петухова А.С., Петухов И.С., Петухов С.И.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, i_van@ikfia.ysn.ru

Выбросы корональной массы (КВМ) являются известным и важным источником геомагнитных возмущений. Степень воздействия КВМ зависит от магнитной структуры магнитного облака (МО), являющегося частью КВМ. Воздействие КВМ на космические лучи (КЛ) называют спорадическим форбуш-понижением (ФП). Из измерений характеристик ФП можно получить сведения о МО. Механизмом формирования ФП может быть электромагнитный механизм, в котором винтовое магнитное поле в МО обеспечивает квазизахват КЛ. При этом длительность захвата прямо пропорциональна амплитуде ФП, т. е. величине понижения интенсивности КЛ.

Рассчитаны характеристики ФП, сформированного электромагнитным механизмом в МО, в зависимости от моделей винтового поля. Проведено сопоставление с результатами базовой модели, в которой МО представлено крупномасштабной петлей, соединенной обоими концами с Солнцем и полностью заполненной винтовым полем. Рассчитаны следующие варианты моделей: 1) МО не соединенное с Солнцем; 2) МО с уменьшенной закрученностью; 3) МО с выпрямленным полем в областях связывающих облако с Солнцем. Выявлена зависимость характеристик ФП от свойств моделей магнитного поля.

В моделях МО соединенного с Солнцем, получено:

- 1) увеличение амплитуды ФП при уменьшении закрученности винтового поля в МО;
- 2) увеличение амплитуды ФП при уменьшении области МО, занятого винтовым полем;

В моделях МО не соединенных с Солнцем, получено:

- 3) уменьшение амплитуды ФП. Эффект более выражен для низких энергий.

Полученные результаты объясняются зависимостью длительности квазизахвата КЛ от структуры винтового магнитного поля в МО.

Результаты расчета могут быть использованы при интерпретации наблюдаемых характеристик ФП в МО.

Работа проводится при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект FWRS-2021-0012).

СОЛНЕЧНО-СУТОЧНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ЗА 71 ГОД НАБЛЮДЕНИЙ

Белова Е.А., Белов А.В., Абунина М.А., Шлык Н.С., Янке В.Г., Оленева В.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, lbelova@izmiran.ru

Получены ежесуточные вектора солнечно-суточной анизотропии КЛ по данным станции Сlітах за 1953-2006 гг. Проведено сопоставление этих результатов с аналогичными векторами, полученными по данным ст. Москва за 1966-2006 гг. и методом глобальной съёмки за 1957-2006 гг. В спокойные периоды между результатами, полученными по разным данным и разными методами, имеется хорошее согласие. Сформирован однородный надежный ряд годовых средних векторов солнечно-суточной анизотропии для космических лучей жесткостью 10 ГВ и спокойных периодов за 1957-2023 годы.

АНОМАЛЬНЫЕ КОМЕТНЫЕ ХВОСТЫ И 11-ЛЕТНИЙ ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Гулиев А.С.¹, Гасымов Г.А.²

¹Шемахинская Астрофизическая Обсерватория, Азербайджан, quliyevaayub@gmail.com

²Бакинский Инженерный Университет, Азербайджан

Исследование зависимости отдельных кометных характеристик и параметров от фазы 11-летнего цикла солнечной активности (СА) имеет давнюю историю. В настоящей работе анализируется возможное влияние СА на образование у некоторых комет также и аномальных хвостов. В ней мы постараемся ответить на вопрос о том, в каких фазах СА чаще всего появляются аномальные кометные хвосты. Поставленная задача носит сугубо статистический характер. Сопоставляются эпохи (Т) образования аномальных хвостов с фазами (F) СА в соответствующей дате. Данные, касающиеся аномальных кометных хвостов, взяты из диссертации Сафарова [1], в которой собрана информация о 78 кометах с такими структурами. А данные по фазам СА взяты из сайта https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/spot_num.txt. С учетом асимметрии кривой СА Величина F нормирована так, что интервалам соответствуют равные периоды времени, как это делалось в работе [2]. Распределение N(F) приводится на рисунке. Оно характеризуется средним и среднеквадратичным отклонением 5.32 и 1.20, соответственно. Применение t-распределение Стьюдента [3] показывает, распределение неравномерное, что обусловлено максимумом (N= 7.4) в интервале 0.7 -0.8. Доверительная вероятность максимума в этом интервале составляет больше 0.95. В остальных интервалах вероятности отклонений от среднего находятся в пределах статистических ошибок. Более детальный анализ показывает, что самым насыщенным интервалом F является 0.67 -0.77 (N=9.88).

Вывод: Аномальные кометные хвосты чаще образуются в период спада СА.

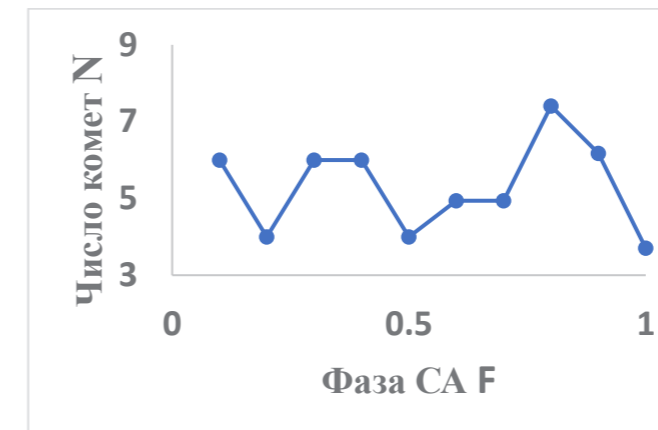


Рис. Частота появления аномальных кометных хвостов на отдельных фазах СА

1. Сафаров, А.Г. Исследование условия образования аномального хвоста комет. Диссертация на соиск. уч. ст. кан. физ. мат. наук. Душанбе. – 2018. – 125 с.
2. Гулиев А.С. Гасымов Г.А. Научные Труды ИНАСАН, 2020, т.4.,201-206.
3. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 479 с

ДУАЛЬНЫЕ КУМУЛИРУЮЩИЕ К И УБЕГАЮЩИЕ ОТ СОЛНЦА ПОКИ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕЛИОСФЕРЕ - КУЛОНОВСКОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОТОКОМ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

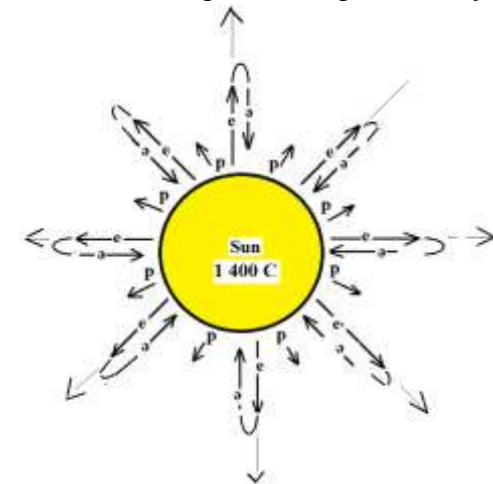
Высикайло Ф.И.

МГОУ, г. Москва, Россия, filvys@yandex.ru

В модели Высикайло (в отличие от модели Pannekoek (1922)-Rosseland (1924)-Eddington (1926)) в квази-постоянной неоднородной гелиосфере электронный ток к положительно заряженному Солнцу практически равен току электронов высокой энергии от Солнца. Эти токи отличаются друг от друга величиной тока положительных ионов от Солнца. В результате этих потоков формируется солнечный ветер и ЭДС положительно заряженной гелиосферы. В модели Высикайло мы имеем:

$$n_{e2} v_{e2} = n_{e1} v_{e1} + \sum Z_i n_i v_i \quad (1)$$

Здесь n_{e2} , v_{e2} - концентрация и скорость электронов высокой энергии, вылетающих из гелиосферы; n_{e1} , v_{e1} - концентрация и скорость электронов, возвращающихся к Солнцу. Высоко энергичные электроны (диссипирующие энергию Солнца и гелиосферы) покидают потенциальную яму – положительно заряженное Солнце и положительно заряженную гелиосферу, в то время как электроны с меньшей энергией замедляются электрическим полем в гелиосфере и отражаются к положительно заряженному Солнцу кулоновским потенциальным барьером, возникающим из-за положительного заряда Солнца в 1400 Кл, см. рисунок. Как показали оценки, энергия высоко энергичных электронов, покидающих гелиосферу, составляет более 18 кэВ [1]. Низко энергичные электроны (с энергией менее 18 кэВ) отражаются барьером (кумулируются и ускоряются) к Солнцу его кулоновским потенциалом. В области короны Солнца они сталкиваются друг с другом и у них из-за электрон-электронных столкновений и взаимодействия с кулоновским барьером во всей гелиосфере устанавливается профиль температуры – $T_e(R)$ (для запертых электронов) [1]. При этом положительные ионы с $Z/M \geq 0,107$ постоянно ускоряются электрическим полем и покидают положительно заряженную гелиосферу или кумулируют в отрицательно заряженные планеты (Земля имеет отрицательный заряд порядка 500 000 Кл. Положительные ионы с $Z/M < 0,107$ падают на Солнце, так как силы гравитации, действующие на них превышают кулоновские силы отталкивания от положительно заряженного Солнца, но их ток ничтожен по сравнению с током протонов и альфа-частиц. Постоянный отток высоко энергичных электронов в гелиосферу компенсируется уходом положительных ионов, формирующих солнечный ветер и притоком энергии в хвост функции распределения энергии электронов при электрон-электронных столкновениях в области солнечной короны во время их кумуляции к Солнцу [1]. Наличие магнитного поля Солнца и дуальность потоков электронов в области короны Солнца приводят к ряду обсуждаемых в докладе явлений.



дуальность потоков электронов в области короны Солнца приводят к ряду обсуждаемых в докладе явлений.

Рисунок. Схемы движения электронов - e и положительно заряженных ионов - в гелиосфере согласно модели Высикайло (1-2) (p - положительно заряженные ионы с $Z/M \geq 0,107$).

1. Vysikaylo P.I. (2022) Quantitative Investigation Nonequilibrium Inhomogeneous Plasma of the Heliosphere With Runaway Electrons // IEEE Trans. Plasma Sci. V. 50, № 4, pp. 810-816 DOI: 10.1109/TPS.2022.3160189 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9745462>

СЕКЦИЯ «Ионосфера»

Понедельник, 10.02.2025 г., Конференц-зал

Председатель: Лукьянова Р.Ю.			
	Время	Ф.И.О. докладчика	Название доклада
1	09.00 - 09.15	Будовкина А.А. и др.	СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИПЕРО И РАЗЛИЧНЫМ ВЕРСИЯМ МОДЕЛИ НWM
2	09.15 - 09.30	Шелков А.Д. и др.	СРАВНЕНИЕ НОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗА 2022-2023 ГОДА
3	09.30 - 09.45	Кириллов А.В. и др.	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТРИПЛЕТНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В СПРАЙТАХ И РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ
4	09.45 - 10.00	Рябова С.А.	ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ИНТЕНСИВНУЮ МАГНИТНУЮ БУРЮ 23–24 МАРТА 2023 ГОДА ПО ДАННЫМ ЕВРОПЕЙСКИХ СРЕДНЕШИРОТНЫХ СТАНЦИЙ ВЫСОТНО-ЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
5	10.00 - 10.15	Куминов А.А.	ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫСОТЫ СРЕДНЕШИРОТНОГО СЛОЯ Е-СПОРАДИЧЕСКОГО ИОНОСФЕРЫ
6	10.15 - 10.30	Клименко М.В. и др.	ОТКЛИК СРЕДНЕШИРОТНОЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ ДНЯ ПОБЕДЫ 10-12 МАЯ 2024 ГОДА: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
	10.30 - 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	

Председатель: Клименко М.В.			
7	11.00 - 11.15	Поклад Ю.В. и др.	ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 10-11 МАЯ 2024 ГОДА
8	11.15 - 11.30	Миронова И.А. и др.	ОТКЛИК НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В 2024 ГОДУ
9	11.30 - 11.45	Шубин В.Н.	ГЛОБАЛЬНАЯ МЕДИАННАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ E-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
10	11.45 - 12.00	Книжин С.И. и др.	ВЫХОД ЗА РАМКИ ФРЕНЕЛЕВСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ
11	12.00 - 12.15	Лукьянова Р.Ю.	МУЛЬТИ-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ДОМИНИРУЮЩЕЙ АЗИМУТАЛЬНОЙ (VU) КОМПОНЕНТЫ ММП
	12.15 - 14.00	Пленарные доклады	
	14.00 - 15.00	Обед	
Председатель: Падохин А.М.			
12	15.00 - 15.15	Павлов И.А. и др.	СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ

13	15.15 - 15.30	Козлов С.В. и др.	ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ НАНОСПУТНИКОВ
14	15.30 - 15.45	Савиных И.Э. и др.	РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМОВ РАДИОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК»
15	15.45 - 16.00	Захаров В.И. и др.	ВЛИЯНИЕ КРУПНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ
16	16.00 - 16.15	Ряховский И.А. и др.	ОЦЕНКА ВКЛАДА D ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ В ВЕЛИЧИНУ ПРИРАЩЕНИЯ ПЭС ВО ВРЕМЯ СЕРИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СЕНТЯБРЕ 2017 Г.
17	16.15 - 16.30	Воробьев А.В. и др.	СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ALL-SKY КАМЕР
	16.30 - 17.00	Перерыв на кофе	
Председатель: Чернышов А.А.			
18	17.00 - 17.15	Крашенинников И.В. и др.	ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ И СУБАВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО КОМПЛЕКСНОМУ РАДИОЗОНДИРОВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ
19	17.15 - 17.30	Баишев Д.Г. и др.	СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОБЫТИЙ STEVE И PF НА ЯКУТСКОМ МЕРИДИАНЕ

20	17.30 - 17.45	Синевич А.А. и др.	ПРОЯВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА, ЕГО СТРАТ И STEVE ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ, А ТАКЖЕ ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РЕГИОНАЛЬНЫМ КАРТАМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
21	17.45 - 18.00	Савельева Н.В. и др.	ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ КНЧ ШУМОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ: ШУМАНОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ, ЛЭП, И ПЕРЕДАТЧИК ЗЕВС
	18.00 - 18.30	Постерная сессия	

Доклады постерной сессии секции «Ионосфера»

2.1. Мирмович Э.Г., ОСОБЕННОСТИ И АППРОКСИМАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИЕЙ ЗАВИСИМОСТИ ИОНИЗАЦИИ ТЕРМОСФЕРЫ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

2.2. Мирмович Э.Г., НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ

2.3. Бахметьева Н.В. и др. НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ ВОСХОДА И ЗАХОДА СОЛНЦА В ГОДЫ МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

2.4. Морозова Т.И., Попель С.И., ЭЛЕКТРОФОННЫЕ ЗВУКИ ОТ ПРОЛЕТОВ МЕТЕОРОИДОВ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

2.5. Мальцева О.А., Никитенко Т.В., МАГНИТНАЯ БУРЯ 10-12 МАЯ 2024 В ИОНОСФЕРЕ: АСИММЕТРИЯ ОТКЛИКА ДВУХ ПОЛУШАРИЙ

Вторник, 11.02.2025 г., Комната 200

		Председатель: <u>Лукьянова Р.Ю.</u>	
	Время	Ф.И.О. докладчика	Название доклада
22	09.00 - 09.15	Савинцева Е.Д. и др.	ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА WASP-39b
23	09.15 - 09.30	Воеводин С.В. и др.	РЕГИСТРАЦИЯ НА СТЕНДЕ НПМ-01 МАГНИТНОГО ПОЛЯ МГД-ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИПОЛЕМ», И СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ
24	09.30 - 09.45	Бахметьева Н.В. и др.	ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕОБЫКНОВЕННОЙ РАДИОВОЛНОЙ ПРИ ЛОКАЦИИ НА ЧАСТОТЕ, БЛИЗКОЙ К НАГРЕВНОЙ
25	09.45 - 10.00	Грач С.М. и др.	ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА НА ОПТИЧЕСКОЕ СВЕЧЕНИЕ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ 2021-2024 ГГ.
26	10.00 - 10.15	Петрова И.А. и др.	РЕЖИМ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ВДОЛЬ СИСТЕМ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
27	10.15 - 10.30	Николенко А.С. и др.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛОБКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ, РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ПРИ РАЗЛЁТЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ПОПЕРЕК МАГНИТНОГО ПОЛЯ
	10.30 - 11.00	Перерыв на кофе	

Председатель: Чернышов А.А.			
28	11.00 - 11.15	Зудин И.Ю. и др.	ДВУМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВИСТОВЫХ ВОЛН F-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ ПРИ НАЛИЧИИ ДАКТА ПЛОТНОСТИ
29	11.15 - 11.30	Кочедыков В.В. и др.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ В КРУПНОМАСШТАБНОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ И МАГНИТОСФЕРЕ
30	11.30 - 11.45	Сурков В.В.	МОДОВАЯ СТРУКТУРА ГЕОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ РС5 ДИАПАЗОНА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ВО ВРЕМЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В АТМОСФЕРЕ
31	11.45 - 12.00	Грушин В.А. и др.	МНОГООБРАЗИЕ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ДИАПАЗОНЕ 0-20kHz ДАТЧИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОЕКТЕ “ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП)” НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО И РАЗЛИЧНЫМ ВЕРСИЯМ МОДЕЛИ HWM

Будовкина А.А., Едемский И.К., Артамонов М.Ф., Васильев Р.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, abudovkina@mail.iszf.irk.ru

В основе настоящей работы лежат данные об интенсивности атмосферного свечения, полученные на интерферометре Фабри-Перо, установленного в Геофизической обсерватории (ГФО) Института солнечно-земной физики СО РАН (с. Торы, 52° N, 103° E) [1]. Определение интенсивности свечения в зональном и меридиональном направлениях позволяют восстанавливать величины соответствующих компонент горизонтального ветра в ночное время [2].

Хорошо известная модель HWM (Horizontal Wind Model) – модель горизонтального нейтрального ветра в верхней атмосфере в своей основе является эмпирической и базируется на данных о ветре, полученных с различных наземных и спутниковых инструментов [3]. Актуальной является версия модели HWM14, но наряду с ней востребованы версии HWM93 и HWM07. Измерения, лежащие в основе модели HWM, в основном получены с приборов, расположенных в Западном полушарии, и корректность модельного прогноза для Восточно-Сибирского региона требует проверки.

В настоящей работе проводится анализ сезонной динамики компонент нейтрального ветра в течение 2022 г. по данным интерферометра Фабри-Перо и модельным вычислениям тремя версиями модели: HWM93, HWM07 и HWM14. Анализ выполнен для времени локальной ночи (10 - 24 UTC). Данные были разделены по сезонам, относительно дней солнцестояния и равноденствия.

Ошибка предсказания моделью каждого компонента ветра варьирует как в течение суток, так и в зависимости от сезона. При этом можно заключить, что ни одна из версий модели не может использоваться для нашего региона, как единственный точный вариант. Например, для меридионального ветра наименьшую ошибку прогноза чаще всего показывала версия модели HWM07, при этом для этого же времени того же сезона лучший результат для зонального ветра могла показывать версия модели HWM14. Таким образом, каждая из рассмотренных версий HWM в среднем дает ошибочное предсказание для Байкальского региона и можно заключить, что модель требует доработки. Полученные результаты можно использовать при выборе версии модели для предсказания нейтрального ветра в заданные сезон и время.

1. Васильев Р. В., Артамонов М. Ф., Белецкий А. Б., Жеребцов Г. А., Медведева И. В., Михалев А. В., Сыренова Т. Е. Регистрация параметров верхней атмосферы Восточной Сибири при помощи интерферометра Фабри—Перо KEO Scientific «Arinae» // Солнечно-земная физика. 2017. №. 3. С. 70-87. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-33201707> (дата обращения: 10.01.2025).

2. Васильев, Р. В. Сравнительный статистический анализ поведения скорости нейтрального ветра в области мезосферы / нижней термосферы средних широт по данным измерений метеорным радаром и интерферометром Фабри - Перо / Р. В. Васильев, М. Ф. Артамонов, Е. Г. Мерзляков // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 86-95. – DOI 10.12737/szf-42201808. – EDN LVXTQT.

3. Drob, D. P., et al. (2015), An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere, *Earth and Space Science*, 2, 301–319, doi:10.1002/2014EA000089.

СРАВНЕНИЕ НОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ И ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗА 2022-2023 ГОДА

Шелков А.Д., Васильев Р.В., Артамонов М.Ф., Ратовский К.Г.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, alshel@iszf.irk.ru

Явление предрассветного усиления свечения красной линии атомарного кислорода 630 нм известно еще с 1959 года. Однако, оно все еще представляет интерес для исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Интерферометры Фабри-Перо НГК РАН способны обнаруживать это усиление. В комбинации с другими инструментами можно исследовать транспорт вещества и энергии из магнитосопряженной области.

В данной работе, в дополнение к ИФП, использовался цифровой ионозонд DPS-4. Чтобы перейти от вариаций к абсолютным значениям интенсивности, была проведена фотометрическая калибровка интерферометра. Для этого строилось соотношение отклика ИФП и теоретической интенсивности свечения на основе данных ионозонда по электронной концентрации. В расчет не брались вклад тепловых и сверхтепловых электронов. Отклик ИФП брались во время его максимальной корреляции с электронной концентрацией (рис. 1).

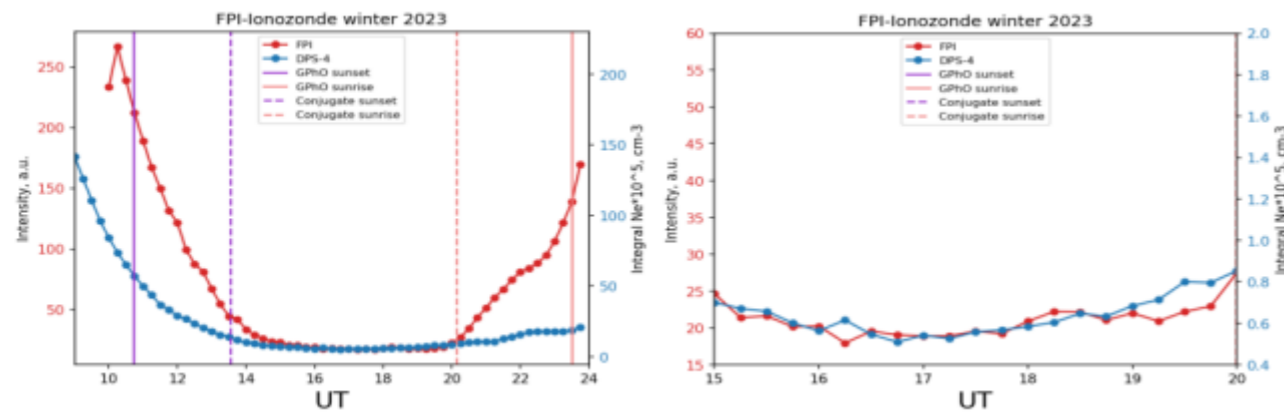


Рисунок 1. Сопоставление интенсивности линии 630 нм по данным ИФП (красная линия) и электронной концентрации по данным DPS-4 (синяя линия). Вертикальные линии показывают время локального (сплошная линия) и магнитосопряженного (пунктир) заката/рассвета на высоте 250 км.

После калибровки, было проведено сравнение температуры нейтральной компоненты, интенсивности свечения 630 нм и электронной концентрации за 2022-2023 года. Данные были усреднены по сезонам (+45 дней от равноденствий/солнцестояний). Показано, что присутствует динамика вышеуказанных параметров, вероятно, связанная с ростом солнечной активности.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТРИПЛЕТНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В СПРАЙТАХ И РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

Кириллов А.С.¹, Тарасенко В.Ф.^{1,2}, Виноградов Н.П.^{1,2}, Кириллов В.А.^{1,3}

¹Полярный геофизический институт, г. Анатиты, Россия, kirillov@pgia.ru

²Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

³Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

Спрайты – это мезосферные разряды, которые высвобождают и ускоряют большое количество электронов. Их появление формирует импульсы оптического излучения в различных спектральных областях и образование некоторых химических веществ.

Для изучения свойств спрайтов разработана модель электронной кинетики молекулярного азота для высот 40-90 км атмосферы Земли в условиях электрического разряда с продолжительностью импульса порядка нескольких микросекунд. Модель включает кинетику триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $V^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) электронно-возбужденных состояний N_2 с учетом переноса энергии возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях и спонтанных излучательных переходах. Модель позволяет рассчитывать интенсивности свечения полос первой (излучательные переходы $V^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$) и второй (излучательные переходы $C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$) положительных систем N_2 как в смеси N_2-O_2 , как и в чистом азоте при электрических разрядах. Результаты моделирования спектров излучения азота в полосах первой и второй положительных систем сравниваются с результатами экспериментальных измерений при давлениях, соответствующим высотам над уровнем моря 40-90 км. Теоретически и экспериментально показано, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей колебательных уровней состояния $V^3\Pi_g$ и уменьшению интенсивностей свечения полос первой положительной системы N_2 .

Для экспериментальных исследований подготовлены две установки на основе разрядных камер из кварцевых трубок, имеющих внутренние диаметры 5 и 8 см. Во второй установке применены три секции, это обеспечивает возбуждение воздуха и азота низкого давления с различной длительностью импульсов тока разряда, в том числе микросекундной и миллисекундной. Также созданы генераторы, работающие при различных частотах следования импульсов. На данных установках проведены предварительные измерения спектров излучения для азота и воздуха для в диапазоне 250-1000 нм при давлениях, соответствующим высотам над уровнем моря 40-90 км.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 25-22-00158.

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ИНТЕНСИВНУЮ МАГНИТНУЮ БУРЮ 23–24 МАРТА 2023 ГОДА ПО ДАННЫМ ЕВРОПЕЙСКИХ СРЕДНЕШИРОТНЫХ СТАНЦИЙ ВЫСОТНО-ЧАСТОТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Рябова С.А.^{1,2}

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, ²ИДГ РАН, г. Москва, Россия, ryabovasa@mail.ru

Солнечная активность является основным фактором, вызывающим возмущения ионосферы Земли. Сильные ионосферные возмущения могут оказывать значительное влияние на функционирование радиотехнических систем, использующих ионосферный радиоканал. Это же относится к устойчивости работы глобальных навигационных спутниковых систем, таких как ГЛОНАСС и GPS.

В настоящей работе выполняется исследование ионосферного отклика в период интенсивной магнитной бури $K_p \sim 7$ с минимальным значением $SymH \sim -170$ нТл, которая наблюдалась 23–24 марта 2023 года. Космическая погода была вызвана геоэффективным выбросом корональной массы, который появился в поле зрения LASCO C2 примерно в 14:42 UT 20 марта 2023 года. Это было связано с солнечной вспышкой класса C4.4, произошедшей в AR13258, которая находилась в точке N18E18. Прибытие межпланетного ударного фронта зарегистрировано в 13:40 UT 23 марта. Геомагнитное возмущение началось с SSC в 14:11 UT 23 марта. Главная фаза бури началась в ~17:30 UT 23 марта с резким поворотом ММП к югу и появлением отрицательного градиента $SymH$. Главная фаза продолжалась до времени минимального значения Dst-индекса (3:00 UT 24 марта), после чего началась восстановительная фаза магнитной бури. Развитие главной фазы происходило при уже сформировавшемся кольцевом токе на фоне мало меняющихся и незначительных по величине скорости и динамического давления солнечного ветра.

При выполнении настоящих исследований в качестве исходных данных использовались данные вертикального зондирования ионосферы, размещенные на сайте Глобальной ионосферной радиообсерватории (GIRO). Анализировались вариации параметров ионосферы для средних широт в Европейском регионе.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (FMWN-2025-0003).

ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫСОТЫ СРЕДНЕШИРОТНОГО СЛОЯ E-СПОРАДИЧЕСКОГО ИОНОСФЕРЫ

Куминов А.А.

ЦАО Росгидромета, г. Долгопрудный, Россия, airship@mail.mipt.ru

20-летний ряд значений действующей высоты слоя E-спорадического ионосферы $h'E_S$, полученных на станции вертикального зондирования ионосферы Пуатье (Франция) с 1970 по 1989 годы был подвергнут Фурье-разложению. Полученный Фурье-спектр обнаруживает четыре хорошо выраженных участка: 1) низкочастотный с периодами гармоник, большими года; 2) группу гармоник годовой вариации с периодами между 1 годом и 1/5 года; 3) группу гармоник суточной вариации и 4) среднечастотный участок спектра с периодами, большими суток и меньшими двух месяцев.

В докладе исследуется годовая вариация $h'E_S$, полученная как сумма гармоник с периодами от 1,1 года до 45 суток. Синтезированный временной ряд был поделен на 20 годовых отрезков, затем методом наложения эпох была получена хорошо выраженная среднеклиматическая годовая вариация $h'E_S$ (рис. 1 слева).

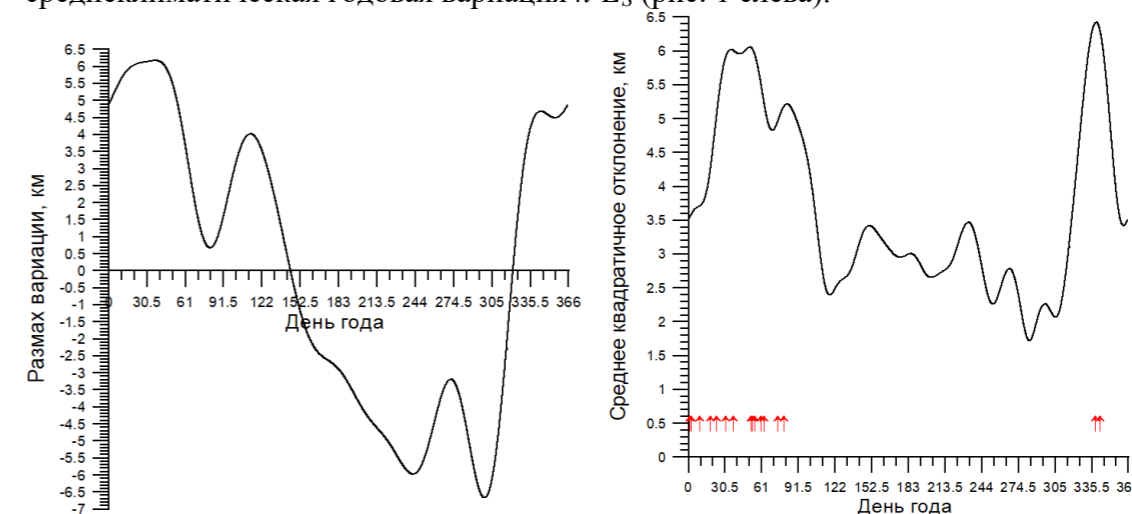


Рис. 1. Среднеклиматическая годовая вариация $h'E_S$ (слева) и годовой ход ее дисперсии (справа)

Из рис. 1 слева видно, что переходы между зимними и летними высотными режимами происходят довольно быстро в третьей декаде мая и в середине ноября. Заметны и внутрисезонные особенности: устойчивые от года к году локальные мартовский минимум и позднесентябрьский максимум.

Поскольку рассчитана среднеклиматическая годовая вариация $h'E_S$, следует посчитать и годовой ход среднеквадратичного отклонения отдельных годовых вариаций от среднеклиматической. Оказалось, что зимняя дисперсия в два раза больше летней (рис. 1 справа). Переходы между зимними и летними режимами изменчивости происходят довольно быстро: в третьей декаде апреля и в первые дни ноября.

Ранее в [1] было показано, что зимняя изменчивость в вариациях $h'E_S$ обусловлена появлением нерегулярных минимумов $h'E_S$, которые, в свою очередь связаны с мажорными внезапными стратосферными потеплениями. На рис. 1 справа в иллюстративных целях стрелками отмечены центральные дни года мажорных ВСП, случившихся в 1970-1989 годах.

В докладе обсуждается также межгодовая изменчивость годовой вариации $h'E_S$.

1. Куминов А.А. // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXX Международного симпозиума. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024. С. E114-E118. – Электронный ресурс: <https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/30/E.pdf>

ОТКЛИК СРЕДНЕШИРОТНОЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ГЕОМАГНИТНУЮ БУРЮ ДНЯ ПОБЕДЫ 10-12 МАЯ 2024 ГОДА: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Клименко М.В.1, Белюченко К.В.1,2, Носиков И.А.1, Тамченко А.В.1, Борчевкина О.П.1, Ефишов И.И., Чернышов А.А.3, Чугунин Д.В.3, Синевич А.А.4, Лебедев В.П.5, Ратовский К.Г.5, Ряховский И.А.6

1 КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, maksim.klimenko@mail.ru

2 СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

3 ИКИ РАН, г. Москва, Россия

4 ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

5 ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

6 ИДГ РАН, г. Москва, Россия

Интерпретация ионосферных возмущений в периоды геомагнитных бурь является наиболее важным и сложным вопросом современной физики ионосферы [1]. Для корректного решения этого вопроса необходимо использовать как доступный набор данных наблюдений параметров термосферы и ионосферы, так и результаты численных моделей верхней атмосферы Земли. В этом докладе представлен подробный анализ воздействия магнитной бури (названной нами «Буря Дня Победы», поскольку солнечные вспышки и выбросы корональных масс вызвавших эту бурю произошли 8–9 мая 2024 года), которая произошла с 10 по 12 мая 2024 года и стала самым значительным геомагнитным событием XXI века на сегодняшний день, на среднеширотную верхнюю атмосферу с использованием различных инструментов и методов наблюдений. Исследование основано на данных спутниковых систем (Swarm, DMSP, TIMED), наземных магнитометров, ионозондов, сигналов ОНЧ (очень низкой частоты), приемников GNSS (глобальная навигационная спутниковая система) радара некогерентного рассеяния и камеры всего неба. Для верификации возможностей модели воспроизвести эффекты такого уникального события космической погоды мы провели расчеты на глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) эффектов геомагнитной бури 10-12 мая 2024 г. Были рассмотрены основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании ионосферных эффектов на разных фазах развития геомагнитной бури.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 10-11 МАЯ 2024 ГОДА

Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Лобанова В.С., Ряховский И.А.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, poklad@mail.ru

В работе [1] нами была предложена методика восстановления параметров нижней ионосферы в рамках модели Фергюссона-Уайта во время рентгеновских вспышек на Солнце. Восстановление параметров велось на двухчастотной трассе распространения сигналов от двух передатчиков GQD и GBZ, расположенных в Великобритании и принятых в геофизической обсерватории «Михнево», расположенной на юге Московской области. Особенностью этой методики является то, что она позволяет восстанавливать временной ход параметров h' (эффективная высота отражения СДВ радиосигналов) и β (скорость нарастания электронной концентрации с высотой) ионосферы в течении всей вспышки, в том числе и начальные значения h' и β перед вспышкой. В данной работе, используя идеи изложенные в [1], мы разработали методику восстановления параметров ночной ионосферы, используя данные о ее состоянии днем.

8-10 мая 2024 г на Солнце произошла серия мощных рентгеновских вспышек M и X классов. Для этих вспышек были восстановлены параметры h' и β дневной ионосферы. Используя параметры дневной ионосферы в качестве начальных данных, по вариации амплитуды сигналов до и после прохождения терминатора, были определены параметры h' и β для ночной ионосферы.

10 мая, начиная с 17 часов UT на Земле произошла сильная магнитная буря класса G5, которая, в том числе, повлияла на параметры принятых радиосигналов. На восстановленных параметрах ионосферы видно, что в ночь с 10 на 11 мая эффективная высота отражения уменьшилась с примерно 82 км до 74 км. Высота 74 км примерно соответствует эффективной высоте отражения дневной ионосферы. Этим, по-видимому, и объясняется то, что эффекты магнитных бурь в большей степени проявляются ночью.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6 с использованием данных полученных на среднеширотном комплексе геофизических наблюдений «Михнево».

1. Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Поклад Ю.В., Ряховский И.А. // Геомагнетизм и аэрномия 2019. V. 59 P. 628.

ОТКЛИК НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В 2024 ГОДУ

Миронова И.А.¹, Доронин Г.Г.¹, Бобров Н.В.¹

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru

За последние два десятилетия самыми сильными геомагнитными бурями были бури осенью 2003 года. Однако в 2024 году произошел ряд солнечных эруптивных событий который привел к ряду геомагнитных возмущений, например в мае и октябре 2024. Экстремальная геомагнитная буря была зарегистрирована в мае 2024 года, и была классифицирована как геомагнитная буря класса G5, по классификации NOAA (Kp = 9), что сделало ее самой мощной бурей после 2003 года.

В докладе предполагается показать последние результаты по исследованию отклика высокоширотной ионосферы/атмосферы на высыпания энергичных частиц во время геомагнитных возмущений 2024 года связанных с эруптивными событиями. В данной работе подробно исследуются высыпания электронов и протонов в разные периоды геомагнитной активности и различной интенсивности солнечных эруптивных событий. Будут показаны проанализированные потоки высыпаний частиц полученные по данным со спутника POES (приборов METOP01, METOP03, NOAA15, NOAA18 и NOAA1) с марта по октябрь 2024 года.

Оценки электронной концентрации нижней ионосферы, образования озон-разрушающих компонент атмосферы и разрушения мезосферного озона будут даны во время геомагнитных возмущений и солнечных эруптивных событий с использованием одномерной фотохимической радиационно-конвективной модели с учетом ионной химии, а также с использованием наблюдений с спутника MLS.

Работы связанные с изучением высыпаний энергичных частиц в ионосферу Земли выполнены в рамках государственного задания СПбГУ №116234986. Работы связанные с изучением эффектов от энергичных частиц в ионосфере/атмосфере Земли выполнены в рамках договора между СПбГУ и МГУ по гранту РФФИ № 22-62-00048.

ГЛОБАЛЬНАЯ МЕДИАННАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ Е-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Шубин В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, shubin@izmiran.ru

Предлагаемая глобальная медианная модель критической частоты E-слоя (foE) ионосферы построена с помощью высотных профилей электронной концентрации, полученных из измерений методом радиозатмения, и данных foE наземных ионосферных станций. Для построения модели были использованы радиозатменные данные низкоорбитальных спутников CHAMP (2001–2008), COSMIC (2006–2020), COSMIC-2 (2019–2023), FY-3C (2014–2020), FY-3D (2019–2023), FY-3E (2022–2023). Из полученных радиозатменных профилей были выделены максимумы электронной концентрации в диапазоне высот 90–135 км. Максимумы электронной концентрации с большими высотными градиентами, которые относились к спорадическим E-слоям, при построении модели устранялись с помощью специальных фильтров.

Построенная модель сравнивается с Международной моделью IRI и измерениями foE на наземных ионосферных станциях Москва (55.5°N, 37.3°E) и Подкаменная Тунгуска (61.6°N, 90.0°E).

ВЫХОД ЗА РАМКИ ФРЕНЕЛЕВСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Книжин С.И., Зверев М.А., Продан П.Е., Котов Д.В., Лебедев В.П.

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия, sergeiknizhin@mail.ru

Изучение физических процессов, протекающих в ионосферной плазме Земли, необходимо для широкого круга фундаментальных и прикладных задач. Данные исследования являются важной составляющей для совершенствования методов передачи радиосигналов на дальние расстояния, радиолокационных исследований околоземного пространства, для обеспечения точной и бесперебойной работы спутниковых систем радиосвязи и радионавигации, а также для прогнозирования космической погоды и др.

С появлением спутниковых технологий появились новые методы исследования ионосферы Земли, которые предоставляют уникальную возможность для глобального мониторинга ионосферы с высоким временным и пространственным разрешением. Одной из наиболее перспективных в настоящее время является спутниковая диагностика, реализуемая с помощью низкоорбитальных искусственных спутников Земли. С помощью спутников можно реализовать простую схему измерений. В ней радиопередатчик, расположенный на борту движущегося по орбите спутника, излучая сигнал через определенные интервалы времени, синтезирует линейку источников, а на поверхности земли располагается стационарная линейка приемников, регистрирующая поле радиоволн, прошедших через неоднородную плазменную среду.

Как правило, спутниковую диагностику разделяют на лучевую и дифракционную. Методы лучевой диагностики являются наиболее развитыми и основываются на геометрическом приближении, в рамках которого характеристики принимаемого сигнала представляют собой линейные интегралы вдоль лучей, имеющие на высоких частотах вид прямых линий. Для учета дифракционных и многолучевых эффектов используют методы дифракционной диагностики. Для сред, вызывающих слабые флуктуации фазы и амплитуды волны, используют приближение Борна и Рытова. В условиях сильных флуктуаций фазы волны обычно используют приближение фазового экрана, однако данная модель требует априорной информации о местонахождении неоднородных плазменных структур. Метод двойного взвешенного Фурье преобразования (ДВФП) позволяет учитывать дифракционные и многолучевые эффекты при сильных флуктуациях фазы и амплитуды волны в отсутствие информации о местонахождении исследуемых неоднородностей [1]. Для повышения разрешающей способности дифракционной диагностики в условиях сильных вариаций фазы и амплитуды волны можно воспользоваться двукратной пространственной обработкой поля на основе метода ДВФП, выполненной относительно координат источника и приемника [1]. В рамках эксперимента данную пространственную обработку поля можно реализовать на сети синхронизированных приемников сигналов низкоорбитальных спутников. Каждый из приемников будет работать на базе технологии SDR в двухканальном режиме (на частотах 150 МГц и 400 МГц). В частности, планируется, что приемники будут регистрировать сигналы недавно запущенной отечественной группировки исследовательских гелиофизических низкоорбитальных спутников «Ионосфера-М».

Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России (Задание № FZZE-2023-0004).

МУЛЬТИ-ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ДОМИНИРУЮЩЕЙ АЗИМУТАЛЬНОЙ (BY) КОМПОНЕНТЫ ММП

Лукьянова Р.Ю.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, lukianova@cosmos.ru

Представлены результаты сравнительного анализа распределения продольных токов, высокоширотных высыпаний, электронной концентрации и конвекции ионосферной плазмы в условиях продолжительных периодов ММП северного направления и (1) $BY \approx +10$ нТл и (2) $BY \approx -10$ нТл. Продольные токи получены по данным наблюдений спутников AMPERE и Swarm, высыпающиеся частицы – по данным DMSP, траектории конвекции – по измерениям радаров SuperDARN и по результатам численного моделирования; электронная концентрация рассчитана по эмпирической модели IRI и по региональной численной модели. Показано, что возмущения ионосферных параметров в северном полушарии концентрируются вблизи полюса и существенно различаются при противоположных знаках ММП BY. Интенсивность высыпаний при $BY > 0$ гораздо больше, чем при $BY < 0$. Численные модели адекватно воспроизводят ионосферные неоднородности в приполюсной области, где эмпирические модели не обладают достаточной точностью из-за отсутствия наблюдательной сети. Модельное распределение электронной концентрации в полярной шапке показывает формирование приполюсного пика плотности плазмы при $BY > 0$ и истощение плазмы при $BY < 0$, что соответствует направлению продольных токов и структуре высокоширотных высыпаний, которые наблюдаются спутниками. Именно при $BY > 0$ в северной полярной ионосфере формируется ‘циклонический вихрь’, который эффективно передает энергию и импульс солнечного ветра в ионосферу в течение нескольких часов северного ММП. Приведены оценки для электрического поля, проникающего из полярной шапки в средние широты.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ.

Павлов И.А.^{1,2}, Падохин А.М.^{1,2}, Илюшин Я.А.³.

¹ ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ipavlov@izmiran.ru

² ИСЗФ СО РАН, Иркутская обл., Россия

³ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Статистический анализ временных и пространственных изменений в ионосфере необходим для улучшения системы коротковолновой радиосвязи и для увеличения точности ассимилятивных ионосферных моделей.

Для исследования пространственной и временной изменчивости в работе используются данные сети европейской сети GNSS станций EUREF за 2018 год, которые пересчитываются по оригинальному алгоритму [1] в данные вертикального полного электронного содержания (ν TEC), а также данные проекта Magrigal [2].

Оценка пространственно-временных характеристик ионосферы производится методами вариографии. Построение вариограммы является нетривиальной задачей, поскольку необходимо учитывать влияние детерминированного тренда в данных. В связи с этим данные использовались как в чистом виде, так и в виде невязок при вычитании глобальной ионосферной карты. По эмпирически построенной вариограмме вычислялись основные параметры вариограммы — уровень свободной дисперсии (nugget), значения плато (sill) и радиус корреляции (range). Исследовались пространственно-временные параметры как изотропных, так и направленных вариограмм в геомагнитной системе координат. Для обоих случаев были построены и проанализированы вейвлет спектры вариаций параметров вариограмм. Для рассмотрения зональной и меридиональной анизотропии были построены и проанализированы вариограммы розы средних значений эмпирических вариограмм за исследуемый период.

Наблюдаемое пространство временную изменчивость необходимо учитывать в алгоритмах вариационного усвоения данных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00157.

1. Chen C. et al. Galileo and BeiDou AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies //Sensors. – 2024. – Т. 24. – №. 19. – С. 6472.
2. MIT Haystack Observatory. Madrigal database. <http://millstonehill.haystack.mit.edu/>

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ НАНОСПУТНИКОВ

Козлов С.В.¹, Каплярчук Е.А.¹, Шапкин А.С.²

БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь, kozlov@bsuir.by

ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Разработка новых методов и средств радиотомографии ионосферы в значительной степени связана с использованием низкоорбитальных (500...1000 км) спутников формата CubeSat и созданием систем низкоорбитального контроля ионосферы (НКИ) [1]. Это позволяет повысить оперативность и объем измерений полного электронного содержания (ПЭС) на трассах распространения в сравнении с известными высокоорбитальными системами на основе ГНСС за счет точных измерений ПЭС между видимым наноспутником и наземными приемными пунктами (ПП) при высокой угловой скорости перемещения указанной трассы, а также обеспечить измерение ПЭС в полярных областях.

Создание системы НКИ является сложной задачей и для определения ее оптимальных параметров, прогнозирования влияния дополнительной информации по измерениям ПЭС и проведения виртуальных экспериментов по реконструкции электронной концентрации в ионосфере был разработан цифровой двойник (ЦД) системы НКИ. Двойник обеспечивает: получение и ввод данных (Global Ionospheric Map) по вертикальному ПЭС от мировых исследовательских центров на заданную дату наблюдения и аппроксимацию указанных данных по координатам и времени; задание координат приемных пунктов (ПП) системы НКИ и параметров приемной аппаратуры; расчет координат навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС согласно их эфемеридам и воспроизведение измерений ПЭС для высокоорбитального компонента; задание орбитальных параметров группировки наноспутников, вычисление модельного и величины измеренного ПЭС на трассах «видимый наноспутник-ПП» в соответствии с условиями наблюдения, параметрами аппаратуры наноспутника, ПП и алгоритмами обработки сигналов в аппаратуре ПП. Воспроизведение измеренных значений ПЭС проводится методом статистического эквивалента или путем прямого расчета принимаемых сигналов и алгоритмов их обработки в вариантах использования когерентных немодулированных сигналов 150/400 МГц или ретрансляции на эти частоты сигналов GPS [2]. Полученные массивы (десятки-сотни тысяч) измерений ПЭС упорядочиваются по заданным критериям и используются в дальнейшем для проверки новых алгоритмов томографической реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере на основе реальных данных о ПЭС и для оптимизации параметров системы НКИ.

Работа выполнена при финансовой поддержке подпрограммы 6 «Исследование и использование космического пространства в мирных целях» Государственной программы «Научно-технологические и технические» Республики Беларусь на 2021–2025 гг. и частично при выполнении НИР по договору № 9СГ3.3-220 «Разработать аппаратно-программный и алгоритмический комплекс радиометрического анализа динамических состояний ионосферы» (2023–2026) в рамках научно-технической программы Союзного государства «Комплекс-СГ».

1. Облик перспективной системы низкоорбитального контроля ионосферы над территорией Республики Беларусь и прилегающими регионами / Е. А. Каплярчук [и др.] // Цифровая трансформация. 2024. Т. 30, № 4. С. 50–61.

2. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 2. С. 7–27.

РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ АЛГОРИТМОВ РАДИОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА «ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК»

Савиных И.Э.¹, Крот А.М.¹, Козлов С.В.²

¹ ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь alxkrot@newman.bas-net.by

² БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь

Создание системы наземного контроля ионосферы (НКИ) является сложной задачей [1], поэтому для определения ее оптимальных параметров, прогнозирования влияния дополнительной информации на измерение полного электронного содержания (ПЭС) и проведения виртуальных экспериментов по реконструкции электронной концентрации в ионосфере был разработан цифровой двойник (ЦД) системы НКИ [2]. Двойник обеспечивает расчет координат навигационных спутников согласно их эфемеридам и воспроизведение измерений ПЭС. ЦД позволяет задать пространственное распределение электронной концентрации как с помощью функций, так и с использованием реальных и интерполированных на их основе данных спутников GPS. Система позволяет проверить работоспособность алгоритмов подсчета ПЭС и оценить качество восстановления электронного распределения радиотомографическими методами с возможностью их адаптационной настройки.

Радиотомография ионосферы основана на измерении фазовой задержки электромагнитного сигнала GPS, появляющейся из-за неоднородностей электронных полей в ионосфере. Сопутствующие распространению электромагнитной волны процессы рассеяния, дисперсии и поглощения приводят к тому, что радиосигнал диспергирует и ослабевает при прохождении через облако электронов в ионосфере, что используется в вычислительной томографии. Данные задержки сигнала по фазе используются для оценивания ПЭС либо с целью последующего применения алгоритмов вычислительной томографии и синтеза изображения электронной плотности. В предлагаемых алгоритмах радиотомографии используются данные ПЭС для создания двумерных изображений поля концентрации электронов в ионосфере, что позволяет оценить как структуру, так и динамику ионосферы. Методы томографии разделяются на итерационные, статистические и детерминированные, основанные на точных математических моделях. К детерминированным относятся методы, основанные на теореме о срезе и на формуле обращения Радона.

При разработке программных средств восстановления функции электронной концентрации в ионосфере используется дискретное преобразование Фурье и эффективные алгоритмы быстрого преобразования Фурье по расщепленному основанию [3]. В результате проведенных исследований были построены и программно реализованы алгоритмы вычислительной радиотомографии на основе двух различных способов восстановления, а именно, посредством теоремы о срезе и метода обратных проекций.

1. Способ оценивания полного электронного содержания в ионосфере на основе ретрансляции сигналов глобальной навигационной спутниковой системы GPS / И. В. Белоконов [и др.] // Информатика. 2023. Т. 20, № 2. С. 7–27.

2. Козлов, С.В. Цифровой двойник системы низкоорбитального контроля ионосферы на базе наноспутников / С.В. Козлов, Е.А. Каплярчук, А.С. Шапкин // Физика плазмы в солнечной системе: материалы Двадцатой ежегодной конференции, Москва, 10-14 февраля 2025 г./ ИКИ РАН ; редкол.: Л. М. Зеленый [и др.]. – Москва, 2025. С. 147.

3. Крот А. М., Минервина Е. Б. Быстрые алгоритмы и программы цифровой спектральной обработки сигналов и изображений. - Минск: наука и техника, 1995. - 407 с.

ВЛИЯНИЕ КРУПНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВИХРЕЙ НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ

В.И. Захаров^{1,2,3}, С.Л. Шалимов^{3,4}, М.Г. Акперов²

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия, zvi_555@list.ru

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Москва, Россия

⁴ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

В работе представлены результаты исследования откликов крупных атмосферных вихрей в верхней атмосфере на примерах внетропических и тропических циклонов. В качестве механизма передачи возмущения на ионосферные высоты часто рассматривают внутренние гравитационные или акустико-гравитационные волны. Известны работы по выделению таких откликов на разных высотах в атмосфере. Однако работ по определению откликов от одного события на различных высотах (т.е. попыток проследить непосредственно динамику передачи возмущения) крайне мало. Проблема связана как с трудностями поиска отклика, так и со сложностью организации синхронных наблюдений за распространением отклика от атмосферного события на разных высотах.

В качестве возмущений мы использовали тропические и внетропические циклоны. Физика их различна, но присущее характерное изменение давления и его вариации, которое приводит к генерации внутренних волн, является общей чертой. Характеристики циклонов во внетропических широтах (>20°N) Северного полушария определялись по данным реанализа ERA5 для атмосферного давления на уровне моря при использовании метода идентификации характеристик циклонов [1]. Данные о тропических циклонах доступны [2]. Для систематических исследований был выбран Дальневосточный регион РФ.

Для исследования возмущения нижней атмосферы использовались данные сверхдлинноволнового зондирования в диапазоне 3–30 кГц, полученные на уникальной научной установке ФИЦ Единая геофизическая служба РАН (Камчатка) [3]. По данным об электронной концентрации, регистрируемым на спутниках системы ESA Swarm [4], по методикам [5] исследован отклик верхней ионосферы.

В работе рассмотрены примеры выделения откликов на разных высотах. Обсуждается статистика и условия успешного выделения откликов, проявляющиеся в нижней ионосфере, отмечаемые по вариациям амплитуды и фазы СДВ-сигнала, а также сопряженные с ними вариации электронной плотности в верхней ионосфере во время активной стадии циклонов, которые в целом можно интерпретировать как прохождение атмосферных внутренних гравитационных волн и их диссипацию.

1. Акперов М.Г., Бардин М.Ю., и др. // Изв. РАН. Физ. Атмосф. и океана. 2007. Т. 43. С. 764.

2. <https://www.jma.go.jp/jma/eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>

3. <http://www.gsras.ru/unu>

4. <https://swarm-diss.eo.esa.int/#>

5. Шалимов С.Л., В.И. Захаров и др. // Геомаг. и Аэроном., 2023. Т. 63. С. 216. DOI: 10.31857/S001679 4022600 442.

ОЦЕНКА ВКЛАДА D ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ В ВЕЛИЧИНУ ПРИРАЩЕНИЯ ПЭС ВО ВРЕМЯ СЕРИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СЕНТЯБРЕ 2017 Г.

Ряховский И.А., Беккер С.З.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, ryakhovskiy88@yandex.ru

Во время солнечных вспышек наблюдается резкое увеличение потоков солнечного излучения в широком диапазоне длин волн, что в свою очередь приводит к изменению полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Основное увеличение ионизации, вызванное вспышками, происходит в F области ($h > 120$ км), поэтому вкладом нижней ионосферы в приращение ПЭС часто пренебрегают.

В работе представлены результаты численной оценки вклада D области ионосферы (50–90 км) в величину приращения ПЭС во время шести мощных рентгеновских вспышек, произошедших в сентябре 2017 года. Изменение концентрации электронов в D области ионосферы во время солнечных вспышек оценивалось с использованием теоретической плазмохимической модели нижней ионосферы [1], разработанной в ИДГ РАН и успешно верифицированной по экспериментальным данным радиофизических измерений в ОНЧ (3–30 кГц) диапазоне и данных радара некогерентного рассеяния. Вариации ПЭС, вызванные солнечными вспышками, оценивались по данным газейных приемников ГНСС [2].

В результате анализа было установлено, что для вспышек с различным спектральным составом, вклад нижней ионосферы в изменение ПЭС варьировался от 7% до 23%. Показано, что вклад D области в величину ПЭС пропорционален доле рентгеновского потока (0,1–0,8 нм) в общем солнечном потоке (0,1–103 нм) [3].

Полученная эмпирическая модель вклада D области в приращение ПЭС от доли рентгеновского излучения в общем спектре вспышки в дальнейшем позволит оценить перераспределение концентрации электронов в ионосфере для заданного спектра излучения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6.

1. Bekker, S. Z., Kozlov, S. I., & Kudryavcev, V. P. (2022). Comparison and verification of the different schemes for the ionization-recombination cycle of the ionospheric D-region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(10). <https://doi.org/10.1029/2022JA030579>

2. D. A. Taurenis, N. S. Barabash, I. A. Ryakhovskiy, and Ya. O. Romanovskiy "Estimates of TEC change caused by solar flares", *Proc. SPIE* 12341, <https://doi.org/10.1117/12.2646664>

3. Bekker, S. Z., & Ryakhovsky, I. A. (2024). Estimation of the contribution of the ionospheric D region to the TEC value during a series of solar flares in September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2024JA032577. <https://doi.org/10.1029/2024JA032577>

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ALL-SKY КАМЕР

Воробьев А.В., Лапин А.Н., Воробьева Г.Р.

ФГБУН Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия, geomagnet@list.ru

В работе предложена и разработана система автоматической классификации состояния верхней ионосферы на основе интеллектуального анализа данных. Так, на примере данных с all-sky камер обсерватории «Ловозеро» показана возможность применения искусственной нейронной сети в задаче классификации получаемых изображений в натуральном спектре. Для оптимизации количества классов авторами предложено разделение снимков на 6 групп, которые отображают различные состояния верхней ионосферы (Рис. 1).

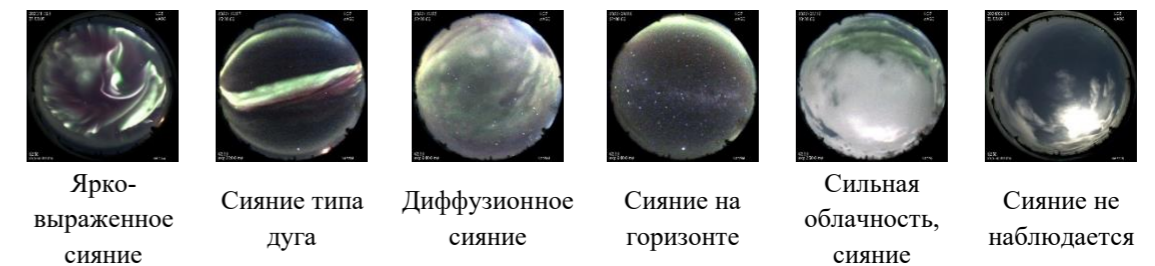


Рис. 1 – Примеры рассматриваемых классов

Для оценки применимости интеллектуальных методов анализа данных проведена ручная группировка 90 тыс. снимков за период 2015 – 2024 гг. Оценка качества обученной модели в задаче классификации показала точность 95,6% по метрике f1-score для валидационной выборки, что позволяет сделать вывод о высокой достоверности получаемых результатов, сравнимой с экспертной оцифровкой в ручном режиме.

В заключение авторами предлагаются перспективные методы по улучшению метрик точности классификации состояния верхней ионосферы на основании нейросетевого подхода.

Литература

1. Зеленый Л.М., Петрукович А.А. Арктика. Космическая погода // *Природа*, № 9, 2015. С. 31–39.

1. Nanjo, S., Nozawa, S., Yamamoto, M. et al. An automated auroral detection system using deep learning: real-time operation in Tromsø, Norway. *Sci Rep* 12, 8038 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11686-8>.

3. Воробьев А.В., Лапин А.Н., Соловьев А.А., Воробьева Г.Р. Подход к интерпретации естественных индикаторов состояния космической погоды для оценки эффектов ее воздействия на высокоширотные энергосистемы // *Физика Земли*. – 2024. – № 4. – С. 100–110. – DOI 10.31857/S0002333724040071.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ И СУБАВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО КОМПЛЕКСНОМУ РАДИОЗОНДИРОВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ

**Крашенинников И.В.¹, Выборнов Ф.И.², Зыков Е.Ю.³, Колчев А.А.³,
Падохин А.М.¹, Шубин В.Н.¹**

¹ ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, krash@izmiran.ru

² Нижегородский государственный университет, НИРФИ, г. Н. Новгород, Россия

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Ионосферное проявление геомагнитного возмущения проявляется, прежде всего, в динамике крупномасштабных структур авроральной области ионосферы, таких как ГИП (главный ионосферный провал), авроральный E-слой, но также может привести к генерации крупномасштабных структур в субавроральных широтах, таких как поляризационный джет (SAID – SubAuroral Ion Drifts) и SAR (Stable Auroral Red) дуг.

Базовым средством диагностики и мониторинга состояния ионизированной части атмосферы Земли является вертикальное радиозондирование ионосферы (ВЗ) и результатом является регистрация ионограммы ВЗ – частотной зависимости группового запаздывания зондирующего сигнала от частоты. Существенно менее применимым методом является наклонное радиозондирование (НЗ), ввиду более высокой сложности формирования и интерпретации радиофизического отклика в виде ионограмм НЗ. Условия отражения для зондирующих радиоволн от ионосферных неоднородностей в методах вертикального и наклонного радиозондирования ионосферы существенно различаются, что может дать в случае их совместного применения расширенные экспериментальные данные об особенностях эволюции крупномасштабных динамических структур ионосферы.

В данной работе представлены результаты комплексного радиозондирования ионосферы: наклонное радиозондирование в широтном направлении с базами ~ 150 и 500 км, с излучением из Васильсурска и Казани, приемом в Казани, Васильсурске и Москве(Троицк), и вертикальное радиозондирование в двух пунктах – Москве(ИЗМИРАН) и Васильсурске (НИРФИ). На рис. 1 приведены примеры регистрации дополнительных отражений в данных наклонного (левая панель, выделено овалом) и вертикального радиозондирования (правая панель). Обсуждаются возможные причины их формирования в субавроральной области ионосферы во время развития умеренной геомагнитной бури 12.09.2023.

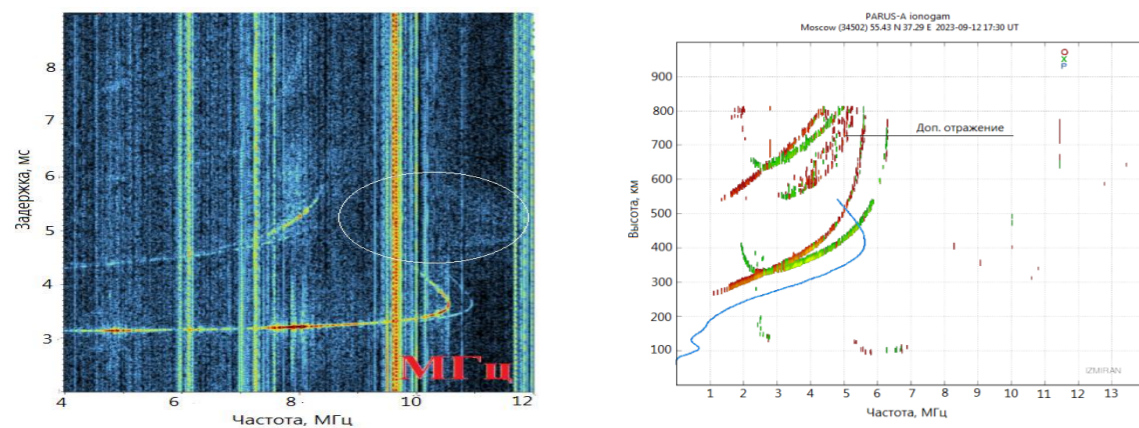


Рис. 1 Ионограмма НЗ Казань-Москва(ИЗМИРАН) 12.09.2023 16:10 UT и ионограмма ВЗ Москва(ИЗМИРАН) 12.09.2023 17:30 UT со следами дополнительных отражений во время развития ионосферного проявления умеренной геомагнитной бури.

Статистический анализ событий STEVE и PF на Якутском меридиане

Баишев Д.Г., Парников С.Г., Гололобов А.Ю., Макаров Г.А., Каримов Р.Р.,
Иевенко И.Б.

(ИКФИА СО РАН, г.Якутск)

baishev@ikfia.ysn.ru

Исследованы события STEVE и Picket fence (PF) по данным наблюдений на станциях «Маймага» (CGM 58°, 200°) и «Жиганск» (CGM 61°, 194°) в период с 2015 по 2023 годы. Получены следующие предварительные результаты: события STEVE и PF происходят в период магнитосферной суббури; область пространственной локализации STEVE и PF событий находится в диапазоне 20-02 MLT; усредненные положения событий STEVE (13:26 MLT) и PF (14:25 MLT) отличаются на ~1 час MLT (или 15 градусов); на станции «Жиганск» события STEVE наблюдаются при менее магнитоактивных условиях, $\langle \text{SME} \rangle = 730$ нТ, чем события STEVE и PF в «Маймаге» с $\langle \text{SME} \rangle = 1170$ нТ. Будут представлены результаты анализа условий формирования свечения в зависимости от параметров межпланетной среды и результаты одновременных наблюдений STEVE и регистрируемые вблизи Якутска возмущений в КНЧ-ОНЧ диапазоне.

Проявления поляризационного джета, его страт и STEVE по спутниковым данным, а также данным вертикального зондирования ионосферы и региональным картам полного электронного содержания

Синеви́ч А.А.^{1,2}, Чернышов А.А.¹, Чугуни́н Д.В.¹, Клименко М.В.³, Панченко В.А.², Якимова Г.А.³, Тимченко А.В.³, Милох В.Я.⁴, Могилевский М.М.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, sinevich.aa@gmail.com

²ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия

³Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

⁴Университет Осло, г. Осло, Норвегия

Поляризационный джет (также известный как SubAuroral Ion Drift, SAID) – явление, происходящее в субавроральной ионосферной плазме и оказывающее влияние на распространение в ней радиоволн. ПД/SAID представляет собой узкую полосу сильного ионного дрейфа на запад на высотах F-слоя вблизи границы проекции плазмопаузы. Скорость дрейфа ионов в такой полосе может достигать нескольких километров в секунду, а неоднородности плазменных параметров внутри могут иметь масштабы вплоть до десятков-сотен метров. Такие высокие скорости и такая структурированность плазмы влияют на прохождение радиосигнала и отражаются на ионограммах, полученных наземными ионозондами. Для того чтобы понять структуру ПД/SAID и ее влияние на распространение радиоволн в ионосфере, было проведено исследование с использованием одновременных измерений различными наземными и спутниковыми средствами. Кроме того, исследована связь ПД/SAID с таким оптическим атмосферным явлением как STEVE и изучена эволюция пространственного положения ПД/SAID со временем на разных секторах местного магнитного времени. Рассмотрено отражение ПД/SAID на региональных картах полного электронного содержания. Выяснено, что скорость дрейфа ионов в нижней части F-области в полосе ПД/SAID значительно ниже, чем скорость дрейфа, измеренная на высоте спутников. Установлено, что страты поляризационного джета и мелкомасштабные неоднородности плазмы внутри них могут вызывать множественные отражения радиосигнала, что проявляется на ионограммах в виде F-рассеяния.

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ КНЧ ШУМОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ: ШУМАНОВСКИЕ РЕЗОНАНСЫ, ЛЭП, И ПЕРЕДАТЧИК ЗЕВС

Н.В. Савельева¹, В.А. Пилипенко^{1,2}, Н.Г. Мазур¹, Е.Н. Федоров¹, С. Чжао³

¹Институт физики Земли РАН, Б. Грузинская 10, Москва 123242, Россия; e-mail: nasa2000@yandex.ru, ENFedorov1@yandex.ru, ngmazur@mail.ru

²Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, Москва 117997, Россия; e-mail: space.soliton@gmail.com

³Национальный центр космических наук Китайской академии наук, Пекин 100190, Китай; e-mail: zhaoshufan@nssc.ac.cn

Китайский спутник CSES-01 работает на солнечно-синхронной орбите высотой ~500 км с наклоном ~97° с февраля 2018 г. В составе оборудования спутника имеются 4.5-метровые антенны для измерения электрического поля в частотном диапазоне от DC до 3.5 МГц, и индукционный магнитометр, который измеряет вариации магнитного поля в диапазоне от 10 Гц до 20 кГц. На средних и низких широтах электрическая антенна спутника часто регистрировала усиление шумов на частоте основной моды Шумановского резонанса (~7.8 Гц) и его первой гармоники. При пролетах над Кольским полуостровом спутник CSES регистрировал электрическую и магнитную компоненты 82 Гц излучения передатчика ЗЕВС и 50 Гц излучения линии электропередачи «Северный Транзит». Сигнал ЗЕВС регистрировался при удалении между подспутниковой точкой и передатчиком от 260 км до 2100 км. Используя теорию возбуждения КНЧ волн в ионосфере линейным заземленным током конечной длины, разработана численная модель с реалистичным горизонтально-слоистым профилем ионосферы для расчёта ожидаемой амплитуды излучения на спутниковых высотах для источников типа ЗЕВС/Северный Транзит с учетом их реальных размеров. Результаты измерений согласуются с результатами моделирования пространственной структуры волнового поля в верхней ионосфере, возбуждаемого переменным горизонтальным током конечной длины. Наблюдения на CSES-01 подтверждают, что излучаемая энергия в масштабах всей планеты постоянно растёт, особенно над промышленно развитыми районами. При этом в КНЧ диапазоне наша планета находится в электромагнитном окружении созданном преимущественно не природными, а техногенными источниками.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА WASP-39b

Савинцева Е.Д., Руменских М.С.

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия, savintsevaed49@gmail.com

Схожий по массе с Сатурном горячий газовый гигант Wasp-39b находится на расстоянии ~ 0.05 АЕ от родительской звезды. Благодаря недавним измерениям с помощью JWST были обнаружены углекислый газ (CO_2), диоксид серы (SO_2), вода (H_2O) и угарный газ (CO) в спектре поглощения данной экзопланеты. Также были зарегистрированы возможные признаки сероводорода (H_2S). Уникальные данные JWST дают возможность определить молекулярный состав с высокой точностью, что помогает уточнять характеристики атмосферы. Однако различные подходы к интерпретации спектров дают взаимоисключающие результаты. Возможным решением данной проблемы может стать совместная интерпретация молекулярных и атомарных спектров поглощения путем численного моделирования и сравнения с наблюдаемыми спектрами поглощения.

Численная трехмерная гидродинамическая модель применялась для воспроизведения транзитных поглощений планеты Wasp-39b в линии атома натрия 589 нм с целью определения параметров, при которых модельные транзиты наилучшим образом совпадали с наблюдаемыми. Как показали наблюдения в молекулярных линиях, атмосфера этой планеты содержит оксиды, а потому можно полагать, что верхние слои атмосферы Wasp-39b могут содержать кислород. Поэтому в дополнение к линии натрия был смоделирован также триплет кислорода 777 нм.

Для моделирования верхних слоев атмосфер горячего юпитера Wasp-39 b были выбраны следующие сценарии моделирования, отражающие различный состав атмосфер:

1. Солнечное содержание тяжелых элементов, таких, как C, O, Na, S
2. Преобладание Na, $n_{\text{Na}}/n_{\text{H}} = 0.1$
3. Преобладание кислорода и натрия, $n_{\text{Na}}/n_{\text{H}} = 0.01$, $n_{\text{O}}/n_{\text{H}} = 0.1$

Данное исследование посвящено определению состава атмосфер экзопланеты по интерпретации транзитных поглощений в линии Na и O, оценке возможности наблюдения триплетной линии кислорода и выявлению чувствительности натриевого дуплета к изменениям условий космической погоды в системе.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00134

РЕГИСТРАЦИЯ НА СТЕНДЕ НПМ-01 МАГНИТНОГО ПОЛЯ МГД-ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИПОЛЕМ», И СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ

Воеводин С.В., Буянов А.Б., Горохов В.В., Долотов А.С., Коблова О.Н., Лимонов А.В., Перминов А.В., Тренькин А.А., Янбиков Н.Р.

ВНИИЭФ, г. Саров, Россия.

Представлены результаты регистрации магнитного поля МГД-волны, возбуждаемой рамочной антенной, симулирующей действие электрического диполя. Опыты проводились на плазменном стенде НПМ-01 в цилиндрической вакуумной камере длиной 7,6 м и диаметром 1 м в однородном соосном с камерой соленоидальном магнитном поле 0,11–0,12 Тл. Давление в камере поддерживалось в диапазоне 0,5–0,7 мТор. Рабочий газ гелий. Столб фоновой плазмы диаметром 20 см плотностью $(4-6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и температурой электронов 10 эВ генерировался вдоль магнитного поля при зажигании разряда между термокатодом и сетчатым анодом. Антенна представляла собой две объединенные по одной стороне прямоугольные катушки – рамки. Каждая катушка размером 6 x 15 см состояла из четырех витков медного провода диаметром 0,9 мм. Рамки антенны располагались в одной плоскости и объединялись по короткой стороне. Внутри вакуумной камеры рамки устанавливались так, что объединенные стороны лежали на оси камеры. Индуктивность каждой катушки была частью цепи активного колебательного LC-контура собственного источника питания. Контуры возбуждались на частоте 274 кГц ($\sim 0,65$ циклотрон-ионной частоты фоновой плазмы). Источники питания катушек синхронизовались. Максимальная амплитуда суммарного тока антенны на оси 296 А. Поле волны $\sim 0,1$ мТл регистрировалось индукционным датчиком, который измерял три ортогональных компоненты. Измерения проводились в пяти плоскостях, ортогональных фоновому магнитному полю, расположенных на расстоянии 20, 40, 60, 80, 100 см от антенны.

Сравнение результатов измерений с расчетами компонент магнитного поля МГД-волн, возбуждаемых электрическим диполем, по полуаналитической модели [1], показало удовлетворительное согласие.

1. Robertson J. // J. Plasma Phys. 2020 V. 86, 835860401

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕОБЫКНОВЕННОЙ РАДИОВОЛНОЙ ПРИ ЛОКАЦИИ НА ЧАСТОТЕ, БЛИЗКОЙ К НАГРЕВНОЙ

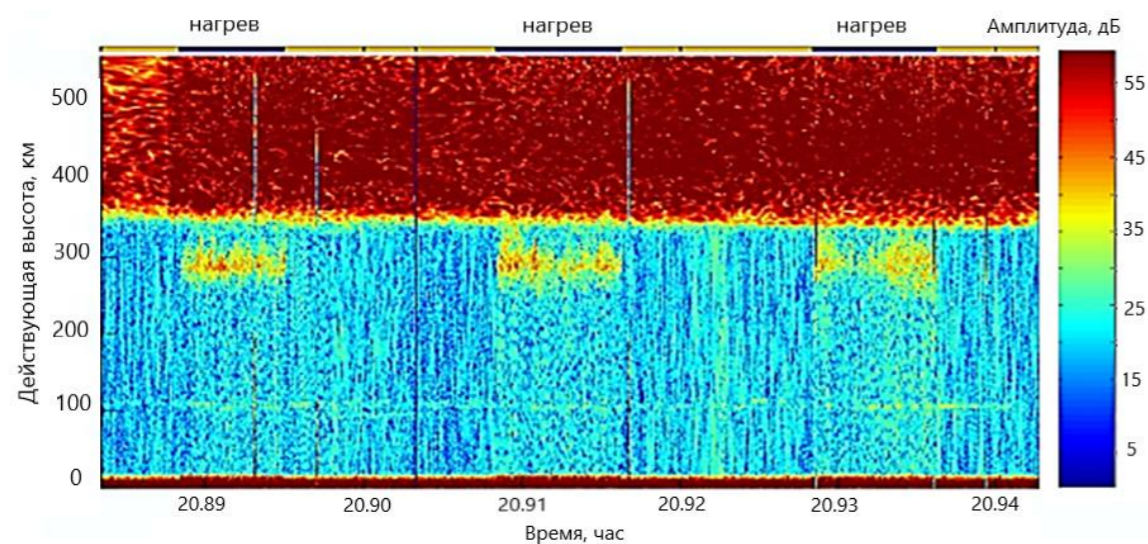
Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемьяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А.

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

В работе приведены результаты исследований воздействия на ионосферу мощных радиоволн необыкновенной поляризации (х-мода) при излучении нагревного стенда СУРА (56,1°N; 46,1°E). Измерения проводились 10–11 октября 2006 г., 1–2 сентября 2014 г., 18 мая 2016 г., и 24–25 сентября 2023 г. в вечерние часы, как правило, в условиях сильной диффузности F-слоя ионосферы. Воздействие на ионосферу осуществлялось с расчетной эффективной мощностью порядка 100–150 МВт на частоте 4.3 МГц с локацией также необыкновенной радиоволной на частоте 4.7 МГц в первых трех экспериментах. В сентябре 2024 г. нагрев ионосферы производился на частоте 5.227 МГц, излучение пробных радиоволн – на частоте 5.455 МГц, то есть выше нагревной частоты на несколько сотен кГц. В режиме нагрева ионосферы стенд СУРА излучал мощные радиоволны в течение 30 с, за которыми следовала 60-ти секундная пауза. Во время нагрева и паузы в работе стенда производилось импульсное зондирование с длительностью импульса 25 (50) мкс и частотой повторения 25 (50) Гц. Эксперимент проводился в условиях, когда критическая частота F-слоя f_0F2 была ниже нагревной частоты, и волны обыкновенной поляризации не отражались ионосферой. Эксперимент показал, что в период воздействия на ионосферу необыкновенной волной в интервале действующих высот на 30–40 км ниже зеркально отраженного сигнала появлялся слабый рассеянный сигнал, пропадавший после окончания нагрева. Этот сигнал развивался в течение 1 с, его интенсивность была ниже зеркального на 40–50 дБ. Время релаксации сигнала было на порядок меньше. Наиболее ярко этот эффект наблюдался в октябре 2006 г. В сентябре 2024 г. в вечерние часы во время воздействия на ионосферу на действующей высоте 100 км регулярно появлялся (усиливался) спорадический слой E.

Обсуждаются возможные причины указанных явлений.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-27-00031.



Пример появления рассеянного сигнала на частоте 4.7 МГц (х-мода) при воздействии на ионосферу частотой 4.3 МГц (х-мода) в условиях диффузной F-области

ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА НА ОПТИЧЕСКОЕ СВЕЧЕНИЕ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ 2021-2024 ГГ.

Грач С.М. (1), Белецкий А.Б. (2), Ткачев И.Д. (2), Шиндин А.В. (1), Насыров И.А. (3), Когогин Д.А. (3), Дементьев В.О. (3), Васильев Р.В. (2), Легостаева Ю.К. (1), Хашев В.Р. (1)

(1) ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

(2) Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

(3) Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Дан краткий обзор результатов экспериментов по исследованию воздействия мощного КВ радиоизлучения (стенд СУРА) на оптическое свечение ночной ионосферы, выполненных в 2021-2024 гг. Оптическое свечение регистрировалось с помощью различных инструментов, расположенных в трёх разнесенных пунктах наблюдения: 1) в непосредственной близости от стенда СУРА (56,10° с.ш., 46,15° в.д.), ~1 км от антенной системы стенда, 2) в магнитной обсерватории Казанского федерального университета (55.56° с.ш., 48.45° в.д.), в 170 км к востоку от стенда и 3) в деревне Заклучная Нижегородской обл. (55.55° с.ш., 48.53° в.д.), в 120 км к юго-западу от стенда. Для изучения пространственной структуры области генерации свечения в линии атомарного кислорода $\lambda=630$ нм использовались камеры с ПЗС – матрицами и выдержкой кадров 25 с. Динамика интенсивности свечения в линиях атомарного кислорода $\lambda=630$ нм и $\lambda=557.7$ нм и в полосе ионов молекулярного азота ($\lambda=391,4$ нм) с высоким временным разрешением ~10 мс регистрировалась с помощью фотометров вблизи стенда. Воздействие на ионосферу осуществлялось вертикально вверх либо при наклоне диаграммы направленности стенда на 12° к югу в плоскости геомагнитного меридиана. Частоты воздействия ниже критической частоты F-слоя ионосферы варьировались от $f_0=4,30$ МГц до $f_0=6,72$ МГц. Основные результаты заключаются в следующем. 1) Для ряда сеансов воздействия, когда свечение в линии $\lambda=630$ нм наблюдалось во всех регистрационных пунктах (всего таких сеансов было около 50), установлены формы и положение областей генерации искусственного оптического свечения (увеличения яркости, ИОС) и подавления фонового свечения ионосферы. 2) По данным анализа корреляции между поведением яркости искусственного оптического свечения в линии 630 нм, карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы и режимами излучения стенда установлено, что ИОС возникает в областях с пониженной электронной концентрацией. При преобладании подавления фона свечения над ИОС, имеет место корреляция между уменьшением значений ПЭС и подавлением фонового свечения под действием излучения стенда. 3) В 2023 и 2024 гг., наряду с красной линией атомарного кислорода 630,0 нм (порог возбуждения 1,96 эВ), впервые регулярно наблюдалось искусственное свечение ионосферы в зеленой линии 557,7 нм (порог 4,19 эВ) и синей линии 391,4 нм (порог 18,7 эВ). Свечение в линии 391,4 нм на стенде СУРА наблюдалось впервые. 4) В ряде сеансов воздействия (05.09.2021, 11.08.23 и 05.08.24) наблюдалась генерация ИОС в линиях $\lambda=557,7$ нм и $\lambda=391,4$ нм при появлении экранирующего или полупрозрачного Es. 05.08.2024 яркость ИОС в линии 557,7 нм во время развития мощного (полностью блокирующего) Es слоя ионосферы с критической частотой $>9,5$ МГц составила не менее 1 кРл. Генерация ИОС в синей линии в спорадическом E-слое наблюдалась впервые. 5) В 2024 г. накоплен большой объем данных по измерениям ИОС в линиях 557,7 нм и 630,0 нм и 391,4 нм при вариациях f_0 вблизи 4-й электронной гирогармоники $4f_c$ (5260 – 5455 кГц) и впервые обнаружено ИОС при $f_0 \sim 5f_c$ (6660 кГц), При приближении f_0 к $4f_c$ и $5f_c$ наблюдается усиление яркости ИОС в зеленой и синей линиях.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ (проекты 20-12-00197П и 23-77-10029) и Минобрнауки РФ (проекты FSWR-2023-0031 (ННГУ) и 075-ГЗ/С3569/278 (ИСЗФ СО РАН)) с использованием аппаратуры центра коллективного пользования «Ангара» ИСЗФ СО РАН (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>).

РЕЖИМ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ВДОЛЬ СИСТЕМ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Петрова И. А., Заборонкова Т. М., Зудин И. Ю., Гушин М. Е.
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, i.petrova@ipfran.ru

Описание распространения низкочастотных электромагнитных волн в околоземной плазме осложнено присутствием разнообразных систем неоднородностей – областей с пониженной или повышенной концентрацией плазмы. Такие системы могут возникать, например, при высокочастотном нагреве ионосферы с использованием нагревных стенов или мощных спутниковых радиопередатчиков. Полноволновое решение задачи о распространении волн свистового диапазона вдоль одной неоднородности было представлено С. Адачи в 1964 году [1]; увеличение числа неоднородностей значительно усложняет теоретическое описание распространения волн, особенно в замагниченной плазме, где взаимодействие волн с неоднородностями имеет выраженный анизотропный характер.

Ранее нами была дана качественная интерпретация результатов численного моделирования задачи о волноводных свойствах системы близко расположенных мелкомасштабных неоднородностей [2]. Взаимодействие между неоднородностями и их влияние на распространение волн, которые необходимо учитывать в реальных условиях, до сих пор не были полноценно описаны аналитически.

В докладе подробно рассматривается задача распространения волн свистового диапазона вдоль группы неоднородностей пониженной концентрации плазмы, вытянутых вдоль магнитного поля. Неоднородности, или дакты плотности, выступают в роли волноводных структур. С помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD) проводится сравнительный анализ структур полей в дактах с резкими и плавными границами, что позволяет интерпретировать волноводные свойства неоднородностей модельной задачи в контексте реальных условий ионосферы и магнитосферы.

Также представлены результаты численного моделирования задачи распространения волн свистового диапазона вдоль системы случайных неоднородностей, плотность которых отличается от фонового значения концентрации плазмы не более чем на 5%. Выбор подобной конфигурации возмущений обусловлен модельными экспериментами по возбуждению турбулентности в лабораторных условиях [3].

Полученные результаты могут быть полезны при анализе систем неоднородностей околоземной плазмы, включая нелинейные явления, а также в разработке новых методов диагностики плазменного окружения Земли. Кроме того, результаты могут найти применение при планировании и проведении как активных, так и лабораторных экспериментов по изучению распространения электромагнитных волн в ионосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00459).

1. Adachi S. Study on the Guiding Mechanism of Whistler Radio Waves // Radio Science Journal of Research, Vol. 69D, No. 4, April 1965.
2. Zudin I.Yu., Zaboronkova T.M., Gushchin M.E. et al. Whistler Waves' Propagation in Plasmas With Systems of Small-Scale Density Irregularities: Numerical Simulations and Theory // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2019. – Vol. 124. – Issue 6.
3. Зудин И. Ю., Гушин М. Е., Стриковский А. В., Коробков С. В., Петрова И. А., Катков А. Н., Кочедыков В. В. Особенности турбулентности, возбуждаемой импульсной высокочастотной накачкой в замагниченной плазме. // Письма в ЖЭТФ. – 2022. - том 116, № 1, С. 46-53.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕЛОБКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ, РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ПРИ РАЗЛЁТЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ПОПЕРЕК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Николенко А.С.¹, Гушин М.Е.¹, Коробков С.В.¹, Зудин И.Ю.¹, Айдакина Н.А.¹, Плешков Д.С.¹

1 – ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, nikolenko@ipfran.ru

На крупномасштабном плазменном стенде «Крот» проводятся лабораторные эксперименты по ограниченному моделированию явлений, возникающих при инъекции искусственно созданных плазменных потоков в ионосфере и магнитосфере Земли [1]. При разлете осесимметричного плазменного потока, создаваемого компактным коаксиальным ускорителем [2, 3] в вакууме или более редкой фоновой плазме вдоль внешнего магнитного поля, возникает область вытеснения последнего – диамагнитная каверна, на стадии торможения облака плазмы на его границе развивается желобковая неустойчивость типа Релея-Тейлора, наблюдаемая в виде вытянутых вдоль поля желобков, отрастающих радиально от невозмущенной поверхности плазмы [1, 4]. Желобковая неустойчивость может существенно влиять на темп расширения плазмы, который в свою очередь определяет характер магнитной диффузии, максимальный размер и динамику диамагнитной каверны. Градиентно-дрейфовые (желобковые) неустойчивости возникают на границе плазма-магнитное поле, где плазма замедляется магнитным полем, образующиеся электрические поля генерируются фактическим или эффективным торможением плазмы, искривлением силовых линий магнитного поля или градиентами плотности, и когда применима обычная магнитная гидродинамика, такие неустойчивости относятся к типу неустойчивостей (магнитного) Релея-Тейлора (MRTI). В нашем случае ионы не замагничены, а электроны замагничены, и поэтому желобковая неустойчивость демонстрирует кинетическое поведение – это может быть неустойчивость большого ларморовского радиуса (LLRI) и нижнегибридная дрейфовая неустойчивость (LHDI).

Контактными зондовой диагностикой совместно с фотосъемкой камерой с быстрым затвором исследована желобковая неустойчивость, изучалась динамика образования и дальнейшая эволюция желобков, оценены инкременты возбуждения наиболее подходящих структурных неустойчивостей, с которыми можно отождествить результаты эксперимента.

Работа выполнена в рамках 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

1. Николенко А.С., Гушин М.Е., Коробков С.В., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Стриковский А.В., Лоскутов К.Н. // Физика Плазмы. Т. 49. № 11. С. 1101.
2. М.Е. Гушин, С.В. Коробков, В.А. Терехин, А.В. Стриковский, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.С. Николенко // Письма в ЖЭТФ 2018. Т. 108. № 5-6. С. 416.
3. С.В. Коробков, М.Е. Гушин, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.В. Стриковский, А.С. Николенко // Письма в ЖТФ 2019. Т.45. №5. С. 45.
4. Коробков С. В., Николенко А. С., Гушин М. Е., Стриковский А. В., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Шайхисламов И. Ф., Руменских М. С., Земсков Р. С., Стародубцев М. В. // Астрономический Журнал 2023. Т. 100. №1. С. 107.

Двумерное численное моделирование распространения свистовых волн в F-слое ионосферы при наличии дакта плотности

Зудин И.Ю.¹, Айдакина Н.А.¹, Белов А.С.², Гушин М.Е.¹, Коробков С.В.¹, Петрова И.А.¹

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород

²ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Нижний Новгород

zudiniy@ipfran.ru

Известно, что высокочастотный нагрев ионосферы может приводить к формированию вытянутых вдоль внешнего магнитного поля неоднородностей концентрации плазмы – дактов плотности. Формирование дактов происходит за счет вытеснения плазмы из области нагрева. В результате дакт имеет сложную структуру и состоит из областей с повышенной и пониженной концентрацией. Характерный поперечный размер возмущенной области составляет порядка 100 км, при этом дакт может содержать неоднородности с поперечным масштабом от нескольких метров до нескольких километров [1]. Экспериментально установлено, что дакты плотности существенным образом могут влиять на трансionoсферное прохождение низкочастотных волн, возбуждаемых наземными (передатчики) или атмосферными (грозы) источниками [2, 3].

В настоящем докладе приводятся результаты численного моделирования распространения волн с частотой 5 кГц при наличии дактов плотности. Расчет ведется в диапазоне высот от 300 до 900 км. Рассматриваются дакты с «простым» поперечным профилем, а также дакты, содержащие неоднородности концентрации с поперечными размерами от 2 км. При постановке численных экспериментов использовались модельные профили концентрации, создаваемые с учетом реальных ионосферных профилей и параметров дактов, рассчитанных с помощью модели SAMI2. Показано, что распространение волн носит сложный характер, при этом могут проявляться эффекты дефокусировки, линзирования, рассеяния и волноводного каналирования. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 24-12-00459).

[1] В.Л. Фролов и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F_2 -области мощным радиоизлучением стенда «Сура». Известия вузов. Радиофизика. 2016, **59**(3), с. 198-221.

[2] Rapoport V.O. et al. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(A10), id. A10322. doi: 10.1029/2010ja015484

[3] Woodroffe, J.R., et al. Whistler propagation in ionospheric density ducts: Simulations and DEMETER observations. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, (11), P. 7011–7018. doi:10.1002/2013ja019445

Экспериментальное исследование динамики параметров распадающейся плазмы в крупномасштабной установке для моделирования физических явлений в ионосфере и магнитосфере

Кочедыков В.В., Гушин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Стриковский А.В., Истомин А.А., Катков А.Н., Плешков Д.С., Петрова И.А., Кондрашов К.Ю., Дмитриев В.Д., Лоскутов К.Н.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, v.kochedykov@ipfran.ru

Для экспериментального моделирования плазменных геофизических и астрофизических явлений используют крупномасштабные плазменные установки, которые позволяют создать долгоживущий квазиоднородный столб плазмы как во внешнем магнитном поле, так и без него. В вакуумной камере на базе стенда «Крот» (ИПФ РАН) [1] с помощью импульсного высокочастотного индукционного разряда создается квазиоднородный столб низкотемпературной замагниченной плазмы рекордного размера – около 5 м в длину и почти 1,5 м диаметром. Модельные эксперименты проводятся после окончания плазмоздающего импульса, т.е. на этапе распада плазмы, что позволяет моделировать, по правилам подобия [2], различные астрофизические и геофизические плазменные явления, включая нагревные и инжекционные активные эксперименты в ионосфере. В 2024 году была проведена модернизация плазмоздающей системы камеры. В докладе представлены результаты исследования динамики параметров распадающейся плазмы в ее динамике, включая профили и временные зависимости концентрации плазмы (с помощью зонда с СВЧ-резонатором на отрезке двухпроводной линии) и температуры электронов (с помощью одиночного зонда Ленгмюра). Методом скоростной фотосъемки были получены динамика светимости плазмы, как на этапе ее создания, так и на этапе ее распада. С помощью измерений было установлено, что распад плазмы происходит в амбиполярном режиме, а также, что на начальных этапах распада плазма является сильноионизованной (частично-ионизованной), т.е. в такой плазме на протяжении распада преобладают кулоновские столкновения электронов с ионами преобладают над электрон-нейтральными столкновениями. Это означает, что при расчетах коэффициентов переноса необходимо учитывать этот вид столкновений и формулы для слабоионизованной плазмы не подходят [3]. По мимо электрон-ионных столкновений есть еще один факт, существенно влияющий на скорость распада, – это не совсем стандартная конфигурация установки. На фоне большинства плазменных установок камера стенда «Крот» выделяется не только своими размерами, но и наличием буферного объема нейтрального газа, внутри которого создается плазма, что на этапе создания плазмы приводит к вытеснению нейтрального газа из области соленоида, и как следствие распад плазмы происходит быстрее, чем ожидается.

Работа выполнена в рамках 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

1. Н. А. Айдакина, А. Г. Галка, В. И. Гундорин, М. Е. Гушин, И. Ю. Зудин, С. В. Коробков, А. В. Костров, К. Н. Лоскутов, М. М. Могилевский, С. Э. Привер, А. В. Стриковский, Д. В. Чугунин, Д. В. Янин // Геомагнетизм и аэрономия. – 2018. – Т. 58, № 3. – С. 331-342.
2. R. L. Stenzel // Review of Scientific Instruments – 1976. – Vol.47 – P. 603
3. В. Е. Голант // УФН **79** 377–440 (1963)

МОДОВАЯ СТРУКТУРА ГЕОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ РС5 ДИАПАЗОНА, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ВО ВРЕМЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА В АТМОСФЕРЕ

Сурков В.В.^{1,2}

¹ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, surkovvadim@yandex.ru

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Вертикальный акустический резонанс (ВАР) в атмосфере и геомагнитные РС5 колебания наблюдались после нескольких сильных землетрясений и извержений вулканов, которые сопровождалась генерацией в атмосфере акусто-гравитационных волн, достигающих высот ионосферы [1]. Резонансы на частотах 3.7 – 6.0 мГц возникают вследствие интерференции акустических волн, распространяющихся вверх от поверхности Земли, и волн, отражённых от области больших градиентов температуры вблизи нижней границы термосферы (80 – 90 км). Акустическая волна, просачивающаяся через верхнюю границу резонатора, увлекает ионосферную плазму, что приводит к образованию ионосферных токов и геомагнитным возмущениям с частотами близкими к резонансным частотам ВАР [2,3]. В отличие от РС5 пульсаций магнитосферного происхождения, эти геомагнитные возмущения локализованы в эпицентральной зоне с размером порядка 300 – 400 км и в магнитно-сопряжённой области.

В некоторых случаях характерные для ВАР возмущения наблюдались в течение 1 – 1.5 ч после окончания сейсмического события. За это время сейсмические волны в земле и волны цунами в океане выходят далеко за пределы области генерации ВАР. Поэтому обычно предполагалось, что причиной долговременной генерации ВАР и атмосферных волн являются продолжительные колебания земной поверхности, связанные с афтершоками. В данной работе исследуется иной механизм этого явления, связанный с особенностями модовой структуры ВАР.

Проводится теоретическое исследование данной проблемы в рамках плоскостной двумерной модели среды, содержащей проводящую землю, «тонкий» гиротропный E-слой ионосферы, магнитосферу и атмосферу с экспоненциальным высотным профилем плотности, состоящую из двух слоёв с разными температурами. Анализ решения в Фурье представлении показывает, что спектры ВАР и геомагнитных возмущений содержат фундаментальную моду с частотой 3.7 мГц и спектр затухающих гармоник. Характерное время затухания второй и третьей гармоник с частотами 4.5 мГц и 5.9 мГц составляет десятки минут, что позволяет объяснить большую длительность эффекта, наблюдаемую при наземных барометрических и магнитных измерениях. Показано, что ветер вблизи границы термосферы влияет на коэффициенты затухания гармоник.

Для исследования возмущений во временном представлении применяется обратное преобразование Фурье. Аналитическое продолжение подынтегральной функции в комплексную плоскость показывает, что влияние собственных колебаний на магнитный сигнал определяется вычетами в полюсах подынтегральной функции. Модельная зависимость геомагнитного возмущения от времени, которая учитывает вклад в сигнал первых трёх гармоник ВАР, имеет вид квази-осцилляторных колебаний со средним периодом около 200 с, что согласуется с результатами наблюдений.

МНОГООБРАЗИЕ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ДИАПАЗОНЕ 0-20kHz ДАТЧИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОЕКТЕ “ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП)” НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС

Грушин В.А.¹, Климов С.И.¹, Белова И.Э.¹, Новиков Д.И.¹, Салаи Ш.², Балайти К.², Сегеди П.³, Надь Я.², Белякова Л.Д.¹, Гречко Т.В.¹, Осадчая Л.А.¹

1-ИКИ РАН, г. Москва, 2-Вигнеровский научный центр Венгерской академии наук, 3-университет Ётвёша г.Будапешт, Венгрия

1-ИКИ РАН, г. Москва, Россия, vgrushin@cosmos.ru

Спектроанализатор SAS-3, был одним из приборов плазменно-волнового комплекса на борту Российского сегмента МКС в 2013 г. и обрабатывал на борту информацию с датчиков электрического и магнитного поля [1]. На входе стояли АЦП с частотой дискретизации 40 кГц. Эта информация разделялась на два потока для передачи на Землю – мониторинговые спектральные данные, содержавшие средние Фурье-спектры за 6 минут и выборочные интервалы волновой формы длительностью 2.7 сек в полном разрешении (40 кГц).

Большое число интервалов волновой формы, преобразованных в Фурье-спектрограммы содержат изображение свистящих атмосфериков (вистлеров), то есть радиосигналов, возбуждаемых грозовыми разрядами и распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Для ряда примеров вистлеров исследованы функции изменения частоты от времени, соотнесённые с индексом L оболочки, на которой был принят сигнал, сравнили с примерами вистлеров, зафиксированных и исследованных в различных космических и наземных экспериментах.

[1] Климов С.И., В.А. Грушин, К. Балайти и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперименте «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС. Космическая техника и технологии № 1(32)/2021, стр. 20-41. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-1-20-41

1. Iyemori T. et al. // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74. P. 103.
2. Surkov V.V. et al. // J. Geophys. Res. 2023. V. 128(10). e2023JA031872.
3. Сурков В.В., Пилипенко В.А. // Физика Земли. 2024. №. 1. С. 57-67.

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ

Мирмович Э.Г., к.ф.-м.н., доцент

Петровская академия наук (Московское отделение), г. Москва, mirmovich1940@mail.ru

Являясь представителем старой ионосферной школы «птенцов» ИЗМИРАНа и СиБИЗМИРа (возможно, одним из самых возрастных), автор считает, что большинство полученных им результатов в области гелиогеофизики остались физически не объяснёнными, либо вовсе незамеченными, хотя могли бы стать темами и даже направлениями для действующих или будущих молодых «ионосферщиков». К ним относятся:

введение в научный обиход принципиально нового термина ТИВ – термосферно-ионосферное возмущение (ТИВ) как альтернативы ионосферно-магнитному [1, 5, 7];

популярный, но не получивший адекватного объяснения открытый автором эффект опережения отдельным классом положительных ТИВ начала магнитной бури [1–4];

необходимость корректировки критериев, выработанных и введенных учёными и специалистами Гидрометеослужбы России ещё в 1993 году как в ионосферно-магнитной, так и в радиационной составляющей [6]. Так, нет влияния магнитных бурь на объекты энергетики, здоровье людей, учёта загрязнения ближнего космоса мусором, риск от которого выше астероидно-кометной опасности, нужен также пересмотр вопроса о составе солнечных космических лучей и нейтронов в них, что важно для полётов на длинных авиатрассах и космонавтов, изменения взглядов на наличие нейтронов на Солнце;

эффект квазипериодической структуры суточного хода f_oF_2 в дневное (освещённое) время с периодами ~ 3 час. в зимний и ~ 5 час. в равноденственные периоды, и почти отсутствие в летнее время. Наибольшая амплитуда этих ТИВ отмечена над ДВ регионом и, в особенности, над Японией (Wakkanai и др.). Наблюдаются в спокойное время и исчезают при усилении магнитной активности. К источнику такого рода ТИВ автор относит эффекты обтекания препятствий над Тибетом с Гималаями, т.к. меньшие по амплитуде, но чётко выраженные вариации суточного хода f_oF_2 обнаружены также на f-графиках американских ионосферных станций, расположенных вблизи Кордильер [8].

1. Мирмович, Э.Г. Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений / Автореф. дисс... канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 1981. 23 с.
2. Mirmovich, E.G. Ionospheric Behavior during August 2-11, 1972... over Khabarovsk. Report UAG, ЯО.28, WDCenter A, Boulder, Colorado, USA, 1973, part II. PP. 557–561.
3. Данилов, А.Д., Мирмович Э.Г., Морозова Л.Д. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагн. и аэронав. Т.25, №5. 1985. С. 768–772.
4. Мирмович, Э.Г. Фундаментальность явления опережения начала магнитной бури одним из типов положительных возмущений среднеширотной ионосферы / 16-я Всероссийская открытая научн. конф. «Физика плазмы в солнечной системе», М., ИКИ РАН. 2021. С. 192. <https://plasma2021.cosmos.ru/docs/2021/PLASMA-2021-AbstractBook-0202.pdf>.
5. Мирмович, Э.Г. Термосферно-ионосферные возмущения как отдельный класс возмущений ионосферы / Там же. С. 193.
6. Мирмович, Э.Г. Потенциальные источники чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического происхождения / Там же. С. 279.
7. Мирмович, Э.Г. Три источника – три составные части» генерации термосферно-ионосферных возмущений (статья) / «Physics of auroral phenomena». 44th Annual Seminar, 15-19.03.2021 г. Апатиты. ПГИ РАН. С. 137-141. <http://pgia.ru:81/seminar/archive/>.
8. Мирмович Э.Г. Квазипериодическая структура дневного хода f_oF_2 . Экспресс-информация ВНИИГМИ-МЦД, метеорология. Обнинск, 1976, вып. 3(47). С. 14–18.

ОСОБЕННОСТИ И АППРОКСИМАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИЕЙ ЗАВИСИМОСТИ ИОНИЗАЦИИ ТЕРМОСФЕРЫ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Мирмович Э.Г.

Петровская академия наук (Московское отделение), Россия, mirmovich1940@mail.ru

Нелинейность зависимости состояния ионизации верхней атмосферы от солнечной активности (СА) была отмечена впервые А.И. Лихачёвым (Томск) по данным за период чуть больше 18-го солнечного цикла (цит. по работе [1], в которой зависимость реакции ионосферы на вариации СА за несколько циклов была представлена полиномиальной квадратичной регрессией). Эффект ограничения или «насыщения» в критических частотах области F-ионосферы (f_oF_2) в летние месяцы, на который обращается внимание в настоящей работе, отдельным ключевым моментом в этих работах выделен не был. Настоящие данные

основаны на исследованиях автора, представленных в научных отчётах прошлых лет по станции Хабаровск (48°СШ) за период 1959–1969 гг., захвативший максимум 19-го, одного из самых сильных из наблюдавшихся циклов СА с $W_{max}=285$. На рис. 1 представлен график эмпирических функций «ручной» аппроксимации, в которой аргументом является индекс СА – W, а по ординате нанесены среднемесячные медианные значения f_oF_2 полуденные зимние, декабрь (1) и летние, июнь (2); минимальные в суточном ходе (2*), а также летние полуденные величины электронной концентрации N_mF_2 (3). Общим у всех кривых является тот факт, что до $W \sim 40-50$ для всех сезонов (и в равноденствия) зависимость от СА качественно иная, чем при $W > 50$, после чего зимой ионизация круто

растёт, а летом входит в зону ограничения, образуя эффект «насыщения». Аппроксимации такого типа лучше представляет простая и двойная сигмоидальная логистическая кривая (иллюстративный рис. 2, слева – характерные точки кривой A_i , соотносимые с точками перегибов на рис. 1) как функция решения уравнения вида $dP/dx = P(1-P)$ (например, [3, 4]). Надо отметить, что для общепринятого объяснения данному «эффекту насыщения», подобному фотоэффекту, своих Столетова и Эйнштейна не нашлось. Несмотря на снижение запроса со стороны задач РРВ КВ-диапазона, исследования и прогнозы ионосферы будут

актуальными хотя бы для демпфирования трудностей в получении прямых данных о составе, температуре и динамике верхней атмосферы; смежных задач гелиогеофизического характера, в т.ч. своей роли в оценке и прогнозе СА [5], её влиянии на жизнедеятельность на земле и в космосе.

1. Хаитов Р.К. Исследование вариаций параметров ионосферы в Томске за 6 циклов СА... / А.Н. Борисевич, С.А. Колесник, А.Г. Колесник. БШФФ, СФТИ. 2011. С. 263–265.
2. Данилов А.М. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем / И.А. Гарькина, Э.Р. Домке. Пенза: ПГУАС, 2011. 296 с.
3. Некрасов О.Н., Мирмович Э.Г. Интерполирование и аппроксимация полиномами степенного, экспоненциального и тригонометрического вида // НиОПЗ. 2010. № 4. С. 23–32.
4. Tverdyi, Dmitriy, and Roman Parovik. Application of the Fractional Riccati Equation for Mathematical Modeling of Dynamic Processes with Saturation and Memory Effect // Fractal and Fractional 6, №3, 2022. С.163. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6030163>.
5. Пектас Р. Отклик состояния ионосферы, характеризуемого f_oF_2 , на солнечную активность в 21, 22 и 23 циклах / А. Озгук, Т. Атак // СЗФ. Вып. 12. Т. 2. 2008. С. 246–247.

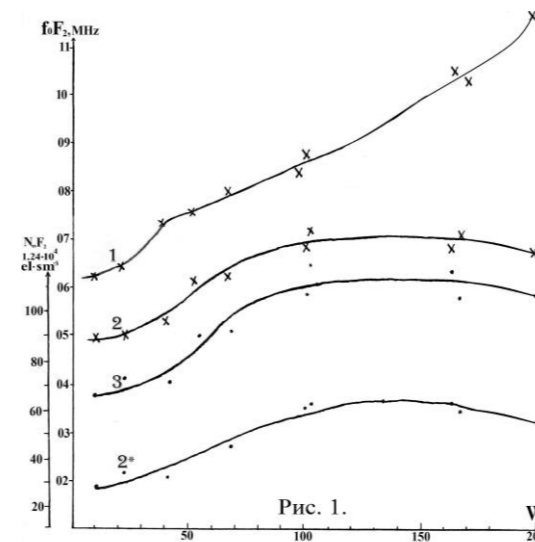


Рис. 1.

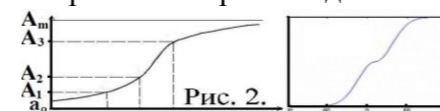


Рис. 2.

НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ ВОСХОДА И ЗАХОДА СОЛНЦА В ГОДЫ МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А.

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

В работе приведены результаты новых исследований нижней ионосферы Земли во время захода и восхода Солнца методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы, создаваемых мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда СУРА (56,1°N; 46,1°E). Измерения проводились в условиях высокой солнечной активности 27–29 июня 2023 г. (среднемесячное число солнечных пятен $W=160.5$), 4–5 октября 2023 г. ($W=134.2$) и 23–24 сентября 2024 г. ($W=141.4$). Неоднородности создавались излучением в зенит передатчиками стенда СУРА мощной радиоволны необыкновенной либо обыкновенной поляризации на частотах 4.3, 4.7 или 5.6 МГц. Локация (зондирование) неоднородностей во время их развития и релаксации после окончания воздействия на ионосферу проводилась на тех же частотах радиоволнами той же поляризации. Измерялись амплитуды и фазы сигналов, рассеянных искусственными неоднородностями. На основе этих измерений получены новые данные о вариациях амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала по высоте и во времени, скорости вертикального движения плазмы, температуры нейтральной компоненты в нижней ионосфере в заходно-восходные часы.

Выделим следующие основные результаты.

На заходе Солнца наблюдался характерный для перехода к ночному режиму ионосферы рост высот рассеянных сигналов в области D с постепенным ее пропаданием в ночные часы. Подтверждена заходно-восходная асимметрия области D, которая проявлялась в том, что в вечерние часы наблюдались более интенсивные рассеянные сигналы, занимавшие больший интервал высот, чем на восходе, что обусловлено особенностями суточного изменения коэффициентов прилипания и отлипания электронов от нейтральных молекул. В часы захода и восхода Солнца часто развивался спорадический слой E, улучшая условия образования ИПН с усилением рассеянного сигнала.

Скорость вертикального движения плазмы, определяемая по фазе сигнала, рассеянного неоднородностями и совпадающая на высотах 60–130 км со скоростью нейтральной компоненты, изменялась в пределах –10 до +10 м/с с периодической сменой величины и направления. Температура нейтральной компоненты, определяемая по времени релаксации рассеянного сигнала, изменялась на высотах 95–115 км, в основном, от 90 К до 250 К. Вертикальный масштаб вариаций температуры составил 2–14 км. Высотные профили температуры имели более регулярный вид в послевосходные часы.

Интенсивные волновые движения с периодами, характерными для внутренних гравитационных волн, распространяющихся в атмосфере Земли, наблюдались в вариациях времени релаксации рассеянного сигнала, скорости вертикального движения плазмы и температуры нейтральной компоненты.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-27-00031.

ЭЛЕКТРОФОННЫЕ ЗВУКИ ОТ ПРОЛЕТОВ МЕТЕОРОИДОВ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Морозова Т.И., Попель С.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru

Метеороиды, или метеорные тела, вторгаются в атмосферу Земли, образуя за собой плазменно-пылевой хвост, содержащий электроны и ионы атмосферных атомов и атомов метеорного вещества, а также заряженные пылевые частицы. В результате сгорания метеорных тел в атмосфере Земли происходит их постепенное разрушение и формирование плазменно-пылевого следа за метеорным телом. Данный процесс осуществляется в несколько этапов и за счет действия различных механизмов: испарения и последующей конденсации метеорного вещества, плавления и последующего затвердения расплавленных струй, а также механического и термомеханического дробления метеорного тела. Все эти процессы относятся к процессам абляции метеорного тела. Самым быстрым процессом формирования пылевого хвоста за метеорным телом является его механическое и термомеханическое дробление. При достижении в метеорном теле больших напряжений происходит его дробление, в результате которого с краев отделяющихся фрагментов и головного тела может происходить эмиссия электронов и частицы будут приобретать электрические заряды. Следует отметить, что на величину их заряда будет также оказывать влияние активная термоэлектронная эмиссия с разогретого метеорного тела и его фрагментов, а также воздействия токов электронов и ионов окружающей плазмы, образующейся в метеорном хвосте и фототока при достаточном свечении метеора или при воздействии солнечного излучения. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц в метеороидном следе и созданию пылевой плазмы метеороидного хвоста.

В плазменно-пылевых системах хвостов метеороидов могут возникать различные волновые колебания. В частности, принимая во внимание неоднородности концентрации плазмы хвостов метеороидов и наличие магнитного поля Земли, возможным оказывается возбуждение дрейфовых нижнегибридных волн. Рассмотрены условия, при которых оказывается возможным распространение дрейфовых нижнегибридных волн в плазме хвостов метеороидов во время их пролёта в атмосфере Земной или и развитие модуляционной неустойчивости данных волн. Отмечается, что появление электрофонных звуков одновременно с пролётом метеорных тел может быть связано с развитием дрейфовой нижнегибридной турбулентности в хвостах метеороидов.

МАГНИТНАЯ БУРЯ 10-12 МАЯ 2024 В ИОНОСФЕРЕ: АСИММЕТРИЯ ОТКЛИКА ДВУХ ПОЛУШАРИЙ

Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

НИИФ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, oamaltseva@sfedu.ru

Магнитная буря 10-12 мая 2024 имела планетарный характер, поэтому в глобальном масштабе изучение отклика ионосферы является наиболее репрезентативным с помощью полного электронного содержания ТЕС, поскольку его глобальные карты позволяют увидеть более детальную картину, чем данные вертикального зондирования или даже спутников. Если посмотреть на широтное распределение ТЕС и его отклонений δTEC от медианы на любом меридиане, то можно увидеть очень сильную асимметрию отклика двух полушарий. Представлены графики в виде широтных распределений ТЕС и δTEC на примере меридиана 30° E и 4 выбранных моментов: 1) 10 мая, UT20 – начало реакции ионосферы после SSC и скачка V_{sw} , 2) 11 мая, UT02 – минимум Dst, конец главной фазы, 3) 11 мая, UT20 – после второго небольшого скачка V_{sw} , 4) 12 мая, UT08 – момент глубокой фазы восстановления. Первый период характеризуется усилением ТЕС в высокоширотной зоне южного полушария с δTEC до 500%. Второй период характеризуется отрицательным возмущением в северном полушарии с $\delta\text{TEC} \sim -50\%$ и положительным возмущением в южном с $\delta\text{TEC} \geq 300\%$. Третий период характеризуется усилением отрицательного возмущения $\delta\text{TEC} \sim -60\%$ - -70% и существенным уменьшением широтного диапазона положительного возмущения с максимумом $\delta\text{TEC} \sim 80\%$. Четвертый период характеризуется отрицательным возмущением в обоих полушариях за исключением экваториальной зоны. Были выбраны две широты $\pm 50^\circ$ для построения долготной зависимости δTEC . В этом случае различия полушарий видны наиболее наглядно. В первом случае это положительное возмущение во всем диапазоне южного полушария с максимумами $\delta\text{TEC} \sim 500\%$ в районе 60° E и $\sim 300\%$ в районе 220° E, в северном полушарии незначительное отрицательное возмущение. Во втором случае сужается зона положительного возмущения в южном полушарии с уменьшением максимума до $\sim 300\%$, в северном полушарии усиление отрицательного возмущения. В третьем периоде существенно уменьшается зона положительного возмущения в южном полушарии ($20\text{-}100^\circ$ E), в северном полушарии отрицательное возмущение усиливается до -60% . В четвертом периоде оба полушария испытывают отрицательное возмущение. Что касается интерпретации этих наблюдений, то в статье [1] показано, что они могут являться результатом взаимодействия между быстрыми проникающими PPEF и возмущенными динамо DDEF электрическими полями: во время главной и ранней восстановительной фаз доминирующую роль в динамике и перераспределении ионосферной плазмы играет PPEF, начиная с 9-10 UT 11 мая начинает превалировать DDEF.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание Г3110/23-10-ИФ).

1 Astafyeva, Elvira, Maletckii, B., Förster, M., et al.: Extreme ionospheric uplift and a remarkable negative storm phase during the 10-11 May 2024 geomagnetic superstorm. ESS Open Archive December 03 (2024). DOI: 10.22541/essoar.173325230.07581097/v1.

СЕКЦИЯ «Магнитосфера»

Вторник, 11.02.2025 г., комната 202

		Председатель: Е.Е.Григоренко	
№	Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада
1	09.00 - 09.15	В.В. Калегаев и др	Вариации потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли под воздействием продолжительных суббуревых активаций
2	09.15 - 09.30	И.В. Дэспирак	«Полярные» суббури во время экстремально медленного солнечного ветра
3	09.30 - 09.45	И.Б. Иевенко и С.Г. Парников	Влияние солнечной активности на высоту SAR дуг по данным наблюдений на меридиане Якутска
4	09.45 - 10.00	С.А. Рябова	Сравнительный анализ спектров вариаций числа солнечных пятен и вариаций геомагнитного поля на обсерватории Эскдалемюр в диапазоне периодов 2-41 год
5	10.00 - 10.15	И.Н. Мягкова и О.В. Козырева	Динамика внешнего радиационного пояса Земли и волновой активности в диапазоне геомагнитных пульсаций PC5 во время магнитных бурь, вызванных высокоскоростными потоками солнечного ветра и корональными выбросами массы
6	10.15 - 10.30	Е.А. Гинзбург	Об особенностях регистрации протонов внутреннего пояса на спутниках Метеор всенаправленными и узконаправленными детекторами.
		10.30 - 11.00	Перерыв на кофе
		Председатель: А.Г. Демехов	
7	11.00 - 11.15	В.А. Сергеев и др.	О влиянии плазменных параметров солнечного ветра на динамику магнитосферных суббурь и авроральную проводимость
8	11.15 - 11.30	В.С. Семенов	Роль кольцевого тока в нестационарном цикле Данжи
9	11.30 - 11.45	А.В. Суворова и А.В. Дмитриев	Проникновение квазизахваченных энергичных электронов (30-300 кэВ) в экваториальную ионосферу во время экстремальных бурь: сравнение для 23 и 25 циклов
10	11.45 - 12.00	Ю.С. Загайнова и др.	Внезапное начало геомагнитной бури по данным с секундным временным

			разрешением на примере двух SC-событий от 17 марта 2013г. и 17 марта 2015 г.
11	12.00 - 12.15	В.Б. Белаховский и В.А. Пилипенко	О вкладе полоидальных Pc4 волн в ускорение электронов внешнего радиационного пояса до релятивистских энергий
12	12.15 - 12.30	Ю.А. Кропотина и А.М. Быков	Распределения надтепловых протонов в глобальной гибридной модели магнитосферы Земли
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	13.30 - 14.30	Обед	
Председатель: В.С. Семенов			
13	14.30 - 14.45	А.Р. Иванова и др.	Высыпания энергичных электронов, вызванные совместным действием разных механизмов рассеяния
14	14.45 - 15.00	П.А. Климов и др.	Микровсплески оптического излучения в авроральной зоне: результаты трех сезонов наблюдений проекта RAIPS
15	15.00 - 15.15	К.Д. Щелканов и др.	Спектральные характеристики микровсплесков в авроральной зоне по данным RAIPS
16	15.15 - 15.30	И.П. Парамоник и др.	Сравнение температуры холодных ионов в областях магнитного пересоединения с применением GMM
17	15.30 - 15.45	Е.Е. Григоренко и др.	Наблюдение вторичного магнитного пересоединения вблизи нейтральной плоскости токового слоя хвоста в русле быстрого плазменного потока
18	15.45 - 16.00	М.В. Леоненко и др.	О связи между электростатическими солитонными волнами и токовыми слоями электронных кинетических масштабов в центральном плазменном слое геомагнитного хвоста Земли
	16.00 - 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель: В.В. Калегаяев			
19	16.30 - 16.45	Г.А. Котова, В.В. Безруких	Влияние солнечного ветра на плазмосферу Земли
20	16.45 - 17.00	Д.В. Чугунин и др.	Зависимость электронной концентрации от географической долготы в плазмосфере
21	17.00 - 17.15	И.П. Кирпичев и Е.Е. Антонова	Изменение основных характеристик плазмы при эволюции радиального профиля давления к плато.
22	17.15 - 17.30	Е.Е. Антонова и др.	Обобщенный закон Ома и особенности развития магнитосферных процессов
23	17.30 - 17.45	А.А. Чибранов и др.	Лабораторное моделирование разлета коллимированных плазменных потоков в поперечном магнитном поле
24	17.45 - 18.00	Юшков Б.Ю.	Расчет проникновения космических лучей в магнитосферу Юпитера

18.00 - 18.30	Постерная сессия
---------------	-------------------------

Доклады постерной сессии секции «Магнитосфера»

- 5.1 Потапов А.С. и др. Перемещение тяжелых ионов к геомагнитному экватору под действием пондеромоторных сил
- 5.2 Суворова А.В., Дмитриев А.В. Оценка параметров электрического дрейфа энергичных электронов и протонов вблизи внутренней кромки радиационного пояса
- 5.3 Ковражкин Р.А. и др. Скейлинг энергии структуры VDIS и составляющих ее сигнатур ионных бимлетов в полярной авроральной магнитосфере
- 5.4 Попова Т.А. и др. Свойства высыпаний релятивистских электронов в годы низкой (2017) и высокой (2023) солнечной активности
- 5.5 Зыкина А.А. и др. Потоки релятивистских электронов внешнего радиационного пояса на геостационарной орбите в период низкой геомагнитной активности 7-25 января 2018 г.
- 5.6 Лаврухин А.С., и др. Моделирование магнитного поля в переходном слое магнитосферы Земли по данным КА THEMIS
- 5.7 Дмитриев А.В., Суворова А.В. Пересечения дневной магнитопаузы во время бури 10 мая 2024: анализ условий в солнечном ветре
- 5.8 Ковражкин Р.А., и др. Авроральные инъекции электронов и генерация Pi2 геомагнитных пульсаций при развитии изолированной суббури
- 5.9 Смирнова Н.Ф., Станев Г. Концентрация электронов в ближней магнитосфере при низкой солнечной активности на основе сопоставления результатов, полученных со спутников ИНТЕРБОЛ-2, POLAR, S3-3
- 5.10 Иванов А.Е. и др. Экспериментальное испытание специальных мишеней и проведение 2-х импульсного облучения шарообразной мишени для увеличения энергии сферических облаков лазерной плазмы
- 5.11 Логинов М.В. и др. Разработка и изготовление измерительного контура для регистрации интегральных возмущений магнитного поля на экспериментальном лазерно-плазменном стенде КИ-1
- 5.12 Громова Л.И., и др. Супербури 10 мая 2024 г.: эффект резкого изменения структуры ММП в распределении высокоширотных ионосферных токов по данным системы низкоорбитальных спутников проекта AMPERE
- 5.13 Макаров Г.А. Влияние межпланетных параметров на показатель степени симметрии магнитосферного кольцевого тока
- 5.14 Груздов Д.С., и др. Пространственно-энергетические зависимости потоков электронов в максимуме внешнего радиационного пояса во время геомагнитных возмущений
- 5.15 Смолин С.В. Нелинейный эффект для потоков заряженных частиц на геостационарной орбите
- 5.16 Яхнина Т.А. и др. Сравнительные характеристики высыпаний релятивистских электронов, связанных с ослаблением напряженности магнитного поля в районе Южно-Атлантической аномалии, с высыпаниями релятивистских электронов, вызванных другими механизмами.

ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ СУББУРЕВЫХ АКТИВАЦИЙ

Калегаев В. В.^{1,2}, Груздов Д. С.^{1,2}, Власова Н. А.²

1 Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,

2 НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия,

klg@decl.sinp.msu.ru

Исследовалась динамика внешнего радиационного пояса в период продолжительной авроральной активности 11-16.10.2017. Приход плотного облака плазмы солнечного ветра в ночь с 10 на 11 октября вызвал слабое геомагнитное возмущение и дал старт серии суббурь. При начальной компрессии магнитосферы наблюдается падение потоков электронов. Это типичная реакция внешнего радиационного пояса на воздействие высокоскоростного потока солнечного ветра, обусловленная, как адиабатическим Dst-эффектом, так и развитием волновой активности в ОНЧ диапазоне. В дальнейшем, в динамике максимумов потоков электронов на геостационарной орбите присутствует несомненная тенденция к возрастанию, особенно заметная в вариациях потоков электронов релятивистских энергий.

Проанализирована возможная роль суббуревой активности в наблюдаемой эволюции внешнего радиационного пояса. Рассмотрены вариации потоков, измеренные на спутниках GOES детекторами высокоэнергичных электронов (0.8 и 2 МэВ) и электронов средних энергий в диапазоне 40-475 кэВ. Серия суббурь привела к инъекциям энергичных электронов во внутреннюю магнитосферу. Спутниковые измерения демонстрируют непосредственный отклик частиц средних энергий на суббуревые инъекции. Пониженные потоки частиц с энергиями 700 кэВ и выше не восстанавливаются сразу. Возрастание потоков частиц субрелятивистских и релятивистских энергий обусловлено кумулятивным эффектом при регулярном и последовательном воздействии индукционного электрического поля, которое генерируется в ходе серии суббурь. Продолжающиеся суббури постепенно доускоряют энергичные электроны до более высоких энергий, приводя к возрастанию потоков частиц релятивистских энергий на два порядка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

«ПОЛЯРНЫЕ» СУББУРИ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНО МЕДЛЕННОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Дэспирак И.В.¹, Клейменова Н.Г.², Любич А.А.¹, Сецко П.В.¹, Малышева Л.М.²

ПГИ, г. Анатиты, Россия, despirak@gmail.com

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

«Полярные» суббури были определены как суббури, наблюдаемые на высоких геомагнитных широтах ($>70^\circ$ MLAT) при отсутствии суббуреподобных возмущений на более низких широтах. Анализ ограничен долготным сектором сети IMAGE (~ 108 - 114 Mlong), в этом случае «полярные» суббури развиваются над архипелагом Шпицберген. «Полярные» суббури обычно наблюдаются в спокойных геомагнитных условиях, но остается открытым вопрос, могут ли «полярные» суббури развиваться в экстремально спокойных условиях, когда величины геоэффективных параметров космической погоды очень малы. Мы изучили 92 интервала «экстремального геомагнитного спокойствия» в 2010-2020 гг., связанных с интервалами экстремально медленного солнечного ветра (ESSWs, $V < 300$ км/с). Установлено, что «полярные» суббури наблюдались даже в условиях экстремально медленного солнечного ветра, однако с появлением отрицательной Vz-компоненты ММП; было найдено 32 таких события в долготном секторе сети IMAGE в 17 интервалах ESSW ($\sim 19\%$ всех интервалов ESSW). Показано, что «полярные» суббури во время ESSW имели основные черты обычных суббурь, а именно они сопровождалась геомагнитными пульсациями P1B, положительными субавроральными или среднеширотными магнитными бухтами, смещением к полюсу западного электроджета и полярными сияниями во время его фазы расширения. Кроме того, было обнаружено, что большинство событий ($\sim 82\%$) «полярных» суббурь во время ESSW были изолированными событиями, развивавшимися только в предполуночном секторе, без суббуревых возмущений в других долготных секторах. Несколько событий «полярных» суббурь проанализированы подробно.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ВЫСОТУ SAR ДУГ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА МЕРИДИАНЕ ЯКУТСКА

Иевенко И.Б., Парников С.Г.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, ievenko@ikfia.ysn.ru

Принято считать, что высота максимума интенсивности красной линии атомарного кислорода в стабильных авроральных красных (SAR) дугах имеет среднее значение 400-450 км. В то же время высота максимальной скорости возбуждения эмиссии 630.0 нм в дуге потоком сверх тепловых электронов должна зависеть от высотного распределения плотности атомарного кислорода и коэффициента дезактивации возбужденных атомов $O(^1D)$. Известно значительное изменение высотного распределения плотности верхней нейтральной атмосферы в солнечном цикле. Согласно модели атмосферы MSISE-90 на высотах 350 и 450 км, общепринятых для красных дуг, концентрация O уменьшалась в ~ 4 и ~ 9 раз, соответственно, в минимуме 23 солнечного цикла. Это дает основание полагать, что высота SAR дуг должна уменьшаться во время минимумов солнечной активности.

По данным многолетних наблюдений субаврорального свечения мы знаем, что в условиях низкой магнитной активности ($Dst \geq -50$ nT; $Kp \leq 3-4$) SAR дуги возникают во время отдельных суббурь. Красные дуги в таких событиях наблюдаются на геомагнитных широтах $55-60^\circ$ [1-4]. В работе [5] рассмотрены первые результаты триангуляционных измерений высоты SAR-дуг на меридиане Якутска в 2015–2020 гг. Получены значения высоты нижней границы свечения в красной дуге в интервалах 240–290 и 350–370 км в минимуме и максимуме 24 солнечного цикла, соответственно. В этом сообщении представлены данные новых триангуляционных наблюдений красных дуг в 2023-2024 гг. Получены значения высоты нижней границы свечения в SAR дугах 350-450 км вблизи максимума 25-го цикла солнечной активности. Увеличение высоты красных дуг было зарегистрировано во время низкой магнитной активности, что может указывать на прямое влияние солнечной радиации (экстремального ультрафиолета) на верхнюю нейтральную атмосферу Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011700172-2).

1. Иевенко И.Б. // Геомагнетизм и аэрономия 1999. Т. 39. С. 26.
2. Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. // Геомагнетизм и аэрономия 2004. Т. 44. С. 643.
3. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. // Adv. Space Res 2008. V. 41. P. 1252.
4. Иевенко И.Б., Парников С.Г. // Геомагнетизм и аэрономия 2022. Т. 62. С. 171.
5. Иевенко И.Б., Парников С.Г., Сокольников А.В. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2023. Т. 87. С. 254.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ВАРИАЦИЙ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИИ ЭСКДАЛЕМЮР В ДИАПАЗОНЕ ПЕРИОДОВ 2-41 ГОД

Рябова С.А.^{1,2}

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, ²ИДГ РАН, г. Москва, Россия, ryabovasa@mail.ru

При проведении настоящих исследований в качестве характеристики вариаций геомагнитного поля использовались вариации восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля, как компоненты наименее подверженной влиянию источников солнечного происхождения. Привлекались данные инструментальных наблюдений, выполненных на обсерватории Эскдалемюр – национальной обсерватории окружающей среды Великобритании, и суточные значения числа Вольфа, которое является самым распространенным индексом солнечной активности за период с 1 января 1941 г. по 31 декабря 2023 г.

С целью получения информации о частотном составе исследуемых цифровых рядов в настоящей работе использовался спектральный анализ в виде построения периодограмм Ломба–Скаргла.

Спектральный анализ цифрового ряда суточных значений числа Вольфа выявил следующие спектральные пики: пик с периодом ~ 33.22 года, соответствующий второй гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~ 22.14 года, соответствующий 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла); пик с периодом ~ 15.81 года, соответствующий четвертой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~ 13.84 года, соответствующий пятой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~ 11.07 года, соответствующий 11-летнему циклу солнечной активности (цикл Швабе или цикл Швабе-Вольфа), т.е. второй гармонике 22-летнего цикла. Ярко выражены в спектре гармоники с периодами 5.54 и 7.38 года, соответствующие третьей и четвертой гармоникам 22-летнего цикла солнечной активности. Во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 2 до 5 лет гармоники (4.74, 3.86, 3.22, 2.81, 2.49, 2.32 и 2.1 года) можно интерпретировать как пятую, шестую, седьмую, восьмую, девятую, десятую и одиннадцатую гармоники цикла Хейла соответственно.

Более сложная картина наблюдается при спектральном анализе вариаций магнитного поля Земли. Спектральный анализ цифрового ряда суточных значений числа Вольфа выявил следующие спектральные пики: пик с периодом ~ 30.21 года, соответствующий второй гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~ 22.14 года, соответствующий 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла); пик с периодом ~ 16.61 года, соответствующий четвертой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~ 14.44 года, соответствующий пятой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~ 11.45 года, соответствующий 11-летнему циклу солнечной активности (цикл Швабе или цикл Швабе-Вольфа), т.е. второй гармонике 22-летнего цикла. Значимыми пиками в спектре в диапазоне от 5 до 10 лет являются гармоники с периодами 5.63, 6.51 и 7.72 года. Гармоники с периодами 7.72 и 5.63 года соответствуют третьей и четвертой гармоникам 22-летнего цикла солнечной активности. Во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 2 до 5 лет выделяются значимые пики: 4.67, 3.77, 3.35, 2.79, 2.46, 2.32 и 2.09 года, которые можно интерпретировать как пятую, шестую, седьмую, восьмую, девятую, десятую и одиннадцатую гармоники цикла Хейла соответственно.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (FMWN-2025-0003).

ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ И ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ PC5 ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ВЫЗВАННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ ПОТОКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ

Мягкова И.Н.¹, Козырева О.В.²

¹НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия, irina@srd.sinp.msu.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, kozyreva@ifz.ru

Задачей данного исследования было сравнение связи вариаций потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) с волновой активностью во время магнитных бурь, вызванных разными причинами – а) приходом к Земле высокоскоростного потока солнечного ветра (ВСП СВ) из корональных дыр (ВСП-бури) и б) корональными выбросами массы (КВМ-бури). Для этого был выполнен сравнительный анализ вариаций потоков электронов внешнего РПЗ и волновой УНЧ-активности во время двух магнитных бурь 2005 года – магнитной бури 9–14 мая, вызванной приходом к Земле ВСП СВ – (ВСП-буря), и второй бури 14–16 мая, вызванной корональным выбросом массы (КВМ-буря). Анализ потоков электронов внешнего РПЗ в широком диапазоне энергий – от 300 кэВ до >3.5 МэВ – выполнялся на основе данных спутниковых измерений, выполненных на спутниках с круговой полярной орбитой – ИСЗ КОРОНАС-Ф (высота орбиты 365 км) [1] и “Университетский-Татьяна” (высота орбиты 1000 км) [2], а также на геостационарной орбите (GOES-11). Была исследована динамика потоков релятивистских и суб-релятивистских электронов во внешнем РПЗ во время указанных бурь. Показано, что поток релятивистских электронов во внешнем РПЗ значительно уменьшался на главной фазе бурь обоих типов, как и в более ранних экспериментах [1]. Затем во время фазы восстановления как ВСП, так и КВМ-бури поток электронов существенно увеличивался и внешний электронный пояс расширялся. При этом после КВМ-бури итоговая интенсивность пояса оказалась существенно выше, чем после ВСП-бури, он имел более широкое распределение по L и его максимум переместился на более высокие L. Было проведено сопоставление с наземной и магнитосферной УНЧ-активностью в диапазоне 2–7 мГц. Волновая активность исследовалась с помощью УНЧ-индекса [3]. Было получено, что динамика УНЧ-активности также была схожей во время ВСП и КВМ-бурь, но УНЧ-вариации в КВМ-буре были более интенсивными, и имели более широкое распределение по L сравнению с ВСП-бурей.

1. С. Н. Кузнецов, И. Н. Мягкова, Е. А. Муравьева и др. «Динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли по данным прибора МКЛ» // *Солнечно-земная физика. Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф*, сс. 332–342, Физматлит, Москва, 2009.

2. Myagkova I.N., M.I. Panasyuk, L.L. Lazutin, et al., December 2006 solar extreme events and their influence on the near-Earth space environment: “Universitetskiy -Tatiana” satellite observation // *Advances in Space Research*. 2009. V. 43, P. 483-494

3. Kozyreva O., Pilipenko V., Engebretson M.J. et al. In search of a new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons // *Planetary and Space Science*. 2007. V. 55.P. 755–769.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

Об особенностях регистрации протонов внутреннего пояса на спутниках Метеор всенаправленными и узконаправленными детекторами.

Гинзбург Е.А.

Институт прикладной геофизики им. академика Федорова Е.К., Москва, Россия, e_ginzburg@mail.ru

На спутниках Метеор-М1 (запуск 17-09-2009) и Метеор-М2 (запуск 08-07-2014) помимо традиционных всенаправленных газоразрядных гейгеровских счетчиков (ИПГ) впервые применялись узконаправленные телескопические приборы СКЛ и МСГИ (НИИЯФ МГУ), установленные в двух взаимно перпендикулярных направлениях – по вектору скорости спутника (направление X) и радиально в зенит (направление Z). Сразу же обнаружилось различие в пространственном распределении потоков протонов во внутреннем поясе при пролетах через него в одной и той же области долгот в направлении от экватора к южному полюсу и от южного полюса к экватору (рис.1) При пролете от экватора к полюсу (верхний правый график) профили потоков, зарегистрированные всенаправленными счетчиками и телескопами X и Z, располагались примерно один под другим («матрешка»). При пролете в обратном направлении «всенаправленный» профиль (левый верхний график) примерно сохранял свое положение, а X и Z профили как бы разъезжались в разные стороны (невольное сравнение с зебрановским расщеплением спектральных линий).

Было сделано предположение о том, что на орбитах этих спутников ориентация осей телескопов по отношению к вектору магнитного поля зависит от долготы и от направления движения, и, следовательно, в зависимости от этого в поле зрения детектора попадают разные области пичч/углового распределения частиц. Проведенные расчеты на основе траекторных данных и модели магнитного поля IGRF подтвердили это предположение. Далее была взята простая модель экваториального пичч-углового распределения протонов во внутреннем поясе в виде $j_o(\mu_o) = \begin{cases} A(\mu_{co}^2 - \mu_o^2)^n, & \mu_o < \mu_{co} \\ 0, & \mu_o \geq \mu_{co} \end{cases}$. где μ_o и μ_{co} – косинусы простого экваториального пичч-угла и угла атмосферных потерь соответственно. На основе этой модели были рассчитаны величины потоков, которые могут попасть в конус приема данного детектора. При этом учитывалось, что часть самого конуса приема может лежать внутри конуса атмосферных потерь. Результаты моделирования качественно совпадали с наблюдаемыми распределениями потоков, как показано на нижних графиках на рис.1.

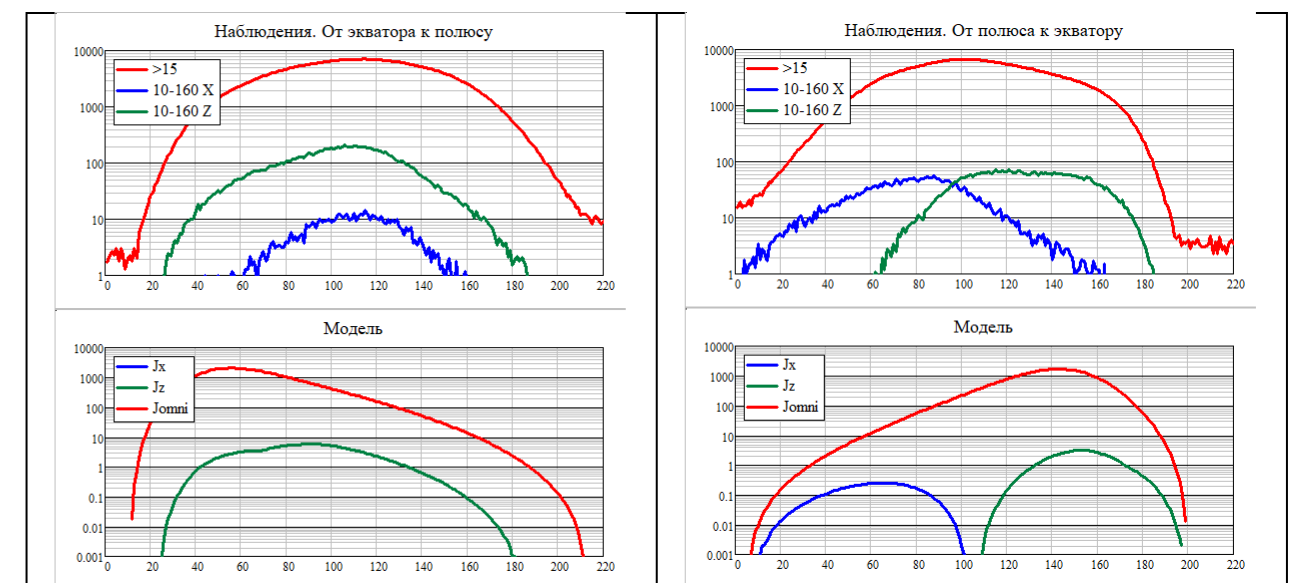


Рисунок 1

О ВЛИЯНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ДИНАМИКУ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ И АВРОРАЛЬНУЮ ПРОВОДИМОСТЬ

Сергеев В. А.¹, К. В. Белюченко¹, А. В. Дивин¹

1-Санкт-Петербургский госуниверситет, г.С-Петербург, Россия, victor40sergeev@gmail.com

Известно, что магнитосферные возмущения запитываются энергией из солнечного ветра (СВ), главным их драйвером является параметр типа $F=VB \sin^2(\theta/2)$ (где V – скорость СВ, B и θ - величина и часовой угол межпланетного магнитного поля, ММП) контролирующей интенсивность пересоединения на дневной магнитопаузе. Сжатия магнитосферы, определяемые динамическим давлением СВ ($Pd=mnV^2$), являются еще одним управляющим параметром, влияющим на вариации геомагнитного поля, ускорение частиц и срыв суббури. Температура (Т) и плотность плазмы (N) в плазменном слое отчасти задаются их значениями в солнечной ветре и они могут отличаться на порядок величины при разных состояниях последнего. Вопрос о том – влияют ли существенно плазменные параметры Т, N (помимо их влияния на величины драйверов F и Pd) на развитие конвекции, магнитосферных суббурь и высыпаний, определяющих проводимость авроральной ионосферы, специально не исследовался, хотя есть основания такое влияние ожидать. Одним из возможных факторов влияния является отношение $eTN \equiv Te^{1/2}/Ne$ в плазменном слое, величина которого определяет эффективность продольного ускорения авроральных электронов.

Анализ проведен на материале двух симуляций (реализованных в центре ССМС) при одинаковых значениях $F(t)$ и Pd в случаях постоянных медленного/холодного/плотного СВ и быстрого/горячего/разреженного СВ в которых, как известно, в среднем образуется холодный/плотный (CDPS) либо горячий/разреженный (HTPS) плазменный слой. Использована модель MAGE-0.75-3 включающая глобальную МГД модель GAMERA с добавлением элементов кинетики из модели RCM и полуэмпирической модели авроральной проводимости. Показано, что за исключением тривиальных кинематических эффектов, основные глобальные электродинамические характеристики суббурь (пиковые значения разности потенциала поперек хвоста и изменения магнитных потоков, характер возмущений и длительности основных фаз суббури) оказываются схожими в двух симуляциях. Схожими по порядку оказались и максимальные величины интегральных проводимостей Холла и Педерсена, что не согласуется с различиями ожидаемыми в условиях CDPS и HTPS.

Общим свойством симуляций является формирование быстрыми струями в период взрывной фазы широкого канала новопересоединенных трубок с пониженными значениями ($Te^{1/2}/Ne$) в центральном секторе хвоста, где контраст между величинами в двух симуляциях оказывается гораздо меньше, чем между величинами eTN в прифланговых областях плазменного слоя. Эти горячие плазменные струи низкой плотности запитывают внутреннюю магнитосферу и в основном определяют высыпания и величины интегральной проводимости. Распределение параметра eTN в магнитосфере оказывается сильно неоднородным и систематически меняется на разных фазах суббури. Показано, что благодаря развитию конвекции в период предварительной фазы в центральной части хвоста происходит замещение разреженной горячей плазмы более плотной холодной плазмой, что ранее было найдено экспериментально в области утоньшающегося токового слоя.

Работа выполнена в лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы при поддержке СПбГУ.

Роль кольцевого тока в нестационарном цикле Данжи

Семенов В.С., Санкт-Петербургский Государственный Университет

Цикл Данжи пересмотрен, чтобы учесть существенно нестационарные эффекты магнитного пересоединения. С помощью теоремы Стокса показано, что в зоне развивающейся токовой петли суббури генерируется мощное электрическое поле с эффективной разностью потенциалов в несколько десятков кВ. Поэтому возникающая биркеландовская токовая петля является важным элементом ускорения частиц в магнитосфере, способствуя энергизации протонов и электронов кольцевого тока. Электрическое поле, возникающее в зоне диполяризации, усиливает уже существующий кольцевой ток, а замыкание его усиленной части через ионосферу генерирует продольные токи зоны 2. Движение расширяющегося частично кольцевого тока вокруг Земли вместе с дрейфом протонов и электронов переносит магнитный поток с ночной стороны магнитосферы на ее дневную сторону. На дневной магнитопаузе пересоединение также создает биркеландовскую токовую петлю, но теперь электрическое поле в области петли замедляет частицы кольцевого тока, и образуются области ослабленного кольцевого тока. Замыкание этих ослабленных токов приводит к переносу магнитного потока с дневной стороны на ночную, тем самым обеспечивая его общий баланс и завершая цикл Данжи. Работа поддержана грантом РФФИ 23-47-00084.

ПРОНИКНОВЕНИЕ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ (30-300 кэВ) В ЭКВАТОРИАЛЬНУЮ ИОНОСФЕРУ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ БУРЬ: СРАВНЕНИЕ ДЛЯ 23 И 25 ЦИКЛОВ.

Суворова А.В., Дмитриев А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, suvorova@decl.sinp.msu.ru

Внезапное возрастание потоков квазизахваченных энергичных электронов в запрещенной зоне, что находится ниже кромки внутреннего радиационного пояса на L-оболочках ≤ 1.2 , было обнаружено из анализа данных низкорбитальных солнечно-синхронных полярных спутников NOAA/POES и известно как явление FEE (англ. *forbidden energetic electrons*) [1]. Энергии электронов, характерные для интенсивных потоков FEE, составляют десятки и сотни кэВ. Интенсивность потока превышает фоновые значения $\sim 10^2$ (см² с ср)⁻¹ в запрещенной зоне на несколько порядков, но не превышает 10^7 (см² с ср)⁻¹. Механизм, который приводит к возрастаниям потоков FEE, до сих пор до конца не ясен.

Статистические исследования выявили интересные закономерности вероятности наблюдения FEE в солнечном цикле, по сезонам и локальному времени [2, 3]. Результаты этих исследований указывают на важную роль проводимости высокоширотной ионосферы в механизме проникновения электронов РПЗ в запрещенную зону.

Вероятность наблюдения FEE неоднозначно зависит от уровня геомагнитной активности [4]. Однако во время экстремально мощных магнитных бурь с $|Dst| \geq 400$ нТ это явление наблюдается всегда [5], хотя потоки необязательно самые высокие и длительные. В 23-м цикле солнечной активности таких бурь было четыре (31 марта 2001, 29-31 октября 2003, 20 ноября 2003 и 7-9 ноября 2004). В 25-м цикле мощная буря произошла 10-11 мая 2024 г. Проведено сравнение основных характеристик FEE, наблюдаемых в этих бурях: максимальная интенсивность потока, длительность наблюдения (часы/сутки), локальные времена и диапазон долгот.

Работа выполнена в рамках НИР НИИЯФ 2.11 «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве».

ВНЕЗАПНОЕ НАЧАЛО ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ ПО ДАННЫМ С СЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ДВУХ SC-СОБЫТИЙ ОТ 17 МАРТА 2013г. И 17 МАРТА 2015 г.

Загайнова Ю.С., Громов С.А., Громова Л.И., Файнштейн В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, yuliazagainova@mail.ru

На примере двух SC-событий от 17 Марта 2013 г. и 17 Марта 2015 г. исследованы особенности внезапного начала геомагнитных бурь (SC) по данным с секундным временным разрешением, предоставляемых сетью INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>). В отобранных для анализа событиях источниками геомагнитных бурь являлись корональные выбросы массы типа гало (ГКВМ) со значительно различающимися координатами источников их возникновения, находящихся в разных полушариях Солнца (Северном и Южном). Построены зависимости появления моментов начала SC и главного импульса MI геомагнитной бури как функции широты φ и долготы λ магнитной станции и всемирного времени t . Оказалось, что время появления SC и MI на разных магнитных станциях различается. Кроме этого, обнаружены тренды на зависимостях $SC(t)$ и $MI(t)$, которые, в среднем, можно описать линейной или параболической зависимостью. Оценено влияние положения источника ГКВМ на полученные результаты. Для каждого из исследуемых событий обсуждается зависимость разности времени появления SC на первой (t_0) и последней (t_N) магнитными станциями от скорости межпланетного коронального выброса массы вблизи Земли, по данным каталога межпланетных КВМ (МКВМ) «List of Richardson/Cane ICMEs» (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>).

1. Suvorova A.V., Tsai L.C., Dmitriev A.V. // Planet. Space Sci. 2012. V. **60**. P. 363.
2. Suvorova A.V. // J.Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. **122**. P. 12274.
3. Суворова А.В., Дмитриев А.В. // Солнечно-земная физика 2024. Т. **10**(3). С. 79.
4. Suvorova A.V., Dmitriev A.V. // Cyclonic and Geo-magnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts. 2015. NOVA Sci.Publ.
5. Suvorova A.V. et al. // J.Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. **118**. P. 4672.

О ВКЛАДЕ ПОЛОИДАЛЬНЫХ Pc4 ВОЛН В УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ

Белыховский В.Б.^{1,2}, Пилипенко В.А.³

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

³ – Институт космических исследований РАН, г. Москва

belakhov@mail.ru

Рост потоков электронов до релятивистских энергий (> 1 МэВ) во внешнем радиационном поясе Земли является одним из важнейших факторов космической погоды, поскольку электроны этих энергий способны выводить из строя аппаратуру на спутниках. Однако механизм ускорения электронов все еще вызывает дискуссии в научных кругах. Большинство исследователей связывают ускорение электронов либо с их взаимодействием с тороидальными волнами Pc5 диапазона [1], либо с ОНЧ хоровыми излучениями [2]. Однако рост УНЧ и ОНЧ активности в магнитосфере заканчивается, как правило, более чем за сутки до начала роста релятивистских электронов [3], и их поток достигает максимума уже после магнитной бури. Поэтому возникает вопрос о том, за счет каких механизмов потоки релятивистских электронов продолжают расти после спада Pc5 и ОНЧ активности. Бетатронный механизм Тверского, связанный с восстановлением магнитосферного магнитного поля [4], не может быть универсальным объяснением, т.к. рост потоков релятивистских электронов происходит часто и при очень слабых магнитных бурях.

На наш взгляд, вполне вероятным кандидатом на роль ускорителя электронов до МэВ-ых энергий могут быть полоидальные Pc4 пульсации. Этот тип волн в магнитосфере, который наблюдается только при спокойных геомагнитных условиях. В докладе представлены случаи, когда Pc4 пульсации регистрировались на спутниках GOES в период роста потоков релятивистских электронов. Наблюдения показывают, что рост и падение потоков МэВ-ых электронов на геостационарной орбите происходит практически одновременно с ростом и падением потоков энергичных протонов (75 кэВ). Таким образом, Pc4 пульсации оказываются агентом, передающим энергию от энергичных протонов электронам МэВ-ых энергий. Механизм возбуждения Pc4 волн и последующего ускорения электронов связан с резонансным баунс-дрейфовым взаимодействием волн и частиц. На наземных магнитометрах полоидальные Pc4 пульсации проявляются в виде P_g пульсаций, выраженных в основном в D-компоненте магнитного поля. Таким образом, P_g пульсации могут являться наземным индикатором роста потоков релятивистских электронов в магнитосфере.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 24-77-10012.

1. Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations. *Geophys Res Lett* 26:3273–3276. 1999.
2. Thorne R.M., W. Li et al. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus, *Nature*, 504, 411. 2013.
3. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Antonova E.E., Miyoshi Y., Kasahara Y. et al. Relativistic electron flux growth during storm and non-storm periods as observed by ARASE and GOES satellites // *Earth, Planets and Space*, 2023, Vol.75, Article number:189.
4. Tverskoy V.A., Formation mechanism of the ring current structure of magnetic storms, *Geomagn. Aeronomy*, 37, N5, 29-34, 1997 (in Russian).

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАДТЕПЛОВЫХ ПРОТОНОВ В ГЛОБАЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Кропотина Ю.А., Быков А.М.

ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, juliett.k@gmail.com

Построена глобальная гибридная модель магнитосферы Земли, позволяющая исследовать процесс ускорения ионов головной ударной волной. В гибридной модели пространство разделено на ячейки, внутри которых плотность заряда и тока, а также электромагнитное поле считаются постоянными. Функция распределения ионов представлена как ансамбль макрочастиц конечного размера, а динамика электронов описывается гидродинамически.

Головная ударная волна Земли является сверхкритической и может ускорять частицы как по механизму Ферми 1 порядка, так и электрическими полями при дрейфе вдоль фронта. Инжекция в механизм ускорения Ферми, результирующий энергетический спектр и процессы переноса частиц ранее моделировались при помощи гибридных и кинетических кодов для случая плоского участка фронта [1,2]. Также существуют полуаналитические модели ускорения на криволинейных фронтах [3]. В данной работе впервые создана самосогласованная кинетическая модель ускорения в криволинейном фронте. Вследствие ограниченности доступных численных ресурсов мы ограничились двумерными конфигурациями, однако размер магнитосферы был выбран равным реальному, поскольку соотношение кривизны фронта и гирорадиусов надтепловых частиц определяет их максимально достижимые энергии.

Анализ траекторий надтепловых ионов показал, что их инжекция в процесс ускорения Ферми происходит, как и в случае плоского фронта, при отражении в момент первого взаимодействия с фронтом. Ионы инжектируются на квазипродольных участках фронта, где магнитное поле направлено под углом менее 45 градусов к нормали. Далее они набирают энергию, дрейфуя вдоль ударного фронта в направлении экватора. Затем некоторые из них вступают в процесс диффузионного ускорения (ускорения Ферми 1 порядка), набирая энергию при многократном пересечении фронта. Этот процесс также протекает только на квазипродольных участках фронта, однако надтепловые частицы могут диффундировать вдоль фронта на квазипоперечные участки. На квазипродольном участке фронта формируется протяженный предвестник, где надтепловые частицы раскачивают плазменные неустойчивости. Количество надтепловых частиц в предвестнике спадает с удалением от фронта примерно экспоненциально, что указывает на диффузионный характер их переноса. Были оценены коэффициенты диффузии за и перед фронтом ударной волны.

Характерные времена дрейфа и ускорения надтепловых частиц составляют порядка нескольких минут, при этом результирующие энергетические спектры жестче, чем это предсказывает теория ускорения Ферми на плоском фронте. Профили ударной волны модифицированы, то есть степень сжатия превышает предсказания Рэнкина-Гюгонио, что и приводит к ужесточению спектров. Ионы достигают энергий, в 50-60 раз превышающих их кинетическую энергию перед фронтом, что соответствует примерно 50-60 кэВ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FFUG-2024-0002

1. Caprioli D., Spitkovsky A. // *ApJ*. 2014. Vol. 794. Issue 1. ID. 47
2. Кропотина Ю.А., Быков А.М., Осипов С.М. и др. // *ЖТФ*. 2020. том 90. вып. 1
3. E. G. Berezhko and S. N. Taneev // *Astronomy Letters*. 2007. Vol. 33. No. 5

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫЗВАННЫЕ СОВМЕСТНЫМ ДЕЙСТВИЕМ РАЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАССЕЯНИЯ

Иванова А.Р.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}, Демехов А.Г.³, Яхнина Т.А.³.

¹ НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ivanova.ar20@physics.msu.ru

² Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия

³ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

При изучении электронных высыпаний из внешнего радиационного пояса в атмосферу Земли, важно понимать, насколько возможно относить исследуемое высыпание к какому-то единственному механизму рассеяния. По данным спутников NOAA/POES была собрана статистика высыпаний энергичных электронов из внешнего радиационного пояса Земли во время геомагнитных возмущений. Высыпания разделены по трем группам по классификации Яхнина [1] для определения характерных различий в энергетических спектрах высыпаний разных групп, вызванных разными механизмами рассеяния. Для высыпаний электронов важной частью спектра является диапазон релятивистских энергий, но в спутниках группировки NOAA присутствует всего один энергетический канал из этого диапазона, поэтому полученные спектры нельзя назвать полными. Но такие спектры можно использовать для того, чтобы попытаться отделить «чистые» высыпания (вызванные одним механизмом рассеяния электронов) от «смешанных» (вызванных сразу несколькими механизмами рассеяния).

Энергетические спектры высыпаний электронов аппроксимировались степенной функцией, и сравнение проводилось по показателю степени спектра (наклону спектра в двойном логарифмическом масштабе), который характеризует соотношение потоков высыпающихся электронов разных энергий. Ожидается, что высыпания разных групп (по крайней мере, 1 и 3 групп, связанные с рассеянием на кривизне магнитной линии и рассеянием на EMIC волнах, соответственно) должны иметь разные показатели спектра в исследуемом диапазоне энергий. Было показано, что часто это не так, по всей видимости из-за того, что многие высыпания являются «смешанными» и не могут в полной мере относиться к какой-либо из групп. Получены распределения высыпаний по показателю спектра, определено положение их источников в магнитосфере (L, MLT). Представляемые результаты – попытка исследовать, насколько часто высыпания электронов разных групп являются «чистыми», в каких диапазонах может меняться их наклон спектра, какими характеристиками они обладают, в каких областях магнитосферы иницируются и чем отличаются от «смешанных» высыпаний.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22–62–00048.

1. Yahnin A. G. et al. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2016. – Т. 121. – №. 9. – С. 8286-8299.

МИКРОВСПЛЕСКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕХ СЕЗОНОВ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОЕКТА RAIPS

Климов П.А.¹, Николаева В.Д.¹, Щелканов К.Д.^{1,2}, Белов А.А.^{1,2}, Козелов Б.В.³, Котиков А.Л.⁴, Мурашов А.С.¹, Ролдугин А.В.³, Сараев Р.Е.^{1,2}, Сигаева К.Ф.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, klimovpa@my.msu.ru

² Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия

³ ПГИ, г. Апатиты, Россия

СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия

На базе обсерваторий ПГИ «Верхнетуломская» и «Ловозеро» создана система стереометрических наблюдений полярных сияний на основе высокочувствительных матричных изображающих фотометров – RAIPS (Pulsating Aurora Imaging Photometers System). Фотометры представляют собой линзовые телескопы, в качестве фотосенсора используются многоанодные фотоэлектронные умножители.

В данных фотометра RAIP-V (обсерватория «Верхнетуломская») обнаружены события со специфическим временным паттерном (квазипериодические серии коротких импульсов свечения) – УФ-микровсплески. Произведен целенаправленный поиск и анализ УФ-микровсплесков для трех сезонов наблюдений с 2021 по 2024 год и обнаружено 75 событий. База данных УФ-микровсплесков, представлена на сайте проекта: <https://uhec.sinp.msu.ru/uv-microbursts.html>.

Каждое событие представляет собой группу серий импульсов. Серия представляет собой ряд последовательных импульсов УФ-излучения. Максимальная продолжительность события – 2 часа. Длительность серий, составляющих событие, варьируется в диапазоне от 20 с до 1 мин и состоит из ряда отдельных импульсов. Каждый импульс обычно имеет сложную структуру с единичным пиком высокой интенсивности и последующим продолжительным периодом послесвечения. Временной интервал между импульсами непостоянен и варьируется в диапазоне от 100 мс до 5 с. Типичная интенсивность составляет 10^4 – 10^5 фотонов/см² ср с.

Метеорологические условия наблюдения были разделены на три категории: ясное небо, прозрачные облака и облака. Большинство событий были зарегистрированы при наличии облачности и видимых звезд, т.е. облака полупрозрачны.

Микровсплески наблюдаются преимущественно на фазе восстановления слабых геомагнитных бурь (абсолютное значение SYM-H индекса не превышает 110 нТл) или на фазе восстановления суббурь при отсутствии геомагнитных возмущений планетарного масштаба.

Для всех событий были проанализированы (при возможности) данные спутниковых экспериментов по потокам заряженных частиц (METEOR-M2, DMSP, POES) и показано, что они наблюдаются одновременно с повышенными потоками энергичных электронов (более 100 кэВ) и южнее аврорального овала (поток низкоэнергетической плазмы).

Вероятным источником УФ-микровсплесков могут быть микровсплески релятивистских электронов (МРЭ, англ. – relativistic electron microburst), которые наблюдаются в спутниковых экспериментах на тех же геомагнитных широтах и имеют схожие временные характеристики. Спутниковые детекторы электронов, а также рентгеновские измерения с помощью воздушных шаров показывают, что МРЭ проявляются в виде кластеров или серий острых пиков. То же самое наблюдается и в фотометре RAIP-V.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-62-00010, <https://rscf.ru/project/22-62-00010/>).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВСПЛЕСКОВ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ПО ДАННЫМ RAIPS

Щелканов К.Д., Климов П.А., Николаева В.Д.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, shchelkanov.kd18@physics.msu.ru

Микровсплески оптического излучения в авроральной зоне были обнаружены в эксперименте RAIPS. Изображающие фотометры проекта RAIPS расположены в обсерваториях ПГИ («Верхнелутомская» и «Ловозеро») на Кольском полуострове. События представляет собой группу из серий импульсов. Длительность серий варьируется от 20 с до 1 мин. Временной интервал между импульсами непостоянен и варьируется в диапазоне от 100 мс до 5 с. Максимальная продолжительность события – 2 часа. Пространственная структура событий представлена различными формами, среди которых выделены широкие пятна (угловой размер больше поля зрения), узкие дуги, пересекающие поле зрения фотометра и локальные пятна. Эти формы существуют одновременно и появляются независимо друг от друга. Размер локальных пятен составляет менее 10 км при условии их возникновения на высоте порядка 100 км. По временной структуре и области регистрации эти события схожи с т.н. микровсплесками релятивистских электронов, обнаруженных на спутнике SAMPEX [1].

Важным параметром, характеризующим природу возникновения излучения является высота в атмосфере. Провести прямые измерения высоты в монокулярных измерениях невозможно, однако можно сделать оценку по спектральным характеристикам сигнала. С этой целью, помимо изображающей части фотометры оснащены рядом спектральных каналов: широкополосные со стеклянными фильтрами УФС1 и КС11, а также узкополосные с центральными длинами волн 337 нм, 391 нм и 430 нм и шириной полосы пропускания 10 нм. Фотосенсором спектральной части являются одноанодные фотоэлектронные умножители. Временное разрешение 1 мс.

Основным источником эмиссии в атмосфере на высотах до 100 км является молекулярный азот. Различные возбужденные состояния имеют разное время жизни и, следовательно, разный вклад в интенсивность эмиссии. Скорость дезактивации возбужденных состояний без излучения зависит от плотности воздуха, которая значительно меняется с высотой. Эта идея лежит в основе метода оценки высоты свечения транзитных световых явлений [2]. Наиболее интенсивное излучение транзитных явлений создают первая ($N_2 1P$) и вторая ($N_2 2P$) положительные системы азота. Первая из них дает свечение в красной части спектра, а вторая – в ближнем УФ. По соотношению интенсивности излучения этих систем можно сделать оценку высоты источника излучения. Этот же метод может быть применен для оценки высоты полярных сияний и микровсплесков в проекте RAIPS, а значит для оценки энергии высыпавшихся частиц.

В работе проведен расчет отклика детектора на излучение двух систем азота ($N_2 1P$ и $N_2 2P$) в зависимости от высоты источника с учетом рассеяния и поглощения в атмосфере, спектральных коэффициентов пропускания каналов прибора, квантовой эффективности фотокатода ФЭУ и коэффициента усиления ФЭУ. Получена зависимость отношения сигнала в каналах с фильтрами КС11 (красная часть спектра) и УФС1 (синяя часть спектра) от высоты источника. По данной зависимости сделаны первые оценки высоты излучения микровсплесков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-62-00010, <https://rscf.ru/project/22-62-00010/>).

1. Lorentzen, K. R., Blake, J. B., Inan, U. S. & Bortnik, J. // J. Geophys. Res. 2011. V. **106**. P. 6017–6027.

2. Веденькин, Н. Н., Гарипов, Г. К., Климов и др. // ЖЭТФ 2011. Т. **140**. № 5. С. 900-910.

СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ХОЛОДНЫХ ИОНОВ В ОБЛАСТЯХ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ GMM

Парамоник И.П., Дивин А.В., Чжун Д., Семенов В.С.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, igorparamonik@gmail.com

Магнитное пересоединение – важный процесс в физике магнитосферы и гелиосферы, объясняющий ускорение и нагрев космической плазмы за счет изменения топологии магнитного поля и преобразования накопленной в нем магнитной энергии. Особое внимание в исследованиях процесса пересоединения уделяется механизмам ускорения частиц, генерирующих направленные пучки, и эффективности преобразования магнитной энергии в кинетическую и тепловую. Однако, присутствие нескольких пучков в одной области пространства формирует сложные многокомпонентные и немаксвелловские функции распределения, в которых разделение энергии плазмы на кинетическую и тепловую части стандартным методом вычисления моментов функции распределения может не отражать эту сложность [1]. Такой подход дает более высокую оценку температуры плазмы, содержащую в себе часть кинетической энергии пучков и не разделяющий между собой механизмы ускорения и нагрева, что становится наиболее заметно на примере изучения холодных ионов.

В этой работе мы изучаем, как меняется оценка температуры плазмы и отдельных пучков в различных областях магнитного пересоединения с холодными ионами на примере данных 2D3V-моделирования, выполненного с помощью кинетического кода iPIC3D [2]. Для выделения в функции распределения отдельных структур, которые нами считаются как пучки, и определения их параметров мы используем алгоритм кластеризации Gaussian Mixture Model (GMM) к скоростям макрочастиц холодной компоненты плазмы [3]. Мы демонстрируем, что увеличение температуры в диффузионной области и выхлопе пересоединения обеспечивается в первую очередь наличием холодных ускоренных пучков, а не их термализации, и приводим распределения температуры пучков и плазмы в разных областях пересоединения, чтобы показать характерную величину.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда №23-47-00084 “Магнитное пересоединение в космической и лабораторной плазме: компьютерные симуляции и эмпирическое моделирование”.

1. Goldman M.V. et al. Multibeam Energy Moments of Multibeam Particle Velocity Distributions // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2020. – Т. 125. – №. 12. – С. e2020JA028340.
2. Markidis S. et al. Multi-scale simulations of plasma with iPIC3D // Mathematics and Computers in Simulation. – 2010. – Т. 80. – №. 7. – С. 1509-1519.
3. Dupuis R. et al. Characterizing magnetic reconnection regions using Gaussian mixture models on particle velocity distributions // The Astrophysical Journal. – 2020. – Т. 889. – №. 1. – С. 22.

НАБЛЮДЕНИЕ ВТОРИЧНОГО МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ ВБЛИЗИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ТОКОВОГО СЛОЯ ХВОСТА В РУСЛЕ БЫСТРОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

Григоренко Е.Е., Du С., Леоненко М.В., Fu Н., Царева О.О., Малова Х.В., Попов В.Ю., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, elenagrigenko2003@yandex.ru

В работе выполнен анализ динамики электронов и токовых структур вблизи Вторичного «электронного» Пересоединения (ВП), наблюдаемого спутниками MMS в окрестности нейтральной плоскости токового слоя хвоста во время распространения к Земле быстрого плазменного потока, ускоренного в первичной X-линии, расположенной в хвосте вниз по потоку. Наблюдению вторичного пересоединения предшествовало увеличение магнитного потока вблизи нейтральной плоскости (magnetic flux pile up) за счет роста B_z – компоненты магнитного поля. Интенсивные токовые структуры с высокой плотностью продольного электрического поля ($J_{\parallel} > 50$ нА/м²) наблюдались в окрестности «вторичных» сепаратрис. На краю этих токовых структур имели место всплески сильных электрических полей ($E \geq 50$ мВ/м) и увеличения плотности мощности энерговыделения: $J \cdot E > 1000$ пВт/м³.

Динамика электронов в ВП демонстрировала основные черты динамики ионов в первичном «макро-пересоединении», а именно: противоположно направленные джеты ускоренных электронов наблюдались при пересечении спутниками MMS области ВП за счет её сноса к Земле быстрым плазменным потоком. При этом, вблизи ВП никаких особенностей в динамике ионов, в частности, их дополнительного ускорения, не наблюдалось. В результате противоположно направленные электронные джеты генерировали сильные перпендикулярные электронные токи ($|J| \sim 100$ нА/м²), направленные в область ВП. Электрический ток в этих структурах генерировался размагниченной Спайсеровской электронной популяцией. Эти токи обусловили наблюдение квадрупольной структуры шировой компоненты магнитного поля (B_y). Исследование магнитной топологии методом FOTE [1] подтвердило наличие магнитного нуля радиального типа (вторичной X-линии) и формирование за ней O-линии.

Наблюдаемая динамика электронов и пространственное распределение токов и полей во многом согласуются с результатами кинетического моделирования электронного ВП в русле быстрого потока [2]. Однако, особенностью данного события является отсутствие сильных электрических полей и энерговыделения в нейтральной плоскости вблизи вторичной X-линии. Основное энерговыделение имело место вне нейтральной плоскости, вблизи продольных токовых структур, генерируемых ускоренными электронными пучками, движущимися вдоль «вторичных» сепаратрис.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-42-00028, <https://rscf.ru/project/25-42-00028/>

1. Fu, H. S., Vaivads A., Khotyaintsev Y. V., Olshevsky V. et al. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 3758. doi:10.1002/2015JA021082.

2. Huang S. Y., et al. // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 6188. doi:10.1002/2014JA020969.

О СВЯЗИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ СОЛИТОННЫМИ ВОЛНАМИ И ТОКОВЫМИ СЛОЯМИ ЭЛЕКТРОННЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МАСШТАБОВ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА ЗЕМЛИ

Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, makarleonen@gmail.com

В работе проведен анализ электрических полей вблизи нейтральной плоскости геомагнитного хвоста Земли во время распространения Быстрых Плазменных Поток (БПП). Обнаружено присутствие Электростатических Солитонных Волн (ЭСВ) с амплитудой до 100 мВ/м в центральном плазменном слое ($B_x < 5$ нТл), вдали от первичного магнитного пересоединения и его сепаратрис.

ЭСВ наблюдаются как параллельные внешнему магнитному полю всплески неидеального электрического поля, которое определяется как электрическое поле в системе покоя электронов: $E' = E + [V_e \times B]$, где E – наблюдаемое электрическое поле, V_e – электронная потоковая скорость, B – внешнее магнитное поле. Волновой пакет ЭСВ типично содержит от нескольких до пары десятков униполярных всплесков.

Показано, что генерация ЭСВ может приводить к падению параллельной электронной температуры до 15%, что совпадает по порядку величины с флуктуациями электрического потенциала ЭСВ. Наблюдаемые ЭСВ приводят к интенсивной трансформации энергии с объемной мощностью до 2.5 нВт/м³.

Типичные характеристики ЭСВ, обнаруженных в данной работе, совпадают с теми, которые наблюдались в пограничном плазменном слое вблизи сепаратрис первичного магнитного пересоединения: амплитуда параллельного неидеального электрического поля порядка десятков мВ/м, длительность порядка 10-20 мс, толщина порядка 5-10 дебаевских радиусов. Наблюдаемая скорость распространения ЭСВ составляет порядка 1000 км/с, что соответствует энергии электронов порядка 1-10 эВ.

В работе доказано, что ЭСВ обычно наблюдаются в присутствии интенсивных, параллельных магнитному полю токовых слоев электронных кинетических масштабов, генерируемых сверхтепловыми электронными пучками, распространяемыми из удаленных источников. Генерация ЭСВ наиболее вероятно связана с развитием ионной/электронной акустической неустойчивости.

Мы предполагаем, что обнаруженные ЭСВ маркируют «вторичные» сепаратрисы «вторичного» магнитного пересоединения в центральном плазменном слое во время распространения БПП. ЭСВ могут представлять канал передачи энергии от горячей сверхтепловой популяции пучка к холодной популяции плазмы в плазменном слое.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-12-00031.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ПЛАЗМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Котова Г.А., Безруких В.В

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kotova@iki.rssi.ru

Большинство исследований, рассматривающих влияние солнечного ветра на внутреннюю магнитосферу, ограничиваются рассмотрением внешней границы области холодной плазмы – плазмопаузы. Положение плазмопаузы действительно сильно зависит от величины скорости солнечного ветра, которая главным образом определяет значение индекса К_p, то есть, геомагнитную активность и электрическое поле конвекции в магнитосфере. Внешние факторы, влияющие на плотность плазмы в плазмосфере, особенно на внутренних L-оболочках, до сих пор не определены. В настоящей работе рассмотрено влияние давления, плотности и электрического поля солнечного ветра на плотность плазмы в плазмосфере.

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОТ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ДОЛГОТЫ В ПЛАЗМОСФЕРЕ

Чугунин Д.В., Котова Г.А., Клименко М.В., Клименко В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, dimokch@cosmos.ru

Работа посвящена исследованию зависимости заполнения магнитных силовых трубок плазмосферы от географической долготы. Несмотря на то, что магнитосфера в основном описывается магнитными координатами, на заполнение ее ионосферной плазмой влияет также разница в освещенности основания силовых линий магнитного поля. В данной работе этот вопрос изучается с использованием измерений концентрации ионов на спутнике ИНТЕРБОЛ и концентрации электронов на спутнике ERG. Для исследования выбирались только длительные спокойные периоды, в течение которых предполагается, что магнитные трубки успевают заполниться плазмой до диффузионного равновесия. Показано, что при одних и тех же геомагнитных координатах плотность плазмы в плазмосфере зависит от географической долготы.

Изменение основных характеристик плазмы при эволюции радиального профиля давления к плато.

Кирпичев И.П.¹, Антонова Е.Е.^{2,1}

¹ ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва, ikir@cosmos.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

По результатам предыдущих работ было показано, что при спокойной геомагнитной обстановке в строении магнитосферы Земли можно выделить новую структурную особенность – плато плазменного давления на радиальном расстоянии $\sim 8-10 R_E$. Эта область, где давление не зависит (очень слабо зависит) от расстояния фактически окружает Землю, образуя кольцо, и может быть устойчивой в течение суток. Представляет определенный интерес проследить динамику основных плазменных характеристик предшествующую образованию плато. В данной работе на основе выделенного события (по данным миссии THEMIS) рассматривается эволюция радиальных профилей ионной температуры и концентрации, локального магнитного поля, плазменного параметра бэта. Показано, что релаксация возмущений ионного давления к плато в основном связана с уменьшением температуры, а не концентрации.

ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ОМА И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Антонова Е.Е.^{1,2}, Кирпичев И.П.², Степанова М.В.³, Овчинников И.Л.¹, Найко Д.Ю.¹, Воробьев В.Г.⁴, Ягодкина О.И.⁴

¹ НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, elizaveta.antonova@gmail.com

² Институт Космических Исследований РАН

³ University of Santiago de Chile

⁴ Полярный Геофизический институт

Определение масштаба, на котором применимо то или иное приближение при описании процессов в плазменной системе, необходимо для получения адекватного описания системы. Описание крупномасштабных плазменных процессов в магнитосфере Земли опирается, в основном, на законы одножидкостной магнитной гидродинамики. При этом считается, что в целом реализуется цикл Данжи с соблюдением условия вмерзлости при крупномасштабных движениях плазмы нарушаемой в областях, называемых точками и линиями «пересоединения». При этом, масштаб плазменной системы намного превышает масштабы областей «пересоединения». Однако, в уравнения одножидкостной магнитной гидродинамики входит обобщенный закон Ома, в соответствии с которым приближение вмерзлости может быть использовано только при больших скоростях движения плазмы. В настоящей работе с использованием усредненных данных полученных за 12 лет работы миссии THEMIS определено распределение усредненного масштаба L_{Hall} в экваториальной плоскости, на котором неприменимо приближение вмерзлости. Показано, что данный масштаб может превышать размеры плазменной системы, что требует пересмотра подходов, применяемых при анализе крупномасштабных магнитосферных процессов. В ходе предварительного анализа крупномасштабной магнитосферной динамики с учетом высокого уровня турбулентности в геомагнитном хвосте, роли магнитосферно-ионосферных взаимодействий и значительного вклада электростатических полей удастся объяснить особенности магнитосферной динамики, ранее считавшиеся доказательством существования цикла Данжи.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА КОЛЛИМИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф., Иванов А.Е., Логинов М.В.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov2013@yandex.ru

На установке КИ-1 [1, 2] был проведен цикл экспериментов по разлету коллимированных плазменных потоков в поперечное магнитное поле и фоновую плазму, в том числе во встречной конфигурации. Для этого плоские полиэтиленовые мишени, расположенные на расстоянии $L \approx 1$ м друг от друга облучались импульсами CO_2 лазера с энергией $E = 100$ Дж и длительностью $\tau = 100$ нс, генерируя потоки лазерной плазмы с начальной энергией $E_0 \approx 32$ Дж, скоростью $V_0 = 250$ км/с и полным числом частиц $N \approx 1.3 \cdot 10^{18}$, разлетающиеся в поперечное магнитное поле $B_0 = 340$ Гс и фоновую водородную плазму, генерируемую тета-пинчем. Измерения проводились с помощью системы совмещенных магнитных и электрических зондов, а также с помощью систем фоторегистрации.

Полученные данные продемонстрировали, что при разлете плазменного потока с плоской мишени в поперечное магнитное поле плазма формирует коллимированную структуру типа «лист», с растеканием плазмы вдоль поля и коллимацией поперек поля, что также обнаружено по данным со сверхскоростного фотографирования. Поток распространяется на расстояние более 1 метра, что много больше гирорадиуса ионов $R_L \approx 18$ см в данном эксперименте. При разлете плазменного потока в замагниченный фон в сверх-Альфвеновском режиме ($M_A \approx 2$) наблюдается «сгребание» фона перед фронтом ОЛП с поджатием поля до 35% от B_0 , после прохождения которого формируется диамагнитная каверна с вытесненным магнитным полем на уровне 50% от B_0 . Судя по данным с фоторегистрации, фоновая плазма препятствует формированию протяженного плазменного джета, как в случае разлета в вакуумное поле, и тормозит поток ОЛП на расстояниях ~ 50 см от мишени. При встречном разлете двух плазменных потоков в вакуумном магнитном поле $B_0 = 340$ Гс наблюдается взаимодействие двух джетов на фотографиях свечения плазмы и на зондовых измерениях. Также обнаружено образование резкого фронта поджатия магнитного поля с высокой концентрацией и высокочастотные колебания ($\nu \approx 1$ МГц) основной компоненты магнитного поля. Таким образом, проведенные эксперименты позволили определить особенности динамики направленных потоков плазмы как в вакуумном магнитном поле, так и в замагниченной фоновой плазме, в том числе в случае встречной конфигурации.

Работы по исследованию плазменных потоков выполнены при поддержке гранта РФФИ № 24-62-00032, <https://rscf.ru/project/24-62-00032/>. Работы по подготовке стенда КИ-1 к эксперименту производились Березуцким А.Г., Захаровым Ю.П. и Посухом В.Г. в рамках Госзадания № НИОКТР 121033100062-5.

1. Y.P. Zakharov et al // *AIP Conference Proceedings*. – American Institute of Physics, **369**, № 1, p. 357-362, (1996).
2. I. F. Shaikhislamov et al // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **56**, № 12, p. 125007, (2014).

РАСЧЕТ ПРОНИКНОВЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МАГНИТОСФЕРУ ЮПИТЕРА

Б.Ю.Юшков

НИИЯФ МГУ, Россия, clef@srd.sinp.msu.ru

Одной из задач, встающих при планировании миссий к Юпитеру, является оценка радиационной обстановки в окрестностях планеты. Основным фактором являются радиационные пояса с высокой интенсивностью потоков заряженных частиц, главным образом электронов. Однако на расстояниях порядка орбиты Ганимеда необходимо также учитывать возможный вклад галактических и солнечных космических лучей. Проникновение космических лучей количественно описывается величиной жесткости магнитного обрезания. В силу сложной структуры магнитного поля Юпитера эта задача решается численным моделированием траекторий частиц, т.е. интегрированием уравнений движения. Ранее [1] было показано, что учет вклада токового слоя в суммарное магнитное поле существенно уменьшает жесткость обрезания по сравнению с чисто дипольной моделью поля. В указанной работе предполагалось, что если пробная частица, пройдя путь длиной в 1000 радиусов Юпитера (R_J), не выходит за границу магнитосферы, то такая частица считается захваченной, а траектория запрещенной. Однако расчеты, проведенные с использованием параболической модели магнитосферы Юпитера [2], показали, что такое предположение неверно – при увеличении допустимой длины траектории дополнительные пробные частицы меньших энергий могут покидать магнитосферу, что соответствует уменьшению эффективной жесткости магнитного обрезания в два и более раз. Задача усложняется тем, что время прохождения релятивистским протоном пути в $10000 R_J$ составляет десятки минут, что сопоставимо с периодом вращения Юпитера.

1. Selesnick R.S. // *Geophys. Res. Lett.* 2002, **29**, 1298.
2. Alexeev, I.I., Belenkaya, E.S. // *Annales Geophys.* 2005, **23**, 809.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ К ГЕОМАГНИТНОМУ ЭКВАТОРУ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СИЛ

Потапов А.С.¹, Гульельми А.В.², Фейгин Ф.З.²

¹ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru

²ИФЗ РАН, Москва, Россия

Как известно, плазма магнитосферы содержит ионы с различным отношением заряда к массе. Кроме легких ионов водорода и гелия, плазма содержит ионы кислорода, а также другие тяжелые ионы. Относительное содержание тяжелых ионов можно оценивать числом Кларка. Например, кларк кислорода равен $\kappa = \rho_{O^+} / \rho_{H^+}$, где ρ_{O^+} и ρ_{H^+} — плотность ионов кислорода и водорода соответственно. Пондеромоторные силы, возникающие под влиянием волн Альвена, постоянно существующих в магнитосфере в виде геомагнитных пульсаций, по-разному действуют на легкие и тяжелые ионы. В работе [1] были получены выражения для парциальных пондеромоторных сил в рамках квазигидродинамического подхода и высказана идея о перераспределении плазмы вдоль геомагнитных силовых линий за счет пондеромоторного воздействия альвеновских волн. В данной работе эта идея получила развитие. Получена система уравнений, описывающая перераспределение ионов вдоль силовых линий магнитного поля в магнитосфере Земли таким путем, что плазма в минимумах магнитного поля характеризуется повышенным содержанием тяжелых ионов. Установлено, что число Кларка, характеризующее металличность плазмы, максимально в минимуме магнитного поля на силовой линии, вдоль которой распространяется альвеновская волна, что приводит к накоплению тяжелых ионов в вершине силовой линии в месте пересечения ее с магнитным экватором. Полученные теоретические результаты согласуются с результатами спутниковых измерений распределения тяжелых ионов вдоль силовых линий в магнитосфере Земли [2, 3].

Работа выполнена в рамках Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ для ИФЗ РАН и ИСЗФ СО РАН.

1. Гульельми А.В., Фейгин Ф.З. // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. С. 28–32.
2. Takahashi K. et al. // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. A08202.
3. Denton R.E. et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A04213.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДРЕЙФА ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ ВБЛИЗИ ВНУТРЕННЕЙ КРОМКИ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

Суворова А.В., Дмитриев А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, suvorova@decl.sinp.msu.ru

Под кромкой внутреннего радиационного пояса (дрейфовые оболочки $L \leq 1.2$), где поток энергичных частиц резко падает до фоновых значений $\sim 10^2$ (см² с ср)⁻¹, наблюдаются внезапные возрастания потоков электронов с энергиями от десятка до нескольких сотен кэВ. Это явление было обнаружено из анализа данных низкорбитальных солнечно-синхронных полярных спутников NOAA/POES и известно как возрастания FEE (англ. *forbidden energetic electrons*) [1]. Из статистики наблюдений FEE за последние 25 лет известно, что самые яркие события могут длиться несколько суток, достигать высоких интенсивностей, вплоть до 10^7 (см² с ср)⁻¹, и охватывать широкий сектор долгот (от Индии до западного края Южно-Атлантической аномалии) [2].

Механизм, который приводит к возрастаниям потоков FEE, до сих пор до конца не ясен. В работе [1] было высказано предположение, что некоторые условия (пока неизвестные) способствуют проникновению на низкие широты в ночном секторе электрического поля западного направления, что вызывает быстрый (порядка часа-двух) электрический ($E \times B$) дрейф частиц с периферии внутреннего пояса на высоты менее 1000 км ($L < 1.2$).

Полагая величину электрического поля ~ 5 мВ/м как в работе [3], мы получили оценки для времени дрейфа между $L=1.2$ и $L=1.1$ порядка десятков минут. Такие параметры могли бы выполняться в период геомагнитных бурь, когда на усиленное электрическое поле конвекции накладывается эффект избыточной экранировки (*overshielding*) при повороте V_z компоненты межпланетного магнитного поля с южного на северное направление. В отсутствие бурь, сильные импульсные электрические поля ~ 20 мВ/м (нестационарные и индукционной природы) во время суббурь или локальных сжатий магнитосферы могли бы приводить к более быстрому, но многоэтапному радиальному дрейфу частиц, типа инъекций [4,5]. Рассматриваются вопросы, связанные с бетатронным ускорением частиц во время глубоких инъекций и разными условиями наблюдения инжектированных электронов и протонов полярными спутниками NOAA/POES.

Работа выполнена в рамках НИР НИИЯФ 2.11 «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве».

1. Suvorova A.V., Tsai L.C., Dmitriev A.V. // Planet. Space Sci. 2012. V. 60. P. 363.
2. Suvorova A.V., Dmitriev A.V. // Cyclonic and Geo-magnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts. 2015. NOVA Sci.Publ.
3. Selesnick R.S., Su Y.-J., Sauvaud J.A. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2019. V. 124, P. 5421.
4. Suvorova A.V. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 4672.
5. Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Parkhomov V.A. // Ann. Geophys. 2019. V. 37. P. 1223.

СКЕЙЛИНГ ЭНЕРГИИ СТРУКТУРЫ VDIS И СОСТАВЛЯЮЩИХ ЕЕ СИГНАТУР ИОННЫХ БИМЛЕТОВ В ПОЛЯРНОЙ АВРОРАЛЬНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ

Ковражкин Р.А., Глазунов А.Л., Владимирова Г.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rostis@bk.ru

По данным измерений ионов 0.1-20.0 кэВ со спутников ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER проведен анализ авроральных сигнатур ионных бимлетов, которые рождаются в виде пучков в выделенных резонансных зонах N токового слоя вдоль хвоста магнитосферы. Бимлеты ускоряются электрическим полем E_y поперек хвоста до ~500-2000 км/с. При распространении цуга бимлетов по магнитосфере в авроральной зоне наблюдается структура, названная VDIS – (Velocity Dispersed Ion Structure), состоящая из сигнатур N бимлетов. Их энергия соответствует энергии бимлетов и точно также зависит от номера резонансной зоны N. В результате исследования механизма ускорения ионов в токовом слое (Зеленый и др., 2007) был установлен закон скейлинга – масштабирования энергии бимлетов W_N от номера N соответствующей резонансной зоны: $W_N \sim N^A$, где $A=1.33$. Экспериментальная проверка закона скейлинга энергий ионных структур VDIS по данным космических аппаратов ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER показала, что значения показателя A в среднем совпадают с теоретическими, хотя имеются вариации в диапазоне от 0.61 до 1.75 для некоторых случаев. В данной работе приведены результаты по анализу скейлинга энергии как самих структур VDIS, так и отдельных авроральных сигнатур ионных бимлетов.

СВОЙСТВА ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ГОДЫ НИЗКОЙ (2017) И ВЫСОКОЙ (2023) СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Попова Т.А., Яхнина Т.А., Демехов А.Г.

ПГИ, г. Анатиты, Россия

tarkada@yandex.ru

В работе исследуется влияние геомагнитной и солнечной активности на высыпания релятивистских (> 700 кэВ) электронов, наблюдаемых в авроральной и субавроральной зоне на высотах ~850 км (по данным спутников NOAA/POES). Для анализа были выбраны два года с низкой (2017 год) и высокой (2023 год) солнечной активностью. В качестве индекса солнечной активности взято полное месячное число солнечных пятен, усредненное за год по кривой, сглаженной с окном 13 месяцев (<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle/historical-solar-cycles.html>) - 21 для 2017 и 125 для 2023. Были составлены каталоги событий для этих двух периодов, когда высыпания релятивистских электронов (ВРЭ) наблюдались в окрестности обсерватории Ловозеро (68°с.ш. 35°в.д.) и сопряженной с ней области в Южном полушарии. Окрестностью обсерватории считалась полоса шириной 75 градусов по магнитной долготе; эта область выбрана для сопоставления высыпаний с наземными наблюдениями ОНЧ волн и геомагнитных пульсаций Pc1. В полученных каталогах была проведена классификация событий по трем группам согласно критерию, представленному в работах [1, 2]. Высыпания каждой группы, в соответствии с этим критерием, имеют свой механизм формирования. Высыпания 1й группы связаны с нарушением 1го адиабатического инварианта вследствие малого радиуса кривизны силовых линий в ночном секторе [3]. Эти высыпания наблюдаются вблизи границы изотропии потоков энергичных электронов. ВРЭ 2й группы всегда наблюдаются одновременно с интенсивными высыпаниями энергичных (40-200 кэВ) электронов. По-видимому, они связаны с возбуждением ОНЧ волн. ВРЭ 3й группы, сопровождаемые высыпаниями энергичных (> 30 кэВ) протонов, связаны с ЭМИЦ волнами. Обсуждаются особенности частот наблюдения ВРЭ и потоков захваченных и высыпающихся энергичных электронов в каждой из групп событий в зависимости от параметров солнечного ветра и геомагнитных условий (индексы K_p , Dst, AE) во время высокой и низкой солнечной активности.

1. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Pashin A.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121, No.9. P. 8286-8299. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>
2. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // J. Geophys. Res. Space Physics. 2017. V. 122, No.9. P. 9169-9182. <https://doi.org/10.1002/2017JA024249>
3. Sergeev V. A., Tsyganenko N. A. Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model // Planet. Space Sci. 1982. V. 30, No. 10 P. 999–1006. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90149-0)

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-62-00048).

ПОТОКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ В ПЕРИОД НИЗКОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ 7-25 ЯНВАРЯ 2018 Г.

Зыкина А.А.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}, Власова Н.А.²

1. Физ. фак. МГУ, 2. НИИЯФ МГУ, г. Москва, anya.zykina@gmail.com

Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли во время трех последовательных периодов пониженной геомагнитной активности 7-13, 14-18 и 19-25 января 2018 года. Проведен сравнительный анализ вариаций параметров межпланетной среды и отклика внешнего радиационного пояса на внешнее воздействие. Работа основана на экспериментальных данных о потоках релятивистских электронов, полученных с геостационарного ИСЗ GOES и с КА Van Allen Probes A (VAP-A), орбита которого проходит через сердцевину внешнего радиационного пояса вблизи экваториальной плоскости.

Показано, что условия в солнечном ветре обусловили разную динамику магнитосферы и потоков захваченных электронов внешнего радиационного пояса: 7-13.01 под воздействием импульса давления солнечного ветра произошло сжатие магнитосферы, что привело к смещению максимума радиационного пояса внутрь и существенному уменьшению потоков электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите; 14-18.01 при южной Vz-компоненте межпланетного магнитного поля развилась слабая геомагнитная буря с суббуревой активностью и на фазе восстановления, в результате образовался новый радиационный пояс электронов с $E \sim 1 \div 2$ МэВ с максимумом на $L \sim 5,7$. Геомагнитные возмущения 19-25 января привели к дальнейшему возрастанию потоков электронов.

Динамика потоков электронов на протяжении трех рассматриваемых периодов сформировалась под воздействием межпланетной среды и суббуревой активности магнитосферы. Приход ускоренных потоков солнечного ветра приводил к развитию слабых магнитных возмущений, вызывающих падение потоков на геостационарной орбите. Суббуревые активации приводили к восстановлению потоков.

Постепенное возрастание потоков энергичных электронов может быть обусловлено ускорением кратковременными импульсами электрического поля, которые возникают на ночной стороне магнитосферы при суббуревых активациях [Кропоткин, 2021]. Суббуревая активность возрастала на протяжении всего рассматриваемого периода, что стало одной из причин повышения интенсивности потоков электронов на геостационарной орбите.

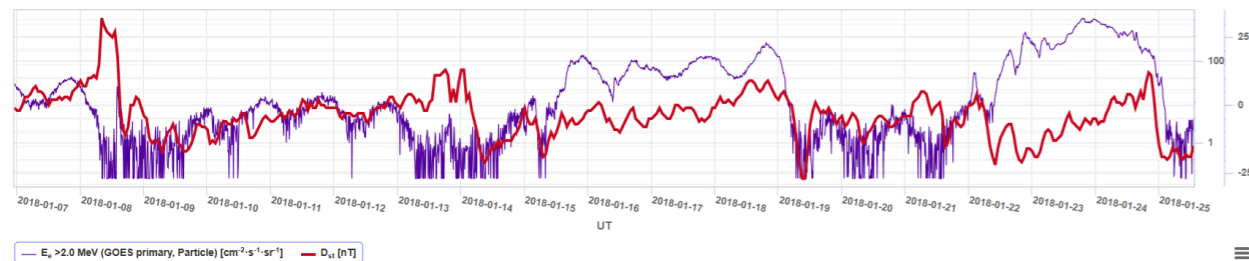


Рис. 1 Временной профиль потоков электронов с $E > 2$ МэВ по данным ИСЗ GOES-15 и Dst-индекс 7-25.01.2018

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРЕХОДНОМ СЛОЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ КА THEMIS

Лаврухин А.С., Невский Д.В., Алексеев И.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, lavrukhin@physics.msu.ru

В данной работе проводится сравнение существующих аналитических моделей магнитного поля в переходном слое магнитосферы Земли с данными, полученными с космических аппаратов. Переходный слой является областью между головной ударной волной и магнитопаузой.

В работе [1] было проведено сравнение различных аналитических моделей переходного слоя магнитосферы Земли с 34 пересечениями переходного слоя на КА Cluster 1-4 (27 пересечений), THEMIS C, E (2 пересечения) и MMS 1, 2 (5 пересечений) за 2002-2019 гг. В качестве параметров межпланетного пространства использовались данные OMNI. Был сделан вывод о том, что модель [2], в которой головная ударная волна и магнитопауза аппроксимируются параболоидами вращения, работает лучше всего.

В настоящей работе по сравнению с [1] было расширено количество анализируемых данных с различных КА. Для выделения области переходного слоя использовались данные о пересечениях головной ударной волны и магнитопаузы [4] из работы [3]. Были выбраны данные о пересечениях головной ударной волны и магнитопаузы аппаратами THEMIS A и D за 2007-2019 гг. Было проанализировано более 300 пересечений переходного слоя, было проведено сравнение с моделью [2] и определена средняя невязка между моделью и измеренным полем. Было проведено сравнение невязки для пересечений квазиперпендикулярной и квазипараллельной головной ударной волны.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом, проект № 25-22-00468.

1. Vandas, M., Romashets, E. // J. Geophys. Res.: Space Physics 2024. V. **129**. e2023JA032393.
2. Kobel, E., Flückiger, E. O. // J. Geophys. Res.: Space Physics 1994. V. **99(A12)**. P. 23617.
3. Nguyen, G. // Zenodo 2021. in-situ_Events_lists: In-situ Events list (v1.0).
4. Nguyen, G., Aunai, N., Michotte de Welle, B., Jeandet, A., Lavraud, B., & Fontaine, D. // J. Geophys. Res.: Space Physics 2024. V. **127**. e2021JA029773.

ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ДНЕВНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ ВО ВРЕМЯ БУРИ 10 МАЯ 2024: АНАЛИЗ УСЛОВИЙ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Дмитриев А.В., Суворова А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, dalex@decl.sinp.msu.ru

Главная фаза геомагнитной бури 10-11 мая длилась около 9 часов, достигнув максимального значения SYM-H индекса -518 нТ. В это время магнитопауза наблюдалась внутри геостационарной орбиты в течение нескольких часов. Геостационарный КА GOES-16, находящийся в полуденном секторе, вышел в магнитослой в 17:06UT сразу после прихода межпланетной ударной волны, и вернулся в магнитосферу в ~21:01UT, находясь в вечернем секторе. КА GOES-18 вышел в магнитослой в 17:20UT в предполуденном секторе и вернулся в магнитосферу в ~22:33UT в послеполуденном секторе. КА THEMIS-A и THEMIS-E вышли в магнитослой в послеполуденном секторе в 17:06UT и вернулись в магнитосферу в 19:12UT, находясь на геоцентрическом расстоянии ~5 Re [1].

Из истории исследований известно о нескольких аналогичных наблюдениях магнитопаузы глубоко внутри геостационарной орбиты [2]. Чтобы сжать дневную магнитосферу до расстояния 5 радиусов необходимо давление более 140 нПа ($11.5/Pd^{1/6}$) или 80 нПа ($11.5/Pd^{1/5.2}$). При одновременном воздействии южной компоненты Bz межпланетного магнитного поля (ММП) давление может быть значительно ниже. Так, во время бури 4 августа 1972г. КА Explorer-45 наблюдал пересечение магнитопаузы на расстоянии ~5.2 Re, а во время бури 7 февраля 1986г. КА AMPTE/CSE наблюдал магнитопаузу на ~4.7 Re. По данным о среднечасовых параметрах солнечного ветра, измеренных на спутниках Прогноз, Pioneer-9 и NEOS-2, находившихся в межпланетной среде 4 августа 1972г. [3], были получены оценки для величины южного компонента Bz межпланетного магнитного поля (ММП) около -35 нТ и динамического давления плазмы солнечного ветра $Pd \sim 32$ нПа.

Наблюдение магнитопаузы позволяет косвенно определить условия в межпланетном пространстве, в частности, динамическое давление солнечного ветра, которое может достигать 200 нПа при экстремальных возмущениях [2], когда плазменные измерения на межпланетных мониторах не всегда надежны.

Работа выполнена в рамках НИР НИИЯФ 2.11 «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве».

АВРОРАЛЬНЫЕ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ГЕНЕРАЦИЯ P_{i2} ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПРИ РАЗВИТИИ ИЗОЛИРОВАННОЙ СУББУРИ

Ковражкин Р.А.¹, Глазунов А.Л.¹, Владимирова Г.А.¹, Баишев Д.Г.²

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rostis@bk.ru

²ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия

Представлены результаты комплексного анализа потоков сверхтепловых электронов в авроральной зоне (спектрометр ION на спутнике ИНТЕРБОЛ-2), планетарной картины полярных сияний (UVI камеры на спутнике POLAR) и P_{i2} пульсаций (цепь канадских магнитных станций вблизи геомагнитной долготы ~305°). Измерения были проведены 09.01.1997 в период взрывной фазы суббури. Максимальные значения AE- и AL-индексов в этот период достигали ~500 нТл и ~ -400 нТл соответственно. Возрастания P_{i2} пульсаций происходили в областях, сопряженных со средней и приполярной областями ночного аврорального овала. Выявлено, что возрастания пульсаций связаны с потоками квазипериодических электронов 0.2-3.5 кэВ, причем наблюдается антикорреляция и корреляция потоков электронов и волновой формы P_{i2} на низких и высоких широтах соответственно. Такое поведение частиц и пульсаций является экспериментальным свидетельством двух различных механизмов возбуждения P_{i2}. Для низкоширотной зоны генерация быстрой магнитозвуковой волны может осуществляться в результате резкого спада потока частиц и его торможения в плазменном слое при переходе силовых линий от вытянутых к дипольным. Взаимосвязь возникновения мелкомасштабных потоков электронов 50-120 с (высокоскоростных потоков типа VBF) в авроральной зоне с усилением P_{i2} пульсаций в сопряженной области может означать одновременное образование вспыхивающих потоков электронов и альвеновской волны в результате импульсного магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы.

1. Hayakawa et al. //Astr. J. 2024. V. P.
2. Dmitriev A.V. et al. // JGR. 2014. V. 119. P.877.
3. Vaisberg O.L., Zastenker G.N. //Space Sci. Revs. 1976. V. 19. P.687.
4. Дмитриев А.В. // Косм. Исслед. 2024. Т. 62. С. 225.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЖНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СО СПУТНИКОВ *ИНТЕРБОЛ-2*, *POLAR*, *S3-3*

Н.Ф. Смирнова¹, Г. Станев²

¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nsmirnova@romance.iki.rssi.ru*

²*ИКИТ БАН, г. София, Болгария, gstanev@space.bas.bg*

В настоящее время имеются результаты определения электронной концентрации с космических аппаратов *ИНТЕРБОЛ-2*, *POLAR*, *S3-3*. Полученные значения сопоставимы, так как эти спутники летали примерно в одинаковых геофизических условиях при низкой солнечной активности, и концентрация окружающей плазмы определялась на основе измерений датчиками электрических полей (EFI). При получении и анализе результатов применялись основные идеи метода А. Педерсона для определения плотности окружающей плазмы на основе измерений потенциала космического аппарата. Если потенциал спутника положительный, необходимо учитывать фотоэлектронную эмиссию [1].

ИНТЕРБОЛ-2 был запущен 29 августа 1996 года, через три месяца после начала 23-го цикла и находился ~2.5 года на орбите между 769 и 19211 км (наклонение 62.8°). *POLAR* был выведен на орбиту 24 февраля 1996 года с параметрами: перигей 4 198 км, апогей 54027 км, наклонение 78.6°. *POLAR* был активным до 28 апреля 2008 года. *S3-3* был запущен летом 1976 года в начале 21 цикла солнечной активности и установлен на полярной орбите с перигеем 240 км, апогеем 8040 км и наклонением 97.5°.

На спутнике *POLAR* применялся EFI для измерения потенциала спутника относительно плазмы, который использовался для изучения зависимости плотности электронов от уровня геомагнитной активности. Был сделан вывод о возрастании плотности электронов с уменьшением индекса Kp, а также получены другие зависимости [2].

Плотность и температура плазмы на спутнике *S3-3* определялась по измерениям зонда Ленгмюра, который являлся частью волнового эксперимента и снимал вольт-амперные характеристики. Параметры определялись с помощью подходящего подбора (*fitting procedure*) измеренной вольт-амперной характеристики к теоретической. Для определения плотности фототока на *S3-3* применялась модификация модели А. Педерсона. По данным спутника *S3-3* типичные значения плотности электронов ~10 см⁻³ на высоте 8000 км [3].

Для определения плотности электронов по измерениям потенциала *ИНТЕРБОЛ-2* можно применить модель: $J_{ph}(V) = J_{ph0} \exp(-Vs/2.1)$, где J_{ph0} - плотность фотоэлектронного тока, V_s - потенциал спутника. Аппаратура спутника *ИНТЕРБОЛ-2* позволяет определить плотность фототока J_{ph0} на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСР-2 и КМ-7 [4,5]. Плотность фототока насыщения находилась в диапазоне 18–36 мкАм⁻². Потенциал спутника *ИНТЕРБОЛ-2*, как правило, 2-5 В. Концентрация электронов 1-40 см⁻³.

В докладе предполагается сопоставить результаты и методы определения концентрации электронов на спутниках *ИНТЕРБОЛ-2*, *POLAR*, *S3-3*.

1. Pedersen A., Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements // *Ann. Geophys.*, V.13, pp.118–121, 1995.
2. Laakso H., Orgenoorth H., Wyganth J., et al. Electron Density Distribution in the Magnetosphere // *ESA SP-415*. 1997. P.53-58.
3. Kletzing C.A., F.S. Mozer, R.B. Torbert, Electron temperature and density at high latitude // *JGR*, 1998, V. 103, no. a7, pp. 14837-14845.
4. Smirnova N.F., Stanev G. Determination of the photoelectron current density based on comparison between IESP-2 and KM-7 probe measurements of the Interball-2 satellite // *Geom. Aeron.* 2009. V. 49. N 8. P. 1204–1207.
5. Смирнова Н.Ф., Станев Г. Оценка плотности электронов в ближней 3-4 R_E магнитосфере на основе измерения потенциала спутника *ИНТЕРБОЛ-2* // *Космич. исслед.* 2023. Т. 61. № 3. С. 202-214.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИСПЫТАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МИШЕНЕЙ И ПРОВЕДЕНИЕ 2-Х ИМПУЛЬСНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ШАРООБРАЗНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ СФЕРИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Иванов А.Е., Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф., Чибранов А.А., Логинов М.В.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, arteemiyy.iv@gmail.com

На стенде КИ-1 [1] были экспериментально испытаны специальные мишени для увеличения энергии сферических облаков лазерной плазмы (ОЛП). Исследовались пять мишеней диаметром D = 10 мм. Мишени различались молекулярным составом и поверхностной структурой. Все мишени равномерно облучались четырьмя лазерными лучами по схеме тетраэдра [2] в одинаковых условиях. Для измерения параметров ОЛП (концентрации ионов, энергии облака и полного количества частиц) использовались электрические зонды Ленгмюра.

После проведения экспериментальной серии по разлету ОЛП с разными мишенями выбран наиболее оптимальный вариант мишени, который далее исследовался в режиме 2-х импульсного облучения [3]. Первый импульс предварительного облучения мишени применялся в режиме плазмообразования.

Результаты первого эксперимента показали, что поверхностная структура мишени в значительной степени увеличивает энергию и число частиц ОЛП, однако, сложные структуры быстрее подвергаются деградации, что приводит к постепенному ухудшению итоговых параметров плазмы. Применение 2-х импульсного лазерного облучения показало, что предварительная ионизация среды первым импульсом позволяет снизить энергетические затраты основного лазера на ионизацию, что увеличивает энергию и число частиц в плазменном облаке. Наиболее выраженный эффект состоит в повышении полного числа частиц итогового ОЛП.

Таким образом, проведенные серии экспериментов на установке КИ-1 позволили определить основные методы по увеличению энергии и числа частиц ОЛП: варьирование состава и поверхностной структуры мишени, а также предварительное облучение мишени в режиме плазмообразования.

Работы по исследованию плазменных мишеней и 2-х импульсному облучению выполнены при поддержке гранта РНФ № 24-62-00032, <https://rscf.ru/project/24-62-00032/>. Работы по подготовке стенда КИ-1 к эксперименту производились Березуцким А.Г., Чибрановым А.А. и Посухом В.Г. в рамках Госзадания № НИОКТР 121033100062-5.

1. Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г. Лазерная плазма и лабораторное моделирование нестационарных космических процессов. – (1988).
2. Berezutsky A. G. et al. Sub-Alfvénic Expansion of Spherical Laser-Produced Plasma: Flutes, Cavity Collapse and Field-Aligned Jets // *Plasma Physics Reports*. – (2023). – Т. 49. – №. 3. – С. 351-361.
3. Антонов В. М. и др. Мощные СО₂-лазеры для плазменных экспериментов и технологии // Новосибирск: Изд ИТПМ СО АН СССР. – (1986).

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТУРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ КИ-1

Логинов М.В., Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Иванов А.Е. Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Чибранов А.А., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, misha.logv@gmail.com

На установке КИ-1[1-2] в 2023 году был разработан, изготовлен и введен в эксплуатацию новый измерительный контур для контроля энергии плазменного облака по интегральным возмущениям внешнего магнитного поля методом удаленного зонда, а также регистрации моделей различных геофизических и астрофизических явлений, которые сопровождались сферическими выбросами лазерной плазмы в замагниченную фоновую плазму. Актуальность данной работы обусловлена тем, что развитие измерительных методик необходимо для качественного, более детального изучения различных нестационарных космических явлений в условиях лабораторного эксперимента на крупномасштабных установках, с применением неинвазивных методов диагностики.

В работе представлены результаты, полученные с измерительного контура на экспериментальной установке. Зонд позволяет контролировать генерацию внешнего магнитного поля B_0 в вакуумной камере, интегральное возмущение поля B_0 при разлете облака лазерной плазмы и замагниченной фоновой плазмы, а также отслеживать повторяемость разлета лазерной плазмы.

Зонд продемонстрировал хорошую чувствительность к плотности и скорости разлета плазменного облака и позволил отслеживать повторяемость плазменных параметров во время проведения эксперимента. Полученные сигналы зонда качественно и количественно соответствуют теории удаленного магнитного зонда, он позволяет измерять усредненный радиус магнитной каверны, который связан с полной энергией облака лазерной плазмы, что важно при разлете облака плазмы и его взаимодействии с внешним магнитным полем и окружающей средой.

Работы по исследованию магнитного контура выполнены при поддержке гранта РФФИ № 24-22-00106, <https://rscf.ru/project/24-22-00106/>. Работы по подготовке стенда КИ-1 к эксперименту производились Березуцким А.Г., Посухом В.Г. и Чибрановым А.А. в рамках Госзадания № НИОКТР 121033100062-5.

Список публикаций:

[1] Y.P. Zakharov et al //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 369, № 1, p. 357-362, (1996).

[2] I. F. Shaikhislamov et al //Plasma Physics and Controlled Fusion, 56, № 12, p. 125007, (2014).

СУПЕРБУРЯ 10 МАЯ 2024 Г.: ЭФФЕКТ РЕЗКОГО ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ММП В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ ПРОЕКТА AMPERE

Громова Л.И.¹, Клейменова Н.Г.², Громов С.В.¹, Малышева Л.М.²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия; gromova@izmiran.ru

²ИФЗ РАН, г. Москва

Супербурия 10 мая 2024 г. была одной из самых сильных магнитных бурь текущего 25 цикла солнечной активности, во время которой Dst_{min} достигло значения -403 нТл. Главная фаза бури развивалась при сильных и быстрых изменениях в структуре межпланетного магнитного поля (ММП). Нами были рассмотрены особенности развития ионосферных токов в утреннем и дневном секторе высоких широт в период одновременного резкого изменения компонент ММП в 22-23 UT, когда B_y -компонента изменилась от -40 нТл до $+70$ нТл, а B_z – от -38 нТл до $+52$ нТл, при этом скорость солнечного ветра оставалась неизменно высокой ~ 750 км/с, а динамическое давление большим $\sim 30-35$ нПа. Планетарное распределение ионосферных и вычисленным по ним продольных токов исследовалось по данным магнитных измерений на 66 одновременных низко орбитальных (на высоте ~ 780 км) спутников проекта AMPERE. Показано, что в течение всего интервала (22-23 UT) в утреннем секторе авроральных широт ($\sim 50-65^\circ$ MLAT) наблюдались интенсивные магнитные вихри, свидетельствующие о локальном усилении продольных токов, что способствовало соответствующему развитию западного электроджета в утреннем секторе. До смены знака компонент (т.е. до $\sim 22:30$ UT) знак B_z и B_y ММП был отрицательным, а затем сменился на положительный. В дневном секторе полярных широт до 22:30 UT наблюдался небольшой западный электроджет, значительно менее интенсивный, чем утренний, а после смены знака компонент ММП он сменился резко усиленным восточным током с максимумом в 10-14 MLT на широтах $\sim 75-80^\circ$ MLAT как результат появления в околополюсной области локального очень интенсивного вытекающего продольного тока, т.е. высыпания низкоэнергичных заряженных частиц. С ростом амплитуды B_y ММП интенсивность электроджетов в дневном секторе полярных широт возрастала, что согласуется со статистическими исследованиями по данным спутника CHAMP, выполненными для нескольких интенсивных магнитных бурь [1]. Таким образом, резкие изменения в структуре ММП, а именно одновременное изменение знака B_y и B_z компонент ММП с отрицательного на положительный, привели к изменению структуры продольных токов в дневном секторе полярных широт и соответствующей смене направления ионосферных токов с западного на восточный.

1. Gromova L., Förster M., Feldstein Y., and Ritter P. Characteristics of the electrojet during intense magnetic disturbances. Ann. Geophys. V. 36. P. 1361-1391. 2018. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-1361-2018>

ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОКАЗАТЕЛЬ СТЕПЕНИ СИММЕТРИИ МАГНИТОСФЕРНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Макаров Г.А.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru

В работе исследуются межпланетные факторы, влияющие на степень симметрии магнитосферного кольцевого тока. Показателем степени симметрии кольцевого тока является отношение $SYM-H/ASY-H$ геомагнитных индексов $SYM-H$ и $ASY-H$, рассчитанных по данным среднеширотных станций. Рассматриваются геомагнитные индексы $SYM-H$, $ASY-H$ и Ap за период 1981 -2015 гг. Геомагнитные данные взяты из Мирового центра данных в Японии (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), межпланетные данные – из Центра данных космической физики НАСА (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Анализ проводится двумя путями: по среднесуточным значениям геомагнитных и межпланетных параметров и их среднегодовым значениям. Такой подход позволяет выделить крупномасштабные закономерности. Массив среднесуточных данных был разбит на 9 групп в соответствии со среднесуточными значениями геомагнитного индекса Ap . Из обработки были исключены дни, когда отсутствовали данные о параметрах солнечного ветра и геомагнитной активности. По среднегодовым данным и по средним в группах Ap значениям были рассмотрены связи показателя степени симметрии кольцевого тока и индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ с такими межпланетными параметрами как модуль B межпланетного магнитного поля (ММП), северо-южная компонента B_n ММП и скорость V солнечного ветра. Связи индексов геомагнитной активности с межпланетными параметрами хорошо известны, они рассматривались многими исследователями и в данной работе получено ожидаемое соответствие с ними.

По среднесуточным и среднегодовым данным установлено, что показатель степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ сильно зависит от модуля ММП, северо-южной компоненты ММП и в меньшей степени от скорости солнечного ветра. Получено, что с интенсификацией межпланетных параметров $SYM-H/ASY-H$ приближается к -1.

По среднесуточным и среднегодовым данным показано, что геомагнитный индекс симметричной компоненты кольцевого тока $SYM-H$ сильнее влияет на степень симметрии кольцевого тока, чем индекс асимметричной компоненты кольцевого тока $ASY-H$.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (номер госрегистрации 122011700182-1).

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В МАКСИМУМЕ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Груздов Д. С.^{1,2}, Калегаев В. В.^{1,2}, Власова Н. А.²

1 Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2 НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, gruzdov.ds20@physics.msu.ru

Внешний радиационный пояс Земли (ВРПЗ) является высокодинамичной областью в магнитосфере. Наиболее существенные изменения ВРПЗ происходят под влиянием солнечного ветра и сопровождаются геомагнитными возмущениями. Во время таких событий могут наблюдаться сильные вариации потоков энергичных электронов, изменения пространственных параметров внешнего пояса: максимум ВРПЗ или его высокоширотная граница. Вариации захваченных (на орбите космического аппарата Van Allen Probes А) и квазизахваченных (на низкой полярной орбите спутника Meteor M2) потоков электронов ВРПЗ изучались на разных фазах геомагнитных бурь разной интенсивности. Временные и пространственные профили потоков электронов в разных энергетических диапазонах ($>0,1$, $>0,3$, $>0,7$ и >2 МэВ) были восстановлены из спутниковых измерений, полученных во время нескольких пересечений радиационного пояса.

В работе рассмотрены три умеренно-слабые магнитные бури, сопровождаемые продолжительной суббуревой активностью: 01-05.02.2015, 6-12.11.2015 и 11-16.10.2017. Данные о потоках электронов в максимуме ВРПЗ на высоких широтах и вблизи геомагнитного экватора имеют сходство для всех трех событий, в связи с чем, при небольшой разнице во времени между измерениями двух спутников (не более 30 минут), можно ожидать похожую динамику потоков.

На главной фазе бурь суббуревые активизации и резонансное взаимодействие частиц с волнами ОНЧ диапазона приводят к ускорению частиц меньших энергий (100-300 кэВ); к концу фазы восстановления растет жесткость энергетического спектра, поток частиц с энергией $E > 2$ МэВ увеличивается примерно на 1.5-2 порядка. Во время главных фаз событий 06-12.11.2015 и 11-16.10.2017 потоки частиц с $E > 0.3$ МэВ, $E > 0.7$ МэВ, $E > 2$ МэВ уменьшаются, что связано, предположительно, с Dst-эффектом и потерями на магнитопаузе.

Измерения пространственного положения максимума ВРПЗ по обоим спутникам не показали надежного сходства, что, по-видимому, связано с различием в методе измерения L-координаты спутника: для Meteor-M2 используется модель IGRF, которая не учитывает возмущенности магнитосферы; при проектировании магнитной линии с орбиты Meteor-M2 ошибка в определении точной магнитной оболочки L^* значительно больше, чем для Van Allen Probes, так как последний располагается вблизи геомагнитного экватора.

Помимо прочего, в событии 11-16.10.2017 наблюдается формирование «дополнительного» радиационного пояса релятивистских электронов с максимумом на $L \sim 4.8$. Присутствует временная задержка в формировании дополнительного максимума для частиц разных энергий, что связано с разной эффективностью ускорения электронов разных энергий. Двухпиковая структура наблюдается как на высоких широтах, так и вблизи геомагнитного экватора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ДЛЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, smolinsv@inbox.ru

Для расчетов предлагается новая основанная на физике математическая модель [1] (обыкновенное дифференциальное уравнение), описывающая аналитически (когда $Kp = \text{const}$ или $Kp \approx \text{const}$) или численно (если $Kp(t) \neq \text{const}$) перпендикулярные (для питч-угла 90 градусов) дифференциальные или интегральные потоки релятивистских электронов на геостационарной (геосинхронной) орбите (ГСО), а также на любой круговой орбите в магнитосфере Земли в зависимости от местного времени (англ. local time) LT на орбите, индекса геомагнитной активности Kp , параметра МакИлвейна L и перпендикулярного дифференциального потока или интегрального потока релятивистских электронов, взятых для $LT = 0$ ч. Используются наблюдения потоков релятивистских (> 2 МэВ) электронов, усредненные по местному часу LT вдоль ГСО с 1995 г. по 2009 г., собранные КА «GOES». Сделано сравнение модельного перпендикулярного интегрального потока релятивистских электронов, когда $Kp \approx \text{const}$, например в течение одних суток, с усредненными экспериментальными данными КА «GOES». Получено практически идеальное согласие. Для всего диапазона от 00 LT до 24 LT вдоль ГСО величина эффективности предсказания (англ. prediction efficiency) точности предложенной математической модели получена $PE = 0.9989$. Если используются экспериментальные данные только КА «GOES 10» для усредненных интегральных потоков релятивистских (> 2 МэВ) электронов, тогда для всего диапазона от 00 LT до 24 LT вдоль ГСО величина $PE = 0.9924$. Предложенные формулы позволяют находить (прогнозировать), например, среднюю величину перпендикулярного интегрального потока релятивистских (> 2 МэВ) электронов за сутки, суточный флуенс, а также предсказывать на сутки вперед приблизительно в будущий полдень на ГСО максимальный перпендикулярный интегральный поток релятивистских электронов, если известен поток в полночь. Нелинейный эффект теоретически прогнозируется (предсказывается) в виде нелинейной зависимости отношения максимального перпендикулярного интегрального потока (\sim в полдень) к минимальному потоку (\sim в полночь) на ГСО от Kp -индекса геомагнитной активности ($0 \leq Kp \leq 9$). Пока сравнение модели с усредненными интегральными потоками релятивистских (> 2 МэВ) электронов произведено для диапазона $0 \leq Kp < 6$ с прогнозируемым максимальным отношением потоков в 24.4139 раза при $Kp = 8$ и с эффективностью предсказания точности нелинейного эффекта $PE = 0.8678$.

1. *Smolin S.V. A Nonlinear Dependence on the Geomagnetic Activity of the Ratio of the Maximum Flux of Charged Particles in a Geostationary Orbit to the Minimum Flux // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. V. 63. N 5. P. 574-583. doi: 10.1134/S0016793223600534.*

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, СВЯЗАННЫХ С ОСЛАБЛЕНИЕМ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ, С ВЫСЫПАНИЯМИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫЗВАННЫХ ДРУГИМИ МЕХАНИЗМАМИ

Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов, Т.А. Попова

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация

В работе по данным спутников серии NOAA POES изучаются высыпания релятивистских (>800 кэВ) электронов (ВРЭ), регистрируемые над областью Южно-Атлантической магнитной аномалии в течение интервала 8-18 октября 2017 г., включающего магнитную бурю, которая сопровождалась многочисленными суббурями. Это неинтенсивные (10^3 - 10^4 (см² с ср)⁻¹) и продолжительные (до 3 минут) ВРЭ. Их общий механизм и сходные характеристики дают основание отнести их к отдельной 4-й группе, отличающейся от ранее изученных трёх групп высыпаний, а именно, высыпаний, связанных с питч-угловой диффузией в области большой кривизны силовых линий геомагнитного поля (1-я группа) со свистовыми волнами (2-я группа) и электромагнитными ионно-циклотронными волнами (3-я группа). Потоки в этих трех группах высыпаний достигают 10^6 (см² с ср)⁻¹. Поскольку ВРЭ 4-й группы связаны с магнитной аномалией, расположенной в южном полушарии, то и наблюдаются эти высыпания, в основном, в южном полушарии. Причем, наблюдаться они могут не только во время усиления геомагнитной активности, но и в спокойные периоды, имея при этом меньшую интенсивность. Сравнение количества зарегистрированных ВРЭ 4-й группы в один и тот же период времени по данным одних и тех же спутников с количеством ВРЭ первых 3-х групп показало явное преимущество (в разы) ВРЭ 4-й группы. Это преобладание по суточному числу наблюдений сохраняется даже во время главной фазы бури, когда количество и интенсивность ВРЭ 4-й группы снижаются. Другой особенностью ВРЭ 4-й группы является их большая протяженность по широте (продолжительность пролета спутника через область высыпаний до 3 минут) в отличие от локализованных ВРЭ первых 3-х групп, для которых продолжительность пролета составляет до 30 секунд. Механизм формирования ВРЭ 4-й группы предполагает наличие достаточного количества энергичных частиц в радиационном поясе. В искаженном магнитном поле энергичные частицы попадают в дрейфовый конус потерь и высыпаются. Увеличение количества и интенсивности высыпаний 4-й группы в конце главной и во время восстановительной фазы бури может быть связано с дополнительным ускорением электронов до релятивистских энергий за счет разных факторов и, в частности, за счет повышенной суббуревой активности. На основании полученных результатов сделан вывод, что высыпания релятивистских электронов, связанные с ослаблением напряженности магнитного поля в районе Южно-Атлантической аномалии, могут вносить существенный вклад в потери частиц из радиационного пояса.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 22-62-00048.

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения токовых слоев»

Секция посвящена столетию со дня рождения Сергея Ивановича Сыроватского

Среда, 12.02.2025 г., Конференц-зал

Время		Ф.И.О. 1-ого автора	Председатель: А.В. Дивин Название доклада
1	09.00 - 09.15	С.В. Апатенков и др.	Квазистационарные токовые слои в наблюдениях CLUSTER
2	09.15 - 09.30	Е.Е. Григоренко и др.	Бессиловые токовые структуры, наблюдаемые в плазменном слое геомагнитного хвоста во время распространения быстрых плазменных потоков
3	09.30 - 09.45	И.Д. Петровский и др.	Интенсивные токовые структуры, наблюдаемые спутниками MMS в плазменном слое геомагнитного хвоста в время спокойных и возмущенных периодов
4	09.45 - 10.00	О.О. Царева и др.	Равновесная структура сверхтонких токовых слоев с широм магнитного поля
5	10.00 - 10.15	О.В. Мингалев и др.	Численное моделирование сверхтонкого электронного токового слоя в ближней части магнитосферного хвоста
6	10.15 - 10.30	П.В. Сецко и др.	Особенности функции распределения токонесящих электронов в сверхтонком электронном токовом слое
10.30 - 11.00		Перерыв на кофе	
Председатель: Е.Е. Григоренко			
7	11.00 - 11.15	Н.Н. Левашов и др.	Моделирование ускорения частиц в трехмерном турбулентном поле с перемежаемостью в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли во время суббури.
8	11.15 - 11.30	А.В. Дивин и др.	Признаки трехмерного магнитного пересоединения в лабораторной установке SPERF-AREX (Харбин).
9	11.30 - 11.45	М.А. Евдокимова и др.	Анализ гелий-протонного соотношения плотности на токовых слоях на 1 а. е.
10	11.45 - 12.00	Х.В. Малова и др.	Моделирование локальных вариаций относительного содержания ионов гелия к протонам внутри сильного токового слоя
11	12.00 - 12.15	Р.А. Кислов	Оценки магнитного момента гелиосферного токового слоя
12	12.15 - 12.30	Обсуждение	
12.30 - 13.30		Пленарный час	
		В. Д. Кузнецов и А.Г.Франк " С.И.Сыроватский - ученый и человек (к 100-летию со Дня рождения)	

10-14 февраля 2025 г. ИКИ РАН

13.30 - 14.30		Обед	
Председатель: О.В. Мингалев			
13	14.30 - 14.45	В.Д. Кузнецов	Токовые слои и солнечные вспышки
14	14.45 - 15.00	Л.С. Леденцов	Пространственная периодизация распада токового слоя в солнечной вспышке
15	15.00 - 15.15	А.Г. Франк	Токовые слои в замагниченной плазме: идеи С.И. Сыроватского, их реализация и развитие в лабораторных экспериментах
16	15.15 - 15.30	С.А. Корягин и др.	Токовые слои намагничивания в экспериментальной плазменной арке коронального типа с анизотропной ионной температурой
17	15.30 - 16.00	Обсуждение	
16.00 - 16.30		Перерыв на кофе	

10-14 февраля 2025 г. ИКИ РАН

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В НАБЛЮДЕНИЯХ CLUSTER

Апатенков С.В.¹, Брыжахина Д.Д.¹, Артемьев А.В.²

1-СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, apatenkov@mail.ru

2-UCLA, США

В работе исследованы пересечения токового слоя (ТС) хвоста магнитосферы спутниками Cluster в спокойных условиях, отобраны события продолжительностью более 10 минут. Обнаружено, что профили тока бифурцированы, имеют локальный минимум в центре, с максимальной амплитудой 3-4 нА/м². Толщины ТС 40-100 ионных гирорадиусов (1.5-2 Re) выделяются на фоне исследуемых ранее более тонких слоев. Оценены вклады диамагнитных и анизотропных вкладов в ток с использованием измерений плазменного давления, градиента dP/dz , их сумма описывает 50-70% тока из градиентов магнитного поля (по курлометру). В центре ТС основной вклад от анизотропного тока, а на краях ТС – от диамагнитных токов. Недостаток диамагнитного тока возможно описать компонентой градиента давления dP/dx .

Работа поддержана фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС» грант №23-1-2-24-1.

БЕССИЛОВЫЕ ТОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ НАБЛЮДАЕМЫЕ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА ВО ВРЕМЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ БЫСТРЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Григоренко Е.Е., Леоненко М.В., Зеленый Л.М., Н. Fu

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, elenagrigorenko2003@yandex.ru

Спутниковые наблюдения MMS показали, что во время распространения быстрых плазменных потоков, ускоренных в удаленном первичном магнитном пересоединении, в плазменном слое геомагнитного хвоста формируются множественные интенсивные Сверхтонкие Токовые Слои (СТС) с характерной толщиной порядка нескольких гирорадиусов тепловых электронов. Статистический анализ более 40 интервалов быстрых потоков, наблюдаемых по обе стороны от первичного пересоединения, показал, что СТС формируются на любых расстояниях от нейтральной плоскости поперечного Токового Слоя (ТС) хвоста, ток в СТС переносят преимущественно электроны, и, в большинстве случаев, ток в СТС течет вдоль силовых линий магнитного поля [1].

Статистический анализ, выполненный в данной работе показал, что во многих случаях СТС представляют собой бессиловые токовые структуры, в которых $J \times B$ мало. При этом, вертикальный баланс давления в таких слоях поддерживается за счет возрастания шировой (параллельной току) компоненты магнитного поля, B_m . В результате, в СТС пространственный профиль поля B_m вдоль нормали к слою имеет колоколообразную форму. Данный кинетический эффект, наблюдаемый на электронном масштабах, подтверждает предыдущие наблюдения бессиловых слоев на ионных кинетических масштабах, полученных спутниками Cluster [2].

Продольные СТС генерируются продольными пучками сверхтепловых электронов [1, 3]. С такими структурами часто связана генерация сильных продольных электрических полей и значительная диссипация энергии. Данные явления присущи сепаратрисам магнитного пересоединения. Множественные наблюдения таких диссипативных токовых структур по всему плазменному слою указывает на возможность существования множественных вторичных "сепаратрис", формируемых при вторичных микро-пересоединениях, ответственных за ускорение токообразующих электронных пучков.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-42-00028, <https://rscf.ru/project/25-42-00028/>

1. Grigorenko E.E., Leonenko M. V., Malykhin A. Y., Zelenyi L.M., Fu, H. S. // J. Geophys. Res. 2024. V. **129**, e2023JA032318. <https://doi.org/10.1029/2023JA032318>.
2. Artemyev A. V., Petrukovich A. A., Frank A.G., Nakamura R., Zelenyi L. M. // J. Geophys. Res. 2013. V. **118**. P. 2789. doi:10.1002/jgra.50297.
3. Leonenko M., Grigorenko E., Zelenyi L. // Atmosphere 2023. V. **14**. P. 722. <https://doi.org/10.3390/atmos14040722>.

ИНТЕНСИВНЫЕ ТОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ СПУТНИКАМИ MMS В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА ВО ВРЕМЯ СПОКОЙНЫХ И ВОЗМУЩЕННЫХ ПЕРИОДОВ

Петровский И.Д., Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, petrovskii.id@phystech.edu

В работе выполнен статистический анализ токовой структуры Плазменного Слоя (ПС), наблюдаемой спутниками MMS в интервалы Быстрых Плазменных Поток (БПП), движущихся со скоростями $|V_{ix}| > 200$ км/с, а также во время спокойных интервалов, когда потоковая скорость ионов была низкой ($|V_{ix}| \leq 200$ км/с). Рассмотрено 10 спокойных и 10 возмущенных интервалов. Построены плотности распределения вероятности наблюдения величины плотности электрического тока (j), модуля неидеального электрического поля ($E' = E + [V_e \times B]$, где V_e - потоковая скорость электронов, B - напряженность магнитного поля) и плотности мощности преобразуемой энергии (параметр $j \cdot E'$).

Обнаружено, что в спокойные периоды в ПС интенсивные токовые структуры не наблюдаются. Максимум распределения соответствуют значениям $|j| \sim 5 - 10$ нА/м². Распределение плотности вероятности j имеет резкий спад, и наблюдаемые значения j не превышают ~ 20 нА/м². Плотность трансформации энергии не превышает нескольких десятков пВт/м³. Во время возмущенных периодов плотность распределения вероятности значительно медленнее спадает с ростом j , чем в спокойные периоды. При этом, наблюдаемые значения j могут превышать 100 нА/м². Величина трансформации энергии может достигать несколько нВт/м³.

Таким образом установлено, что генерация множественных интенсивных токовых структур и большие значения плотности энергии, трансформируемой в ПС, наблюдаются только во время распространения БПП из первичного магнитного пересоединения. Кроме того, установлена зависимость максимальной плотности трансформируемой энергии от максимальной скорости БПП.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-12-00031.

РАВНОВЕСНАЯ СТРУКТУРА СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ С ШИРОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Царева О.О., Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Малова Х.В., Попов В.Ю., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, olga8.92@mail.ru

Многочисленные наблюдения MMS показали наличие значительной шировой компоненты магнитного поля в токовых слоях (ТС) хвоста магнитосферы Земли [1,2], при этом в большинстве случаев вектор плотности тока (j) практически параллелен магнитному полю (B), т. е. реализуется бессиловая конфигурация ($[j \times B] = 0$). Шировая компонента магнитного поля (B_y) может проникать в хвост магнитосферы из межпланетного пространства или возникать самосогласованно, что влияет на динамику носителей тока вблизи нейтральной плоскости и изменяет структуру ТС.

Мы обобщили одномерную самосогласованную модель сверхтонкого токового слоя (СТС) [2], поддерживаемого размагниченными и замагниченными электронами, на случай конфигурации с ненулевым магнитным широм ($B_y \neq 0$). В рамках нашей модели замагниченная часть электронной популяции описывается с помощью МГД-подхода, а размагниченная часть – с помощью квазиadiaбатического приближения с использованием каппа-распределения скоростей.

Результаты показывают, что увеличение шировой компоненты магнитного поля существенно изменяет форму и толщину СТС. В частности, с ростом B_y максимальная электронная плотность тока уменьшается, а толщина слоя увеличивается, что согласуется с аналитической оценкой полутолщины $j_y(z)$ -профиля при однородном магнитном шире ($B_y = \text{const}$) $L_e \sim \cos^{-1} \alpha$, где $\cos^{-1} \alpha = (1 + B_y^2/B_z^2)^{1/2}$ [3]. Полутолщина продольного тока (j_{\parallel}) при колоколообразном шире $B_y(z)$ оценивается как $L_e \sim \cos^{-3/2} \alpha$. Максимальный магнитный шир в модели соответствует квази-бессиловой конфигурации системы. Эти результаты подтверждают важность учета ширового магнитного поля для понимания динамики токовых слоев в магнитосфере.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 23-12-00031.

1. Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Zelenyi L.M., et al. // JGR 2021. V. **126** (11). P. e2021JA029641.
2. Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E., et al. // JGR 2023. V. **128** (6). P. e2023JA031459.
3. Zelenyi L.M., Malova H.V., Leonenko M.V., et al. // JGR 2022. V. **127** (11). P. e2022JA030881.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХТОНКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ТОКОВОГО СЛОЯ В БЛИЖНЕЙ ЧАСТИ МАГНИТОСФЕРНОГО ХВОСТА

О.В. Мингалев^{1,2}, П.В. Сецко¹, М.Н. Мельник¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{3,4},
Е.Е. Григоренко⁴, Л.М. Зеленый⁴

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Мурманский арктический университет, филиал в г. Апатиты (Мурманская обл.)

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Космические аппараты миссии MMS во время предварительной фазы магнитосферных суббурь регулярно регистрируют в ближнем хвосте земной магнитосферы потоки электронов и поддерживаемый ими сверхтонкий токовый слой (СТС), чья толщина по порядку равна примерно десяти тепловым гирорадиусам электронов в долях хвоста выше и ниже слоя, а максимум электронного тока составляет от нескольких десятков до более чем сотни нА/м². Такие СТС вложены в более толстый ионный тонкий токовый слой (ТТС), для которого максимальное значение плотности тока обычно порядка нескольких десятков (10–30) нА/м², а толщина по порядку равна примерно десяти тепловым гирорадиусам ионов на краю слоя. Измеренные в СТС достаточно сильные электрические поля имеют характерные величины порядка 0.01–0.1 В/м, что на 1–2 порядка превышает величину типичного электрического поля в ионном ТТС с характерным порядком величины 10⁻⁴–10⁻³ В/м.

В работе предложена численная самосогласованная численная модель стационарного токового слоя (ТС) с заданной нормальной компонентой магнитного поля, который состоит из ионного ТТС и вложенного в него еще более тонкого электронного СТС, с комбинированным описанием электронов, при котором в модели с помощью численного решения соответствующего стационарного уравнения Власова учитываются популяция пролетных протонов и популяция пролетных электронов, а популяция фоновых электронов с изотропным давлением и электростатические эффекты учитываются аналитически с помощью дрейфовой теории аналогично тому, как это сделано в аналитических моделях ТТС.

С помощью представленной модели получен набор самосогласованных по электронам стационарных конфигураций СТС, в которых профиль плотности тока ионов фиксирован и взят из конфигурации чисто ионного ТТС с изотропными электронами. Полученные стационарные конфигурации сверхтонких электронных токовых слоев качественно и количественно хорошо соответствуют СТС, наблюдаемым по данным миссии MMS.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОНЕСУЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СВЕРХТОНКОМ ЭЛЕКТРОННОМ ТОКОВОМ СЛОЕ

П.В. Сецко¹, О.В. Мингалев^{1,2}, М.Н. Мельник¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{3,4},
Е.Е. Григоренко⁴, Л.М. Зеленый⁴

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Мурманский арктический университет, филиал в г. Апатиты (Мурманская обл.)

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Космические аппараты миссии MMS во время предварительной фазы магнитосферных суббурь регулярно обнаруживают в ближней части хвоста земной магнитосферы потоки электронов и создаваемый ими сверхтонкий токовый слой (СТС) с толщиной порядка десяти тепловых гирорадиусов электронов в долях хвоста выше и ниже слоя, и с максимумом электронного тока в пределах примерно 30 – 100 нА/м². Такие электронные СТС вложены в более толстый ионный тонкий токовый слой (ТТС), для которого максимальное значение плотности тока ионов обычно лежит в пределах 10 – 30 нА/м², а толщина по порядку равна примерно десяти тепловым гирорадиусам ионов на краю слоя.

В работе рассматриваются результаты численного моделирования стационарного электронного СТС с помощью новой самосогласованной численной модели стационарного токового слоя (ТС) с заданной нормальной компонентой магнитного поля, который состоит из ионного ТТС и вложенного в него еще более тонкого электронного СТС. В модели популяция пролетных протонов и популяция пролетных электронов учитываются с помощью численного решения соответствующего стационарного уравнения Власова, а популяция фоновых электронов с изотропным давлением и электрическое поле за счет малого разделения зарядов учитывается аналитически с помощью дрейфовой теории и условия продольного силового равновесия электронов аналогично тому, как это сделано в аналитических моделях ТТС.

С помощью указанной модели получен набор самосогласованных по электронам стационарных конфигураций СТС, в которых профили ионных плотности тока и концентрации фиксированы и взяты из конфигурации чисто ионного ТТС с изотропными электронами. Полученные стационарные конфигурации сверхтонких электронных токовых слоев качественно и количественно хорошо соответствуют СТС, наблюдаемым по данным миссии MMS. При этом в модели для каждого узла пространственной сетки рассчитывается функция распределения пролетных электронов и функция распределения пролетных протонов на достаточно детальной сетке в пространстве скоростей. В работе проводится сравнение этих функций распределения во всех частях ТС и выявлены их основные различия внутри СТС и его окрестности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

Моделирование ускорения частиц в трехмерном турбулентном поле с перемежаемостью в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли во время суббури.

Левашов Н. Н., Попов В. Ю., Малова Х.В., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nn.levashov@physics.msu.ru

Предложена трехмерная модель мультифрактального турбулентного поля с контролируемым уровнем перемежаемости. В разработанной модели векторный потенциал турбулентного поля задается при помощи суперпозиции Гауссовых вейвлетов:

$$A_k(x, y, z, t) = \sum_{i,j} A_k^{i,j}(x, y, z, t), \text{ где } A_k^{i,j}(x, y, z, t) = A_k^0 \cdot m_{i,j} \cdot c_i \cdot \exp\left(\frac{-\pi \cdot dr_{i,j}^2(t)}{2 \cdot a_i^2}\right), k = [x, y, z],$$

$dr_{i,j}(t) = \sqrt{(x - x_{i,j}(t))^2 + (y - y_{i,j}(t))^2 + (z - z_{i,j}(t))^2}$, c_i – амплитудный коэффициент для каждого масштабного класса вейвлетов, $m_{i,j} \in [-1; 1]$ – случайный коэффициент. A_k^0 – амплитудная константа. Электрическая и магнитная компонента поля вычисляются при помощи уравнений Максвелла.

Для того, чтобы моделируемое поле было перемежаемым и мультифрактальным, необходимо задать специальное распределение амплитуд у вейвлетов. Для этого выберем 8 весовых коэффициентов p_1 - p_8 и сформируем неоднородное Канторово множество [1]: для самого крупного класса вейвлетов, вычислительная область разбивается на 8 одинаковых кубических ячеек, где в каждой ячейке попавшие в нее вейвлеты будут домножаться на соответствующий коэффициент p_n . Для класса вейвлетов, с масштабом вдвое меньше – каждая исходная ячейка разбивается еще на восемь кубических ячеек, в каждой из которых весовой коэффициент исходной ячейки снова умножается на один из восьми весовых коэффициентов p_1 - p_8 . При таком разбиении, функция мультифрактального спектра, $f(h)$, где h – показатель Гельдера, будет выпуклая, и вблизи своего максимума может быть аппроксимирована параболой.

В рамках данной модели исследовано влияние перемежаемости на ускорение частиц в хвосте магнитосферы Земли. Чтобы моделируемое поле было близко к наблюдаемому, мы ориентировались на событие 17 июля 2001 года, когда в плазменном слое хвоста магнитосферы более 10 минут наблюдалась потоки плазмы со скоростями до 400 км/с и амплитудой турбулентного магнитного поля порядка десяти нТл. В рамках нашей модели показано, что при ускорении в перемежаемом поле, частицы способны набрать большую энергию, по сравнению с неперемежаемым случаем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

1. Федер Е. Фракталы. Москва: Мир, 1991.

ПРИЗНАКИ ТРЕХМЕРНОГО МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКЕ SPERF-AREX (ХАРБИН).

Дивин А.В.¹, Семенов В.С.¹, Апатенков С.В.¹, Парамоник И.П.¹, Zhong D.¹, Mao A.², He X.², Liu S.², Wang X.²

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, a.divin@spbu.ru

² Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, People's Republic of China

Рассмотрены результаты численного моделирования динамики лабораторной магнитосферы в большой установке Space Plasma Environment Research Facility (Харбинский технологический институт, Китай). В эксперименте SPERF-AREX плазма в магнитошисе формируется при ионизации фонового газа заданной плотности под действием вихревого электрического поля разряда [1]. При этом, движение плазмы происходит при накачке магнитного потока в MS соленоидах (MS coils) диаметром порядка 2 м. Такой подход позволяет задать требуемое магнитное поле и скорость дрейфа плазмы. Магнитный момент "земного" диполя также имеет импульсный характер с длительностью порядка 100 мс, однако на характерных временах эксперимента AREX (500 мкс) может считаться постоянным [2]. Расчеты проводились параллельным кодом iPIC3D, в котором реализован полуневявный метод типа "частица-в-ячейке" (Particle-in-cell) [3]. Основным новшеством в кинетическом моделировании процессов в эксперименте AREX явилось добавление в код iPIC3D нового модуля с внутренним граничным условием; плазма в вычислительной области приводится в движение самосогласованно при изменении тока в основных MS катушках. В работе анализируются признаки магнитного пересоединения на кинетических масштабах порядка и меньше электронного гирорадиуса, с параметрами, характерными для асимметричного "дневного" процесса в эксперименте AREX-SPERF. Рассмотрена конфигурация токового слоя в диффузионной области и показано появление области с существенной электронной негиротропией и магнитным полем Холла. Также, кинетические вычисления показали наличие областей магнитного пересоединения между отдельными соленоидами. Действительно, так как ток в катушках направлен в одну сторону, то магнитные поля формируют между ними локальные токовые слои с активной нейтральной линии. Предполагается, что события пересоединения такого типа в реальном эксперименте дополнительно нагревают поступающую на "земной" диполь плазму.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-47-00084 «Магнитное пересоединение в космической и лабораторной плазме: компьютерные симуляции и эмпирическое моделирование».

1. M. Aohua, R. Yang, J. Hantao, E. Peng, H. Ke, W. Zhibin, X. Qingmei, and L. Liyi // Plasma Sci. Technol. 19, 034002 (2017).
2. X. He, A. Mao, S. Apatenkov, Z. Wang, M. Sun, J. Zou, X. Wang // Phys. Plasmas 1 October 2023; 30 (10): 102901
3. Markidis, S., G. Lapenta, and Rizwan-uddin // Math. Comput. Simul. 2010, 80(7), 1509–1519

АНАЛИЗ ГЕЛИЙ-ПРОТОННОГО СООТНОШЕНИЯ ПЛОТНОСТИ НА ТОКОВЫХ СЛОЯХ НА 1 А.Е.

Евдокимова М.А.¹, Хабарова О.В.³, Малова Х.В.^{1,2}, Попов В.Ю.^{1,2,5}, Кислов Р.А.⁴, Зеленый Л.М.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, evdokimari@mail.ru

²МГУ, г. Москва, Россия

³Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

⁴ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

⁵НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

В работе представлен анализ соотношения плотностей гелия и протонов в окрестности сильных токовых слоев (СТС) в солнечном ветре на орбите Земли по данным космического аппарата Wind с разрешением 3с., что соответствует нескольким гирорадиусам протонов по пространству. СТС представляет собой токовый слой толщиной в несколько ларморовских радиусов протонов, характеризующийся значительным провалом в модуле магнитного поля (иногда на порядок) из-за смены знака хотя бы одной его компоненты. Некоторые долгоживущие СТС формируются в солнечном ветре на продолжении нейтральных линий магнитного поля Солнца. Также СТС образуются вследствие магнитного пересоединения, турбулентности и неустойчивостей, развивающихся на гелиосферном токовом слое (ГТС). В этом случае они заполняют пространство, окружающее ГТС, в виде вторичных ТС и разделителей магнитных островов, создавая гелиосферный плазменный слой (ГПС) совокупно с СТС, являющимися продолжениями корональных стримеров. Еще один источник СТС - сильные разрывы, формирующиеся, преимущественно, на краях и внутри высокоскоростных потоков, хотя они также могут образовываться и в спокойном солнечном ветре при слиянии мелкомасштабных ТС, рожденных турбулентностью.

Исследование проведено для максимума и минимума солнечной активности 23 и 24 циклов. СТС определялись с помощью методики автоматической идентификации этого типа структур по данным магнитного поля и плазмы (Khabarova et al. JGR, 2021, doi: 10.1029/2020JA029099) В статистику вошли более 300000 слоев. Гистограммы распределения гелий-протонного соотношения концентрации, посчитанные для моментов, когда внутри 3-х секундного интервала был идентифицирован СТС, показывают усредненную картину по всей толщине слоя. Был проведен анализ данного отношения вне СТС и на СТС при разной величине провала магнитного поля, а также для СТС вне и внутри ГПС. Из анализа гистограмм следует, что гелий-протонное соотношение плотностей на СТС при любых условиях всегда существенно больше, чем вне слоёв. Причём при ужесточении критерия силы СТС эффект роста соотношения становится ярче выраженным.

Полученный результат позволяет скорректировать имеющиеся представления о признаках токовых слоёв. В литературе 1980-х годов упоминалось, что на МГД-масштабах (часовые или суточные осреднения) гелий-протонное соотношение плотностей уменьшается вблизи секторной границы (в современной интерпретации - области, где расположен конгломерат ГПС-ГТС). Поскольку в то время считалось, что секторная граница – это ГТС, критерий минимума гелий-протонного соотношения был перенесен на все токовые слои и иногда использовался для их идентификации. Анализ статистических свойств СТС иллюстрирует некорректность такого подхода, поскольку статистическое исследование, сделанное на МГД масштабе порядка суток, не относилось к токовым слоям, а всего лишь показывало свойства плазмы в широкой окрестности ГПС. При этом истинным свойством СТС является увеличение отношения плотности гелия к плотности протонов. Показано, что данное отношение преимущественно меняется в силу роста плотности гелия на СТС.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОВ ГЕЛИЯ К ПРОТОНАМ ВНУТРИ СИЛЬНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Малова Х.В.^{1,2}, Хабарова О.В.³, Попов В.Ю.^{1,2,4}, Кислов Р.А.⁵, Евдокимова М.С.², Зеленый Л.М.²

¹МГУ, г. Москва, Россия, hmalova@yandex.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

⁴Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁵ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

Солнечная корона непрерывно расширяется, образуя пространственно протяженную гелиосферу. На низких широтах в межпланетном магнитном поле формируется относительно тонкий токовый слой в форме диска (так называемый гелиосферный токовый слой – ГТС), разделяющий крупномасштабные области с противоположной магнитной полярностью. Наблюдения в межпланетном пространстве показали, что ГТС окружен многочисленными сильными токовыми слоями (СТС), являющимися остатками корональных стримеров, а также вторичными токовыми слоями и магнитными островами, – продуктами турбулентности и пересоединения, скапливающимися внутри гелиосферного плазменного слоя (ГПС). При грубом осреднении порядка часа и более, конгломерат ГТС-ГПС также называют секторной границей. Кроме устойчивого долгоживущего ГТС и окружающего его ГПС, в солнечном ветре также существуют короткоживущие тонкие структуры, ассоциирующиеся с турбулентностью [1]. Часть из них также может сливаться в СТС. Кроме того, СТС формируются на сильных разрывах, на краях и внутри высокоскоростных потоков.

В рамках развитой ранее гибридной модели токовых слоев [2] исследован вопрос об относительном содержании ионов гелия (альфа-частиц) по отношению к протонам внутри широкого СТС. Результаты показывают, что отношение плотности гелия к плотности протонов может зависеть от двух основных факторов: особой динамики протонов в тонких слоях (на краях преобладает дрейфовое движение, в нейтральной области – квазиadiaбатическое) и повышенной плотности тяжелых альфа-частиц в СТС вследствие захвата турбулентной средой. Моделирование тонких токовых структур с высоким разрешением (~ гирорадиуса протона) показывает, что относительное содержание ядер гелия по сравнению с протонами может иметь локальный минимум внутри отдельного СТС. Однако при наблюдениях токовых слоев в солнечном ветре с типичным для космических аппаратов разрешением порядка 1-3 секунд (несколько гирорадиусов) видна усредненная картина отношения концентрации альфа частиц к протонам по полной толщине широкого токового слоя. В результате, среднее значение относительной плотности альфа-частиц к протонам оказывается, напротив, выше значений за пределами слоя, что согласуется с моделированием профиля слоя при предполагаемом невысоком разрешении приборов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

1. Khabarova O., O. Malandraki, H. Malova, R. Kislov, A. Greco, R. Bruno, O. Pezzi, S. Servidio, Gang Li, W. Matthaeus, J. Le Roux, N. E. Engelbrecht, F. Pecora, L. Zelenyi, V. Obridko, and V. Kuznetsov // Sp. Sci. Rev. 2021. V. **217:38**. P. 1-97.

2. Malova H.V., Popov V.Yu., Grigorenko E.E., Petrukovich A.A., Delcourt D., Sharma A.S., Khabarova O.V., Zelenyi L.M.// Astrophys. J. 2017. T. **834**. С. 1-9.

ОЦЕНКИ МАГНИТНОГО МОМЕНТА ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Кислов¹ Р.А.

¹ ИЗМИРАН, Россия, Москва, Троицк, kr-rk@bk.ru

Гелиосферный токковый слой во время минимума солнечной активности можно приближённо рассматривать как гигантский диск с током. Этот ток можно оценить, зная теоретические или наблюдательные зависимости компонент межпланетного магнитного поля от гелиоцентрического расстояния. Тогда можно найти магнитный момент токкового диска как функцию его радиуса. В данном исследовании сделаны оценки магнитного момента гелиосферного токкового слоя. Оказалось, что вне зависимости от используемой модели межпланетного магнитного поля, полный магнитный момент гелиосферного токкового слоя на несколько порядков превышает дипольный магнитный момент Солнца в минимуме солнечной активности. Отсюда следует предположение, что в системе Солнце-солнечный ветер следует учитывать не только влияние Солнца на структуру гелиосферы, но и обратное влияние процессов в солнечном ветре на магнитное поле Солнца.

ТОКОВЫЕ СЛОИ И СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Кузнецов В.Д.

ИЗМИРАН, г. Москва, г.Троицк, Россия, kvd@izmiran.ru

Проблема ускорения космических лучей была и остается одной из центральных проблем в физике космоса, также как и возможные механизмы преобразования энергии магнитного поля в нагрев плазмы и излучение. Теория токковых слоев в высокопроводящей плазме с сильным магнитным полем, созданная и развитая С.И.Сыроватским, явилась одним из таких механизмов, получившим как экспериментальное (лабораторное), так и наблюдательное подтверждение на примере солнечных вспышек. В работах С.И.Сыроватского по токковым слоям и солнечным вспышкам даны ответы на ключевые вопросы теории солнечных вспышек - формирование токковых слоев и накопление магнитной энергии, неустойчивости (разрыв) токкового слоя и импульсное выделение магнитной энергии, преобразование ее в энергию ускоренных частиц и в нагрев плазмы. Для магнитных полей на Солнце свойственно наличие нулевых линий и сепаратрисных поверхностей, разделяющих независимые магнитные потоки различных источников на поверхности фотосферы. Другой особенностью всплывающих из-под фотосферы магнитных полей в солнечной атмосфере является в большинстве случаев их арочная структура, охватывающая высоты от фотосферы до короны, так что на уровне фотосферы движения плазмы управляют магнитными полями, а в солнечной короне, где и происходят вспышки, магнитное поле преобладает над другими видами энергии и выполняется приближение сильного магнитного поля. В окрестности нулевых линий и сепаратрисных поверхностей магнитного поля при движении источников поля на фотосфере или при их всплывании происходит формирование токковых слоев, приводящих к вспышкам. С.И.Сыроватским на основе теории токковых слоев построен пример простой модели токкового слоя солнечной вспышки с тепловым триггерным механизмом его разрушения, в котором теория и наблюдения хорошо согласуются. Последующие наблюдения солнечных вспышек с космических аппаратов, а также основанные на этих наблюдениях теоретические работы по токковым слоям и вспышкам, подтвердили основные положения механизма солнечных вспышек С.И.Сыроватского.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЕРИОДИЗАЦИЯ РАСПАДА ТОКОВОГО СЛОЯ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ

Леденцов Л.С.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, leonid.ledentsov@gmail.com

С целью анализа современных спутниковых наблюдений аркад вспышечных корональных петель предложен метод оценки пространственного периода энергосвечения в солнечных вспышках [1]. Метод основывается на применении Фурье анализа к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Метод применен к наблюдениям крупной солнечной вспышки 4 ноября 2003 года. Вспышка произошла на краю диска Солнца, вспышечная аркада, протянувшаяся вдоль солнечного лимба, была подробно отснята в ультрафиолетовом канале 195А спутника TRACE. Фурье анализ разностных изображений показывает наличие нескольких гармоник в пространственном распределении областей энергосвечения вспышки с характерными периодами, лежащими в диапазоне от 3 до 18 Мм. По современным представлениям подобная периодизация может быть результатом распада предвспышечного токового слоя, аккумулирующего энергию солнечной вспышки в корональных магнитных полях, в связи с некоторой неустойчивостью, к примеру, тепловой природы [2-4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72- 30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>).

1. Леденцов Л.С. // ПАЖ 2023. Т. 49. С. 819.
2. Ledentsov L.S. // Sol. Phys. 2021. V. 296. N. 74.
3. Ledentsov L.S. // Sol. Phys. 2021. V. 296. N. 93.
4. Ledentsov L.S. // Sol. Phys. 2021. V. 296. N. 117.

ТОКОВЫЕ СЛОИ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ: ИДЕИ С.И. СЫРОВАТСКОГО, ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ И РАЗВИТИЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Франк А.Г.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

Начиная с 60-х гг. прошлого века основные работы Сергея Ивановича Сыроватского были посвящены проблемам поведения плазмы в сильных неоднородных магнитных полях, физике солнечных вспышек, других вспышечных явлений в плазме, а также импульсному ускорению заряженных частиц. С.И. показал, что течения плазмы с вмороженным магнитным полем в окрестности нулевой линий магнитного поля приводят к формированию токового слоя и концентрации магнитной энергии. Собственно вспышка возникает при быстром разрушении (разрыве) слоя, когда накопленная магнитная энергия преобразуется в энергию плазмы, ускоренных частиц и излучений. На основе идей С.И. Сыроватского в лаборатории ускорителей ФИАН были начаты экспериментальные исследования с целью апробации выводов теории и возможностей кумулятивного ускорения заряженных частиц. Эти исследования в настоящее время продолжаются в ИОФ РАН.

1. С самого начала существовала дилемма, какая структура образуется в окрестности нулевой линий магнитного поля: токовый слой или течение Петчека. Доказательство формирования нейтрального токового слоя в лабораторном эксперименте стало одним из важных аргументов для обоснования концепции С.И. Сыроватского о токовых слоях.

2. В связи с обнаруженной стабильностью токовых слоёв возникла проблема с получением в эксперименте разрыва токового слоя. На основе гипотезы С.И. о «залечивании» разрыва плазмой, окружающей слой, удалось найти условия для осуществления разрыва токовых слоев, при котором происходила перестройка магнитной структуры слоя, импульсный нагрев плазмы, ускорение частиц, т.е. в эксперименте были реализованы явления типа солнечных вспышек.

3. В 3D магнитных конфигурациях с особыми X-линиями и продольной компонентой магнитного поля вдоль X-линии, согласно С.И., возможно развитие токовых слоев, причем во многих случаях роль продольной компоненты эквивалентна газокINETическому давлению плазмы. Эти представления были подтверждены в экспериментах по формированию токовых слоев в 3D магнитных полях различной структуры.

4. Начиная с самых первых работ по данной тематике, С.И. Сыроватский подчеркивал общность физической природы таких нестационарных явлений, как вспышки на Солнце и звездах, суббури в магнитосферах Земли и планет, а также ряд процессов в лабораторной плазме. В дальнейшем эта идея нашла подтверждение, в частности, при сопоставлении спутниковых наблюдений в хвостовой области магнитосферы Земли с результатами экспериментов по динамике токовых слоев в ИОФ РАН.

5. В работе С.И. (ЖЭТФ, 1971) было показано, что у боковых краев токового слоя могут присутствовать токи обратного направления. Такие токи впоследствии были зарегистрированы экспериментально, они изучались и сопоставлялись с динамическими процессами в токовых слоях. В результате было установлено, что обратные токи возникают в результате движения быстрых плазменных потоков от середины слоя к его боковым краям. При этом на краях слоя возникают силы торможения, которые приводят к резкому ограничению длительности потоков. Сравнительно недавно токи обратного направления были обнаружены и в магнитосферном токовом слое, при распространении потоков плазмы из хвостовой области магнитосферы по направлению к Земле.

ТОКОВЫЕ СЛОИ НАМАГНИЧЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ АРКЕ КОРОНАЛЬНОГО ТИПА С АНИЗОТРОПНОЙ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Корягин С. А., Викторов М. Е., Губченко В. М.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, koryagin@ipfran.ru

Компактный экспериментальный стенд «Солнечный ветер» (ИПФ РАН) предназначен для моделирования плазменных процессов в магнитной структуре типа корональной арки: удержание плазмы, разрыв петли, генерация радиоизлучения в неравновесной системе [1]. Дуговые разряды испускают сверхзвуковые плазменные потоки из каждого основания арки к вершине петли. В бесстолкновительном режиме встречные потоки совместно образуют плазменную систему с существенно более высокой ионной температурой вдоль оси трубки, чем в ортогональном сечении. Высокая анизотропия ионной температуры снимается посредством шланговой неустойчивости [2], которая может сопровождаться расслоением плазмы [3] и генерацией поверхностной волны альвеновского/ионно-циклотронного типа [4].

Исследование шланговой неустойчивости в неоднородной системе типа пробкотрона выявило гармонически осциллирующие и экспоненциально нарастающие пространственные моды крутильного альвеновского колебания [3]. Данные моды отличаются резким изменением направления возмущённой части магнитного поля вблизи поперечных сечений трубки, которые отделяют неустойчивую привершинную область арки от устойчивых оснований. В указанных сечениях скорость распространения крутильного альвеновского движения обращается в нуль в плазме с анизотропной температурой.

Остановка волнового движения допускает наглядную интерпретацию как обращение в бесконечность магнитной проницаемости плазмы по отношению к компонентам магнитной индукции и напряжённости, ортогональным оси трубки. В свою очередь, смена знака высокой магнитной проницаемости при переходе из устойчивой в неустойчивую область арки отражает противонаправленные намагниченности данных областей, так что граница между ними подобна доменной стенке в ферромагнетике. По разделительному сечению по сути протекает поверхностный ток намагничения ионной фракции с анизотропной температурой. Ток сосредоточен в узком слое порядка ионного ларморовского радиуса и обуславливает резкую смену знака возмущения магнитной индукции при переходе сквозь сечение.

Экспериментальный стенд позволяет запустить квазипостоянный электронный ток вдоль оси трубки. В этом случае электронный ток играет роль источника магнитной напряжённости, а ионная фракция с анизотропной температурой — роль среды с высокой магнитной проницаемостью в привершинной области арки. Работа обсуждает стационарную токовую структуру намагничения ионной фракции вблизи порога шланговой неустойчивости, которую создаёт квазипостоянный продольный электронный ток в трубке.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ 23-12-00317.

1. Viktorov M. E., Mansfeld D. A., Vodopyanov A. V., et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. Art. no. 075001. doi: [10.1088/1361-6587/aa6c36](https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa6c36).

2. Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. М.: Атомиздат, 1975. § 18.7.

3. Koryagin S. A., Viktorov M. E. // arXiv. Cornell University, 2024. doi: [10.48550/arXiv.2412.07451](https://arxiv.org/abs/10.48550/arXiv.2412.07451).

4. Korzhimanov A. V., Koryagin S. A., Sladkov A. D., Viktorov M. E. // arXiv. Cornell University, 2024. doi: [10.48550/arXiv.2412.06065](https://arxiv.org/abs/10.48550/arXiv.2412.06065).

СЕКЦИЯ «Космическая погода»

Четверг, 13.02.2025 г., Конференц-зал

Председатель: <u>Калегаев В.В.</u>			
	Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада
1	09.00 - 09.15	Нусинов А.А.	Развитие и проблемы прогнозирования 25 цикла солнечной активности.
2	09.15 - 09.30	Нусинов А.А.	Тренды крайнего УФ-излучения Солнца по ионосферным данным.
3	09.30 - 09.45	Коган Л.П.	Возникновение структур высокой степени детерминированности в статистике рентгеновского излучения Солнца перед вспышками X-класса
4	09.45 - 10.00	Сапралиев М.Е.	Трёхмерное МГД-моделирование солнечного ветра по данным синоптических наблюдений фотосферного магнитного поля на ГАС ГАО РАН.
5	10.00 - 10.15	Князева И.С.	RARPs: база данных радио спектров активных областей на основе наблюдений с РАТАН 600
6	10.15 - 10.30	Ишков В.Н.	Долгосрочный прогноз солнечной активности в свете новой парадигмы солнечной цикличности и сценарий СЦ.
	10.30 - 11.00	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Абунина М.А.</u>			
7	11.00 - 11.15	Капорцева К.Б.	Современное состояние прогнозирования распространения межпланетных корональных выбросов массы
8	11.15 - 11.30	Шлык Н.С.	Сравнение и согласование начальных скоростей КВМ по данным различных каталогов.
9	11.30 - 11.45	Вахрушева А.А.	Влияние параметров двумерной dbm-модели на результаты прогноза прибытия корональных выбросов массы к Земле
10	11.45 - 12.00	Ожередов В.А.	Байесовская сеть доверия для прогнозирования протонного возрастания на основе непрерывного мониторинга радио-событий и корональных выбросов массы.
11	12.00 - 12.15	Махмутов В.С.	Особенности проявлений солнечной активности в космических лучах 10-11 мая 2024.
12	12.15 - 12.30	Шлык Н.С.	Эмпирическая модель солнечных протонных событий: вероятности и потоки частиц
	12.30 - 13.30	Пленарный час	

13.30 - 14.30		Обед	
Председатель: <u>Абунин А.А.</u>			
13	14.30 - 14.45	Абунина М.А.	Исследование параметров геомагнитной активности за период с 1932 по 2023 гг.
14	14.45 - 15.00	Гаджиев И.М.	Методики прогнозирования геомагнитного индекса Kp с помощью машинного обучения
15	15.00 - 15.15	Исаев И.В.	Выравнивание распределения значений геомагнитного индекса Dst как способ повышения качества его прогнозирования
16	15.15 - 15.30	Азра-Горская К.Ж.	Согласованная динамика кольцевого тока и электронов внешнего радиационного пояса Земли 17-18.III.2015 и 22-23.VI.2015
17	15.30 - 15.45	Белова А.О.	Отбор входных признаков при решении задачи прогнозирования потоков заряженных частиц на круговой полярной орбите.
18	15.45 - 16.00	Владимиров Р.Д.	Сравнение качества прогнозирования суточных флуенсов релятивистских электронов внешнего РПЗ в периоды минимума и максимума солнечной активности
16.00 - 16.30		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Гуляева Т.Л.</u>			
19	16.30 - 16.45	Замогильный Д.	Разработка региональной модели полного электронного содержания в ионосфере с применением многослойной нейронной сети.
20	16.45 - 17.00	Морозов Д.А.	Мониторинг и моделирование параметров ионосферы по наблюдениям ГНСС.
21	17.00 - 17.15	Филатов Г.С.	Некоторые результаты оперативного прогноза критической частоты F2 слоя (FoF2) ионосферы на базе нейросети LSTM.
22	17.15 - 17.30	Мингалев И.В.	Оценка пространственного распределения ионосферных параметров по данным возвратно-наклонного зондирования
23	17.30 - 17.45	Крашенинников И.В.	Вариации фонового электромагнитного шума в условиях суперсильной ионосферной бури 01.01.2025.
24	17.45 - 18.00	Крылова А.А.	Динамика физических процессов в плазме ионосферы
18.00 - 18.30		Постерная сессия	

Доклады постерной сессии секции «Космическая погода»

- 8.1 Стуков Д. А., Ягова Н. В. Возрастания потока электронов с энергиями порядка 100 кэВ на геостационарной орбите во время и вне сильных геомагнитных возмущений
- 8.2 Ожередов В.А., Струминский А.Б., Григорьева И.Ю. Соотношение максимумов потока энергичных протонов и электронов по долгосрочным наблюдениям EPHIN
- 8.3 Кузьмин А.К и др. Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами с поверхности земли и орбит КА. Часть 3. Структуры "black" и "ant-black" аугога и их возможные механизмы генерации.
- 8.4 Петросян А.П. Исследование влияния особенностей поведения магнитосферы на геоиндуцированные токи

Пятница, 14.02.2025 г., комната 202

Председатель: <u>Мерзлый А.М.</u>			
Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада	
1	09.00 - 09.15	Гуляева Т.Л.	Адаптация климатических 2мерных моделей ионосферы к реальным условиям по картам GIM-TEC
2	09.15 - 09.30	Бондаренко А.М.	О существовании двух групп суббурь по интенсивности пульсаций P _{i3} – волнового отклика в диапазоне 1-5 мГц
3	09.30 - 09.45	Белаховский В.Б.	Рост ГИТ во время магнитных бурь в марте-апреле 2023 года: роль ионосферных токовых систем и конфигурации ЛЭП.
4	09.45 - 10.00	Дэспирак И.В.	Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) во время сильной геомагнитной бури 10-12 мая 2024 года
5	10.00 - 10.15	Вахнина В.В.	Особенности насыщения магнитной системы силового трансформатора при повышенной геомагнитной активности
6	10.15 - 10.30	Сахаров Я.А.	Развитие системы регистрации геоиндуцированных токов на магнитном меридиане Мурманск-Петрозаводск-Москва
10.30 - 10.45		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Сахаров Я.А.</u>			
7	10.45 - 11.00	Богомолов А.В.	Эффекты космической погоды, наблюдавшиеся с помощью наноспутников группировки МГУ «Созвездие-270» во время сильных гелиогеофизических возмущений 2024 г.
8	11.00 - 11.15	Калишин А.С.	Новые инструменты мониторинга геофизической обстановки в высоких широтах. Перспективы. Первые результаты.
9	11.15 - 11.30	Мёрзлый А.М.	Некоторые результаты экспериментов в рамках учений "Безопасная Арктика-2025" по определению местоположения мобильных объектов в арктических условиях.
10	11.30 - 11.45	Куприянов А.О.	Применение постоянно действующих дифференциальных геодезических станций для оперативного мониторинга возмущений ионосферы в арктическом регионе.
11	11.45 - 12.00	Селиванов В.Н.	Трехкомпонентный датчик магнитного поля Земли с магниторезистивным сенсором.

12	12.00 - 12.15	Садыков А.М.	Моделирование отклика детекторной системы КОДИЗ-2 на потоки электронов (50 кэВ-5 МэВ) и протонов (2-200 МэВ).
12.15 – 12.30		Перерыв на кофе	
13	12.30 - 12.45	Ковалев Д.В.	Оценка воздействия эффектов космической погоды на метрологические характеристики геофизической аппаратуры в арктической зоне РФ
14	12.45 - 13.00	Моисеев И.А.	Использование устройств мобильной связи для сбора информации с помощью установленных в смартфоне программ на ОС андроид по оценке уровня сигнала ГНСС и величины горизонтальной составляющей магнитного поля с последующей передачей данных в ИАС ИКИ РАН для обобщения при прогнозировании условий прохождения радиоволн В КВ диапазоне
15	13.00 - 13.15	Янаков А.Т.	Результаты работы межведомственной экспериментальной высокоширотной радиотрассы ИКИ РАН в 2024 году
16	13.15 - 13.30	Анохин М.В.	О возможности использования технического индекса космической погоды Кспэ

РАЗВИТИЕ И ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Нусинов А.А.

ФГБУ "ИПП", г. Москва, Россия, nusinov@mail.ru

Представлена модификация метода долгосрочного прогноза формы цикла чисел солнечных пятен W , предложенного Hathaway [1]. Показано, что форма цикла определяется максимальным числом пятен W_{\max} . Для долгосрочного прогноза новой (см., например, [2]) версии ряда чисел пятен в качестве предикторов использованы, аналогично [3], суточные значения W и индекса геомагнитной активности A_p , средние за последние три года солнечного цикла, предшествовавшего прогнозируемому циклу.

Для получения прогностических соотношений использованы данные о солнечной и геомагнитной активности за 17-24 цикла. Анализ имевшихся данных показал, что для всех без исключения циклов отклонения прогнозируемых значений W_{\max} от наблюдавшихся невелика и в среднем составляет около 4%.

В результате прогноза величин скользящего среднего годового значения W было получено, что предстоящий максимум 25-го цикла ожидается столь же умеренным ($W_{\max} \sim 102$ в середине 2024 г), как и для 24-го, причем снова оказывалось возможно нарушение правила Гневешева-Оля, согласно которому в паре четный и нечетный цикл всегда мощнее нечетный.

Однако наблюдения показали, что полученные соотношения дают неверную картину развития цикла: в настоящее время величина W продолжает расти и уже превысила значение $W \sim 150$. Одновременно резко возросла величина среднеквадратичного отклонения W от скользящего среднего, почти вдвое превысив величину ~ 10 , наблюдаемую в предыдущих циклах. Возможно, наблюдаемые аномалии свидетельствуют о начале нового долговременного цикла активности.

Для прогноза индекса F10.7 приводятся соотношения для расчетов по данным последней версии временного ряда W . Приводятся также соотношения для прогноза фонового (без активных областей на Солнце) радиоизлучения на волне 10.7 см, важные для долгосрочного прогноза потоков коротковолнового ультрафиолетового излучения (КУФ).

Литература

1. Hathaway D. H. Solar Cycle Forecasting // Space Sci Rev. 2009. V. 144: P.401-412 .DOI 10.1007/s 11214-008-9430-4
2. Обридко В.Н., Наговицын Ю. А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза // СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. — 466 с.
3. ГОСТ 25645.302-83 Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности

ТРЕНДЫ КРАЙНЕГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПО ИОНОСФЕРНЫМ ДАННЫМ.

Нусинов А.А.

ФГБУ "ИПП", г. Москва, Россия nusinov@mail.ru

В последнее время наблюдаются изменения параметров ионосферы и верхней атмосферы, одной из причин которых предполагается наличие трендов крайнего ультрафиолетового излучения (КУФ). Подтвердить наличие таких трендов прямыми длительными измерениями излучения в космосе не представляется возможным вследствие относительно короткого (несколько лет) времени существования приборов в космосе, деградации детекторов и неизбежных различий их калибровки. Эта проблема исследуется с помощью природного детектора КУФ — ионосферы, у которой слой E, его критическая частота f_oE , в отсутствие геомагнитных возмущений является чувствительным индикатором вариаций потока КУФ [1].

С помощью данных f_oE ионосферных станций Слау и Линдау удастся восстановить, используя модель E-слоя, интенсивность потока солнечной спектральной линии водорода La , определяющей потоки во всем спектре КУФ, за период с 1932 г. по настоящее время. Исследование этого временного ряда показало, что за длительный период наблюдений сколько-нибудь заметные тренды интенсивности КУФ отсутствуют.

Литература

1. Нусинов А.А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // Геомагнетизм и аэрономия 2004. Т. 44. № 6. С. 779-786.

ВОЗНИКНОВЕНИЕ СТРУКТУР ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ ДЕТЕРМИНИРОВАННОСТИ В СТАТИСТИКЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПЕРЕД ВСПЫШКАМИ X-КЛАССА

Коган Л.П., Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н.

КрАО РАН, Республика Крым, Россия, L.kog@list.ru

При анализе статистики рентгеновского излучения Солнца был выявлен феномен возникновения квазидетерминированных структур, предшествующих вспышкам высокого уровня энергии. Анализ соответствующих графических зависимостей позволяет говорить о том, что за несколько суток перед такими солнечными событиями изменение уровня хаоса в измеряемом сигнале начинает подчиняться почти регулярным закономерностям. Данный эффект, который с высокой вероятностью характерен для вспышек X-класса, существенно слабее проявляется для вспышек класса M. В сочетании с рядом дополнительных предвестников солнечных событий, возникновение указанных структур может рассматриваться как предвестник вспышки X-класса, которая произойдет спустя несколько суток. Все полученные результаты базируются на измерениях рентгеновского излучения Солнца в двух энергетических диапазонах, проведенных в 2017–24 годах.

Рис. 1 соответствует статистике измерений рентгеновского излучения Солнца в диапазоне длин волн от 0.5 \AA до 4 \AA за период 17 суток перед вспышкой класса X5, которая имела место 31 декабря 2023 года. Горизонтальная ось отвечает времени в часах от момента начала отсчета, а вертикальная – значениям применяемого статистического функционала, характеризующего уровень хаоса в измеряемом случайном процессе. Красная сплошная вертикальная линия соответствует времени начала вспышки. На рисунке изображен ряд структур высокого уровня параллельности, проходящих через точки экстремумов зависимости $L(n)$, которые отобраны в рамках строго алгоритма при жестких ограничениях. Моменты завершения подобных квазилинейных объектов «притягиваются» к времени начала сильных солнечных событий и могут рассматриваться как их предвестники.

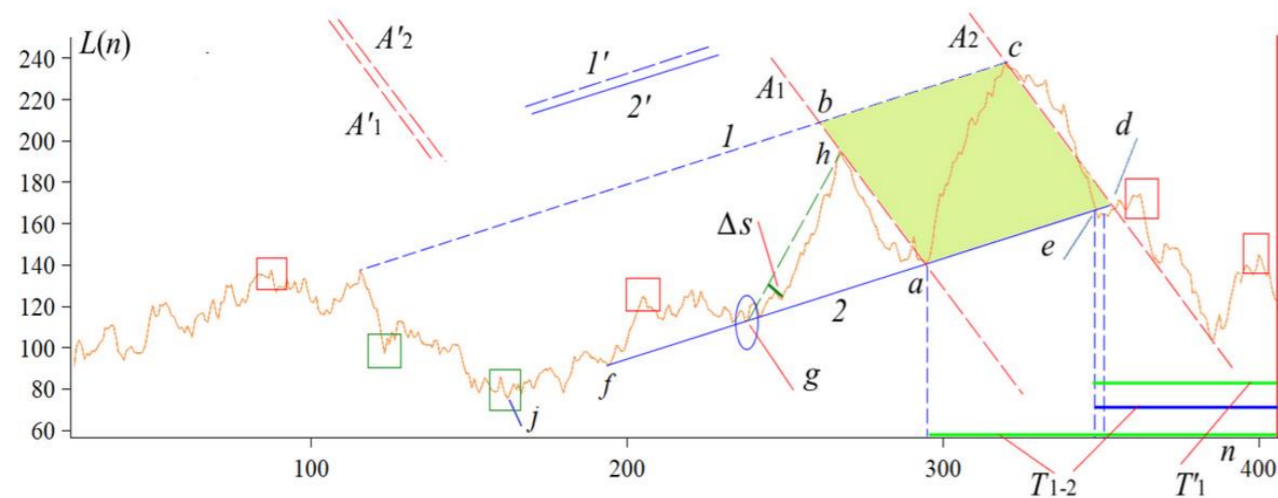


Рис. 1. Зависимость $L(n)$ характеризует уровень энтропии интенсивности принимаемого рентгеновского излучения Солнца. Красная вертикальная прямая отвечает моменту вспышки класса X5, которая имела место 31 декабря 2023 года.

ТРЕХМЕРНОЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ СИНОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ФОТОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ГАС ГАО РАН

Сапралиев, М.Е.¹, Березин И.А.², Глатов А.Г.²

¹КалмГУ, г. Элиста, Россия, m_sapraliev@mail.ru

²ГАС ГАО РАН, г. Кисловодск, Россия, tlatov@mail.ru

Понимание крупномасштабной трехмерной структуры внутренней гелиосферы, имеет большое значение для приложений космической погоды, таких как прогнозирование времени прибытия и распространения корональных выбросов массы (СМЕ). Мы создали программный комплекс для расчета параметров солнечного ветра на основе ежедневных синоптических наблюдений магнитных полей на магнитографе СТОП на Кисловодской Горной астрономической станции ГАО РАН. В данном комплексе используется модель солнечного ветра Potential Field Source Surface[1][2]–Wang–Sheeley–Arge[2] (PFSS–WSA) для постановки граничных условий для МГД-моделирования. МГД-моделирование производится с помощью пакета PLUTO[4] на диапазоне 0.1 - 1.1 а.е. Проведено сравнение значений скорости, плотности и магнитного поля солнечного ветра на орбите Земли с данными измерений (OMNI) и расчетами NOAA SWPC

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-03-2024-113 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений».

1. Altschuler M.D., Newkirk G. // Solar Physics 1969. V. **9(1)**. PP. 131–149.
2. Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.F. // Solar Physics 1969. V. **6**. PP. 442–455.
3. Arge C.N., Odstrcil D., Pizzo V.J., and Mayer L.R. // AIP Conf. Proc 2003. V. **679(1)**. PP. 190–193.
4. Mignone et al. // ApJS 2007. V. **170(1)**. PP. 228–242.

RARPs: база данных радио спектров активных областей на основе наблюдений с РАТАН 600

Князева И.С., Курочкин Е.А., Лысов И.И., Деркач Д.А.

ГАО РАН, iknyazeva@gmail.com

Обработка радиоданных Солнца имеют ключевое значение для углубления наших знаний о физических процессах на Солнце и разработки эффективных систем мониторинга и прогнозирования космической погоды [1].

Такие инструменты, как РАТАН-600, обладают значительными преимуществами, сочетая достаточное пространственное разрешение и высокую чувствительность, и большой динамический диапазон, что позволяет обнаруживать как мощные, так и слабые микроволновые источники. Эти возможности особенно важны для изучения слабых событий и анализа активных областей на ранних этапах их формирования. Удобный доступ к таким данным и их обработка играют решающую роль в продвижении исследований в этой области. В настоящее время инструменты, такие как библиотека SunPy, упрощают доступ к солнечным данным, включая модули, например, drms, которые автоматизируют работу с данными наблюдений фотосферы Солнца и в жестком ультрафиолетовом диапазоне. Более того, с помощью данной библиотеки была создана база данных активных областей SHARPs (Space-Weather HMI Active Region Patches) представляющая собой фрагменты магнетограмм активных областей и метаданные [2]. Наличие такой базы данных привело к появлению огромного количества работ как в области анализа областей, так и связанных с построением прогностических систем на основе них.

Для доступа, визуализации и анализа многодиапазонных радионаблюдений Солнца, полученных с комплекса РАТАН-600 нами был разработан пакет на языке Python RatanSunPy [3]. Также с помощью этого пакета мы собрали базу данных RARPs (Ratan Active Region Patches) содержащую фрагменты радио спектров с РАТАН -600, соответствующие активным областям, а также дополнительные данные об активной области, для которой был выделен этот фрагмент. Наличие такой базы данных существенно облегчит использование радио данных активных областей как для анализа физических процессов, так и для возможного построения прогностических систем

1. Bogod, V., Kal'tman, T., Peterova, N., Yasnov, L., 2017.// *Cosmic Research* 55, 1–11.
2. Bobra, M.G., Wright, P.J., Sun, X. and Turmon, M.J., 2021.// *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 256(2), p.26.
3. Knyazeva, I., Lysov, I., Kurochkin, E., Shendrik, A., Derkach, D., & Makarenko, N. 2024// *Astronomy and Computing*, 100918.

Долгосрочный прогноз солнечной активности в свете новой парадигмы солнечной цикличности и сценарий СЦ

В.Н. Ишков

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ishkov@izmiran.ru

Успешный прогноз высоты циклов 2-ой эпохи пониженной солнечной активности(СА) по сценарию их развития, который следует их анализа достоверных наблюдений относительных чисел пятен (с 1849 г.) является хорошим аргументом в пользу правильности такого подхода. Данный сценарий [Ишков, 2013] определяется величиной фоновых значений общего магнитного поля по наблюдаемым его отражениям, средним и полярным магнитными полями, которая определяет эпохи повышенной (5 СЦ) или пониженной (5 СЦ) СА с переходными периодами между ними (~1.5 СЦ). Сами фоновые значения наблюдаются в точках минимума СЦ и, согласно теории динамо-процесса, представляются минимальными значениями полоидальной компоненты общего магнитного поля Солнца. Эпохи СА со своим уровнем фонового магнитного поля контролируют изменения солнечной постоянной, характер и уровень пятнообразовательной деятельности, энергетику всех солнечных активных явлений внутри СЦ соответствующей эпохи, и через них физические характеристики и уровень воздействий СА на электромагнитную и корпускулярную обстановку внутренней, включая ОКП, и внешней гелиосферы на масштабах времени развития физических магнитных СЦ и эпох СА (десятки и сотни лет)

Сценарий солнечной цикличности, на мой взгляд, хорошо вписывается в недавно предложенную новую парадигму солнечной цикличности, опубликованной в обзоре [S. Martin, 2024], которая показывает как изменялись и уточнялись наши знания о структуре СА, при освоении новых видов наблюдений. Первый этап начался с достоверной регистрации числа солнечных пятен за интервалы 9–13 лет (11-летние СЦ). Второй – с регулярных наблюдений магнитных полей, когда и стало понятным, что более правильным считать основным СЦ физический 22-летний (два 11-летних), связанный с динамикой общего магнитного поля Солнца, с переполусовкой в максимуме каждого из его составляющих. Регулярные наблюдения более мелких структур (биполярных магнитных областей: короткоживущих эфемерных АО, ярких рентгеновских точек), позволило расширить понятие солнечной цикличности. Фундаментальный цикл СА понимается как сочетание двух 22-летних СЦ с одновременным существованием мелких биполярных магнитных структур в разных отдельных, соседних широтных полосах, относящихся к соседствующим 11-летним СЦ. Ориентации большинства биполярных магнитных областей в этих полосах отличаются друг от друга на ~180°. Обе полосы непрерывно дрейфуют из высоких широт в более низкие. Смена полярности для большинства таких магнитных структур происходит в начале каждого 22-летнего СЦ и на более высоких широтах, чем в циклах солнечных пятен. Надо иметь в виду, что новый взгляд на СЦ появился на стыке двух эпох СА, при переходе от эпохи повышенной к эпохе пониженной СА и дальнейшие наблюдения, на наш взгляд, внесут существенные уточнения в эту концепцию. Однако, ясно, что мы поэтапно приближаемся к понятию эпох СА, которые полностью определяются величиной фоновых (затравочных) значений общего магнитного поля Солнца внутри фундаментальных СЦ

Литература

Ишков В.Н. Периоды «пониженной» и «повышенной» солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Сб. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013», под ред. Ю.А. Наговицина, Изд. ВВМ, Санкт- Петербург, 2013, с. 111 – 114, http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2013/conf_2013.pdf

Martin SF (2024), Observations key to understanding solar cycles: a review. *Front. Astron. Space Sci.* 10:1177097. doi: 10.3389/fspas.2023.1177097

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

Капорцева К.Б., Шугай Ю.С.

НИИЯФ МГУ, Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия, kb.kaportceva@physics.msu.ru

Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) являются одними из основных факторов в космической погоде. Приход МКВМ к орбите Земли является причиной самых сильных геомагнитных возмущений, которые в свою очередь могут негативно повлиять на работу спутниковых систем, электросетей и радиосвязь на Земле. Средне-срочное прогнозирование (2-5 дней) МКВМ требует комплексного подхода и включает в себя не только выбор модели распространения выброса, но и определение начальных параметров коронального выброса массы (КВМ), наблюдаемого у Солнца, учет взаимодействия МКВМ с другими потоками солнечного ветра, а также прогноз его влияния на состояние магнитосферы Земли. В докладе рассматриваются основные методы прогнозирования скорости и времени прибытия МКВМ к Земле, включая эмпирические модели и модели на основе кинематики и численного моделирования магнитогидродинамических процессов. Обсуждаются текущие пределы точности прогнозов, и важность точного определения начальных параметров моделей, критически необходимых для осуществления прогноза.

Неотъемлемой частью прогнозирования является валидация моделей КВМ. Существует ряд метрик для оценки качества прогноза, использующих сопоставление наблюдаемых и прогнозируемых событий. Попытки к разработать универсальный подход к валидации были предприняты, например, в центре координирования моделей НАСА (CCMC NASA). Созданная там система CME Scoreboard [1] позволяет научным группам в реальном времени публиковать прогнозы прихода МКВМ и сравнивать результаты с другими моделями и с наблюдаемыми МКВМ, которые определяет группа экспертов. Однако для валидации своих моделей авторы зачастую используют различные наборы прогнозируемых и наблюдаемых событий, которые составляют самостоятельно, что приводит к сложностям, возникающим при попытке сравнения точности моделей. В работе [2] нами было проведено сравнение некоторых часто используемых для валидации моделей списков МКВМ, и было показано, что в зависимости от используемого набора результаты валидации будут сильно отличаться. Еще одной проблемой является сложность определения входных параметров модели. Применение различных методов для восстановления параметров исходного КВМ по изображениям коронографа приводит к тому, что наборы входных данных получаются различными, что в конечном итоге будет оказывать влияние на результаты моделирования.

В докладе представлено предложение по разработке международного стандарта для моделирования КВМ, на основе анализа существующих моделей и результатов прогноза за последние десятилетия в том числе в режиме реального времени, сделанных различными научными группами. Данный анализ будет способствовать унификации подходов к валидации моделей и повышению их точности. Стандарт создаст основу для более скоординированного использования данных и улучшит прогнозы, позволяя минимизировать риски, связанные с космической погодой.

1. Riley P. et al. // Space Weather 2018. V. 16. P. 1245.

2. Kaportseva K.B. et al. // Universe 2024. V. 10. P. 321.

СРАВНЕНИЕ И СОГЛАСОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ КВМ ПО ДАННЫМ РАЗЛИЧНЫХ КАТАЛОГОВ

Шлык Н.С., Абунина М.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, nshlyk@izmiran.ru

Корональные выбросы массы (КВМ) оказывают влияние на состояние космической погоды, и значения начальной скорости КВМ во многих случаях являются обязательными входными параметрами для различных моделей прогноза геомагнитных возмущений или роста потоков высокоэнергичных частиц. В данной работе обсуждается проблема несоответствия значений начальных скоростей КВМ, определенных автоматически в режиме близком к реальному времени (каталог CACTUS, <https://www.sidc.be/cactus/catalog.php>) и рассчитанных со значительным запаздыванием после более тщательной обработки данных (каталог LASCO, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). В частности, рассмотрены КВМ, достигшие орбиты Земли за период с 1997 по 2023 гг. (база данных FEID, <https://tools.izmiran.ru/feid>), для которых было установлено однозначное соответствие между двумя каталогами. Получены предварительные оценки связи между значениями начальных скоростей для разных диапазонов скорости и типов КВМ, которые могут быть использованы при составлении различных прогнозов в квази-реальном времени (с минимальной задержкой, предоставляемой CACTUS).

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУМЕРНОЙ DBM-МОДЕЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА ПРИБЫТИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ К ЗЕМЛЕ

Вахрушева А.А.^{1,2}, Шугай Ю.С.¹, Капорцева К.Б.^{1,2}, Еремеев В.Е.¹, Калегаев В.В.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ² Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия, vakhr.anna@gmail.com

Корональные выбросы массы (КВМ) являются одним из важных факторов возникновения сильных геомагнитных возмущений. Для прогнозирования прибытия КВМ к Земле часто используется DBM-модель [1]. Эта модель основывается на предположении о том, что, начиная с некоторого расстояния от Солнца, можно пренебречь силой Лоренца и гравитационной силой, то есть на распространение КВМ влияет только сила вязкого трения, определяемая взаимодействием КВМ с фоновым солнечным ветром. Входными параметрами для модели являются: время старта КВМ, его начальная скорость, параметр торможения γ , скорость фонового солнечного ветра. Также базовый вариант DBM-модели, описывающий распространение одной точки на фронте КВМ, может быть доработан до двумерного варианта с помощью введения геометрии КВМ, например, с использованием модели конуса. Предполагается, что в отличие от использования одномерной DBM для всех точек фронта без учета его угловой ширины и направления распространения, двумерная модель позволит уточнить время прибытия КВМ на околоземную орбиту и его скорость, а также узнать, достигнет ли рассматриваемый КВМ заданной мишени.

В данной работе проведены расчеты времени прибытия на околоземную орбиту и скорости КВМ с использованием трех вариантов геометрии КВМ: концентрической модели, модели самоподобного расширения и модели с выравниванием фронта [2]. В концентрической модели предполагается, что все точки фронта находятся на одинаковом расстоянии от Солнца. В модели самоподобного расширения фронт КВМ не меняет своей формы при распространении, в модели с выравниванием фронта же считается, что каждый элемент фронта КВМ распространяется независимо от других.

Для анализа были отобраны события 24-го солнечного цикла с известным источником КВМ на Солнце, для этого использовался объединенный каталог МКВМ (https://swx.sinp.msu.ru/tools/icme_list.php), собранный в НИИЯФ МГУ. Всего в итоговую выборку вошло 54 КВМ. В качестве координат источника КВМ на диске Солнца использовались координаты соответствующего димминга из базы данных Solar Demon (<https://www.sidc.be/solardemon/>) [3]. Параметры КВМ получены из системы автоматического детектирования САСТус (<https://www.sidc.be/cactus/>) [4] по данным коронографа SOHO/LASCO. Для учёта скорости фонового солнечного ветра расчёт был выполнен в 5 точках гелиосферы на основе прогноза квазистационарных потоков солнечного ветра. Получено, что в среднем наименьшая ошибка времени прибытия КВМ получается при использовании концентрической модели, наименьшая ошибка скорости КВМ получается при использовании самоподобной модели. Также были рассмотрены зависимости от других параметров DBM-модели: скорости фонового ветра, параметра γ , начальной скорости КВМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

1. Vršnak B., Žic T., Vrbaneck D. et al. // Solar Phys. 2013. V. **285**. P. 295.
2. Dumbovic M., Calogovic J., Martinic K. et al. // Front. Astron. Space Sci. 2021. V. **8**. P. 639986.
3. Kraaikamp E., Verbeeck C. // Space Weather Space Clim, 2015. V. **5**. A18
4. Robbrecht E., Berghmans D. // A&A. 2004. V. **425**. P. 1097.

БАЙЕСОВСКАЯ СЕТЬ ДОВЕРИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОТОННОГО ВОЗРАСТАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА РАДИО-СОБЫТИЙ И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

Ожередов В.А.¹, Струминский А.Б.¹, Григорьева И.Ю.²

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

² ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается разработанный нами алгоритм, сопоставляющий каждому моменту времени меру субъективной (фидуциальной) вероятности протонного возрастания, наступающего не позднее нескольких часов после появления прогноза. Для построения этого алгоритма статистические связи между параметрами радио-эвентов (превышений мощностью сигнала на частотах 15400, 8800, ..., 245 МГц уровня фона) и корональными выбросами массы (КВМ) организуются в виде ориентированного графа, называемого Байесовской сетью доверия. Моментом «первой тревоги» является начало вспышки в мягком рентгене (обозначаемой в файлах YYYYMMDD.txt как XRA) либо второй кадр коронального выброса массы (именно второй по причине того, что алгоритм отсеивает медленные КВМ как не имеющие отношения к протонным событиям). Далее, сеть непрерывно «наблюдает» за развитием процесса, анализируя взаимное расположение временных интервалов-носителей радио-эвентов и эволюцию скорости КВМ, на основе чего повышает или понижает исходную оценку вероятности возникновения протонного возрастания. В отличие от нейросетевых методов прогноза и методов на основе громоздких решающих деревьев (или еще более громоздкого решающего леса), данный алгоритм допускает вполне разумную физическую интерпретацию и потому представляет интерес не только как средство прогноза, но и как инструмент исследования.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ 10-11 МАЯ 2024

Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Филиппов М.В., Стожков Ю.И., Ерхов В.И.,

Морзабаев А.К., Тулеков Е.А., Ролан Ж-П, Такза Ж.

ФИАН, г. Москва, Россия, mahmutovvs@lebedev.ru

В мае 2024 года наблюдалось значительное увеличение солнечной активности, проявившееся в большом количестве солнечных вспышек. Наиболее активной была активная область NOAA 13664, в которой произошли многочисленные вспышки рентгеновских классов М и X, сопровождавшиеся выбросами корональной массы (КВМ). Начиная с 8 мая, на околоземной орбите наблюдались энергичные солнечные частицы (СКЛ) с энергией $E > 10$ МэВ. 10 мая 2024 г. произошла крупнейшая за последние 20 лет геомагнитная буря, вызванная приходом к Земле нескольких слившихся КВМ, которые инициировали Форбуш-понижение в галактических космических лучах 10-11 мая 2024 г., зарегистрированное мировой сетью наземных нейтронных мониторов. Вспышка 11 мая в 01:10 UT X5.8, S17W44 генерировала релятивистские протоны, и в ~02 UT началось наземное возрастание космических лучей (GLE 74). Таким образом, наземные установки, демонстрировали сложное поведение потоков частиц, обусловленное наложением GLE на модуляцию потоков ГКЛ.

В работе основное внимание направлено на исследование модуляционных процессов в космических лучах, проявившихся на наземных приборах КОВЕР и нейтронных детекторах, расположенных на Долгопрудненской научной станции ФИАН, в Евразийском национальном университете (Республика Казахстан) и в астрономическом комплексе КАСЛЕО (Аргентина). Данные этих приборов и нейтронных мониторов анализируются совместно данными о межпланетной и геомагнитной активности.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФИАН

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ: ВЕРОЯТНОСТИ И ПОТОКИ ЧАСТИЦ

Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, nshlyk@izmiran.ru

Исследуются различные характеристики солнечных вспышек и корональных выбросов массы, приведших (или не приведших) к регистрации у Земли солнечных протонных событий за период с 1996 по 2023 гг. На основе данных спутников GOES, коронографа SOHO/LASCO, ежедневных фильмов обсерватории SDO и сравнения с другими ранее опубликованными каталогами протонных событий, был составлен подробный уточненный каталог из 522 событий, включающий данные основных параметров солнечных источников (гелиокоординаты и балл рентгеновской вспышки, скорость соответствующего коронального выброса массы) и характеристики зарегистрированных у Земли протонных событий (максимальные потоки частиц с энергиями >10 и >100 МэВ, времена их регистрации). Каталог находится в открытом доступе и доступен по ссылке http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2024/SEPs_1996_2023corr.pdf.

Получены регрессионные зависимости параметров солнечных источников и возрастных потоков протонов около Земли. Предложен новый «индекс протонности» события, на основе которого произведены расчеты вероятности регистрации солнечных протонных событий и ожидаемых потоков частиц разных энергий. Также получены долготные распределения различных параметров, характеризующих возрастания потоков протонов (в частности, времени наступления максимума потоков частиц с энергией >10 МэВ).

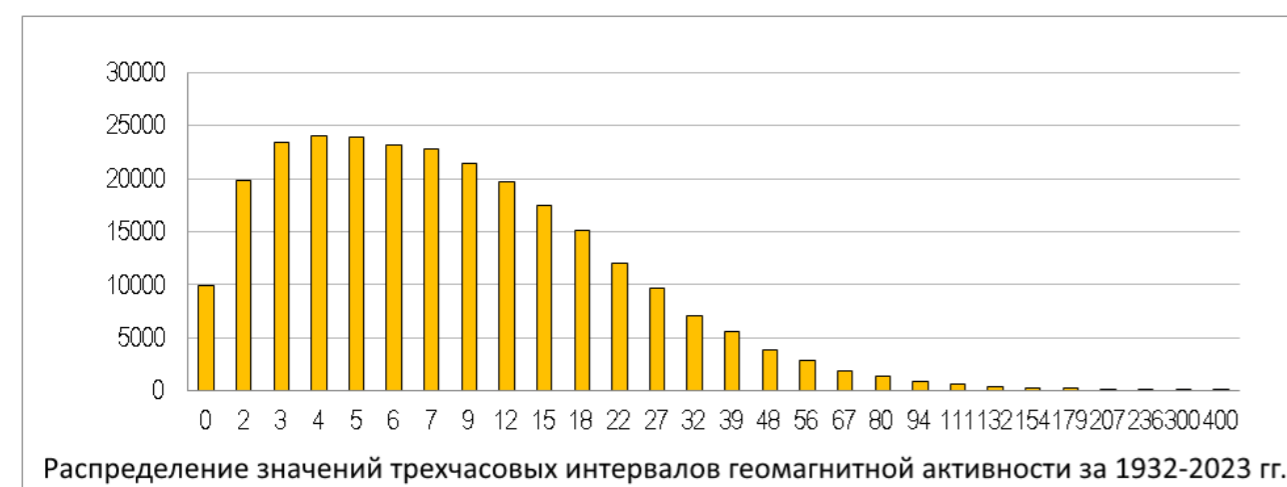
Установленные закономерности положены в основу эмпирической модели, позволяющей оценивать как вероятность прихода высокоэнергичных частиц к Земле, так и ожидаемые уровни и времена регистрации максимумов потоков протонов с энергиями >10 и >100 МэВ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ЗА ПЕРИОД С 1932 ПО 2023 ГГ.

Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов А.В., Абунин А.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, abunina@izmiran.ru

Изучены различные параметры геомагнитной активности (Ap- и Kp-индексы) за период с 1932 по 2023 гг. Рассмотрены общие статистические изменения количества интервалов геомагнитных бурь за все время наблюдений, а также за отдельные солнечные циклы. Показано, что около 46% времени геомагнитная обстановка остается спокойной, и только в 7% всего времени наблюдаются периоды магнитных бурь. Наибольшее количество трехчасовых интервалов геомагнитных бурь было зарегистрировано в 18 цикле солнечной активности, а наименьшее – в 24-ом. Отдельно рассмотрена длительность магнитных бурь за весь период исследования.



МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА Kp С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Гаджиев И.М.^{1,2}, Баринов О.Г.¹, Мягкова И.Н.¹, Доленко С.А.¹

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова:

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ),

²Физический факультет

г.Москва, Россия, ismailgadzhievff@gmail.com

В данном докладе рассматривается задача прогнозирования геомагнитных возмущений с горизонтом прогноза до 24 часов с помощью методов машинного обучения. В качестве переменной, характеризующей геомагнитные возмущения, рассматривается 3-часовой планетарный индекс Kp. С учетом частоты поступления новых значений индекса Kp, задача превращается в задачу регрессии 8 следующих значений индекса (для 8 горизонтов прогнозирования). Для решения задачи прогнозирования используются значения индекса Kp, индекса Dst, а также данные о модуле и компонентах межпланетного магнитного поля в системе GSM и о параметрах солнечного ветра (плотность, скорость и температура), измеренные в эксперименте на космическом аппарате ACE в точке Лагранжа L1 между Солнцем и Землей.

Для оценки качества прогнозирования используются стандартные метрики – коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратичная ошибка (СКО). Так как индекс Kp является дискретной величиной, то рассчитывается также доля точных совпадений предсказанного значения с фактически измеренным. Метрики вычисляются отдельно для каждого из горизонтов прогнозирования; на основании их значений делается вывод о применимости модели для прогнозирования Kp-индекса. Кроме того, рассчитываются метрики для тривиальной модели, для которой прогноз равен последнему известному значению индекса. Предсказания всех остальных моделей сравниваются с результатами тривиальной модели в качестве репера.

Тестируются классические методы машинного обучения – линейная регрессия (с регуляризацией), градиентный бустинг (в реализации CatBoost). Кроме того, исследуется применение нейросетевых методов – полносвязных перцептронов с разным количеством скрытых слоев, а также рекуррентных и сверточных сетей.

Исследуется влияние учета истории переменных с помощью методики погружения (топологического вложения) временных рядов на глубину до 24 часов на качество прогнозирования. Для лучшей модели производится также тестирование использования погружения на глубину до 96 часов.

На основании полученных результатов делается вывод об оптимальной модели для прогнозирования Kp-индекса на каждом из горизонтов и оптимальной модели для прогнозирования в целом (без выбора конкретного горизонта). Отдельно анализируется поведение модели во временных периодах, где были зафиксированы сильные геомагнитные возмущения. Производится анализ значимости входных признаков для прогнозирования геомагнитных возмущений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

ВЫРАВНИВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА Dst КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Исаев И.В.¹, Мушина А.С.^{1,2}, Сухадольский А.Г.²,
Барин О.Г.¹, Мягкова И.Н.¹, Доленко С.А.¹

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова:

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ),

²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

г.Москва, Россия, isaev_igor@mail.ru, dolenko@srd.sinp.msu.ru

Одним из эффективных подходов к прогнозированию значений геомагнитного индекса Dst является использование методов машинного обучения (МО) для построения моделей, аппроксимирующих зависимость значения прогнозируемого индекса от входных признаков (ВП) задачи, в качестве которых обычно выступают значение самого прогнозируемого индекса, а также значения модуля и компонент межпланетного магнитного поля и параметров солнечного ветра (скорость, плотность, иногда температура), измеренные на космических аппаратах в точке Лагранжа L1 между Солнцем и Землей. Для повышения качества прогнозирования на вход моделей, не содержащих обратных связей, обычно подают также предысторию ВП на определённую глубину (от часов до нескольких суток).

При этом построение (обучение) и тестирование моделей МО осуществляется на исторических данных. В этой ситуации качество получаемых моделей напрямую зависит от представительности данных, в частности, от их распределения. К сожалению, распределение значений индекса Dst далеко как от равномерного, так и от нормального, причём наиболее интересные с научной и практической точек зрения значения, соответствующие возмущённой магнитосфере, попадают на «хвост» гистограммы распределения и оказываются представлены явно недостаточно. Это приводит к тому, что именно для этих значений большинство моделей МО выдают максимальную погрешность прогноза.

Данная работа посвящена проверке гипотезы о том, что выравнивание распределения значений индекса Dst может позволить повысить качество его прогнозирования методами МО. При этом рассматриваются три альтернативных подхода. Два из них связаны с нелинейным преобразованием значений индекса, третий – с генерацией дополнительных примеров, соответствующих областям с низкой представительностью данных.

В рамках первого подхода нелинейное преобразование значений индекса Dst (условное логарифмирование) производится по формуле $Dst_{lg} = \lg(100 - Dst)$. При этом форма распределения логарифмированного индекса оказывается более близкой к нормальному с максимумом в районе 2 и диапазоном изменения от 1.5 до 2.7.

В рамках второго подхода используется метод нормализации гистограммы распределения, основанный на нелинейном преобразовании значений индекса, предусматривающем выравнивание интегрального распределения индекса с интегральным нормальным распределением. Новое распределение оказывается близким к нормальному.

Третий подход использует генерацию дополнительных данных с помощью так называемых вариационных автоэнкодеров (ВАЭ) – специальной архитектуры нейронных сетей, переводящей каждый пример данных (точку в пространстве ВП задачи прогнозирования) в так называемое латентное пространство более низкой размерности, с наложением дополнительного требования о нормализации распределения данных в этом латентном пространстве. После построения ВАЭ на тренировочном наборе данных его можно использовать для расширения этого набора путём выборки новых примеров из распределения в латентном пространстве и их перекодирования обратно в пространство ВП.

В работе сравниваются результаты прогнозирования индекса Dst с использованием его значений: исходных; преобразованных в рамках первого и второго подходов; а также при расширении обучающей выборки в рамках третьего подхода.

СОГЛАСОВАННАЯ ДИНАМИКА КОЛЬЦЕВОГО ТОКА И ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ 17-18.III.2015 и 22-23.VI.2015

Азра-Горская К.Ж.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}, Власова Н.А.¹

1 НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, clemenceanastasia@gmail.com

2 Физический факультет МГУ

Представлены результаты исследования динамики потоков протонов кольцевого тока и релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли, а также магнитосферного магнитного поля на примере двух геомагнитных бурь 17-18 марта 2015 г. и 22-23 июня 2015 г. близкой мощности и с похожими профилями Dst. Буря 17-18 марта была связана с воздействием плотного высокоскоростного потока солнечного ветра с преимущественно южным направлением межпланетного магнитного поля, что обеспечило традиционный сценарий развития магнитной бури. В ходе бури 22-23 июня было зарегистрировано экстремально-сильное воздействие импульса давления солнечного ветра при длительном периоде северного направления ММП, что обусловило разную динамику магнитосферных токовых систем во время рассматриваемых геомагнитных возмущений.

Исследование основано на данных измерений двух космических аппаратов Van Allen Probes. Измерения потоков протонов с энергиями >50кэВ и электронов >2 МэВ показывают, что несмотря на неблагоприятное (северное) направление межпланетного магнитного поля, в ходе июньской бури произошло формирование мощного кольцевого тока, что обусловлено экстремально-мощным воздействием импульса давления солнечного ветра. Таким образом, вследствие разных механизмов взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы во время геомагнитных бурь 17-18 марта 2015 г. и 22-23 июня 2015 г. реализованы два различных типа формирования кольцевого тока: за счет усиления крупномасштабной магнитосферной конвекции и суббуревых инжекций, и за счет сжатия магнитосферы под действием экстремального импульса давления солнечного ветра.

По спутниковым измерениям восстановлены компоненты магнитного поля, связанного с развитием буревых токовых систем магнитосферы. Сопоставление вариаций магнитного поля и одновременных измерений потоков захваченных протонов и энергичных электронов демонстрирует согласованную динамику кольцевого тока и потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли во время обеих геомагнитных бурь. Показано, что вариации магнитного поля, вызванные развитием кольцевого тока, ответственны за динамику потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

ОТБОР ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА КРУГОВОЙ ПОЛЯРНОЙ ОРБИТЕ

Белова А.О.¹, Мягкова И.Н.²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, belova.ao20@physics.msu.ru

²НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, г.Москва, Россия, irina@srd.sinp.msu.ru

Как известно, радиационные условия в околоземном космическом пространстве при отсутствии солнечной активности в значительной мере определяются потоками заряженных частиц в радиационных поясах Земли. Попадание в зоны с большим потоком заряженных частиц может негативно сказаться на технике, установленной на борту космического аппарата [1,2]. При этом внешний радиационный пояс Земли (РПЗ) может претерпевать сильные и быстрые вариации - примерно после половины магнитных бурь поток релятивистских электронов внешнего РПЗ увеличивается на порядок и более, что делает задачу прогнозирования потоков электронов внешнего РПЗ весьма актуальной [3].

В ходе данной работы использовались данные низкоорбитального полярного спутника «МЕТЕОР-М» №2 (запущен 08.07.2014) за период с 01.06.2019 00:10 по 01.11.2019 00:00. Орбита спутника «МЕТЕОР-М» №2 солнечно-синхронная, высота в восходящем узле $h=832$ км, наклонение $i\sim 98,8^\circ$, период обращения $T=101,3$ мин. То есть за один виток спутник пересекал внешний РПЗ четыре раза. Электроны релятивистских и субрелятивистских энергий - >100 кэВ, >300 кэВ, >700 кэВ и >2 МэВ - регистрировались с помощью полупроводниковых и сцинтилляционного детекторов. На спутнике «МЕТЕОР-М» №2 было установлено два набора телескопов с углами обзора в 30° , регистрировавшие потоки захваченных (направление детектора перпендикулярно силовым линиям магнитного поля) и высыпавшихся (вдоль силовых линий) частиц.

В работе проведен анализ потоков электронов различных энергий, а именно >0.1 , >0.3 , >0.7 , >2 МэВ, внешнего РПЗ на круговой полярной орбите, схожей с планируемой орбитой российской орбитальной служебной станции (РОСС), запуск которой планируется на 2027 год. Исследована связь вариаций потоков электронов внешнего РПЗ на низкой полярной орбите с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также с геомагнитными индексами и потоками электронов внешнего РПЗ на геостационарной орбите с целью отбора оптимальных входных параметров при прогнозировании потоков электронов на низких полярных орбитах, необходимого для обеспечения безопасности будущих космических полетов.

1. Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др., Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 44. № 4. С. 502–510. 2004.

2. Iucci N., Leviti, A.E., Belov A.V., Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space Weather. 2005. V. 3. №1. P. S01001. doi: 10.1029/2003SW000056

3. Pires de Lima R., Chen Y., Lin Y., Forecasting megaelectron-volt electrons inside Earth's outer radiation belt: PreMeV 2.0 based on supervised machine learning algorithms // Space Weather. 2020. V 18(2). e2019SW002399. doi:10.1029/2019SW002399

СРАВНЕНИЕ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНЫХ ФЛУЕНСОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РПЗ В ПЕРИОДЫ МИНИМУМА И МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Владимиров Р.Д., Баринов О.Г., Доленко С.А., Мягкова И.Н.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

г. Москва, Россия, vladimirov.rd16@physics.msu.ru, irina@srd.sip.msu.ru

Прогнозирование суточных интегральных потоков (флуенсов) релятивистских электронов (РЭ) во внешнем радиационном поясе Земли (РПЗ) сталкивается с проблемами, вызванными сложностью и нелинейностью системы "Солнце - солнечный ветер - магнитосфера Земли". В качестве инструмента прогнозирования нами были использованы методы машинного обучения. В данном исследовании проверяется зависимость качества прогнозирования от фазы цикла солнечной активности.

Для прогнозирования значений суточных флуенсов РЭ с энергиями > 2 МэВ использовались временные ряды следующих физических величин:

- Параметры солнечного ветра (СВ) в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем:
 - Скорость СВ (км/с)
 - Температура СВ (К)
 - Плотность протонов в СВ (см^{-3})
- Параметры вектора межпланетного магнитного поля (ММП) в системе GSM:
 - Компоненты V_x , V_y , V_z
 - Модуль ММП
- Геомагнитный индекс Dst
- Планетарный индекс Kp
- Интегральные суточные потоки РЭ внешнего РПЗ с энергиями > 2 МэВ

Все переменные были агрегированы для получения временных рядов с шагом в одни сутки.

В исследовании использованы модели машинного обучения (МО) (искусственные нейронные сети и градиентный бустинг) для прогнозирования потока РЭ внешнего РПЗ, что позволяет учитывать сложные динамические процессы в радиационных поясах. Кроме того, результаты прогнозирования указанными методами МО сравнивались с результатами тривиальной модели (инерционный прогноз). Горизонт прогнозирования составлял от 1 до 3 суток.

Целью данного исследования являлось сравнение качества получаемых одной и той же моделью МО прогнозов в периоды минимума и максимума солнечной активности (СА). Разные фазы цикла СА характеризуются существенными отличиями в распределении как самих суточных флуенсов РЭ внешнего РПЗ, так и входных признаков задачи, а также возможными различиями взаимосвязей между ними. Последнее может приводить к тому, что на разных фазах цикла СА оптимальными будут оказываться различные модели МО. В этом случае для обеспечения наиболее эффективного прогнозирования необходимо обеспечивать своевременное переключение между моделями.

Все расчёты в данной работе выполнены с помощью специальной системы прогнозирования временных рядов с помощью методов МО «Сивилла», разработанной в НИИЯФ МГУ специально для проведения исследований в области прогнозирования космической погоды, параметров магнитосферы Земли и потоков РЭ на геостационарной орбите.

Разработка региональной модели полного электронного содержания в ионосфере для территории РФ с применением многослойной нейронной сети

Замогильный Д., Куприянов А.О., Морозов Д.А.

МИИГАуК, г. Москва, Россия, dmt.zam@gmail.com

Нейронная сеть, представляет собой вычислительную модель, вдохновленную биологическими нейронными сетями, которые составляют мозг животных. Она состоит из взаимосвязанных узлов (нейронов), каждый из которых обрабатывает информацию и передает сигналы другим нейронам. Нейросети используются для решения сложных задач, где неявные зависимости между входными и выходными данными. Одной из таких задач является моделирование полного электронного содержания в ионосфере (ПЭС).

В данной работе рассматривается решение этой задачи для территории РФ. Соответственно целью работы является создание модели на основе многослойной нейронной сети с возможностью моделирования и прогнозирования ПЭС. Такие модели могут применяться для ослабления погрешностей наблюдений ГНСС, а также для мониторинга и определения ионосферных аномалий. Для решения такой задачи необходимо в первую очередь собрать базу данных для обучения модели, а также разработать оптимальную архитектуру нейронной сети.

В качестве исходных данных использовался промежуток с 01.01.2016 – 01.01.2024 т.е. полные 8 лет с дискретностью в 15 минут. Основой базы данных для обучения служат параметры модели Klobuchar, NeQuick, IRI2016, а также глобальная ионосферная карта IGS. Область моделирования представляет собой сетку широт и долгот которая состоит из 272 точек (от 25 до 190° по долготе и от 45 до 80° по широте с шагом в 5°). Соответственно итоговая база данных с параметрами для обучения содержит в себе 76 299 264 строк данных, в каждой из которой по 33 параметра.

Разработка архитектуры выполняется в несколько этапов. Первый этап — это выбор конфигурации нейронной сети и количество слоев. На данном этапе определяется количество входных слоев и входные данные, поступающие в них, а также количество скрытых слоев. Второй этап подразумевает подбор количества нейронов, функции активации для каждого слоя, а также методы оптимизации и функции потерь. По итогам анализа оптимальным вариантом оказалась многослойная нейронная сеть с 7 входными слоями, 2 скрытыми, слоем объединения и 1 выходным слоем.

Результатом работы являются 2 ионосферные модели. Первая способна моделировать и прогнозировать ПЭС на основе параметров из навигационных сообщений GPS и Galileo с относительной погрешностью 12-20%, что в среднем на 30% лучше самых распространенных ионосферных моделей IRI2016 и NeQuick. Вторая модель способна выполнить прогноз ПЭС на час вперед на основе ПЭС на текущий момент времени с относительной погрешностью 2-6%.

Мониторинг и моделирование параметров ионосферы по наблюдениям ГНСС

Морозов Д.А., Куприянов А.О.

МИИГАуК, г. Москва, Россия, dez.data@mail.ru

Наблюдения ГНСС на постоянно действующих наземных станциях и подвижных носителях предоставляют большой объем мультимедийной измерительной информации для оценки полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли и эффектов, связанных с его изменением.

Для получения точных и достоверных значений ПЭС по результатам обработки кодовых и фазовых псевдодальностей, измеренных по двум частотам, необходимо организовать учёт как случайных (шум, многолучевость), так и систематических (межканальные задержки спутников и приёмника) погрешностей.

В рамках данного исследования для решения задач мониторинга и ПЭС как в постобработке, так и в режиме реального времени разработана методика и реализующее её специальное программное обеспечение (ПО). Разработанное ПО позволяет производить вычисления наклонных и вертикальных значений ПЭС по наблюдениям одного или нескольких приёмников ГНСС, моделировать распределение вертикального ПЭС в заданной локальной области, производить уточнение физических моделей ионосферы путём подбора для них входных параметров и выполнять оценку межканальных задержек приёмников ГНСС, включая литеральные задержки для сигналов ГЛОНАСС.

Также проведены экспериментальные исследования с применением разработанного ПО для оценки ионосферных возмущений связанных с сейсмической активностью.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2 СЛОЯ (foF2) ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТИ LSTM

Филатов Г.С., Мерзлый А.М., Моисеев И.А., Никифоров О.В., Шубин В.Н., Янаков А.Т.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, fgs0907@yandex.ru

В докладе приведены результаты оперативного прогноза foF2 для Московского региона полученные на основе использования нейросети LSTM.

Применены некоторые способы коррекции нейросети для улучшения качества прогноза.

В рамках прогноза foF2 с использованием нейросети LSTM получилось добиться точности в 40%. При добавлении коррекции, точность увеличилась до 60-70%.

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Мингалева И.В.¹, Суворова З.В.¹, Мерзлый А.М.², Янаков А.Т.², Моисеев И.А.²

¹*Полярный геофизический институт, г. Анатиты, Россия, mingalev_i@pgia.ru*

²*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Доклад посвящен анализу методов определения пространственного распределения концентрации электронов в ионосфере по данным возвратно-наклонного зондирования с измерением азимутов и углов места лучевых траекторий эхосигналов, входящих в приемную антенну ионозонда. Представлены результаты расчетов лучевых траекторий зондирующих сигналов ионозонда во всем диапазоне рабочих частот для различных дат и геофизических условий при задании распределений ионосферных параметров с использованием разработанной в ИЗМИРАН отечественной эмпирической модели ионосферы GDMI. Обсуждается однозначность и точность определения пространственного распределения концентрации электронов в ионосфере при использовании разных подходов к интерпретации данных возвратно-наклонного зондирования.

ВАРИАЦИИ ФОНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА В УСЛОВИЯХ СУПЕРСИЛЬНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ 01.01.2025.

Крашенинников И.В., Митин О.В., Шубин В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, krash@izmiran.ru

Авроральная область ионосферы характеризуется интенсивным высыпанием заряженных частиц солнечного ветра, производящим как действия на квантовом уровне – ионизацию молекул атмосферных газов, так и электромагнитный шум (EMN – Electromagnetic Noise), генерируемый циклотронным излучением и коллективными действиями электронных пучков в магнитосфере (широкополосный шум), наиболее интенсивный в километровом диапазоне радиоволн – Auroral Kilometric Radiation (AKR) [1]. Существует четыре широких классификации радиоизлучений земного аврорального происхождения, которые теоретически можно наблюдать на уровне Земли в диапазоне ОНЧ и на более высоких частотах: 1) авроральные циклотронные гармонические излучения, узкополосные и локализованные на циклотронных гармониках; 2) авроральный среднечастотный всплеск, широкополосный, на частотах 1,3–5,0 МГц; 3) авроральное “шипение”, широкополосное, ниже 1,3 МГц; и 4) просочившееся авроральное километровое излучение на частотах в сотни кГц [1].

В данной работе представлены результаты регистрации фонового EMN в параметрах – амплитуда и спектр на частоте 4996 кГц на ст. Москва (ИЗМИРАН) во время высокоинтенсивных бурь 2024 г., когда полярный овал подходил довольно близко к месту регистрации. В целом, отмечается достоверное усиление фонового электромагнитного шума при приближении и спадание при отходе овала. Характерный вид временной зависимости амплитуды фонового шума от динамики овала приведён на рис. 1 (левая панель). Наиболее информативные результаты были получены во время развития супербури 01.01.2025, когда полярный овал переходил широту Москвы и возвращался назад. На рис. 1, левая панель представлены измеренные значения фонового шума в интервале времени 15:30-19:30 UT – в ночное время с низким уровнем антропогенной составляющей шума, иллюстрирующие возрастание его интенсивности в период подхода экваториальной границы полярного овала. Максимальное зарегистрированное значение аврорального эффекта в EMN может достигать ~ 6 дБ. Данные регистрации ионозонда “Парус-А” – рис.1, правая панель в 17:00 UT (во время максимума амплитуды EMN) и расчеты положения границ авроральных областей показывают, что ст. Москва (ИЗМИРАН) действительно находилась в это время вблизи полярной стенки ГИП (область полярного овала).

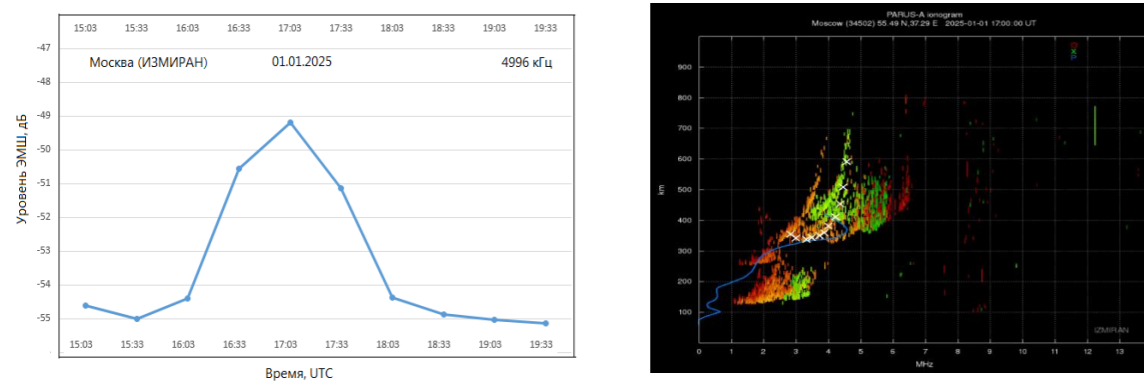


Рис. 1 Уровень фонового электромагнитного шума во время суперсильной ионосферной бури 01/01/2025 (левая панель) с максимумом в 17:03 UT и ионограмма V3 на ст. Москва(ИЗМИРАН) в 17:00 UT (правая панель).

1, LaBelle J (2023), Radio emissions of auroral origin observable at ground level: outstanding problems // Front. Astron. Space Sci. 10:1195654.doi: 10.3389/fspas.2023.1195654 (обзор).

ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ ИОНОСФЕРЫ

Крылова А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, naur.zum@mail.ru

Проведен обзор современного состояния исследований физических процессов в ионосфере. Рассмотрены внешние и внутренние факторы, влияющие на условия в ионосфере, включая градиенты N_e , и проанализированы причины возникновения некоторых видов ионосферных неустойчивостей: Фарлей-Бунемана, Кельвина-Гельмгольца и градиентно-дрейфовой неустойчивости.

Сделана оценка максимальных значений магнитосферного кольцевого и продольных ионосферных токов и сопутствующих радиационных эффектов.

Проанализирована возможность влияния ионосферных неустойчивостей, токов и сопутствующих эффектов на распространение радиоволн дециметрового диапазона в полярной ионосфере.

АДАПТАЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ 2МЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ К РЕАЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ ПО КАРТАМ GIM-TEC

Гуляева Т.Л., Шубин В.Н.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, Россия, tam.gulyaeva@gmail.com

Климатическая 3хмерная модель ионосферы–плазмосферы IRI-Plas предусматривает адаптацию медианного прогноза полного электронного содержания IRI-Plas-TEC к текущим измеренным значениям TEC [1]. Медианный прогноз TEC в модели IRI-Plas выполняется на основе прогноза МККР (CCIR) карт критической частоты foF2 и коэффициента M3000F2 [2], преобразованного в высоту максимума hmF2. В данной работе впервые вместо карт [2] в модели IRI-Plas использованы 2мерные модели foF2 и hmF2 [3] для прогноза медианы IRI-Plas-TEC. Сравнение ее с расчетом по 2мерной модели GTEC [4] показало их отличие от наблюдаемых медиан карт GIM-TECm со средне–квадратичной ошибкой от 5 TECU (GTEC~TECm) до 10 TECU (IRI-Plas-TEC~TECm). Адаптация расчета IRI-Plas-TEC к модели GTEC позволяет скорректировать модели foF2 и hmF2 [3] до близкого совпадения IRI-Plas-TEC с GTEC (различие менее 1 TECU). При этом средне–квадратичная ошибка модели IRI-Plas-TEC уменьшается в 2 раза, а скорректированные 2мерные модели foF2 и hmF2 позволяют их адаптацию к реальным условиям в ионосфере по картам GIM-TEC.

1. Gulyaeva T.L., Arian F., Hernandez-Pajares M., Stanislawski I. // Adv. Space Res. 2013. V.51. P.693-690.
2. CCIR. Atlas of ionospheric characteristics // Report 340-2 1975. Consultative Committee on International Radio, International Telecommunications Union..
3. Shubin, V.N., Gulyaeva T.L. // Acta Astronautica 2021. V.179. P.197-208.
4. Shubin, V.N., Gulyaeva T.L. // Adv. Space Res. 2022. V.69. P.168-175.

О СУЩЕСТВОВАНИИ ДВУХ ГРУПП СУББУРЬ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ Pi3 – ВОЛНОВОГО ОТКЛИКА В ДИАПАЗОНЕ 1-5 мГц

Бондаренко А. М.^{1,2,3}, Ягова Н. В.¹, Пилипенко В. А.¹

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, bondarenkoam@ifz.ru

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

³НИУ МЭИ, г. Москва, Россия

На фазе восстановления суббури часто наблюдаются геомагнитные пульсации Pi3 – иррегулярные вариации в диапазоне 1-5 мГц. Визуальный анализ показывает, что амплитуды Pi3 сильно отличаются для разных суббурь – их амплитуда может быть как сравнимой с амплитудой главного бухтообразного возмущения, так и практически незаметной на ее фоне. Это позволило выдвинуть гипотезу о существовании двух групп суббурь – с Pi3 и без них. Для проверки данной гипотезы исследуется отношение R амплитуды Pi3 к амплитуде главного бухтообразного возмущения. Для анализа суббурного возмущения и Pi3 используются данные магнитометрических измерений на авроральных станциях сети IMAGE, доступные с шагом 10 с, а для оценки общего уровня авроральной возмущенности – индекс AE. Для анализа выбран период спада и минимума 23 цикла солнечной активности. Отбираются суббури с одним четким минимумом в H компоненте. Pi3 исследуются на восстановительной фазе суббури – от минимума до 90% восстановления. Для выделения пульсаций на фоне бухтообразного возмущения используется высокочастотная фильтрация. Рассматривается эмпирическая функция плотности вероятности для отношения R . Обнаружено, что мультимодальные распределения R , разделенные областями глубоких минимумов, действительно существуют. Это подтверждает гипотезу о существовании групп суббурь, отличающихся по интенсивности волнового отклика в миллигерцовом диапазоне. Исследуется зависимость выраженности обнаруженного эффекта от фазы солнечного цикла и геомагнитной широты станции, а также отличия вариаций магнитного поля в течение последних часов перед началом главной фазы и во время суббури для выделенных групп суббурь.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-77-10012

РОСТ ГИТ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ В МАРТЕ-АПРЕЛЕ 2023 ГОДА: РОЛЬ ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВЫХ СИСТЕМ И КОНФИГУРАЦИИ ЛЭП

Белаховский В.Б.¹, Пилипенко В.А.^{2,3}, Евдокимова М.А.³, Сахаров Я.А.¹, Селиванов В.Н.⁴

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

³ – Институт космических исследований РАН, г. Москва

⁴ – Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты

belakhov@mail.ru

Подробно рассмотрен рост геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) на Кольском полуострове во время двух сильных магнитных бурь 2023 года: 23-24 марта и 23-24 апреля. Регистрация ГИТ проводилась на авроральной станции Выходной (VKH) и субавроральной станции Кондотога (KND). Хотя величина геомагнитных возмущений и вариабельность магнитного поля dB/dt (~ 400-600 нТл/мин) на станции Лопарская (LOR) были сопоставимы для обеих бурь, во время бури в апреле величина ГИТ на станции VKH была значительно больше (~40 А), чем во время бури в марте (10-15 А). Мы связываем эту разницу с вкладом вихревых ионосферных токов (связанных с $Pi3/Ps6$ пульсациями), которые вызывают более сильный отклик ГИТ для ЛЭП, ориентированной в направлении север-юг. Необходимо учитывать, что станция VKH является узловой: к ней подходят и ЛЭП, ориентированные в направлении запад-восток. Компенсация ГИТ от разных ЛЭП на станции VKH может приводить к различным значениям ГИТ для рассмотренных магнитных бурь. Также необходимо отметить, что для бури в апреле 2023 года на станции LOR наблюдались более низкочастотные $Pi3/Ps6$ пульсации на фоне суббури, чем для бури в марте 2023 года, что также приводит к более высоким значениям ГИТ в ЛЭП.

Напротив, на станции KND величина ГИТ для обеих бурь была пропорциональна значениям dB/dt . На широте станции KND вклад в рост ГИТ вносит западный электроджет, расширяющийся на более низкие широты во время экстремальных магнитных бурь.

ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ (ГИТ) ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 10-12 МАЯ 2024 ГОДА

Дэспирак И.В.¹, Сецко П.В.¹, Любич А.А.¹, Сахаров Я.А.¹, Селиванов В.Н.²

¹Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия, despirak@gmail.com

²Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

Мы проанализировали интенсивные геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) в линиях электропередач на северо-западе России во время одной из самых сильных бурь космической эры 10–12 мая 2024 г. Несколько МКВМ 8–10 мая вызвали сильную магнитную бурю с длительной главной фазой и длительной фазой восстановления. Анализ проводился для периода — с 17 UT 10 мая по 06 UT 12 мая и основывался на прямых измерениях ГИТ на 3 станциях (Выходной, Лоухи и Кондопога), расположенных на широтах авроральной зоны от 62° до 69° GLAT°. Подтверждено, что источники ГИТ распределены по секторам MLT: источниками интенсивных ГИТ (~15–30 А) в вечернем и ночном секторах были суббури и суперсуббури, а источниками ГИТ (~15–30 А) в утреннем секторе были геомагнитные пульсации $Pc5/Pi3$. Кроме того, наблюдалось 3 сильнейших пика ГИТ ~50-62 А - один в ночном и два в утреннем секторах. Эти пики были вызваны суперпозицией этих основных источников ГИТ, а также интенсивным локальным магнитным возмущением, вызванным большим скачком динамического давления солнечного ветра. Особенностью этой бури было наличие двух суперсуббурь (SSS- supersubstorms) в ночном и дневном секторах. Источниками сильных ГИТ в ночном секторе была полярная кромка первой SSS, в то время как ГИТ в дневном секторе были связаны с усилениями восточного электроджета во время развития второй SSS на ночной стороне. Таким образом, впервые обнаружено, что во время ночной SSS могут возникать интенсивные ГИТ на дневной стороне за счет усиления восточного электроджета.

ОСОБЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н., Федяй О.В.

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия, VVVahkina@yandex.ru

Представлены результаты анализа кривых тока намагничивания силового трехфазного трансформатора номинальной мощностью 670 МВА, напряжением 525/230/23 кВ с бронестержневой конструкцией магнитной системы при насыщении под воздействием геоиндуцированного тока (ГИТ) величиной от 10А до 200А при повышенной геомагнитной активности. Насыщение крайних стержней и боковых ярм магнитной системы силового трансформатора происходит уже при величине ГИТ равной 10А, а насыщение центрального стержня начинается при величине ГИТ равной 20А. Имеется существенная фазная несимметрия токов намагничивания, обусловленная различием как формы, так и амплитуды бросков тока намагничивания, причем степень несимметрии уменьшается с увеличением ГИТ. При ГИТ величиной 20А амплитуда бросков тока намагничивания отличается в 2,35 раза, а при ГИТ величиной 200А отличается только в 1,2 раза.

Выполнено обоснование допустимости линейной аппроксимации зависимости основной гармоники тока намагничивания крайних стержней от величины ГИТ с коэффициентом пропорциональности равным 1,48, а центрального стержня с коэффициентом пропорциональности, равным 1,05. Реактивная мощность намагничивания трехфазного трансформатора с бронестержневой магнитной системой определяется путем суммирования реактивной мощности намагничивания отдельных фаз. Показана допустимость линейной аппроксимации зависимости реактивной мощности намагничивания трехфазного трансформатора от величины ГИТ со средневзвешенным коэффициентом пропорциональности 0,85 Мвар/А.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА МАГНИТНОМ МЕРИДИАНЕ МУРМАНСК – ПЕТРОЗАВОДСК – МОСКВА

Сахаров Я.А.¹, Билин В.А.¹, Селиванов В.Н.^{2,3}, Мёрзлый А.М.³

¹ *Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, sakharov@pgia.ru*

² *Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Россия*

³ *Институт космических исследований, г. Москва, Россия*

Предлагается создать единую систему контроля в реальном времени за развитием геомагнитных возмущений, приводящих к возбуждению геомагнитно - индуцированных токов (ГИТ) в высоковольтных линиях электропередач, расположенных приблизительно вдоль магнитного меридиана Мурманск – Петрозаводск – Москва.

Система должна объединять распределённую сеть датчиков магнитного поля, фиксирующих развитие возмущения в геомагнитном поле, и сеть датчиков, регистрирующих возбуждение ГИТ в высоковольтных сетях. Существенным аспектом системы является сбор информации в почти реальном времени, организация хранения, обработки и доступа к данным, получаемых системой, обеспечение основных потенциальных потребителей информации. В докладе обсуждается структура системы, её необходимая инфраструктура, требуемый персонал, необходимый объем финансирования.

Цель проекта - обеспечение устойчивой работы Единой энергетической системы и сокращение возможных потерь в случае развития сильных и экстремальных геомагнитных возмущений.

ЭФФЕКТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ, НАБЛЮДАВШИЕСЯ С ПОМОЩЬЮ НАНОСПУТНИКОВ ГРУППИРОВКИ МГУ «СОЗВЕЗДИЕ-270» ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ 2024 г.

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Еремеев В.Е., Июдин А.Ф., Калегаев В.В., Мягкова И.Н., Свертилов С.И.

МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, aabboogg@srd.sinp.msu.ru

Продолжается развертывание группировки нано-спутников МГУ «Созвездие-270». К настоящему времени запущено 20 спутников формата кубсат с аппаратурой для мониторинга космической радиации и электромагнитных транзиентов различной природы, в том числе атмосферного, астрофизического и солнечного происхождения. В настоящей работе используются данные пяти кубсатов, запущенных 27 июня 2023 г. (Авион, Монитор-2, Монитор-3, Монитор-4, UTMN2) и двух кубсатов, выведенных на орбиту 5 ноября 2024 г. (Альтаир, АрктикСат). На каждом из них установлены сцинтилляционные детекторы ДеКоР для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения и заряженных частиц, специально разработанные в НИИЯФ МГУ для подобных экспериментов. Спутники Авион, Монитор-2 и Альтаир наряду с традиционными радиопередатчиками в УКВ-диапазоне оснащены передатчиками в S-диапазоне, позволяющими проводить фактически непрерывные измерения. Данные кубсатов МГУ доступны на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу <https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php> в виде графиков и таблиц данных мониторинга с временным разрешением до 1 с.

В работе представлены результаты наблюдений явлений космической погоды, приводящих к существенному изменению радиационных условий в околоземном пространстве. К таким явлениям, которые могут быть зарегистрированы в экспериментах на кубсатах группировки «Созвездие-270», относятся: 1) жесткое рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек; 2) солнечные космические лучи (СКЛ), регистрируемые на кубсатах в области полярных шапок; 3) вариации интенсивности и пространственной структуры распределения потоков электронов высоких энергий во внешнем радиационном поясе Земли (ВРПЗ) во время магнитных бурь, вызванных изменением параметров солнечного ветра вследствие активных процессов на Солнце – как приходом на орбиту Земли корональных выбросов массы, так и высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр. И СКЛ, и возрастания потоков электронов ВРПЗ приводят к существенной перестройке радиационных полей во внутренней магнитосфере. Также они важны для определения локальных дозовых нагрузок на заданных орбитах. В течение 2024 года на Солнце произошло несколько десятков вспышек X-класса, часть из них сопровождалась потоками СКЛ. Также наблюдалось более десятка сильных магнитных бурь, наиболее мощные из которых произошли в марте, апреле и мае, а также августе, сентябре и октябре. Большинство данных событий космической погоды были зарегистрированы в экспериментах, проводимых на кубсатах группировки «Созвездие-270».

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23–42-10005, а также научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса», проект №24-Ш01-05 «Созвездие 270».

НОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ МОНИТОРИНГА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ. ПЕРСПЕКТИВЫ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

Калишин А.С.¹, Благовещенская Н.Ф.¹, Борисова Т.Д.¹, Федоренко Ю.В.², Егоров И.М.¹, Стрибный О.Ю.¹, Дронов Д.К.¹

¹*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, askalishin@aari.ru*

²*Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия,*

В период с 2022г по настоящее время Арктический и антарктический НИИ проводит ряд инфраструктурных проектов по расширению пунктов и средств наблюдений за состоянием космической погоды в высоких широтах.

После длительного перерыва возобновлены исследования на дрейфующих научно-исследовательских станциях СП-41 и СП-42, где развернут комплекс геофизических наблюдений. На борту ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс» и на ледяном поле выполняются магнитные, гравиметрические и радиофизические исследования. Пункт наблюдения на СП интегрирован в существующую высокоширотную сеть трасс наклонного зондирования ионосферы.

Выполнено проектирование радиофизической и гравиметрической лаборатории на новом научно-экспедиционном судне «Иван Фролов», закладка которого состоялась в октябре 2024г. Судно предназначено для совершения регулярных рейсов в Антарктику. По прибытию в пункты назначения и по ходу движения будет проводиться комплекс геофизических наблюдений: гравиметрические, оптические, трансionoсферное и наклонное зондирование.

С 2022г проводится модернизация научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» в Ленинградской области. Обновляется инфраструктура и приборный парк научного оборудования. Установлен новый комплекс антенн декаметрового диапазона, оборудование для проведения дистанционной диагностики эффектов активных воздействий на ионосферу мощного радиоизлучения, комплекс возвратно-наклонного зондирования, приемник ОНЧ радиоизлучения, риометер.

В докладе представлены первые результаты наблюдений эффектов космической погоды на СП-41 и НИС «Горьковская».

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В РАМКАХ УЧЕНИЙ "БЕЗОПАСНАЯ АРКТИКА-2025" ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Мёрзлый А.М.¹, Беспалов В.Л.², Горламов А.С.², Кавлис С.Е.², Куприянов А.О.³, Мироненко А.В.², Замогильный Д.³, Янаков А.Т.¹

¹ *Институт космических исследований, г. Москва, Россия,*

aoku28@gmail.com

² *ООО Научно-производственное предприятие «Новые Технологии Телекоммуникации», г. Санкт -Петербург, Россия*

³ *Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Россия*

Арктический гелиогеофизический центр ИКИ РАН совместно с ООО Научно-производственным предприятием «Новые Технологии телекоммуникации» и Московским государственным университетом геодезии и картографии с 25 по 28 декабря 2024 г. приняли участие в первом этапе межведомственных опытно-исследовательских учений сил и средств единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации «Безопасная Арктика-2025». Первый этап учений был проведен в Мурманской области по маршруту: «Мурманск-Печенга-Никель-Верхнетуломское-Мончегорск-Пояконда-Медвежьегорск».

Проведена отработка технологии экспериментальной оценки точности определения местоположения подвижного объекта в арктических условиях. на основе применения макета мобильного радиомаяка (УКВ и L диапазонов).

Решены ряд прикладных задач (экспериментальная оценка передачи данных через КА о местоположении объекта в отсутствии мобильной сети с использованием модуля УКВ диапазона макета, отработка основных элементов методики геопозиционирования подвижных наземных объектов в арктических условиях с учётом данных ГНСС и др.).

ПРИМЕНЕНИЕ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Куприянов А.О.¹, Замогильный Д.¹, Кузьмин А.К.², Мёрзлый А.М.², Мингалёв И.В.³, Морозов Д.А.¹, Петрукович А.А.², Сахаров Я.А.³, Черняков С.М.³, Янаков А.Т.²

¹ *Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Россия,*
aoku28@gmail.com

² *Институт космических исследований, г. Москва, Россия*

³ *Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия,*

Актуальность работы обусловлена необходимостью развития инфраструктуры в арктической зоне Российской Федерации. Предпринимаемые в настоящее время усилия, направленные на освоение арктического региона проявляются, в частности, в развитии его геодезической инфраструктуры. Это выражается в создании постоянно действующих дифференциальных геодезических станций, на которых ведутся непрерывные мультисистемные и мультисистемные наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Ряд таких станций создан в последние годы в рамках программы развития национальной Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и Федеральной сети геодезических станций (ФСГС). Получаемая при помощи этих станций в арктическом регионе измерительная информация позволяет получать данные о полном электронном содержании ионосферы (ПЭС) в значительном радиусе от них.

Для мониторинга ионосферы по результатам наблюдений ГНСС на постоянно действующих дифференциальных геодезических станциях необходимо организовать как систему сбора и агрегации измерительной информации, так и её постобработку обеспечивающую учёт как случайных (шум, многолучёвость), так и систематических (межканальные задержки спутников и приёмника) погрешностей. В рамках данного исследования рассмотрена организация системы мониторинга параметров ионосферы региональном масштабе по наблюдениям на станциях ФАГС, ФСГС, IGS и других сетей. Приведены результаты оценки ПЭС и моделирования ионосферы по данным станций ФАГС, расположенных в арктическом регионе, сведения о наблюдаемых эффектах и возмущениях, а также анализ оптимальных подходов к обработке измерительной информации ГНСС для мониторинга параметров ионосферы в арктической зоне.

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫМ СЕНСОРОМ

Селиванов В.Н.¹, Билин В.А.^{1,2}, Колобов В.В.¹, Сахаров Я.А.^{1,2}

¹ЦЭС КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия, v.selivanov@ksc.ru

²ПГИ, г. Анатимы, Россия

Разработан и изготовлен макет низкобюджетного трехкомпонентного датчика магнитного поля Земли на двух микросборках двухканального магниторезистивного сенсора НМС1002 компании Honeywell. Себестоимость (комплектующие и расходные материалы) такого датчика вместе с управляющим компьютером не превышает 100 тыс.руб., в то время, как стоимость феррозондовых и кварцевых магнито-вариационных станций (МВС) превышает 1 млн.руб. Получены патент на полезную модель и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [1-3]. Макет датчика в начале ноября 2023 г. установлен в обсерватории Ловозеро в павильоне МВС рядом с измерительной платформой ЦИАС, состоящей из трех кварцевых датчиков системы Боброва с преусилителями. Опытная эксплуатация показала, что разработанное нами устройство может успешно использоваться в тех системах мониторинга геомагнитной обстановки, где не предъявляются высокие требования к точности и разрешающей способности датчиков. Магниторезистивные матрицы демонстрируют существенную температурную зависимость, поэтому необходимо их термостатировать. Однако так как в системах мониторинга геоиндуцированных токов используется значение первой производной от магнитных вариаций, то влияние длиннопериодных колебаний температуры является несущественным фактором. Датчики предполагается использовать при создании сети магнитовариационных станций для мониторинга геомагнитной обстановки по трассе прохождения магистральных электрических сетей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00413, <https://rscf.ru/project/22-29-00413/>.

1. Патент на полезную модель №222118 Российская Федерация, G01R33/025 (2023.08). Магнитометр / Колобов В.В., Баранник М.Б.; заявитель и патентообладатель ФИЦ КНЦ РАН. – №2023118487; заявл. 12.07.2023; опубл. 12.12.2023, Бюл. № 35. – 2 с.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2023685808. Программа обработки данных и управления настройками трехкомпонентного магниторезистивного датчика магнитного поля Земли / Селиванов В.Н., Колобов В.В.; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. - № 2023684987; заявл. 21.11.2023; опубл. 30.11.2023. Бюл. №12. – 1 с.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2023685811. Программа микроконтроллера AVR трехкомпонентного магниторезистивного датчика магнитного поля Земли / Селиванов В.Н., Колобов В.В.; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. - № 2023684986; заявл. 21.11.2023; опубл. 30.11.2023. Бюл. №12. – 1 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ КОДИЗ-2 НА ПОТОКИ ЭЛЕКТРОНОВ (50 КЭВ - 5 МЭВ) И ПРОТОНОВ (2 - 200 МЭВ)

Садыков А.М., Золотарев И.А., Бенгин В.В., Нечаев О.Ю., Антониук Г.И., Оседло В.И., Сазонова А.В., Лебедев М.О.

НИИЯФ, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, sadykov.am19@physics.msu.ru

В рамках настоящей работы было проведено моделирование отклика детекторной системы КОДИЗ-2 (КОмбинированный Детектор Излучения) на потоки высокоэнергетических электронов (от 50 кэВ до 5 МэВ) и протонов (от 2 до 200 МэВ). В состав детекторной системы КОДИЗ-2 входят 2 полупроводниковых и 1 сцинтилляционный детектор из кристалла CsI. Для анализа была использована модель детектора, созданная в программе AutoCAD, с последующим преобразованием её в формат GDML, используемом для работы в программной среде Geant4.

Основной целью исследования было подтверждение возможности разделения потоков электронов и протонов, что является ключевым аспектом для разработки высокоэффективных детекторных систем. В ходе моделирования с числом частиц порядка 10^9 для каждого типа частиц было проведено исследование отклика системы, что позволило определить ключевые параметры, влияющие на разделение этих потоков.

Результаты моделирования подтвердили возможность точного различия потоков электронов и протонов с высокой точностью, что открывает перспективы для применения детектора КОДИЗ-2 в задачах, требующих высокой чувствительности. Дополнительно, была проведена оценка зависимости отклика системы от начальной энергии протонов, что позволило предложить методику определения энергии протонов по результатам измерений в детекторе.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Ковалев Д.В., Вальчук А.С., Воробьев А.В.

АО «Башнефтегеофизика», г. Уфа, Россия, dvkovalev@yahoo.com

В связи с указом президента РФ от 26 октября 2020 г. N 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года" была разработана стратегия, п. 14а которого гласит о необходимости "выделения приоритетных направлений научно-технологического развития и наращивания деятельности по проведению фундаментальных и прикладных научных исследований в интересах освоения Арктики" [1]. Этот стратегически значимый регион требует исследования процессов, влияющих на экосистемы и климат всей планеты, с акцентом на состояния атмосферы, гидросферы и биосферы [2]. Важной, но малоизученной областью является влияние космической погоды, включающей солнечные вспышки, корональные выбросы и поток солнечного ветра. Эти процессы могут существенно воздействовать на атмосферные условия, магнитосферу и ионосферу, что сказывается на результатах исследований в этом регионе. Одной из значимых сфер антропогенной деятельности человека, на которую влияют изменения в магнитосфере, является нефтегазовое дело, а именно геофизические измерения.

Актуальность оценки воздействия космической погоды на геофизические исследования в арктической зоне России усиливается необходимостью адаптации исследовательских методов и технологий, учитывающих влияние космической погоды [3] на разнообразные аспекты геофизических измерений, такие как определение пространственного положения ствола скважины, сейсмическое наблюдение и мониторинг магнитного поля. Понимание этих взаимодействий способствует более глубокому исследованию арктических процессов и улучшает планирование будущих исследований. Однако недостаточная изученность данной проблемы ограничивает прогресс в арктических исследованиях, затрудняя адекватную интерпретацию данных и разработку эффективных методов управления рисками.

В настоящее время в своем пике находится 25й солнечный цикл. Это дает возможность подготовить научно-техническую базу, которая позволит учитывать влияние геомагнитных возмущений на магнитное оборудование, для будущих исследований.

Работа представляет собой результаты комплексной оценки влияния космической погоды на геофизические исследования в Арктике. Был проведен анализ данных с геомагнитных обсерваторий и информации о геомагнитных бурях и суббурях с целью выявления статистических взаимосвязей. Дальнейшим шагом стал синтез регрессионной модели и дополнительной погрешности инклинометрических систем. Основная цель работы – предложение рекомендаций для будущих исследований и создание практических приложений, что позволит ученым более эффективно справляться с вызовами, связанными с космической погодой при исследованиях в арктическом регионе.

1. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. N 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года" (с изменениями и дополнениями от: 12 ноября 2021 г., 27 февраля 2023 г.)
2. В.Н. Коньшев и др. // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2017, т. 13, вып. 3, стр. 416–430
3. В.Т. Минлигареев, Д.Д. Вишняков, Е.Д. Виноградова, А.С. Калишин // Влияние опасных явлений космической погоды на технические средства и системы // Технологии гражданской безопасности, том 20, 2023, № 3 (77), стр 30-34

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УСТРОЙСТВ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ИАС ИКИ РАН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ ПРОХОЖДЕНИЯ РАДИОВОЛН В КВ ДИАПАЗОНЕ

Моисеев И.А., Моисеева В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия moiseev_i_a@cosmos.ru

В мировой практике существуют успешные примеры привлечения широкого круга пользователей индивидуальных устройств связи для сбора информации о событиях планетарного масштаба. Неточность измеренных параметров компенсируется широтой охвата как в пространстве, так и во времени при использовании автоматизированной системы сбора и обработки. Предлагаемое решение получения гелиогеофизических параметров позволит стать начальным этапом в развитии системы сбора информации.

Предлагается использовать бесплатно распространяемые программы поиска уровня сигнала спутников GPS и ГЛОНАСС GPS-Test, с помощью которых фиксируются количество (номера) спутников, оценка уровня принимаемого сигнала и время сеанса. Снятые показатели группируются по времени, месту наблюдений и обрабатываются методами математической статистики, в частности получают зависимости амплитуды принимаемого сигнала от параметров ионосферы.

Программа магнитометра в смартфоне позволяет определять текущее значение ЭДС, в UT (мкТ), а также составляющие вектора (X, Y, Z). Измеренные параметры горизонтальной составляющей магнитного поля целесообразно использовать как индикатор наличия или отсутствия магнитной суббури.

С помощью программ подключения к сайтам типа WebSDR можно грубо измерять уровни сигналов на разных частотах стационарных КВ радиомаяков, работающих по известному расписанию. Эти данные позволяют судить о характеристиках ионосферы, влияющих на условия прохождения КВ радиоволн. Кроме того, при наличии обычных радиоприемников можно оценивать уровни сигнала заранее назначенных вещательных радиостанций с фиксацией их мощности и месторасположения.

Сбор измеренных данных возможен с использованием сервисов Telegram путем привлечения школьников с целью приобретения навыков работы с измерительными приборами, съема показаний приборов и их предварительной обработки. При наличии специализированных программ для смартфонов операции по сбору и передаче данных могут быть автоматизированы. Важным результатом организации вышеописанных работ является расширение сети гелиогеофизических датчиков по всей стране.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МЕЖВЕДОМСТВЕННОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЫ ИКИ РАН В 2024 ГОДУ

Янаков А.Т.¹, Мёрзлый А.М.¹, Мингалев И.В.², Моисеев И.А.¹, Никифоров О.В.¹, Сахаров Я.А.², Стариков А.С.¹, Филатов Г.С.¹, Куприянов А.О.³

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, yanakov@cosmos.ru

² Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия

³ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

В докладе рассматриваются результаты экспериментальных и расчетных работ на оборудовании первой очереди Межведомственной экспериментальной высокоширотной радиотрассы ИКИ РАН (далее – МЭРТ ИКИ РАН).

Приведены результаты экспериментальных работ (суточные изменения проходимости радиоизлучения на разных частотах, с разным ослаблением сигнала, в различных геомагнитных условиях) базовых станций на радиотрассе Карпогоры (передающая позиция) – Верхнетуломское (приёмная позиция).

Приведены результаты экспериментальных работ мобильного комплекса с макетами антенн различного диапазона на маршруте Карпогоры – Верхнетуломское с целью повышения точности определения местоположения источников радиоизлучения в заданных диапазонах.

Рассмотрены перспективы размещения оборудования реперных станций в локациях обсерваторий Верхнетуломское (Мурманская область) и Карпогоры (Архангельская область) с целью повышения эффективности работы системы определения местоположения источников радиоизлучения.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ИНДЕКСА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ $K_{спз}$

Анохин М.В.^{1,2,3}, Галкин В.И.², Дубов А.Е.¹, Савкин Л.В.¹, Шилло А.Г.³

¹ СКБ КП ИКИ РАН, г. Таруса, Россия,

² НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия,

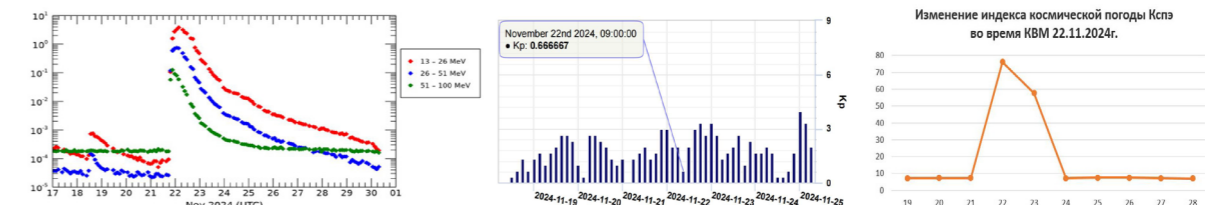
³ Институт тонких экологических технологий (ИТЭТ) г. Таруса, Россия.

anokhinmikhail@yandex.ru

В настоящем сообщении рассматривается ряд вопросов космической погоды с инженерно-физической позиции. В этом случае основными параметрами являются: чувствительный объем электронного элемента \dot{V} , Q_c - критическая плотность заряда в \dot{V} , и D_{pa} – критическая плотность смещений на атом, зависящая от пороговой энергии смещения E_{pa} . Тогда для оценки интенсивности одиночных событий в микроэлектронике под действием космических лучей можно использовать простую формулу

$$F \approx f \cdot \dot{V} / E_{pa}^n \cdot Q_c^2$$
. Здесь n – параметр, зависящий от массового спектра поля ионизирующих частиц (ПИЧ) внутри КА, $f(q, t, d, v)$ – дифференциальный параметр, характеризующий интенсивность и спектр плотности энергии (СПЭ) ПИЧ, связанный с состоянием космической погоды внутри КА и измеренный, в данном случае, посредством детектора на базе Kodak KAI-0340 CCD - ПЗС матрицы коронографа LASCO C3, имеющей $0,25 \times 10^6$ вокселей. В этом случае: t – время измерения СПЭ, q – заряд, собранный вокселем, имеющим объём v , d – число смещений, зарегистрированных в ПЗС.

Для введения в протокол информационного обмена (ПИО) бортового космического прибора удобно применить инженерный индекс космической погоды $K_{спз} = \int f(q, t, d, v) dt$. Пределы интегрирования определяются в ПИО. Эффективность использования параметра $K_{спз}$ продемонстрирована здесь во время КВМ, произошедшем в сторону Земли в ноябре 2024 г..



Интересно сравнить значения $K_{спз}$ за этот же период времени с информацией о текущем K_p индексе (SWX) Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ. На прилагаемом рисунке представлено слева направо: изменение потока протонов на КА SOHO, изменение K_p индекса (SWX) и изменение $K_{спз}$ индекса.

Предполагается, что данный подход будет технически реализован на КС РОС в проекте ПИЧ с использованием нейросети, позволяющей изменить циклограмму микроэлектронных устройств в автономном режиме.

Дополнительной особенностью такого подхода является потенциальная возможность учёта влияния корональных выбросов массы Солнца типа стелс-КВМ, образующих, по-видимому, целый класс событий, которые невозможно выявить с помощью современных методов, но которые, тем не менее, могут вносить заметный вклад в ПИЧ КА и влиять на вероятность сбоя и отказов микроэлектроники вследствие одиночных радиационных эффектов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ НА ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ

Петросян А.П.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, annapetrosyan@phystech.edu

Активность на Солнце, такая как солнечные вспышки, выбросы корональной массы и т.д., способствует возникновению интенсивных возмущений космической погоды, что приводит к геомагнитным возмущениям. Когда такие потоки солнечной плазмы достигают Земли, магнитное поле нашей планеты, которое выполняет роль естественного щита против стремительно движущейся плазмы, сжимается. Колебания ионов и электронов в магнитосфере становятся более интенсивными, а в ионосфере формируются новые заряды. В полярных областях заряженные частицы следуют вдоль магнитных силовых линий, вызывая полярное сияние. Данное взаимодействие приводит к стремительным изменениям в магнитном поле Земли. В результате этих изменений на поверхности планеты индуцируется геоэлектрическое поле, что приводит к возникновению геомагнитно-индуцированного тока (ГИТ).

С учетом значительной зависимости современного промышленного общества от стабильного энергоснабжения, для предотвращения серьезных экономических последствий необходимо уделять повышенное внимание прогнозированию возможных экстремальных уровней геомагнитных индуцированных токов (ГИТ) в различных регионах, подверженных электромагнитным возмущениям во время магнитосферной активности. Несмотря на то, что исследования, посвященные возбуждению ГИТ, проводятся более трех десятилетий, задача защиты от негативных последствий геомагнитных возмущений остается нерешенной. Во-первых, прогнозирование магнитных бурь во времени представляет собой сложную задачу, во-вторых, их проявления в пространстве весьма разнообразны, а в-третьих, каждая технологическая система по-разному реагирует на магнитосферные возмущения. С одной стороны, необходим глобальный подход к изучению этого явления на планетарном уровне, а с другой стороны, важно исследовать процессы возникновения и действия ГИТ в каждой конкретной системе.

Характер возбуждения геомагнитных индукционных токов (ГИТ) в различных системах определяется множеством факторов, включая длину, конфигурацию и местоположение системы, а также геомагнитную широту и ориентацию её проводящих элементов, электрические характеристики подстилающей поверхности, сопротивление самой системы и цепей заземления. В настоящее время установлены ключевые условия для возбуждения ГИТ в протяженных линиях электропередач, которые зависят от параметров линии, её ориентации, расположения и уровня геомагнитных возмущений.

Сильные магнитные бури связаны с активным кольцевым током и протяженными ионосферными токами, что может приводить к глобальным проявлениям ГИТ на Земле. В спокойные периоды наблюдаются преимущественно медленные вариации магнитного поля, а индукционные токи, как правило, имеют небольшую величину, с потенциально опасными явлениями, сосредоточенными в области овала полярных сияний.

В дополнение к созданию моделей развития ГИТ в действующих сетях и вероятностной оценке интенсивности геомагнитных бурь при различных условиях солнечного ветра, важной частью защиты от негативных последствий космической погоды является мониторинг геомагнитных возмущений и регистрация развития ГИТ в реальных энергосистемах.

ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ПОРЯДКА 100 КЭВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ ВО ВРЕМЯ И ВНЕ СИЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Стуков Д. А., Ягова Н. В.

ИФЗ РАН, Москва, Россия, sda@ifz.ru

Работа посвящена резким возрастаниям потока электронов с энергиями порядка 10^5 эВ на геостационарной орбите. Исследуются данные дифференциального по энергии потока электронов во внешнем радиационном поясе на магнитосферных спутниках GOES за 2013-2016 годы. Составлен каталог событий, включающий спектр электронов в диапазоне от 40 до 500 кэВ непосредственно перед возрастанием и при максимальной интенсивности, а также условия в межпланетной среде и индексы геомагнитной активности. На данном этапе исследования рассматривается связь резких возрастаний потока с неволновыми параметрами вне и внутри магнитосферы. Для электронов с энергиями в сотни кэВ основным фактором являются авроральные активации – более 80% событий приходится на главную и восстановительную фазу суббурь с $AE > 300$ нТл. Влияние бурь выражено слабее, чем для релятивистских электронов – даже для граничного $Dst = -50$ нТл на главную и восстановительную фазу приходится меньше половины событий. Более подробно рассматриваются события, когда возрастания потока возникали при низкой и умеренной возмущенности – вне бури и при отсутствии авроральных возмущений с $AE_{max} > 300$ нТл во время возрастания и в течение трех часов до него. Для этих событий, чтобы выявить факторы, приводящие к возрастаниям в отсутствие глобальных возмущений, исследуются предшествующие возрастаниям вариации пространственного распределения потока электронов в магнитосфере и магнитного поля в магнитосфере и на Земле.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

СООТНОШЕНИЕ МАКСИМУМОВ ПОТОКА ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДОЛГОСРОЧНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ EPHIN

Ожередов В.А.¹, Струминский А.Б.¹, Григорьева И.Ю.²

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе предпринята попытка проанализировать наблюдательное подтверждение того, что энергичные солнечные протоны и электроны ускоряются в одном и том же процессе. В самом деле, если гипотеза верна, то интегральные потоки протонов и электронов в разных солнечных событиях, связанных с выбросом энергичных частиц (solar energetic particles, SEP) будут пропорциональны друг другу. Для определения начала и конца SEP-эвента нами разработан алгоритм поиска точек перелома тренда на основе релаксационного прогнозирования границ коридора, прописываемого сигналами EPHIN.

Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами с поверхности земли и орбит КА. Часть 3. Структуры "black" и "ant-black" аугога и их возможные механизмы генерации.

Кузьмин А.К., Крылова А.А., Мёрзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Янаков А.Т.

В продолжение работы, начатой в 2022 и 2023 гг., составлена часть 3 аннотированного атласа примеров изображений структур эмиссий и характеристик плазмы в авроральном овале и субавроральной области во время конкретных событий, происходивших в разных секторах MLT в разных геомагнитных условиях. Мотивацией создания атласа стал дальнейший анализ опыта развития технологии подготовки и проведения орбитальных и наземных экспериментов, нацеленных на создание системы картографирования и диагностики многообразных динамичных авроральных явлений в полярной ионосфере, отражающихся в мгновенном поле градиентов Ne в различных высотных слоях, являющихся «виновниками» проблем при распространении трансполярных сигналов. Как и части 1 и 2, эта работа в основном акцентирована на примерах результатов наблюдений авроральных эмиссий, полученных с помощью изображающих камер с поверхности Земли и с орбит КА с полярным углом наклона плоскости к плоскости экватора, а также на обзорах процессов, происходящих во время этих событий в соответствующих областях полярной ионосферы. В качестве близких по времени условий некоторые из представленных примеров сопровождаются: среднemasштабными изображениями структур аврорального овала и полярной шапки в разных секторах MLT, полученными в относительно близкое к рассматриваемым событиям время с орбит конкретных КА DMSP в авроральных эмиссиях в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) с помощью сканирующего по пространству изображающего спектрографа SSUSI, сопутствующими измерениями распределений характеристик потоков высыпающихся частиц (анализатор SSJ), градиентов магнитного поля, а также результатами локальных наблюдений градиентов Ne радарными некогерентного обратного рассеяния в соответствующих секторах полярной ионосферы в близкое к наблюдаемым событиям время. В данной работе рассматриваются: характеристики и особенности «дуэтов» структур полярных сияний, имеющих интенсивность, превышающую диффузный фон, называемых black-auroга и anti-black aurora, которые, в конкретных событиях и условиях сопровождают друг друга, и рассматриваются возможные механизмы их генерации.

СЕКЦИЯ «Волновые явления в космической плазме»

Среда, 12.02. 2025 г., Конференц-зал

		<u>Председатель Беспалов П.А.</u>	
Время	Ф.И.О. 1-го автора	Название доклада	
	16.10 - 16.30	Перерыв на кофе	
1	16.30 - 16.50	Чернышов А.А. и др.	О природе излучения типа гектометровый континуум
2	16.50 - 17.10	Артеха Н.С., Шкляр Д.Р.	Инкремент медленных необыкновенных волн в плазме с каппа-распределением при наличии конуса потерь
3	17.10 - 17.30	Шкляр Д. Р. и др.	Механизм генерации верхнегибридных волн в плазмосфере Земли
4	17.30 - 17.50	Колпак В.И. и др.	Парадоксальная зависимость аврорального километрового излучения от солнечной активности
5	17.50 - 18.10	Дорофеев Д.А. и др.	Особенности наблюдения гектометрового континуума излучения на разных временных масштабах

Четверг, 13.02. 2025 г., комната 202

		<u>Председатель Демехов А.Г.</u>	
Время	Ф.И.О. докладчика	Название доклада	
6	09.30 - 09.50	Магер О.В., Челпанов М.А.	Исследование суббуриковых пульсаций Pc5 по данным одновременных наблюдений радаров когерентного рассеяния, наземных станций и спутников Van Allen Probes
7	09.50 - 10.10	В.А. Пилипенко и др.	Возбуждение искусственных pc1 пульсаций в эксперименте FENICS-2024
8	10.10 - 10.30	Стуков Д. А., Ягова Н. В.	Зависимость когерентности длиннопериодных УНЧ вариаций магнитного поля в окрестности ночной магнитопаузы от длины интервала по данным измерений на спутниках CLUSTER
	10.30-11.00	Перерыв на кофе	
			Председатель Демехов А.Г.
9	11.00 - 11.20	Михайлова О.С., Магер П.Н.	Существование продольного приэкваториального резонатора для ионно-ионных гибридных волн в земной магнитосфере: исследование по данным Van Allen Probe
10	11.20 - 11.40	Стародубцев С.А.	МГД-волны в области предфронта межпланетной ударной волны 10 мая 2024 года
11	11.40 - 12.00	Романов К.В. и др.	Аномальный разогрев верхних слоев хромосферы и нижней короны медленными МГД-ударными волнами
12	12.00 – 12.20	Моисеев А.В. и др.	Особенности распространения в системе магнитосфера -ионосфера компрессионных длиннопериодных колебаний, проникающих из межпланетной среды, по наземным и спутниковым данным
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	13.30 - 14.30	Обед	

Председатель <u>Пилипенко В.А.</u>			
Время	Докладчик	Название доклада	
13	14.30 - 14.50	Д.Д. Позднякова и др.	Спутниковые и наземные наблюдения Pc1 пульсаций: новые результаты и новые вопросы
14	14.50 - 15.10	Пулинец С.А. и др.	Первые результаты регистрации плазменных волн во внешней ионосфере по данным спутников «ИОНОСФЕРА-М» №1 и №2
15	15.10-15.30	Викторов М.Е. и др.	Экспериментальное исследование неустойчивостей при столкновении встречных потоков плазмы в лабораторной магнитной арке
16	15.30 - 15.50	Галка А.Г. и др.	Лабораторное моделирование распространения высокочастотных волн вблизи электронного циклотронного резонанса в неоднородной плазме
17	15.50 -16.10	Лужковский А.А., Шкляр Д.Р.	Самосогласованное описание ленгмюровской турбулентности в неоднородной плазме
	16.10 - 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель <u>Викторов М.Е.</u>			
18	16.30 - 16.50	Трухачев Ф.М. и др.	Ионно-звуковые солитоны разрежения: перенос вещества и возмущение функций распределения фоновой плазмы
19	16.50-17.10	Герасименко Н.В., Трухачёв Ф.М.	Некоторые особенности взаимодействия магнитозвуковых солитонов с плазмой
20	17.10 -17.30	Лукьянцев Д.С. и др.	Рефракционные эффекты плазменных и гравитационных неоднородностей при распространении электромагнитного излучения удаленных космических источников

21	17.30-17.50	В.Н. Тищенко и др.	Резонанс цугов сгустков лазерной плазмы, расширяющихся с до-Альфвеновской скоростью
22	17.50-18.10	Чумарина Д.А. и др.	Реконструкция профилей магнитного поля плоских галактик методом конечномерного фарадеевского синтеза
Постерная сессия			

Доклады постерной сессии 13.02.2025 «Волновые явления в космической плазме»

- 7.1 Никитенко А.С. и др. Наблюдения естественных СНЧ/ОНЧ сигналов во время экспедиции «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС—41»
- 7.2 Никитенко А.С. и др. Влияние увеличения риометрического поглощения на распространение авроральных шипений к земной поверхности
- 7.3 Никитенко А.С. и др. Особенности выхода авроральных шипений к земной поверхности одновременно с ростом риометрического поглощения
- 7.4 Чекушева С.С., Демехов А.Г. Сравнение теоретических моделей хоровых ОНЧ излучений в магнитосфере Земли
- 7.5 Березуцкий А.Г. и др. Генерация альвеновских волн сгустками лазерной плазмы в плазме с нейтралами
- 7.6 Шкарева П.Д., Савина О.Н. Некоторые данные наблюдений о влиянии крупномасштабных процессов в атмосфере на квазипериодические излучения свистового диапазона внутри плазмосферы.
- 7.7 Нешеткин Г.М. и др. Результаты расчета размерности Хаусдорфа и корней характеристического уравнения для хоров со спектральными формами в двух частотных полосах.
- 7.8 Ягова Н. В. и др. Пространственное распределение поля геомагнитных Pc1 пульсаций на земле и в верхней ионосфере от средних до авроральных широт
- 7.9 Лундин Б.В. Распространение высокочастотных волн в приземной ионосфере — модифицированное дисперсионное уравнение для холодной фоновой плазмы

Пятница, 14.02. 2025 г., Конференц-зал

Председатель Шкляр Д. Р.			
№	Время	Ф.И.О. докладчика	Название доклада
23	10.20 - 10.40	Беспалов П.А., Савина О.Н.	Особенности генерации квазипериодических ОНЧ излучений с существенной частотной динамикой внутри плазмосферы.
24	10.40 - 11.00	Демехов А.Г.	Моделирование хоровых ОНЧ излучений и сравнение с данными спутниковых наблюдений
25	11.00 - 11.20	Грач В.С., Демехов А.Г.	Влияние амплитудной и частотной модуляции волнового пакета свистовых волн на ускорение энергичных электронов
	11.20 - 11.50	Перерыв на кофе	
26	11.50 - 12.10	Французов В.А. и др.	Глобальный дисперсионный анализ системы на основе эмпирической функции распределения
27	12.10 - 12.30	Белаховский В.Б. и др.	QR эмиссии с увеличивающимся периодом, зарегистрированные по данным спутника Arase и обсерватории «Ловозеро»
28	12.30-12.50	Титова Е. Е и др.	Наблюдение и генерация двухполосных шумовых излучений выше и ниже половины гирочастоты электронов вблизи геомагнитного экватора
29	12.50- 13.10	Галстян Т.В. и др.	Крупномасштабные волны во вращающейся частично ионизованной плазме в приближении холловской магнитной гидродинамики
30	13.10-13.30	Кошкина Д.А. и др.	Приближение бета-плоскости для волновых течений частично ионизованной плазмы

О ПРИРОДЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА ГЕКТОМЕТРОВЫЙ КОНТИНУУМ

Чернышов А.А.¹, Шапошников В.Е.^{2,3}, Могилевский М.М.¹, Чугунин Д.В.¹, Дорофеев Д.А.^{1,4}

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, achernyshov@cosmos.ru

²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

³Нижегородский филиал НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

⁴НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

Относительной недавно в гектометровом диапазоне 525-1700 кГц было обнаружено нетепловое излучение, так называемый нетепловой гектометровый континуум, с узкополосной частотной структурой и поляризацией, соответствующей обыкновенной моде, на японском спутнике ERG (Arase). Физический механизм, лежащий в основе генерации этого типа излучения в околоземной плазме, до сих пор неизвестен. В представленном исследовании впервые рассматривается модель, описывающая формирование квазигармонической (линейчатой) структуры спектра гектометрового радиоизлучения. Рассмотренная теоретическая модель основана на эффекте двойного плазменного резонанса на электронных циклотронных гармониках, который реализуется в случае, когда частота верхнего гибридного резонанса близка к частоте одной из гармоник электронной гирочастоты. Анализируя зарегистрированные на спутнике ERG (Arase) случаи нетеплового гектометрового континуума, обсуждается предлагаемый физический механизм создания квазигармонической частотной структуры, приводящей к квазипараллельным полосам излучения. Другими словами, эффект двойного плазменного резонанса предлагается в качестве возможного объяснения наблюдаемых полос излучения в динамическом спектре гектометрового континуума. Демонстрируется, что механизм двойного плазменного резонанса может теоретически объяснить существующие экспериментальные измерения нетеплового гектометрового излучения в околоземном пространстве.

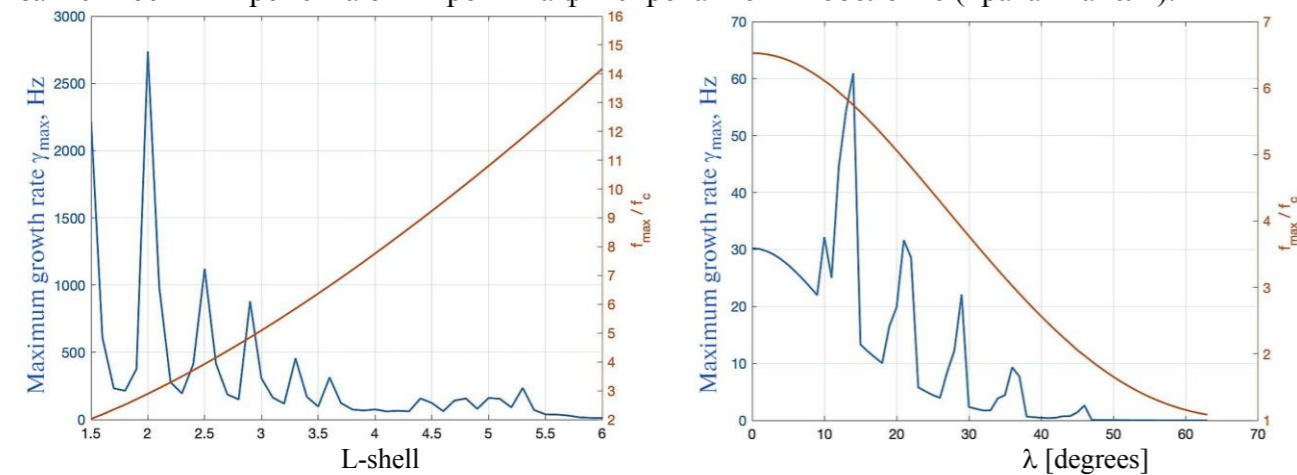
ИНКРЕМЕНТ МЕДЛЕННЫХ НЕОБЫКНОВЕННЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ С КАППА-РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПРИ НАЛИЧИИ КОНУСА ПОТЕРЬ

Н. С. Артеха^{1,2}, Д. Р. Шкляр¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия

²НИУ "ВШЭ", г. Москва, Россия, natalya.arteha@mail.ru

Резонансное взаимодействие волн и частиц является одним из фундаментальных процессов в околоземной плазме. Это взаимодействие в значительной степени определяет спектры наблюдаемых волн, также как и динамику энергичных частиц в плазмосфере, в частности, в радиационных поясах Земли. По существующим представлениям, резонансное взаимодействие с волнами играет важную роль в ускорении и питч-угловом рассеянии энергичных частиц, приводящем к их высыпанию в атмосферу. Медленные необыкновенные волны играют важную роль в динамике частиц плазмосферы Земли. Кроме того, рассеиваясь на мелкомасштабных неоднородностях плотности, эти волны могут возбуждать обыкновенную моду, прямая генерация которой неэффективна из-за ее малого показателя преломления. Выполнено детальное исследование генерации медленных необыкновенных (МН) волн в магнитосфере Земли. В предположении, что распределение энергичных электронов описывается функцией распределения вида κ -функции с конусом потерь, рассчитан инкремент неустойчивости МН волн с учетом релятивистских эффектов и неоднородности плазмы и внешнего магнитного поля на основе закона сохранения энергии в системе волна – кинетическая энергия резонансных частиц, где энергия волны включает энергию электромагнитного поля и колебательную энергию нерезонансных частиц. Изучена зависимость инкремента как от параметров функции распределения горячих частиц, так и от плотности холодных частиц, которая характеризуется отношением плазменной электронной частоты к электронной циклотронной частоте: ω_p / ω_c . Это отношение является одним из ключевых параметров задачи. Для различных значений ω_p / ω_c получены зависимости инкремента неустойчивости от параметра функции распределения κ , параметра конуса потерь l , температуры распределения и ее анизотропии. Показано, что максимум инкремента достигается вблизи экватора, на частотах и при углах волновой нормали, близких к резонансным значениям, в частности, вблизи верхней гибридной частоты и для углов волновой нормали, близких 90° . Выявлена и объяснена немонотонная, квази-периодическая зависимость инкремента от отношения частоты к электронной гирочастоте, которая проявляется в зависимости экваториального инкремента от L -оболочки (левая панель), либо зависимости инкремента от широты на фиксированной L -оболочке (правая панель).



D. R. Shklyar and N. S. Artekha, Generation of Quasi-Electrostatic Slow Extraordinary Waves by Kappa Distribution with a Loss Cone, Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 10, pp. 1243–1257.

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ВЕРХНЕГИБРИДНЫХ ВОЛН В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Д. Р. Шкляр¹, Е. Е. Титова^{2,1}, Н. С. Артеха^{1,3}

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, david@iki.rssi.ru

²Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия

³НИУ "ВШЭ", г. Москва, Россия

Одновременные измерения волновых электромагнитных полей в широком диапазоне частот, дифференциальных потоков энергичных частиц и параметров окружающей плазмы на спутниках Van Allen Probes дают уникальную возможность сравнить наблюдаемые спектры волн с их линейными инкрементами. Доклад посвящен исследованию верхнегибридных (ВГР) волн, соответствующих медленным необыкновенным волнам вблизи резонанса показателя преломления и углов волновой нормали, близких к 90° . Предполагая, что возбуждение ВГР волн обусловлено циклотронным взаимодействием с энергичными электронами на высоких циклотронных резонансах, мы выполнили расчеты инкремента этих волн. Для расчетов использована модельная функция распределения в виде каппа-распределения с конусом потерь и анизотропией продольной и поперечной температур. Параметры этого распределения выбраны на основе измеренных дифференциальных потоков энергичных электронов на спутнике Van Allen Probe и известной связи между дифференциальными потоками и функцией распределения частиц. Используя выбранную таким образом модельную функцию распределения, был рассчитан абсолютный максимум инкремента (по отношению к частоте волны и углу волновой нормали) на орбите спутника. Особенности рассчитанного инкремента состоят в том, что эти максимумы всегда достигаются на частотах, близких к частоте ВГР (что подразумевает угол волновой нормали волны, близкий к 90°), и что величины этих максимумов сильно возрастают, когда частота ВГР близка к целому кратному электронной гирочастоте. Соответствующее увеличение спектральной интенсивности ВГР волн на частотах кратных электронной гирочастоте является характерной особенностью обзорных спектрограмм, наблюдаемых на спутниках Van Allen Probes. Такое соответствие между наблюдаемым спектром и локальным инкрементом, с учетом малой групповой скорости квазиэлектростатических ВГР волн, является серьезным аргументом в пользу предложенного механизма их генерации.

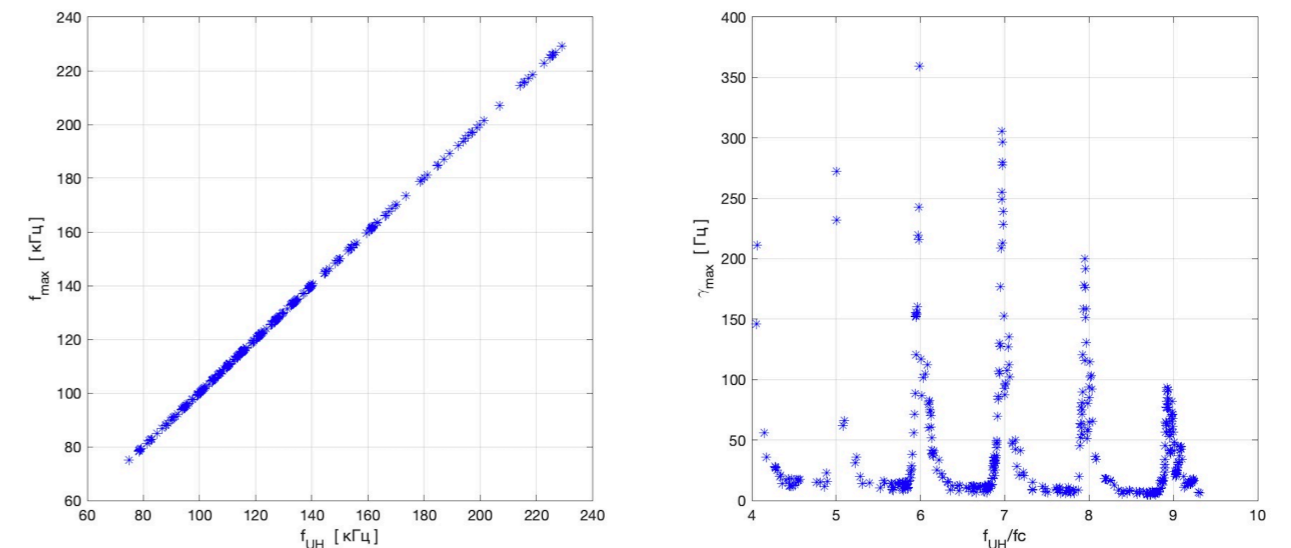


Рис. 1. Зависимость частоты максимума инкремента ВГР волн от частоты верхнегибридного резонанса (левая панель). Абсолютный максимум инкремента ВГР волн вдоль траектории спутника в зависимости от отношения f_{UH} / f_c (правая панель).

ПАРАДОКСАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

В.И. Колпак^{1,2,3}, **М.М. Могилевский**², **Д.В. Чугунин**², **А.А. Чернышов**²,
И.Л. Моисеенко², **М. О. Рязанцева**²

1. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.

Н.В. Пушкова РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия, lera.kolpak@yandex.ru

2. Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, России

3. Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000 Москва, Россия

Накопленные за 50 лет сведения о свойствах аврорального километрового радиоизлучения (АКР) позволяют использовать это излучение для зондирования среды, в которой происходит его распространение. Представлены результаты статистической обработки измерений АКР, зарегистрированного на борту спутника WIND вблизи точки либрации L1. Анализ данных показывает, что существуют длиннопериодные вариации частоты регистрации АКР:

1) Ассиметричное распределение по оси Y: во время минимума солнечной активности АКР наблюдается чаще при нахождении спутника в диапазоне Y от +50 R_E до +100 R_E, чем при Y от -50 R_E до -100 R_E.

2) При повышении солнечной активности частота регистрации АКР понижается, а при её уменьшении – увеличивается. Это противоречит классическому представлению о прямой зависимости частоты АКР от солнечной активности. Сделано предположение, что подобное изменение частоты регистрации АКР может быть связано не условиями генерации АКР, а с особенностями распространения радиоизлучения в неоднородной плазме солнечного ветра.

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ГЕКТОМЕТРОВОГО КОНТИНУУМ ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ

Дорофеев Д.А.^{1,2}, **Чернышов А.А.**¹, **Чугунин Д.В.**¹, **Могилевский М.М.**¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, dadorofeev_1@edu.hse.ru

²НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

Благодаря анализу данных со спутника ERG (Arase) за период в 7 лет (2017-2023) удалось обнаружить около 1000 случаев регистрации гектометрового континуум (ГМК) излучения в магнитосфере Земли, что позволило определить характерные особенности на разных временных масштабах. На суточных масштабах было установлено, что ГМК наблюдается в ночное время и полностью отсутствует в дневное. Также присутствует асимметричное смещение на 1-2 часа относительно рассвета и заката. Скорее всего, это связано с тем, что в ночное время, когда отсутствует солнечное излучение и наблюдается пониженная плотность плазмы в верхней ионосфере, происходит генерация ГМК. В дневное же время солнечное излучение способствует активной ионизации частиц в ионосфере, магнитные силовые трубки начинают заполняться, это приводит к изменению характеристик фоновой плазмы и нарушению условий для генерации ГМК излучения в околоземной плазме. Во время проведения исследования, также было найдено, что вечерние случаи преимущественно наблюдаются в 2019 году, что может быть связано как с положением орбиты спутника, так и с физическими процессами. Кроме того обнаружено, что, начиная с 2022 года гектометровый континуум перестаёт наблюдаться вплоть до конца 2023, данные по которому имеются в открытом доступе. Это может быть связано с приближением к пику 25-го цикла солнечной активности – ростом индекса F10.7 и числа Вольфа.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУББУРЕВЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc5 ПО ДАННЫМ ОДНОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ РАДАРОВ КОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ, НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ И СПУТНИКОВ VAN ALLEN PROBES

Магер О.В., Челпанов М.А.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, o.mager@iszf.irk.ru

В 2014-2015 гг. на Екатеринбургском среднеширотном когерентном декаметровом радаре (ЕКВ), являющемся аналогом радаров SuperDARN, был проведен ряд экспериментов по обнаружению и изучению Pc5 волн в ночной ионосфере. В дополнение к радару использовались данные ближайших наземных магнитных обсерваторий: Амдерма, Норильск и Диксон [Mager et al., 2015], для соотнесения регистрируемых волн с определенными типами мод, установления их природы и связи с процессами, протекающими в магнитосфере, данные спутниковых миссий Van Allen Probes и THEMIS [Chelpanov et al., 2016; Chelpanov et al., 2018; Mager et al., 2019].

В продолжение цикла работ представляются результаты исследования пространственно-временных характеристик суббуравых Pc5 и Pi2 пульсаций, одновременно регистрируемых с помощью ЕКВ радара и радара SuperDARN в Ханкасалми (Финляндия) в ночной ионосфере (в секторе 2-4 MLT), и спутников Van Allen Probes в сопряженной области магнитосферы ($L \sim 5.8-4.7 R_E$). Проведено сопоставление наблюдаемых колебаний с вариациями геомагнитного поля на наземных магнитных станциях Тикси, Диксон и сети IMAGE, находящихся секторе обзора радаров.

Исследуемые волновые события наблюдались в интервале с 23:00 UT 7 декабря по 01:00 UT 8 декабря 2014 г. в период активизации нескольких суббурь. По данным радаров, спутников и наземных станций четко прослеживается, что интенсификация суббуравой активности смещалась с востока на запад. На восстановительных фазах суббурь регистрировались Pc5 волны с частотами $f \sim 1,8$ мГц и 2 мГц, что оказалось значительно ниже альфвеновских частот на этих магнитных оболочках, следовательно, эти волны не являлись альфвеновскими. Вычисленные на основе данных радара азимутальные волновые числа, составили $m \sim -40$ и -15 соответственно. Волны сопровождалась увеличением потоков энергичных протонов. При этом направление распространения волн совпадало с направлением магнитного дрейфа протонов. Наблюдались модуляции потоков протонов с энергиями 20 кэВ и 90 кэВ на соответствующих частотах. Взрывная фаза суббури сопровождалась всплеском Pi2 и Pc5-6 пульсаций, которые регистрировались радаром, спутниками и наземными станциями. А также Pc4 пульсациями с частотой $f \sim 12$ мГц, которые регистрировались спутниками Van Allen Probes и ЕКВ радаром.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10012.

1. Chelpanov M. A., Mager P. N., Klimushkin D.Y., Bergardt O. I., Mager O. V. // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. V. 121, 1315.
2. Chelpanov M.A., Mager O.V., Mager P.N., Klimushkin D.Y., Bergardt O.I.// *JASTP*. 2018. V. 167.P. 177
3. Mager, O. V., Chelpanov, M. A., Mager, P. N., Klimushkin, D. Y., & Bergardt, O. I. // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2019 V. 124, 3276.
4. Mager, P. N., Bergardt O. I., Klimushkin D. Y., Zolotukhina N. A., Mager O. V. // *JASTP*. 2015. V. 130, P.112.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ Pc1 ПУЛЬСАЦИЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ FENICS-2024

В.А. Пилипенко¹, А.В. Рябов², А.С. Потапов³, Р.А. Марчук³, В.В. Колобов⁴, С.В. Анисимов⁵, Е.Н. Ермакова⁶, Н.Г. Мазур¹, Е.Н. Федоров¹, Д.Д. Позднякова¹, Э.М. Дмитриев⁵

¹ *Институт физики Земли РАН, Москва*

² *Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород*

³ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

⁴ *Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Анатиты*

⁵ *Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли РАН, Ярославская обл.*

⁶ *Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского Университета, Н. Новгород*

Электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны диапазона Pc1 могут приводить к высыпанию релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу и таким образом снижать уровень потоков электронов-«убийц» в магнитосфере. Кроме того, электромагнитные возмущения УНЧ диапазона могут использоваться для магнитотеллурического зондирования (МТЗ) земной коры. Можно ли ЭМИЦ волны возбуждать искусственно? Для возбуждения искусственных пульсаций Pc1 проводятся эксперименты с модулированным радионагревом ионосферы на стендах СУРА и HAARP. Однако, использование выведенных из эксплуатации ЛЭП могут быть значительно более дешевой и эффективной альтернативой радионагревным методам. Для обоснования этой возможности в июле-августе 2024 г. на Кольском полуострове был проведен эксперимент FENICS-2024 по генерации УНЧ - СНЧ сигналов в ночные часы с использованием ЛЭП в качестве горизонтальной излучающей антенны. Частота генератора от сеанса к сеансу менялась от 1 Гц до 194 Гц. На магнитных станциях, удаленных от передающей линии от ~ 300 км до ~ 2100 км, зарегистрированы сигналы с частотами от 1 Гц до 9 Гц. Амплитуды сигналов, нормированные на величину тока излучателя, варьировались от ~ 3 фТл/А до ~ 0.2 фТл/А в зависимости от расстояния и положения, относительно излучателя. Для теоретических оценок использована численная модель УНЧ поля в атмосфере и ионосфере, создаваемого линейным приземным током конечной длины. Модель основана на решении системы уравнений Максвелла в вертикально неоднородных атмосфере и ионосфере. Расчеты оказались в качественном согласии с результатами наблюдений. Проведенные наблюдения показали перспективность нового типа активных экспериментов для оперативного проведения МТЗ на громадной площади и воздействия искусственными сигналами на околоземную плазму.

ЗАВИСИМОСТЬ КОГЕРЕНТНОСТИ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ УНЧ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ НОЧНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ ОТ ДЛИНЫ ИНТЕРВАЛА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКАХ CLUSTER

Стуков Д. А.^{1,2}, Ягова Н. В.¹

¹ИФЗ РАН, Москва, Россия, sda@ifz.ru

²ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

В работе [1] было обнаружено отличие вида зависимости когерентности от длины интервала T между вариациями геомагнитного поля в диапазоне первых миллигерц (Pc5/Pi3) в геомагнитном хвосте и магнитослое и наличие порогового значения T , на котором это отличие начинает сказываться. Настоящая работа продолжает исследование [1] на большем статистическом материале, что позволяет оценить значимость полученных закономерностей и включить в исследование зависимость от расстояния спутников от магнитосферных границ и друг от друга. Рассматривается зависимость спектральной когерентности вариаций магнитного поля от длины выбранного интервала для разных расположений спутников. Для анализа используются данные измерений магнитного поля на спутниках Cluster на фазе спада 23 цикла солнечной активности. Для выявления вклада «шумовой» и квазигармонической части вариаций сравниваются зависимости для средних и максимальных в полосе значений спектральной когерентности γ^2 и значений γ^2 на частотах локальных спектральных максимумов или более слабых особенностей типа плато.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 24-77-10012

1. Временные масштабы когерентности пульсаций магнитного поля диапазона 1-5 мГц в геомагнитном хвосте и ночном магнитослое. Сборник: Proceedings of the XVIII Conference of Young Scientists “Interaction of fields and radiation with matter”. ИСЗФ РАН, Иркутск. 2024. С. 220-222. DOI: 10.62955/0135-3748-2024-220

СУЩЕСТВОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ИОННО-ИОННЫХ ГИБРИДНЫХ ВОЛН В ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ: ИССЛЕДОВАНИЕ ПО ДАННЫМ VAN ALLEN PROBE

Михайлова О.С., Магер П.Н.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [o_mikhailova@iszf.irk.ru](mailto:mikhailova@iszf.irk.ru)

Ультранизкочастотные волны или геомагнитные пульсации регулярно наблюдаются в магнитосфере Земли [1]. Пульсации диапазона Pc1 (0,2-5 Гц) имеют наибольшую частоту среди них. В космосе наблюдаются неструктурированные и структурированные (модулированные) колебания в данном диапазоне частот. Причины, по которым структурированные Pc1 имеют соответствующую форму, частоту и частоту модуляции, до конца не установлены.

В наших предыдущих работах [2,3] мы рассматривали одну из гипотез, объясняющих формирование подобной структуры. Согласно этой гипотезе, в присутствии в плазме магнитосферы тяжелых ионов (гелия или кислорода), в экваториальной части магнитной силовой линии может сформироваться резонатор для ионно-ионных гибридных волн (квазипоперечные волны в диапазоне Pc1). Собственные частоты резонатора определяют частоту возбуждаемых волн. Из-за плотного спектра частот в резонаторе возникает эффект биений – формируются структурированные колебания.

Для проверки этой гипотезы мы выбрали событие в диапазоне Pc1, которое было зафиксировано 14 июля 2014 года зондом Van Allen Probe A. Частота волны варьировалась от 0,9 до 1,3 Гц и находилась чуть выше гирочастоты ионов гелия. Во время события наблюдались высокие концентрации ионов гелия и кислорода. Соотношение плотности гелия к плотности протонов составляло порядка 1, а соотношение плотности кислорода к плотности протонов превышало 10. Расчетные собственные частоты приэкваториального резонатора для ионно-ионных гибридных волн, в присутствии в плазме магнитосферы ионов кислорода и гелия, соответствуют частоте наблюдаемой волны. Были также рассчитаны собственные частоты для экваториального резонатора для квазипродольных ионно-циклотронных волн [4]. Показано, что, по крайней мере, в присутствии высоких концентраций тяжелых ионов, гипотеза запираания волн в резонаторе для квазипоперечных ионно-ионных гибридных мод гораздо лучше описывает частоту наблюдаемых колебаний, чем гипотеза запираания квазипродольных волн в подобном резонаторе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10032.

1. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
2. Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Marilovtseva O.S. Parallel structure of Pc1 ULF oscillations in multi-ion magnetospheric plasma at finite ion gyrofrequency // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2010. Vol. 72, no. 18. P. 1327–1332. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.09.019.
3. Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Two modes of ion-ion hybrid waves in magnetospheric plasma // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020a. Vol. 62, no. 2. P. 025026. DOI: 10.1088/1361-6587/ab5b32.
4. Guglielmi A.V., Potapov A.S., Russell C.T. The ion cyclotron resonator // JETP Letters. 2000. V. 72, N 6. P.298–300.

МГД-ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПРЕДФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ 10 МАЯ 2024 ГОДА

Стародубцев С.А.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

Межпланетное магнитное поле (ММП) является важным компонентом космической плазмы. Оно играет значительную роль при генерации и распространении космических лучей в гелиосфере, а также в возникновении геомагнитных бурь и формировании различного типа пульсаций в магнитосфере Земли. При этом во многих случаях, при изучении физических явлений происходящих как в межпланетной среде, так и в различных геосферах, немаловажное значение имеет и его турбулентная составляющая.

В связи с этим представляет интерес всестороннее изучение мощных гелиофизических событий, произошедших в первой половине мая 2024 г., когда после целой серии солнечных вспышек рентгеновского класса X, на орбите Земли наблюдались значительные изменения космической погоды и, как следствие, разного рода ее геофизические проявления. В частности, прохождение сильной межпланетной ударной волны 10 мая 2024 г. вызвало на Земле мощную геомагнитную бурю, характеризующуюся минимальным значением $Dst = -412$ нТл, и большой более 10 % эффект Форбуша. Кроме того, 11 мая мировой сетью станций нейтронных мониторов было зарегистрировано наземное возрастание космических лучей, известное как GLE74.

В этой работе изучается динамика турбулентной составляющей ММП от спокойного периода 7 мая 2024 г. до момента прихода межпланетной ударной волны во второй половине 10 мая 2024 г. Для достижения поставленной цели к анализу привлечены 1-минутные данные прямых измерений параметров межпланетной среды на космических аппаратах ACE, DSCOVR и WIND. При помощи методов спектрального анализа изучается эволюция спектров мощности модуля ММП и МГД-волн на инерционном участке спектра турбулентности солнечного ветра (СВ) на частотах $3 \cdot 10^{-4} - 8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц. Определен вклад альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн в наблюдаемый спектр мощности модуля ММП, измеряемого на каждом из 3-х космических аппаратов, и установлены спектры мощности МГД-волн этих типов. Показано, что мощность спектров флуктуаций модуля ММП и МГД-волн более чем на порядок величины возрастает по мере приближения ударной волны в точку ее регистрации на космических аппаратах. Сделан вывод, что это является следствием генерации МГД-волн потоками штормовых частиц - космических лучей с энергиями порядка 1 МэВ, наблюдающихся в области перед фронтом межпланетной ударной волны. На основе анализа совокупности всех данных измерений параметров ММП и СВ сделано предположение, что увеличение уровня турбулентности ММП приводит к изменению направления среднего ММП перед фронтом ударной волны, которая зарегистрирована на всех трех КА, достаточно близко расположенных относительно друг друга вблизи точки либрации L1.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН FWRS-2021-0012.

Романов К.В., Романов Д.В., Романов В.А.,
Степанов Е.А., Лебедев А.А., Маскаев В.А..

Аномальный разогрев верхних слоев хромосферы и нижней короны медленными МГД-ударными волнами

В верхних слоях хромосферы из-за роста температуры и падения плотности газа нелинейно растет электрическая проводимость солнечной плазмы. В этих условиях при наличии даже слабых магнитных полей разогрев солнечной атмосферы осуществляется диссипацией энергии магнитогазодинамических ударных волн. В настоящей работе исследуются вопросы генерации и распространения различных типов МГД-ударных волн в солнечной хромосфере и нижней короне. Изучается влияние пространственной структуры магнитного поля на реализацию различных типов магнитогазодинамических ударных волн, определяется их вклад в аномальный разогрев нижних слоев солнечной атмосферы.

Для решения поставленной задачи выписаны соотношения на поверхности разрыва МГД-ударных волн в общем виде. Полученная система уравнений обезразмеривается и методом исключения переменных приводится к кубическому уравнению расчета МГД-параметров в стандартной постановке задачи об ударной волне: заданы МГД-параметры газа перед фронтом ударной волны и при заданной скорости ударной волны рассчитываются МГД-параметры газа за фронтом ударной волны. Решение кубического уравнения производится по формулам Кардано. Исследуется общая структура допустимых решений. Переход МГД-ударных волн в звуковые реализуется на скоростях быстрого и медленного магнитного звука. Третьей и последней выделенной точкой в диапазоне скоростей ударной волны является альфвеновская скорость. В итоге определяются 4 зоны генерации МГД-ударных волн в зависимости от скорости ударной волны.

В отличие от обычных газодинамических ударных волн генерация магнитогазодинамических ударных волн возможна в двух скоростных диапазонах. Дополнительный диапазон генерации ударных волн расположен между скоростью медленного магнитного звука и альфвеновской скоростью. Замечательная особенность ударных волн в этом диапазоне состоит в том, что все они дозвуковые. Медленные магнитозвуковые ударные волны генерируются раньше обычных газодинамических ударных волн и вносят существенный вклад в разогрев нижних слоев солнечной атмосферы в присутствии магнитных полей с малой напряженностью.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СИСТЕМЕ МАГНИТОСФЕРА -ИОНОСФЕРА КОМПРЕССИОННЫХ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ, ПРОНИКАЮЩИХ ИЗ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ, ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Моисеев А.В., Попов В.И., Мишин В.В., Пенских Ю.В.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, moiseev@ikfia.ysn.ru

Изучены свойства P₁₃ пульсаций с периодом около 30 мин в системе магнитосфера-ионосфера. По данным наземных магнитных станций, находившихся в предполуденном секторе магнитосферы, выявлено распространение пульсаций по азимуту с дневной на ночную сторону со скоростью 5-20 км/с, амплитуда была максимальной в полосе широт 69-73° и быстро спадала с широтой. Вдоль меридиана сигнал распространялся к полюсу со скоростью 1-10 км/с. Анализ спектров сигнала на станциях, расположенных вдоль разных меридианов позволил выявить два максимума, соответствующие периодам: 1900 с (неизменный) и в полосе 1050 -1400 с, зависящий от долготы меридиана наблюдения. Установлено, что первый из них совпадает с частотой осцилляций V_z ММП и динамического давления P_d в солнечном ветре, а второй, более короткопериодный, ассоциируется с ночным магнитосферным резонатором. Эквивалентная токовая система (ЭТС) пульсаций изучалась двумя способами: методом сферических гармоник и техникой инверсии магнитограмм. Анализ ЭТС полученных обоими методами, показал их хорошее согласие. ЭТС пульсаций в дополуденном секторе представляла собой большой вихрь, состоящий из более мелких вихрей, которые распространялись в ионосфере, вдоль линии раздела вода-суша, т.е. преобладало распространение по меридиану к полюсу со скоростями близкими по величине скоростям распространения пульсаций. Обнаружено также, что магнитная широта западной электроструи, являющейся низкоширотной частью большого холловского вихря, расположенной на геомагнитных широтах 65-80°, примерно соответствует широтам, на которых наблюдаются резонансы силовых линий. Резонансная широта уменьшается в направлении более ранних часов MLT. ЭТС пульсаций соответствовала токовой системе DP2 с преобладающей западной электроструей в дополуденном и ночном секторе. Токовая система была локализована на высоких широтах, так, что западная электроструя затекала и за пределы области 2 продольных токов в ночном секторе. Анализ спутниковых данных показал следующее. В солнечном ветре (СВ) пульсации распространялись со скоростью 200-300 км/с, что значительно ниже скорости движения среды, достигавшей 500 км/с. В магнитосфере пульсации с преобладающей компрессионной компонентой распространялись с дневной на ночную сторону со скоростью ~ несколько сотен км/с, однако задержки в наступлении максимумов дифференциальных потоков энергичных электронов, свидетельствуют о противоположном распространении с ночной на дневную сторону со скоростью 50-150 км/с. На вклад суббуревых инъекций частиц в колебания также указывает преобладающая полюидальная компонента на спутнике, расположенном в утреннем секторе.

Пульсации в данном событии были обусловлены как внешним (колебаниями в солнечном ветре), так и внутренним источниками (магнитосферным резонатором, который мог быть возбужден в том числе и суббурей). Динамика «тонкой структуры» большого вихря – малых вихрей, в магнитосфере в целом совпадает по скорости и направлению распространения с геомагнитными пульсациями.

Спутниковые и наземные наблюдения P_{с1} пульсаций: новые результаты и новые вопросы

Д.Д. Позднякова¹, В.А. Пилипенко¹, М. Носэ², С.Ю. Хомутов³, Д.Ю.Баишев⁴

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

² Нагойский университет, Нагоя, Япония

³ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Россия

⁴ Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

Электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны в диапазоне геомагнитных пульсаций P_{с1} (от долей Гц до первых Гц) имеют особое значение для космической физики, т. к. они могут приводить к высыпанию релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу и таким образом снижать уровень потоков электронов-«убийц». Принципиальные вопросы о физической природе и механизме генерации ЭМИЦ волн установлены, но ряд особенностей их возбуждения и распространения остаются невыясненными. Проанализированы ЭМИЦ колебания на восстановительной фазе магнитной бури 25 марта 2023 г., зарегистрированные как на сети наземных станций на Дальнем Востоке, так и на низкоорбитальных спутниках SWARM. Мы проследили распространение P_{с1} волн через ионосферу и вдоль земной поверхности. В то время как на наземных станциях наблюдалось длительное (~ 1 часа) узкополосное излучение, на спутниках были зарегистрированы только короткие всплески поперечных колебаний с длительностью ~10 с. Оценка когерентности сигналов между двумя близкими спутниками дает величину поперечного масштаба волнового пакета в ионосфере ~90 км. Большая длительность излучения на наземных станциях обусловлена волноводным распространением сигналов вдоль ионосферы, в результате чего станция «собирает» сигналы из большой магнитосферной области. Кросс-спектральный анализ данных близких спутников показал, что фазовый фронт P_{с1} волн в верхней ионосфере сильно отклоняется от продольного распространения. Вопрос о том, чем определяется поперечный масштаб ЭМИЦ волн в магнитосфере, остается открытым. Нам представляется, что ЭМИЦ неустойчивость протонов кольцевого тока работает не как конвективный усилитель многократно осциллирующих волновых пакетов, а как абсолютная неустойчивость - генератор волновых всплесков. При этом ЭМИЦ неустойчивость развивается в виде локализованных и непродолжительных всплесков, но механизм такого режима остается невыясненным. Работа поддержана грантом РФФ №24-77-10012.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ «ИОНОСФЕРА-М» №1 И №2

Пулинец С.А., Цыбуля К.Г., Данилов И.С.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pulse@cosmos.ru

В рамках создания спутниковой системы для мониторинга космической погоды Ионозонд-2025 на 4-х спутниках «Ионосфера-М» установлены ионозонды вертикального зондирования ионосферы ЛАЭРТ [1]. ЛАЭРТ может работать в двух режимах: пассивном как ВЧ радиоспектрометр, и в активном режиме импульсного зондирования. В процессе формирования антиподной конфигурации орбиты первых двух спутников «Ионосфера-М», запущенных 5 ноября 2024 г. ионозонд ЛАЭРТ включался только в пассивном режиме, что позволило за короткий промежуток времени собрать основную информацию о типах электромагнитных излучений, регистрируемых в частотном диапазоне 0.1 – 20 МГц, в том числе о плазменных волнах, возбуждаемых, в основном, потоками энергичных частиц.

В предыдущих экспериментах, когда впервые проводился глобальный мониторинг ВЧ излучений во внешней ионосфере, было показано, что с помощью таких измерений можно проводить диагностику ионосферы как на высоте орбиты спутника, так и проводить оценку электронной концентрации в максимуме слоя F2 по огибающей электромагнитных шумов, проникающих во внешнюю ионосферу на частотах, превышающих критическую частоту [2].

Особый интерес представляет низкочастотное излучением в свистовом диапазоне $f < f_{he}$. Оно регулярно регистрируется в области аврорального овала и полярного каспа, что дает возможность проводить диагностику положения и широтного размера аврорального овала, а также его динамики во время геомагнитных бурь и интенсивности потоков высыпавшихся частиц. Излучение от потоков высыпавшихся частиц имеет вторую моду в диапазоне между плазменной и верхнегибридной частотами $f_p \leq f \leq f_{uh}$.

ЛАЭРТ позволяет не только регистрировать форму излучения вдоль орбиты, но и измерять его спектр. Оказалось, что спектры излучения в свистовом диапазоне аналогичны тем, что регистрировались 50 лет назад в проекте АРАКС при инъекции электронного пучка в ионосферу с максимумом на частоте 150 кГц. [3].

Следует отметить, что спектр излучения в каспе имеет другой характер, чем в авроральном овале: он симметричный и его максимум находится на частоте ~ 0.35 МГц.

Помимо интересных, но все-таки ожидаемых результатов, было обнаружено явление, которое можно интерпретировать как абсолютно новый эффект, ранее не описывавшийся в научной литературе. Это острый максимум электронной концентрации пирамидальной формы, регулярно регистрируемый вблизи Южного полюса в дневной ионосфере. Удивляет не только его форма, но и амплитуда. Верхняя гибридная частота достигает величин того же порядка, что и в области экваториальной аномалии. Этот эффект пока ждет своего объяснения.

К числу неожиданных результатов следует отнести также зарегистрированный всплеск излучения на высоких частотах (14-19 МГц), который можно отнести к разряду всплесков солнечного радиоизлучения III типа.

1. Пулинец С., Закутняя О., Градусник космической погоды. Российские спутники возобновляют изучение ионосферы, Русский космос, август 2022, с. 40-43
2. Pulinets S.A., Kiraga A., Klos Z., Ionospheric mapping using satellite data of natural HF noise, Adv. Space Res. 10, No 8, p.(8)71- (8)74, 1990.
3. Пулинец С.А. Экспериментальное исследование волновых процессов при искусственной инъекции электронов в ионосферу и магнитосферу Земли (эксперимент АРАКС). Диссертация на соискание ученой степени кфмн. Москва, ИЗМИРАН, 1980, 216 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ АРКЕ

Викторов М.Е., Елясин А.А., Маринин Н.М., Мансфельд Д.А., Коржиманов А.В., Корягин С.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mikhail.viktorov@ipfran.ru

Лабораторное исследование взаимодействия сверхзвуковых потоков высокоионизованной плазмы с магнитными полями арочной конфигурации важно для понимания физических механизмов ряда явлений в космической плазме, прежде всего наблюдаемых во внутренних областях корональных петель на Солнце, где происходит ускорение заряженных частиц и генерация ими нетеплового электромагнитного излучения. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований на компактной лабораторной установке «Солнечный ветер» [1], в которой достигается бесстолкновительный режим удержания плазмы, типичный для космических условий. Исследуются процессы при столкновении двух сверхзвуковых потоков плазмы, инжектируемых вдоль силовых линий магнитной арки от ее подножий в противоположных направлениях. Потоки плазмы создаются двумя плазменными генераторами, которые испаряют материал металлического катода в результате вакуумно-дугового разряда. При взаимодействии потоков плазмы регистрируется нетепловое микроволновое излучение плазмы в электронно-циклотронном диапазоне частот, частота которого в точности соответствует напряженности магнитного поля в вершине магнитной арки. В работе представлены результаты экспериментального исследования столкновения двух потоков плазмы в магнитной арке в широком диапазоне параметров эксперимента. С использованием теоретических оценок и численного моделирования обсуждаются возможные механизмы, которые могут привести к образованию неізотропной фракции электронов при столкновении потоков плазмы, ответственной за возбуждение электромагнитного излучения плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00317).

[1] M. Viktorov, S. Golubev, and A. Vodopyanov, Plasma Phys. Control. Fusion, 035001 (2019).

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН ВБЛИЗИ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

Галка А.Г., Малышев М.С., Костров А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, galasnn@ipfran.ru

Работа посвящена лабораторному исследованию особенностей распространения высокочастотных волн в однородной магнитоактивной плазме и при наличии вытянутого вдоль магнитного поля дакта плотности. Параметры эксперимента соответствовали условиям распространения аврорального километрового излучения (АКР). АКР на частотах от десятков до сотен килогерц вблизи электронного циклотронного резонанса генерируется высыпавшимися электронами в нижней части полярной магнитосферы с пониженной концентрацией плазмы. Мощное излучение распространяется от Земли и регистрируется спутниками на высоте несколько тысяч километров в узком угловом конусе, ориентированном вдоль магнитного поля, преимущественно в виде быстрой необыкновенной волны. Вопрос о транспортировке километрового излучения на большие расстояния до сих пор остается открытым.

В работе экспериментально исследуются эффекты каналирования электромагнитных волн вблизи электронной циклотронной частоты в плазменных дактах с пониженной плотностью. Эксперименты проводились на установке Ионосфера, позволяющей воспроизводить по параметрам подобия физические явления в околоземной плазме и исследовать особенности распространения пробных электромагнитных волн в широком диапазоне значений частоты волны, концентрации зараженных частиц и внешнего магнитного поля. Установка оснащена диагностическими зондами для контроля параметров плазмы и измерения электромагнитных полей. Плазма во внешнем однородном и стационарном магнитном поле создавалась высокочастотным индукционным разрядом в атмосфере аргона и распадалась с характерным временем несколько миллисекунд. Цилиндрический дакт с пониженной плотностью формировался в результате рекомбинации плазмы на диэлектрическом стержне. Относительное изменение концентрации плазмы в канале составляло 0.1 от фонового значения.

В результате измерений пространственной структуры полей показано, что в однородной плазме без дакта вблизи электронного циклотронного резонанса поток энергии излучающей антенны направлен поперек магнитного поля. Установлено, что в верхнегибридном диапазоне частот эффективно возбуждается квазистатическая замедленная волна (Z-мода) резонансного конуса с углом раствора от нуля до 90 градусов. Вблизи верхнегибридного резонанса наблюдалось слабое излучение вдоль магнитных силовых линий.

Установлено, что дакт каналирует высокочастотные волны, излучаемые антенной внутри канала. Наиболее эффективно каналируются быстрые волны с показателем преломления плазмы меньше единицы. При этом резонансный конус не формируется за пределами плазменной неоднородности, и поле замедленной волны сосредоточено внутри канала на незначительном расстоянии от источника по сравнению с полем быстрой волны. Плазменный дакт для быстрых волн является аналогом диэлектрического волновода для электромагнитной волны, основное поле которой сосредоточено внутри направляющей структуры. Диэлектрический волновод не имеет поперечного критического размера для фундаментальной моды. Таким образом, плазменный дакт является эффективным каналом переноса АКР в широком диапазоне частот вдоль магнитного поля от области генерации к спутнику.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 24-12-00459).

САМОСОГЛАСОВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

Лужковский А. А., Шкляр Д. Р.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, luzartyom@yandex.ru

В работе проводится исследование резонансного взаимодействия заряженных частиц с ленгмюровскими волнами в условиях пространственной неоднородности плазмы. Поиск самосогласованного решения системы уравнений Власова-Пуассона, описывающей это взаимодействие, является предметом множественных исследований. В научной литературе широко используются два различных подхода к решению данной системы уравнений. Метод частиц в ячейках основывается на отслеживании траекторий отдельных макрочастиц в самосогласованном электромагнитном поле. Этот подход требует относительно небольших вычислительных ресурсов и применим к многомерным задачам, но из-за ограниченного числа макрочастиц приводит к росту численного шума. Для подавления тепловых численных флуктуаций часто применяется иной подход, в котором напрямую решается кинетическое уравнение Власова и определяется временная эволюция функций распределения частиц в фазовом пространстве. В большинстве известных нам программ, которые предназначены для численного решения системы уравнений Власова-Пуассона, плазма предполагается однородной. Главной особенностью нашего рассмотрения является учет пространственной неоднородности плазмы, задаваемой в системе с помощью внешней потенциальной силы.

Поиск самосогласованного решения системы уравнений, состоящей из кинетического уравнения Власова и закона Ампера-Максвелла, был выполнен с помощью компьютерного моделирования в рамках двухкомпонентной модели плазмы. Плотная «холодная» компонента плазмы, определяющая дисперсионные свойства среды, не участвует в резонансном взаимодействии с волной. Линейный ток, соответствующий этой компоненте, можно объединить с электрическим полем в электрическую индукцию с помощью локального тензора диэлектрической проницаемости. При таком подходе компьютерное моделирование, связанное с подавляющим большинством холодных электронов, не проводится. Вторая «энергичная» компонента участвует в резонансных взаимодействиях с волной и, таким образом, отвечает за рост или затухание волны. Эволюция функции распределения энергичных частиц в поле ленгмюровской волны определяется решением кинетического уравнения Власова с использованием схемы Рунге-Кутты 4-го порядка по времени. Электрическое поле волны на каждом временном шаге рассчитывается путем численного интегрирования закона Ампера-Максвелла.

В нашем исследовании мы рассматриваем два типа невозмущенных функций распределения для энергичных частиц. Мы используем распределение Больцмана для анализа затухания Ландау и пучковое распределение для изучения механизмов возбуждения, а также самосогласованной эволюции ленгмюровского спектра. В нашем анализе мы исследуем случаи, включающие либо одну волну, либо широкий спектр волн в качестве начального возмущения электрического поля.

ИОННО-ЗВУКОВЫЕ СОЛИТОНЫ РАЗРЕЖЕНИЯ: ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА И ВОЗМУЩЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

Трухачев Ф.М., Герасименко Н.В., Васильев М.М., Петров О.Ф.

ОИВТ РАН, г.Москва, Белорусско-Российский Университет, г. Могилев; ftru@mail.ru

Явления переноса заряженных частиц и возмущения плазменных функций распределения ионно-звуковыми солитонами сжатия исследовались в работах [1-6]. Было показано, что солитоны сжатия переносят заряженные частицы на несколько дебаевских радиусов в направлении своего движения. Кроме того, в окрестности солитона изначально равновесные функции распределения приобретают форму характерную для плазмы, содержащей пучок частиц (beam-like форму). В предлагаемой работе указанные результаты обобщены на случай ионно-звуковых солитонов разрежения. В качестве базовой выбрана двухэлектронная модель плазмы с холодными ионами [7,8]. Результаты получены в рамках метода псевдопотенциала Сагдеева и эргодической гипотезы. Получена точная формула для ионных функций распределения по скоростям $f_v(v_i)$ и по энергиям $f_w(W_i)$ в окрестности солитонов сжатия и разрежения, показано, что солитоны разрежения перемещают ионы в направлении противоположном направлению движения волны на несколько λ_D .

$$f_v(v_i) = \frac{\sqrt{2} \cdot T^{-1}}{\sqrt{a \left[\mu \left(e^{\frac{Mv_i - 0.5v_i^2}{a}} - 1 \right) + \frac{\nu}{\beta} \left(e^{\frac{Mv_i - 0.5v_i^2}{a}} - 1 \right) \right] - Mv_i}}; f_w(W_i) = \frac{1}{T \cdot \sqrt{W_i} \sqrt{a \left[\mu \left(e^{\frac{\pm M\sqrt{2W_i} + W_i}{a}} - 1 \right) + \frac{\nu}{\beta} \left(e^{\frac{\pm M\sqrt{2W_i} + W_i}{a}} - 1 \right) \right] \pm \sqrt{2W_i} M}}$$

Здесь $a=(\mu+\nu\beta)$, β – отношение температур холодных и горячих электронов, μ , ν – массовые доли горячих и холодных электронов, M – число Маха, T – постоянная нормировки функций распределения, "+" соответствует солитонам сжатия, "-" – солитонам разрежения.

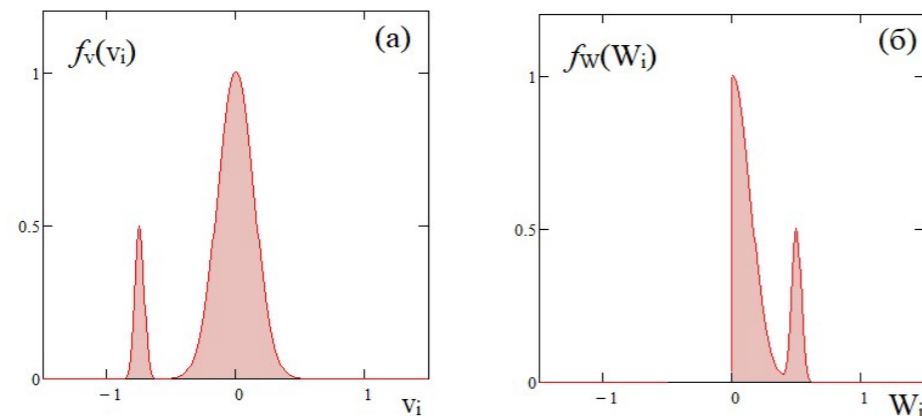


Рис.1 Характерный вид ионных функций распределения по скоростям (а) и по энергиям (б) в окрестности ионно-звукового солитона разрежения.

1. Dubinov A.E., Lebedeva X.I. // *Chaos, Solitons & Fractals* 2021. V. **152**. P. 111391.
2. Алешин И.М., Перегудов Д.В. // *Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2000. № 1. С. 8-11.
3. Trukhachev F.M. et.al.// *Phys. of Plasmas* 2023. V. **30**. P. 022113.
4. Trukhachev F.M. et.al. // *Phys. of Plasmas* 2023. V. **30**. P. 112302.
5. Кузнецов С.В. // *Вестник объединенного института высоких температур*. 2024. V.**13**. P.4.
6. Трухачев Ф.М. и др. // *ТВТ*. 2024. Т. **62**(5). С. 661.
7. Ghosh S.S., Ghosh K.K., Sekar Lyender A.N. // *Phys. Plasmas*. 1996. V. **3**. P. 3939.
8. Трухачев Ф.М., Васильев М.М., Петров О.Ф. Анализ электрических токов в окрестности ионно-звуковых солитонов разрежения в трехкомпонентной плазме // *ТВТ*. 2024. Т. **62**(6) (в печати).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТОЗВУКОВЫХ СОЛИТОНОВ С ПЛАЗМОЙ

Герасименко Н.В., Трухачев Ф.М.

Белорусско-Российский университет, г. Могилев, ОИВТ РАН, г.Москва; ngrsmk@gmail.com

Способность нелинейных волн переносить вещество в направлении своего движения было впервые предсказана в 1847 г. Дж. Стоксом. Предсказанное явление было названо «дрейф Стокса», и впоследствии наиболее активно исследовалось в области физики океана и вод суши как один из наиболее значимых механизмов переноса загрязнений, например, пластика [1].

Как было показано в работах [2,3], в плазме существует принципиально отличный механизм переноса вещества в направлении распространения волны. В отличие от дрейфа Стокса, где скорость дрейфа (а также перемещение вещества за единицу времени) пропорциональна квадрату амплитуда волны ($v_s \sim A^2$), нелинейные волны (солитоны) перемещают заряженные частицы в направлении распространения волны на расстояние, пропорциональное квадратному корню амплитуды ($v_s \sim \sqrt{A}$). По этой причине данным явлением нельзя пренебрегать даже в случае волн малых амплитуд. Механизм переноса вещества хорошо изучен для ионно-звуковых звуковых солитонов в отсутствие магнитного поля, однако для возможных приложений данной теории (космическая плазма, удержание плазмы в токамаках и др.) присутствие магнитного поля играет ключевую роль. Это задача в настоящее время недостаточно хорошо изучена и представлена малым количеством публикаций.

Основные результаты представленной работы получены на основе математической модели, описывающей установившиеся магнито-звуковые волны конечной амплитуды, распространяющиеся поперек магнитного поля, впервые предложенной в работе [4] А.А. Веденовым, Е.П. Велиховым и Р.З. Сагдеевым. На основе данной модели рассчитаны ортогональные магнитному полю компоненты скорости частицы, движущиеся под действием силы Лоренца в присутствии магнито-звукового солитона. Установлено, что взаимодействие ионов с магнитным полем солитона может вызывать их колебания, что, в свою очередь, влияет на динамику плазмы в целом, а также на механизм переноса. Существенную роль при этом играет как электронная, так и ионная популяции. Магнито-звуковые солитоны также могут вызывать асимметричное распределение частиц, что приводит к возникновению электрического поля, которое дополнительно усиливает перенос заряда.

Дальнейшие исследования будут направлены на получение асимптотических зависимостей и выражение дистанции переноса частиц как функции амплитуды волны.

1. Onink, V., Wichmann, D., Delandmeter, P., & van Seville, E. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(3), P. 1474-1490.
2. Trukhachev F.M., Gerasimenko N.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. // *Phys. of Plasmas* 2023. V. **30**. P. 022113.
3. Trukhachev F.M., Gerasimenko N.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. // *Phys. of Plasmas* 2023. V. **30**. P. 112302.
4. Vedenov A.A., Velikhov E.P., Sagdeev R.Z. // *Nuclear Fusion* 2023. V. 1 (82). P. 82-100.

РЕФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УДАЛЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Лукьянцев Д. С., Афанасьев Н. Т., Танаев А. Б.

ИГУ, г. Иркутск, Россия, cmefo1997@mail.ru

Учет рефракции электромагнитного излучения дискретных космических источников исключительно важен для правильной интерпретации данных астрофизических экспериментов [1]. Это связано с тем, что анализируя измеренные рефракционные характеристики принятого излучения источника с известными характеристиками, относительно просто можно определить параметры неоднородностей космической плазмы. С другой стороны, имеющиеся априорные сведения о неоднородной структуре космической среды и данные измерений рефракционных характеристик принятых сигналов позволяют исследовать механизмы генерации и статистику источников излучения. Дополнительные трудности при интерпретации данных астрофизических экспериментов возникают вследствие влияния окружающих полей тяготения. В частности, транспорт излучения в окрестности массивных астрофизических объектов может сопровождаться рядом таких значимых эффектов как гравитационное линзирование, фокусировка потока излучения, изменение наблюдаемого спектра и др. [2]. В то же время измеренные рефракционные характеристики и структурные особенности излучения, прошедшего поля тяготения, содержат уникальную информацию о природе скрытых объектов, невидимых в электромагнитном диапазоне, но проявляющих себя через гравитационное взаимодействие. Для детального восстановления возмущающих гравитационных потенциалов скрытых объектов по характеристикам принятого излучения необходимо учитывать не только маскирующее действие космической плазмы, но и присутствие в окружающем пространстве областей стохастических неоднородностей полей тяготения, поскольку последние также могут приводить к частичному замыканию гравитационных эффектов детерминированных массивных объектов.

В настоящем докладе предложен метод численно-аналитического моделирования статистических характеристик направления распространения и групповой задержки сигналов дискретных космических источников при просвечивании группы массивных астрофизических объектов в присутствии плазменных неоднородностей и гравитационного шума. Основу метода составляет решение стохастических дифференциальных уравнений Лагранжа-Эйлера, полученных из вариационного принципа Ферма. Влияние гравитации учтено посредством введения эффективного показателя преломления вакуума, выраженного через гравитационный потенциал. Результаты моделирования показали, что под воздействием многокомпонентного флуктуирующего гравитационного поля происходит сепарация электромагнитного излучения в картинной плоскости наблюдателя. Сепарация излучения выявлена и при моделировании стохастического эффекта Шапира [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (тема госзаданий FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005).

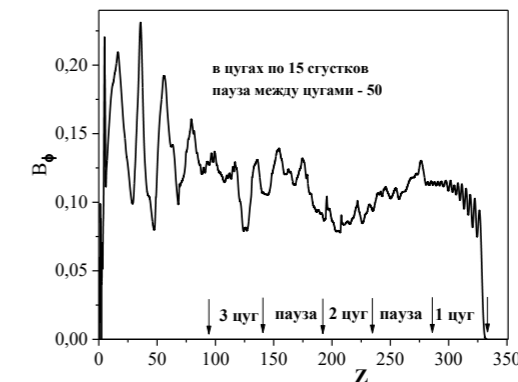
1. Многоканальная астрономия / Ред.-сост. А. М. Черепашук. – Фрязино : Век 2, 2019. – 528 с.
2. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. Т.1. – М. : Мир, 1977. – 480 с.
3. Shapiro I. I. New method for the detection of light deflection by solar gravity // Science. – 1967. – V. 157. – P. 806–808.

Резонанс цугов сгустков лазерной плазмы, расширяющихся с до-Альфвеновской скоростью

В.Н. Тищенко, А.Г. Березуцкий, И.Б. Мирошниченко, С.С. Шарипов,
И.Ф. Шайхисламов
tvn.25@yandex.ru

В ИЛФ СО РАН предложен и развивается новый метод генерации интенсивных потоков и МГД волн сгустками лазерной плазмы в замагниченной плазме (далее – фон). При резонансе сгустков с фоном более 80 % энергии закачиваются в узкую магнитную силовую трубку с возможностью управления типом генерируемых волн: альфвеновская, медленная магнитозвуковая, вистлеры и струя.

В 2024 году с использованием расчётов на суперкомпьютерах исследовались волны, создаваемые цугами сгустков при низких скоростях разлета $M_A \ll 1$. Впервые установлено, что при $M_A \sim 0.2$ альфвеновская волна содержит ~50 % энергии с протяженным “хвостом” после прекращения действия сгустков. В виде потока плазмы содержится еще ~35 %. Выявлен новый значимый эффект: последовательность нескольких цугов, каждый из которых содержит ~5–15 сгустков, формирует волновой пакет большой протяженности. Ожидается, что эффект может представлять интерес для лазерно-плазменных технологий, а также в астрофизике.



Относительная амплитуда волны в альфвеновском пакете, создаваемым тремя цугами сгустков при $M_A \sim 0.2$.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0243-2021-0003 при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-22-00106), расчёты проведены на МСЦ РАН

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОФИЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛОСКИХ ГАЛАКТИК МЕТОДОМ КОНЕЧНОМЕРНОГО ФАРАДЕЕВСКОГО СИНТЕЗА

Чумарина Д.А.¹, Юшков Е.В.^{1,2}, Соколов Д.Д.¹

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Кафедра математики, Москва, Россия, konovalova.da21@physics.msu.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Идея использования поляризации синхротронного излучения релятивистских электронов для реконструкции астрофизических магнитных полей была предложена в 60-ых годах прошлого века. В основе этой идеи лежал всем известный эффект поворота плоскости поляризации света при распространении в магнитоактивной среде – эффект Фарадея. Однако одним из первых мост между идеей и ее практической реализацией прокинул Виталий Лазаревич Гинзбург в своей работе 1965 года. В настоящие же дни эта идея успешно реализована посредством многочисленных радионаблюдений синхротронного излучения галактик, туманностей и джетов, и наряду с эффектом Зеемана является одним из основных источников наших знаний о магнитных полях в далеком космосе [1].

Если говорить кратко, то обратная задача реконструкции магнитного поля по поляризации радиоизлучения в целом похожа на задачу “экрана Фарадея”, отличие заключается в том, что каждая область магнитоактивной среды, например галактики, расположенная вдоль луча наблюдения, не только отвечает за поворот плоскости поляризации, но при этом сама является источником такого излучения. Для плоской ‘галактики’ с однородным магнитным полем, эта задача реконструкции была решена в 1966 году Берном, а полученные им формулы для степени и угла поляризации в зависимости от длины волны излучения известны сейчас как формулы Берна [2].

В рамках доклада мы развиваем результат полученный Берном для плоских галактик с непостоянным профилем магнитного поля, и показываем как, используя понятие фарадеевской глубины, можно получить асимптотическую оценку профиля магнитного поля по данным о поляризации синхротронного излучения. Такой подход носит в литературе название фарадеевского синтеза [3]. Отличие предлагаемой нами методики от классической заключается в том, что мы предполагаем четность профиля магнитного поля относительно центра слоя. Это предположение позволяет использовать ряд Фурье вместо интеграла, а также исключить проблему связанную с отрицательными значениями квадрата длины волны. Мы демонстрируем работу метода на модельных данных, обсуждая влияние на погрешность реконструкции используемых в радиотелескопах длины волн, измерительные погрешности и флуктуационные отклонения профиля среднего магнитного поля от четной квадрупольной структуры [4].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ номер 23-11-000-69.

1. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. // Успехи физических наук. 1965.
2. Burn B.F. // Mon. Not R. astr. Soc. 1966.
3. Frick, P., Sokoloff, D., Stepanov, R., & Beck, R. // Mon. Not R. astr. Soc. 2011.
4. Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. // 2006. 384 с.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ С СУЩЕСТВЕННОЙ ЧАСТОТНОЙ ДИНАМИКОЙ ВНУТРИ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Беспалов П.А.¹, Савина О.Н.²

¹ ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@ipfran.ru

² НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены несколько базовых моделей частотного дрейфа в квазипериодических ОНЧ излучениях с периодами повторения спектральных форм от 30 до 300 с. Во всех случаях речь идет о циклотронной неустойчивости электронных радиационных поясов, которая хорошо описывается в рамках теории плазменного магнитосферного мазера, основанной на усредненной самосогласованной системе квазилинейных уравнений для волн и частиц. Не очень четкие спектральные элементы обычно с возрастающими частотами характерны для QR 1 всплесков, представляющих собой шипения с резонансной модуляцией геомагнитными пульсациями диапазона Pc 3-4. Анализ общей задачи о равновесии в радиационных поясах показывает возможность его неустойчивости, которая обусловлена отличием питч-угловых зависимостей мощности источника частиц и стационарной функции распределения. В нелинейном режиме указанной неустойчивости формируются QR 2 излучения часто с четким возрастанием частот в отдельных спектральных формах. Существенный интерес и хорошие перспективы дальнейшего изучения имеют QR 2 излучения, в которых есть два временных масштаба, меньший из которых обусловлен эффектами волноводного распространения свистовых волн между точками отражения в условиях компенсации дисперсионного искажения сигналов эффектами квазилинейного взаимодействия волн и частиц. Изучение важных деталей возбуждения квазипериодических излучений со значительным частотным дрейфом с одной стороны сохраняет интересные перспективы для дальнейших исследований, а с другой стороны уже достигнутый уровень понимания магнитосферных процессов имеет важный диагностический потенциал.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 25-22-00237.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОРОВЫХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Демехов А.Г.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

В работах [1-2] предложена самосогласованная нелинейная система уравнений, основанная на модели режима лампы обратной волны (ЛОВ) в магнитосферном циклотронном мазере [3]. Ранее в статье [4] на примере события, зарегистрированного спутником THEMIS-D 06.12.2008, было показано, что с использованием этой модели удается получить в расчетах параметры хоровых ОНЧ излучений, соответствующие наблюдениям. В данной работе обсуждаются результаты численного моделирования для параметров плазмы и магнитного поля, соответствующих результатам измерений на спутниках Van Allen Probes в области генерации хоровых излучений. Показана возможность непротиворечиво воспроизвести в рамках моделирования такие параметры хоровых излучений как скорость нарастания и характерную величину амплитуды, скорость дрейфа частоты и характерный интервал между хоровыми элементами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-12-00457.

Литература

[1] Демехов А. Г., Трахтенгерц В. Ю. О динамике магнитосферного циклотронного КНЧ-ОНЧ мазера в режиме лампы обратной волны. I. Исходные уравнения и результаты в приближении однородного магнитного поля // Изв. вузов — Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 719–729.

[2] Демехов А. Г., Трахтенгерц В. Ю. О динамике магнитосферного циклотронного КНЧ-ОНЧ мазера в режиме лампы обратной волны. II. Влияние неоднородности магнитного поля // Изв. вузов — Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 977–987.

[3] Trakhtengerts V. Y. Magnetosphere cyclotron maser: Backward wave oscillator generation regime. *Journal of Geophysical Research*. 1995. V.100, No.9. P.17205–17210. <https://doi.org/10.1029/95JA00843>

[4] Demekhov A. G., Taubenschuss U., Santolík O. Simulation of VLF chorus emissions in the magnetosphere and comparison with THEMIS spacecraft data // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. V.122, No.1. P. 166–184. <https://doi.org/10.1002/2016JA023057>

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНОЙ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА СВИСТОВЫХ ВОЛН НА УСКОРЕНИЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Грач В.С.¹, Демехов А.Г.^{1,2}

¹ ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@ipfran.ru

² ПГИ, г. Апатиты, Россия

В работе рассматривается резонансное взаимодействие энергичных электронов пакетом свистовых волн. Параметры волнового пакета основаны на данных спутника Cluster; рассматривается 4 варианта пакета: модельный пакет с гауссовым профилем амплитуды и линейным частотным профилем, пакет с амплитудным профилем, основанным на спутниковых данных (учет амплитудной модуляции), пакет с частотным профилем, основанным на спутниковых данных (учет частотной модуляции) и «реальный» пакет (учет обоих видов модуляции). Для большого числа значений начальных параметров электронов и положения волнового пакета методом пробных частиц рассчитаны изменение экваториального питч-угла и энергии в результате взаимодействия за однократный пролет каждой частицы через пакет.

Показано, что частотная и амплитудная модуляции схожим образом влияют на характеристики взаимодействия. Наличие модуляции (амплитудной и/или частотной) заметно повышает вероятность захвата частиц полем волны (для определенных начальных параметров электронов), но при этом максимальный набор энергии частицей уменьшается. В зависимости от начального положения пакета, это уменьшение может быть как незначительным (на 5-10 %), так и существенным (в 2-3 раза).

Получена зависимость характеристик взаимодействия от начального положения пакета. Показано, что максимальный относительный набор энергии соответствует случаю, когда в начальный момент времени середина пакета расположена на экваторе. Начальная энергия электронов, которой соответствует максимальное относительное ускорение, увеличивается с удалением пакета от экватора.

Показано, что в результате рассмотренного взаимодействия электроны с энергиями 20-80 кэВ могут высыпаться в конус потерь. При этом характеристики высыпавшихся частиц слабо зависят от наличия амплитудной и частотной модуляции волнового пакета.

ГЛОБАЛЬНЫЙ ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Французов В.А., Артемьев А.В., Петрукович А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, vafrantsuzov@yandex.ru

Увеличение объема и качества спутниковых измерений функций распределения заряженных частиц открывает новые возможности в область изучения динамики плазменных систем в рамках анализа волновых процессов в этих системах. Линейные волновые характеристики локально однородной замагниченной плазмы описываются общим дисперсионным уравнением $D(\omega, \mathbf{k}) = 0$, нелинейность функциональных зависимостей в котором значительно усложняет нахождение численного решения с использованием дискретного (в пространстве скоростей) набора наблюдений: решение может быть неустойчивым и не иметь явного контроля ошибки аппроксимации.

Дискретность экспериментальных данных не позволяет однозначно определить зависимость дисперсионной функции $D(\omega, \mathbf{k})$ от частоты волны ω и волнового вектора \mathbf{k} , что предполагает аппроксимацию измеряемой функции распределения частиц f для последующего интегрирования в пространстве скоростей. В нашем докладе мы рассматриваем кусочно-линейную интерполяцию, которая позволяет не только точно контролировать ошибку аппроксимации, но и разделить, и выразить интегралы дисперсионных соотношений через обобщенную гипергеометрическую функцию ${}_pF_q$, ошибка оценки которой хорошо определена. Получаемая дисперсионная функция $D(\omega, \mathbf{k})$ представляется в виде мероморфной функции в области $\text{Im}(\omega) \geq 0$.

Проблема дальнейшего решения дисперсионного уравнения связана с отсутствием какой-либо информации о локальном поведении решений вследствие неаналитичности используемой (интерполированной) функции распределения f : методы, требующие начальные предположения для решения уравнения, могут сходиться не к тому решению или же вообще быть неустойчивыми. Но мероморфность дисперсионной функции $D(\omega, \mathbf{k})$ в рассматриваемой области позволяет произвести анализ на основе аналитичности функции $\ln D(\omega, \mathbf{k})$ во всей области за исключением дискретного набора точек: нулей и полюсов $D(\omega, \mathbf{k})$. Используя принцип аргумента Коши и анализируя поток градиента функции $\ln |D(\omega, \mathbf{k})|$, возможно определить все нули и полюсы исследуемой функции в заданном регионе по ω .

Таким образом, предлагаемые методы позволяют получить все решения дисперсионного уравнения $D(\omega, \mathbf{k}) = 0$ в рассматриваемой области, ошибка которых контролируется точностью аппроксимации измеряемой функции распределения f . Глобальность алгоритма позволяет значительно повысить его устойчивость и общность.

QR ЭМИССИИ С УВЕЛИЧИВАЮЩИМСЯ ПЕРИОДОМ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ARASE И ОБСЕРВАТОРИИ «ЛОВОЗЕРО»

Белаховский В.Б.¹, Калишин А.С.², Пильгаев С.В.¹

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

belakhov@mail.ru

Исследованы одновременные QR эмиссии, зарегистрированные по данным спутника Arase и по данным ОНЧ приемника в обсерватории «Ловозеро» (Кольский полуостров) Полярного геофизического института, когда спутник Arase и обсерватория «Ловозеро» были геомагнитно сопряжены. Со спутника Arase использован инструмент PWE (Plasma Wave Experiment), прибор OFA (Onboard Frequency Analyzer). QR эмиссии в диапазоне 1-2 кГц наблюдались на вечерней стороне в течение около 1,5 часов в период низкой геомагнитной активности ($SUM-H = -20$ нТл, $AE = 100-200$ нТл).

Данные QR эмиссии относятся к классу QR-2, поскольку они не сопровождались одновременными геомагнитными пульсациями того же периода на наземных магнитометрах (магнитометры станций LOZ, LOP, сеть IMAGE). PE эмиссии (periodic emissions – PE) наблюдались на фоне QR эмиссий. Анализ данных спутника Arase показывает отсутствие пульсаций с тем же периодом в потоках заряженных частиц. По данным риометров в Скандинавии во время этого события не наблюдается сильного увеличения поглощения космического радиоизлучения, что указывает на отсутствие сильных электронных высыпаний.

Период QR эмиссий увеличивается со временем примерно с 40 секунд до 85 секунд. Анализ показывает, что нет четкой связи между изменением периода QR эмиссий и изменением потоков электронов с энергий 3-15 кэВ по данным спутника Arase. Анализ данных ионозондов гидрометеорологической станции Ловозеро показывает постепенное снижение критической частоты в F-слое ионосферы. Поэтому мы связываем изменение периода излучений QR с изменением коэффициента отражения ионосферы.

НАБЛЮДЕНИЕ И ГЕНЕРАЦИЯ ДВУХПОЛОСНЫХ ШУМОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВЫШЕ И НИЖЕ ПОЛОВИНЫ ГИРОЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОНОВ ВБЛИЗИ ГЕОМАГНИТНОГО ЭКВАТОРА

Титова Е. Е.^{1,2}, Любич А. А.¹, Шкляр Д. Р.².

¹ПГИ, г. Анатиты, Россия, lena.titova@gmail.com

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Выполнен анализ ОНЧ шумовых излучений, спектр которых имеет две полосы на частотах ниже и выше половины гирочастоты электронов, зарегистрированных на спутнике Van Allen Probe 30 ноября 2015 года. Анализ основан на одновременных измерениях электромагнитных полей и потоков энергичных электронов, включая их питч-угловые распределения, на спутнике вблизи геомагнитного экватора. Поскольку частоты ОНЧ-шумовых излучений были пропорциональны гирочастоте электронов, то естественно считать, что они генерируются в результате циклотронного взаимодействия с электронами радиационных поясов. При генерации свистовых волн вследствие электронной циклотронной неустойчивости в экваториальной области магнитосферы и их наблюдении на очень низких широтах, как это имеет место в рассматриваемом случае, особенности наблюдаемого спектра должны быть тесно связаны с локальным коэффициентом усиления, который и был рассчитан на основе одновременных измерений дифференциальных потоков электронов на спутнике VAP В. Сравнение рассчитанного коэффициента усиления с одновременно наблюдаемым ОНЧ-спектром показывает их хорошее соответствие.

Генерация двухполосных шумовых излучений связана с присутствием энергичных электронов с поперечной анизотропией в достаточно широком диапазоне энергий $\approx 10^2$ - 10^4 эВ, и наличием двух максимумов в отклонении интегральной (зависящей только от частоты волны) анизотропии распределения электронов от критической в областях частот выше и ниже $f_{ce}/2$. Отклонение же интегральной анизотропии распределения от критического значения на частотах вблизи $f_{ce}/2$ оказывается минимальным, что и приводит к минимальной интенсивности спектра в этой области частот.

Выполненное исследование дает ключ к пониманию давней проблемы происхождения двухчастотных полос на ОНЧ-спектрограммах

Крупномасштабные волны во вращающейся частично ионизованной плазме в приближении холловской магнитной гидродинамики

Галстян Т.В.^{1,2}, Кошкина Д.А.^{1,2}, Климачков Д.А.¹, Петросян А.С.^{1,2}

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия

²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, galstyan.tigran@phystech.edu

Работа посвящена развитию теории крупномасштабных течений вращающейся частично ионизованной космической и астрофизической плазмы в приближении холловской магнитной гидродинамики. Такие течения широко распространены в космической и астрофизической плазме. Под крупномасштабными течениями мы понимаем течения плазмы с характерными масштабами порядка размера космического или астрофизического объекта, в динамику которых существенно влияет вращение объекта. Частично ионизованная плазма, которой посвящена работа, состоит из трех компонент: электронной, ионной и нейтральной.

В работе мы обобщаем идеи холловской магнитной гидродинамики частично ионизованной плазмы для случая вращения каждой из компонент плазмы. Учет эффектов вращения в теории холловской магнитной гидродинамики не может быть осуществлен путем простого добавления силы Кориолиса в уравнение движения центра масс, поскольку вращение влияет на холловский ток и на амбиполярную диффузию плазмы. Нетривиальность состоит в том, что холловский ток и амбиполярная диффузия плазмы определяются скоростями отдельных компонент частично ионизованной плазмы, которые подвержены влиянию силы Кориолиса.

Получена система уравнений холловской магнитной гидродинамики с учетом вращения в пренебрежении инерции электронов. Уравнения холловской магнитной гидродинамики при наличии вращения включают в себя новые слагаемые описывающие влияние силы Кориолиса на импульс центра масс и на эволюцию магнитного поля. Найдено дисперсионное уравнение для линейных волн во вращающейся частично ионизованной плазме на фоне тривиального стационарного течения. Получены дисперсионные соотношения для модифицированных Альфвеновских волн, для вращающихся быстрых и медленных звуковых волн и модифицированных свистовых волн. Медленные звуковые волны являются новым типом течений вызванных силой Кориолиса. Быстрые звуковые волны соответствуют обычным звуковым волнам при отсутствии вращения.

ПРИБЛИЖЕНИЕ БЕТА-ПЛОСКОСТИ ДЛЯ ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

Кошкина Д.А.^{1,2}, Галстян Т.Г.^{1,2}, Климачков Д.А.¹, Петросян А.С.^{1,2}

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия, koshkina.da@phystech.edu

² МФТИ (НИУ), г. Москва, Россия

Большинство космических объектов находятся в состоянии плазмы. Наиболее яркими примерами служат Солнце, звезды, межпланетный газ и ионосферы планет. В настоящее время возникла и активно развивается плазменная астрофизика - наука о течениях и общих свойствах плазмы, характерной для разных астрофизических объектов. Вращение является характерным свойством большинства астрофизических объектов и оказывает существенное влияние на динамику крупномасштабных течений в плазме. Под крупномасштабными течениями мы понимаем течения с характерными масштабами порядка масштаба изучаемого объекта. Динамика таких течений существенно модифицируется наличием вращения. Другим важным свойством большинства астрофизических течений является присутствие газовой компоненты наряду с заряженной жидкостью (плазмой), что существенно изменяет динамику многокомпонентной плазмы. Плазму с газовой добавкой мы называем частично ионизованной. Мы ограничимся исследованием частично ионизованной плазмы состоящей из трех компонент: электронной, ионной и нейтральной.

Подход холловской магнитной гидродинамики основывается на том, что заряженная и нейтральная компонента подвержены влиянию различных сил. Наличие столкновений между компонентами приводит к передаче импульса, вследствие чего устанавливается равновесие между компонентами, в котором заряженная и нейтральная компонента движутся как единое целое. Описание такой единой жидкости заряженной и нейтральной компонент основывается на учете вклада эффекта Холла в динамику плазмы. Эффект Холла обусловлен тем, что сила Лоренца влияет на разноименные заряды по разному, приводя к возникновению холловского тока, который в свою очередь, приводит к возникновению силы в направлении векторного произведения вектора плотности тока и вектора магнитной индукции.

Развита теория крупномасштабных течений вращающейся несжимаемой частично ионизованной плазмы в приближении бета-плоскости с учетом эффекта Холла. Для описания эффектов сферичности мы используем приближение бета-плоскости. Приближение бета-плоскости является упрощением заменяющим сферические координаты на локальные декартовы координаты. При этом сохраняется зависимость вертикальной компоненты вектора угловой скорости вращения Земли от широты. Полученные уравнения указывают на существенное влияние вращения и неоднородности вращения на крупномасштабную динамику плазмы, проявляющуюся не только через традиционную силу Кориолиса, но и через модификацию холловской и амбиполярной диффузии. Проведен анализ линейных течений на фоне стационарного состояния, в котором вектора угловой скорости вращения и магнитной индукции сонаправлены. Получены дисперсионные соотношения для гидродинамических волн Россби и глобальных свистовых волн. Глобальные свистовые волны являются новым типом течений, вызванных неоднородностью вращения на сфере.

НАБЛЮДЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ СНЧ/ОНЧ СИГНАЛОВ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕДИЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС—41»

Никитенко А.С.¹, Пильгаев С.В.¹, Ларченко А.В.¹, Федоренко Ю.В.¹, Благовещенская Н.Ф.², Калишин А.С.², Борисова Т.Д.², Стрибный О.Ю.², Филатов М.В.¹, Кузнецова М.В.¹, Лебедь О.М.¹

¹ ПГИ, г. Анатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

² ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия

В 2023-2024 гг. на дрейфующей полярной станции «Северный полюс-41», организованной специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института, были проведены уникальные измерения горизонтальных компонент магнитного поля и вертикальной компоненты электрического поля СНЧ/ОНЧ диапазона (300 Гц - 15 кГц) в приполярной области. Для этого был применен многофункциональный цифровой СНЧ/ОНЧ приемник, обеспечивающий регистрацию двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент поля с прецизионной синхронизацией с мировым временем. Такие же приемники в стационарном варианте использовались для наблюдений в обсерваториях ПГИ Баренцбург (78.09 N, 14.21 E), расположенной также в приполярной области, но к западу от траектории дрейфа, и Ловозеро (67.98 N, 35.082 E), расположенной в авроральной зоне.

В работе обсуждаются результаты анализа наиболее представительных случаев всплесков естественных магнитосферных излучений, зарегистрированных на дрейфующей полярной станции в нейтральных водах. Результаты наблюдений сопоставлены с наблюдениями СНЧ/ОНЧ сигналов в обсерваториях Баренцбург и Ловозеро.

ВЛИЯНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ РИОМЕТРИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ШИПЕНИЙ К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Никитенко А.С., Лебедь О.М., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В.

ПГИ, г. Анапты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

Представлены результаты анализа всплесков авроральных шипений, зарегистрированных в обсерватории Ловозеро (Кольский полуостров, геогр. к-ты 67.98 N, 35.082 E) Полярного геофизического института. Рассматриваемые всплески резко пропадают одновременно с увеличением поглощения космического радиошума на частоте 38.5 МГц, измеренного риометрами в обсерваториях Ловозеро и Туманный (69.013 N, 35.709 E), которая расположена в 100 км к северу от Ловозеро. Рассмотрены события 9 ноября 20:00-21:00 UT, 7 декабря 21:00-22:00 UT и 15 декабря 19:00-20:00 UT 2023 года, во время которых на указанных станциях был отмечен рост уровня поглощения до значений 2.2, 0.6 и 0.7 дБ, соответственно. Чтобы объяснить наблюдаемый эффект, мы моделировали распространение авроральных шипений к земной поверхности в условиях невозмущенной ионосферы и возмущенной высыпаниями электронов различных энергий, способных обеспечить наблюдаемый уровень поглощения космического радиошума.

В ходе моделирования показано, что затухание шипений при распространении сквозь невозмущенную ионосферу составляет 12 — 15 дБ относительно их мощности на высоте 800 км, а при значении риометрического поглощения около 0.6 дБ затухание составляет 50 дБ. Согласно опыту наших многочисленных наземных наблюдений отношение среднестатистической мощности шипений к мощности шумов волновода Земля-ионосфера лежит в диапазоне 30-40 дБ. Отсюда следует, что при поглощении 0.6 дБ мощность хисса у земной поверхности сопоставима с мощностью собственных шумов волновода Земля-ионосфера. При наблюдаемых значениях риометрического поглощения 2 дБ авроральные шипения не могут наблюдаться у земной поверхности.

Работа поддержана грантом РФФИ № 24-27-20048 «Оценка состояния ионосферы в арктической зоне по результатам наземных измерений электромагнитного поля авроральных шипений в очень низкочастотном диапазоне и риометрического поглощения»

ОСОБЕННОСТИ ВЫХОДА АВРОРАЛЬНЫХ ШИПЕНИЙ К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОДНОВРЕМЕННО С РОСТОМ РИОМЕТРИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

Никитенко А.С., Лебедь О.М., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В.

ПГИ, г. Анапты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

В работе представлены результаты анализа азимутальных углов прихода и поляризации всплесков авроральных шипений, которые были зарегистрированы в обсерватории Ловозеро Полярного геофизического института (Кольский полуостров, геогр. к-ты 67.98 N, 35.082 E). Рассматриваемые всплески являются нетипичными и сопровождаются ростом поглощения космического радиошума, измеренного узкоапертурными риометрами, установленными в обсерватории Ловозеро и обсерватории Туманный (69.013 N, 35.709 E), которая расположена в 100 км к северу от Ловозеро.

Рассмотрены события регистрации авроральных шипений, азимутальные углы прихода которых указывают на приход волн в точку наблюдений с более высоких широт, чем обс. Ловозеро, более низких широт и одновременно с нескольких направлений. Результаты анализа авроральных шипений сопоставлены с результатами наблюдений полярных сияний в обс. Ловозеро и в точках наблюдений Скандинавии. На основе проведенного анализа предложен возможный механизм связи одновременного наблюдения авроральных шипений и роста риометрического поглощения в близких точках.

Работа поддержана грантом РФФИ № 24-27-20048 «Оценка состояния ионосферы в арктической зоне по результатам наземных измерений электромагнитного поля авроральных шипений в очень низкочастотном диапазоне и риометрического поглощения»

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХОРОВЫХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Чекушева С.С., Демехов А.Г.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, chekusheva_01@mail.ru

Хоровые излучения генерируются в радиационных поясах Земли вследствие циклотронной неустойчивости при взаимодействии свистовых электромагнитных волн очень низкой частоты (ОНЧ, $\sim 1 - 10$ кГц) с электронами [1].

Известно, что хоровые излучения генерируются преимущественно в утреннем и дневном секторах магнитосферы в экваториальной области размером около $\sim 2 - 5$ тыс. км вдоль геомагнитного поля на геоцентрическом расстоянии $L = 4 - 7$ (L – параметр МакИлвайна) и имеют вид последовательных дискретных элементов (квазимонохроматических пакетов) свистовых волн с быстро возрастающей (или убывающей) частотой $\left| \frac{df}{dt} \right| \sim 1.5 \cdot 10^4$ Гц/с [2]. Интервал между этими элементами варьируется в пределах $(0.1 - 1)$ с [3].

Не все энергичные электроны, взаимодействующие с волной, ее усиливают. Те электроны, которые захватываются потенциалом волны, ускоряются полем волны, пополняя собой радиационные пояса, а незахваченные электроны отдают свою энергию на усиление волны, затем высыпаются в авроральную область и формируют так называемые микровсплески [4, 5]. Таким образом, хоровые излучения выступают в качестве передатчика энергии от одних электронов к другим [6].

Большой интерес к изучению хоров обусловлен трудностями объяснения высокого инкремента и быстрого дрейфа частоты. Эти задачи до конца не решены, хотя существующие теоретические модели дают реалистичные и согласующиеся друг с другом оценки скорости дрейфа частоты. В отношении остальных характеристик хоровых излучений (инкремент, амплитуда, интервал между элементами) подходы разных моделей различаются.

В данной работе анализируются три модели генерации хоровых излучений: модель лампы обратной волны (ЛОВ) [7], метод нелинейных резонансных токов [8], модель захвата и высвобождения [9].

Для упомянутых моделей сопоставляются результаты аналитической оценки инкремента волн, скорости дрейфа частоты и характерной амплитуды хоровых излучений на начальной и конечной стадии генерации.

Работа С.С. Чекушевой выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики «Базис», проект № 24-1-1-97-3.

1. Helliwell R.A. // Journal of Geophysical Research 1967. V.72. No. 19. P. 4773-4790. <https://doi.org/10.1029/JZ072i019p04773>
2. Burtis W.J., Helliwell R.A. // Planetary and Space Science 1976. V. 24. No. 11. P. 1007-1010. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(76\)90119-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(76)90119-7)
3. Santolik O., Gurnett D.A., Pickett J.S. // Journal of Geophysical Research: Space Physics 2003. V. 108. No. A7. P. 1278. <https://doi.org/10.1029/2002JA009791>
4. Breneman A. W. et al. // Geophysical Research Letter 2017. V. 44. No. 22. P. 11,265–11,272. <https://doi.org/10.1002/2017GL075001>
5. O'Brien T. P. et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics 2003. V. 108. No. A8. P.1329. <https://doi.org/10.1029/2002JA009784>
6. Shklyar D. R. // Ann. Geophys. 2011. V. 29. No. 6. P. 1179–1188. <https://doi.org/10.5194/angeo-29-1179-2011>
7. Trakhtengerts V.Y. // Journal of Geophysical Research: Space Physics 1995. V. 100. No. A9. P. 17205-17210. <https://doi.org/10.1029/95JA00843>

ГЕНЕРАЦИЯ АЛЬВЕНОВСКИХ ВОЛН СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМЕ С НЕЙТРАЛАМИ

Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Мирошниченко И.Б., Шарипов С.С., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

В работе представлены результаты численного моделирования по исследованию генерации низкочастотных альвеновских волн, создаваемых периодической последовательностью сгустков лазерной плазмы в замагниченной плазме с нейтралами. Рассмотрено влияние параметров фоновой плазмы и предельное содержание нейтралов в фоне на структуру и интенсивность волн.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-22-00106.

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ О ВЛИЯНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ НА КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ВНУТРИ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Шкарева П.Д.¹, Савина О.Н.²

¹ ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, pdzharavina@edu.hse.ru

² НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Проведено исследование возможной связи структурированных электромагнитных излучений свистового диапазона частот внутри плазмосферы с крупномасштабными атмосферными процессами. При обработке данных наблюдений, выполненных на космических аппаратах Van Allen Probes, наше внимание привлекли несколько всплесков квазипериодических ОНЧ излучений на частотах ниже и порядка 2 кГц с периодами повторения спектральных форм порядка 90 – 240 с, с глубокой модуляцией интенсивности, с большим частотным дрейфом и без четкой связи с геомагнитными пульсациями. Важно, что указанные излучения наблюдались во время сильных землетрясений, наземная область локализации которых охватывала основание магнитной трубки, соответствующей синхронному местоположению космического аппарата. Было проверено отсутствие похожих динамических спектров в данных наблюдений без землетрясений при близких положениях космического аппарата и характеристиках геомагнитной обстановки. По нашему мнению влияние крупномасштабных процессов в атмосфере на квазипериодические ОНЧ излучения внутри плазмосферы может быть связано с высокой чувствительностью процессов в плазменном магнитосферном мазере к изменениям коэффициента отражения свистовых волн от ионосферы сверху. Поэтому изучение магнитосферных излучений может быть средством диагностики крупномасштабных атмосферных процессов, достигающих ионосферных высот и модулирующих коэффициент отражения свистовых волн.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 25-22-00237, и фонда развития теоретической физики и математики "Базис", проект № 23-1-1-67-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАЗМЕРНОСТИ ХАУСДОРФА И КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ХОРОВ СО СПЕКТРАЛЬНЫМИ ФОРМАМИ В ДВУХ ЧАСТОТНЫХ ПОЛОСАХ

Нещеткин Г.М.^{1,2}, Беспалов П.А.¹, Савина О.Н.²

¹ ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@ipfran.ru

² НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

В работе исследуются количественные характеристики механизма возбуждения широкополосных ОНЧ хоровых излучений посредством анализа данных высокого разрешения с космического аппарата Van Allen Probe. Выбран характерный пример хоров со спектральными формами в двух частотных полосах (ниже и выше половины электронной циклотронной частоты) в области локального минимума магнитного поля за плазмопаузой в средней магнитосфере. Для вычисления размерности Хаусдорфа длинных числовых последовательностей использовалась оригинальная программа. Во всех случаях размерность оказалась нецелой, что свидетельствует о сложной динамике системы, и дает возможность использовать при интерпретации результатов следствия теорем Такенса. Результаты измерений волнового поля в канале данных высокого разрешения представлены в виде прямоугольной матрицы события, каждая строка которой соответствует одному периоду волнового процесса. В матрице события выбраны строки, отвечающие фрагментам реализации, которые наилучшим образом характеризуют естественный источник зарождения коротких электромагнитных импульсов. Это дало возможность определить комплексные собственные значения характеристического уравнения источника на линейной стадии возбуждения хоров. Результаты расчета размерности Хаусдорфа и значения корней характеристического уравнения соответствуют реализации ВРА (beam pulse amplifier) механизма возбуждения хоров посредством усиления шумовых электромагнитных импульсов.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 25-22-00237, и фонда развития теоретической физики и математики "Базис", проект №23-1-1-67-1.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ ГЕОМАГНИТНЫХ Pc1 ПУЛЬСАЦИЙ НА ЗЕМЛЕ И В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ОТ СРЕДНИХ ДО АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТ

Ягова Н. В., Федоров Е. Н., Мазур Н. Г.

ИФЗ РАН, Москва, Россия, nyagova@ifz.ru

Исследуется пространственное распределение поля геомагнитных пульсаций Pc1 от авроральных до средних широт на Земле и в верхней ионосфере. Для анализа использованы данные измерений магнитного поля на ионосферном спутнике SWARM и наземных станциях сети CARISMA. Показаны случаи когерентных на Земле и в ионосфере пульсаций. Для них определен по наземным данным пространственный масштаб больше, чем для некогерентных пульсаций. Распределение амплитуды и фазы на Земле и в ионосфере и отношение амплитуд Земля/ионосфера для когерентных пульсаций сравнивается со значениями, определенными по модели прохождения альвеновского пучка конечного радиуса через квазиреальную ионосферу [1]. Оценивается адекватность модели для различных широт и уровней возмущенности и возможность использования данных по пространственному распределению поля наземных и ионосферных пульсаций для оценки радиуса пучка на верхней границе ионосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

1. Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2018. V. 123. P. 3965–3982. DOI: 10.1029/2018 JA025338.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН В ПРИЗЕМНОЙ ИОНОСФЕРЕ — МОДИФИЦИРОВАННОЕ ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ФОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, lundin.bv@gmail.com

Было показано [1], что новые формы классического дисперсионного уравнения для плоских электромагнитных волн в холодной магнитоактивной плазме позволяют в условиях приземной плазмы умеренной плотности эффективно исследовать особенности эволюции дисперсии и поляризации волн электронного свистового мода в диапазоне прозрачности от частот ионной отсечки, сравнимых с ионными гирочастотами, и почти до интервала частот, где ионный вклад важен лишь для обеспечения квазинейтральности фона. Удалось исследовать [2] влияние на распространение радиоволн загрязнений плазмы молекулами и другими конгломератами тяжелых частиц с повышенным сродством к электронам вплоть до спектральных свойств почти чисто ионной плазмы реализуемой при локальной адгезии электронов фоновой плазмы «загрязнениями». При этом диапазон прозрачности для плоских волн в холодной плазме сужается до малой окрестности вблизи ионной плазменной частоты. Впервые было показано [3], что эксперименты с почти чисто ионной плазмой наиболее эффективны при «выборе загрязнений» с наибольшим из возможных модулей их отрицательных удельных зарядов.

Модификация дисперсионного уравнения для диапазонов частот волн используемых для зондирования приземной ионосферы также расширяет возможности аналитического выявления качественных эффектов (ср.[4,5]) пригодных для более детального анализа, включая подходы с использованием ИИ.

1. Lundin B.V., C. Krafft. // J. Plasma Phys. 2002. V. 67(2-3), P. 149.
2. Lundin B.V., Krafft C. // Phys. Plasmas 2009. V. 16. P. 052104.
3. Lundin B.V., Krafft C. // Phys. Plasmas 2011. V. 18. P. 102114.
4. Лундин Б., К. Крафт. // Физика плазмы 2009. Т. 35. № 6. С. 551.
5. Lundin B.V., Krafft C. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 25643.

СЕКЦИЯ «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли», юбилейное 10-е заседание

Четверг, 13.02.2025 г., Комната 200

Председатель: <u>Веретененко С. В.</u>			
Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада	
1	09.00 - 09.30 Приглашенный доклад	Миронова И. А.	Роль космической погоды в разрушении озонового слоя
2	09.30 - 09.50	<u>Куликов Ю.Ю.</u> , Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., Рыскин В.Г.	О связи между солнечной активностью и полярным мезосферным озоном по данным микроволновой радиометрии
3	09.50 - 10.10	<u>Караханян А.А.</u> , Молодых С.И.	Связь метеопараметров с вариациями электрического потенциала ионосферы при разных характеристиках солнечного ветра
4	10.10 - 10.30	<u>Диденко К.А.</u> , Коваль А.В., Ермакова Т.С., Гаврилов Н.М., Головки А.Г.	Эффекты взаимодействий волна – средний поток в термосфере и области МНТ под воздействием солнечной активности
10.30 - 11.00		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Миронова И. А.</u>			
5	11.00 - 11.30 Приглашенный доклад	<u>Руменских М. С.</u> , Шайхисламов И.Ф.	Интерпретация наблюдений атмосфер горячих экзопланет: настоящее и перспективы
6	11.30 - 11.50	<u>Веретененко С.В.</u> , Дмитриев П.Б., Обридко В.Н.	Проявление солнечного магнитного цикла Хейла в геофизических и климатических характеристиках
7	11.50 - 12.10	Сурков В.В.	Влияние рентгеновского излучения солнечной вспышки на частоты шумановских резонансов
8	12.10 - 12.30	<u>Воробьева Г.Р.</u> , Воробьев А.В.	Информационная система краткосрочного прогнозирования и оперативного оповещения о состоянии верхней ионосферы
12.30 - 13.30		Пленарный час	
13.30 - 14.30		Обед	
Председатель: <u>Рагульская М. В.</u>			

9	14.30 - 15.00 Приглашенный доклад	Наговицын Ю. А.	Солнечная активность на длительных временах и ее возможное влияние на климат Земли
10	15.00 - 15.20	Старченко С. В.	Простейшая модель геодинамо и планетарные магнитные катастрофы
11	15.20 - 15.40	Рагульская М. В.	Солнечная активность, геомагнитная активность, космические лучи и атмосферное воздействие как биотропные эпидемиологические факторы
12	15.40 - 16.00	Бережной А. А.	Влияние болидных явлений на состав атмосферы Земли
16.00 - 16.30		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Ожередов В. А.</u>			
13	16.30 - 16.50	Костров А.В.	Влияние космической пыли на погоду Земли
14	16.50 - 17.10	Храмова Е. Г.	Космические факторы формирования атмосферных спрайтов
15	17.10 - 17.30	<u>Кузьмичева М. Ю.</u> , Вениаминов С. С., Козлов С.И.	Приближенная оценка значений критической засоренности космического пространства, влияющего на распространение солнечного излучения
16	17.30 - 17.50	<u>Ожередов В.А.</u> , Бреус Т.К.	Вспышечная активность как фактор появления депрессивно-тревожного текстового контента в интернете
17	17.50 - 18.10	<u>Комитов Б.П.</u> , Кафтан В.И.	Космическая погода, климат и геотектоника
18	18.10 - 18.30	Серых И. В.	О влиянии квази-одиннадцатилетних изменений солнечной активности на Эль-Ниньо - Южное колебание
18.30 - 19.00		Постерная сессия	
19.00		БАНКЕТ	

СЕКЦИЯ «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли»
Пятница, 14.02.2025 г., Комната 200

Председатель: <u>Котов В. А.</u>			
Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада	
2	Кузнецова Т.В.	Связь солнечных циклов с 15 по 22 с мощным 198–летним колебанием в солнечном ветре, орбитальным движением Юпитера и квебекским событием	
3	Котов В. А.	Вращение солнца, 27 суток и климат Земли	
4	<u>Подгорный А.И.</u> , Подгорный И.М.	Расположение солнечной вспышки на протяженной поверхности магнитных линий с повышенной плотностью тока по результатам МГД - моделирования	
11.50 - 12.10		Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Голованов Д.Л.</u>			
5	Криволицкий А.А.	Глобальное состояние озоносферы и нижней ионосферы до высот 0-130 км в спокойных условиях на Солнце	
6	<u>Мальнева И.В.</u> , Черкесов А.А.	Влияние космической погоды на развитие склоновых процессов на территории Кабардино-Балкарской республики в 2022-2024 годах	
7	<u>Лазарева Е.А.</u> , Новиков В.А.	Отклик сейсмичности геотермальных зон северной Калифорнии на сильные пульсации геомагнитного поля	
8	<u>Голованов Д.Л.</u> , Дьяконов К.Н.	Закон количественной компенсации в функциях биосферы А.Л. Чижевского – фундаментальный сквозной закон географии	
13.30		Заккрытие конференции	

Доклады постерной сессии секции «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли»
Четверг, 13.02.2025 г.

9.1 Кириллов А.С., Рюрих-Андропов И.Л. Инфракрасное свечение окиси азота в атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных частиц

9.2 Кузнецова Т.В. Особенности пяти солнечных циклов, включающих 19 цикл с самым большим максимумом в истории наблюдений солнечной активности

9.3 Куликов Ю.Н., Кириллов А.С. Моделирование свечения атмосферных полос молекулярного кислорода на высотах ночной мезосферы и нижней термосферы Земли

9.4 Габис И. П. Квазидвухлетняя модуляция антарктического стратосферного вихря: согласие или противоречие с эффектом Холтона-Тана?

РОЛЬ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В РАЗРУШЕНИИ ОЗОнового СЛОЯ

Миронова И.А.¹

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru

Космическая погода это совокупность явлений в цепочке солнечно-земных связей наблюдаемых в определенный момент времени в той или иной точке пространства. Обычно космическая погода связывает процессы происходящие в ионосфере и атмосфере Земли с процессами на Солнце и околоземном космическом пространстве.

Озон играет ключевую роль в цепочке солнечно-земных связей и влияет на изменение климата как локального, так и глобального. Озон является газом который определяет температурный и циркуляционный режим средней атмосферы, а так же газом который эффективно поглощает солнечное ультрафиолетовое излучение предохраняя тем самым все живое от опасной радиации. Хорошо известно, что выбрасывания энергичных частиц приводят к ионизации атмосферы Земли, инициируя образование активных химических соединений, которые разрушают озон и могут влиять на состав и динамику атмосферы вплоть до тропосферы.

Корректное описание физики солнечно-земных связей требует глубокого понимания не только процессов в околоземном космическом пространстве, но и атмосферных процессов, включающих ионизацию, вызванную энергичными частицами в атмосфере, и образование химически активных компонентов атмосферы, способных влиять на потерю озона и климат.

В данном обзоре дается оценка подверженности озонового слоя процессам космической погоды. Отдельно рассматриваются сезонные и широтные эффекты разрушения озона связанные с мощными геомагнитными бурями и геоэффективными солнечными событиями. В этом докладе представлены результаты изучения реакции химического состава атмосферы и озонового слоя в цепочке солнечно-земных связей проанализированные с помощью фотохимической радиационно-конвективной модели с учетом ионной химии и глобальных химико-климатических моделей, а также результаты с использованием наблюдений за химическим составом атмосферы со спутника MLS.

Все полученные оценки дополняют наше растущее понимание того, как космическая погода влияет на озоновый слой, и обеспечивают основу для понимания явлений в цепочке солнечно-земных связей и совокупного воздействия космической погоды на атмосферу и климат Земли.

Доклад подготовлен в рамках государственного задания СПбГУ №116234986.

О СВЯЗИ МЕЖДУ СОЛНЕЧНОЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ПОЛЯРНЫМ МЕЗОСФЕРНЫМ ОЗОНОМ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ

Куликов Ю.Ю.¹, Демин В.И.², Демкин В.М.³, Кириллов А.С.², Рыскин В.Г.¹

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, yuyukul@appl.sci-nnov.ru

²ПГИ, г. Апатиты, Россия

³ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Обсуждаются результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы в Апатитах (67N, 33E) для декабря месяца в зимние сезоны, начиная с 2017 года по настоящее время. Первые три сезона пришлось на минимум солнечной активности между 24 и 25 циклами. Остальные сезоны с 2021 года по 2024 год пришлось на 25 солнечный цикл около его максимума. В измерениях использован мобильный микроволновый спектрометр с рабочей частотой 110.8 ГГц, который позволяет отслеживать вариации O₃ с 15-ти минутным временным разрешением на высотах средней атмосферы. Выполнены оценки вертикального профиля озона в интервале высот 22 – 60 км.

В настоящем сообщении обсуждается поведение озона средней атмосферы в декабре месяце (полярная ночь) в процессе изменения солнечной активности. Почему для такого анализа выбран месяц декабрь. Основное внимание мы уделяем изменениям концентрации O₃ в течение суток на высоте 60 км. На этой высоте изменчивостью озона управляют как фотохимические процессы, которые определяются восходом и заходом Солнца, так и динамические процессы, которые связаны с внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) и полярными вихрями. Кроме того, солнечный ветер (протоны и релятивистские электроны) способен оказать влияние на O₃ на высоте 60 км. В декабре, как правило, ВСП отсутствуют и не могут оказать воздействия на вертикальный профиль O₃. Кроме того, декабрь – это месяц так называемой полярной ночи, когда высота Солнца составляет – 1° относительно горизонта во время зимнего солнцестояния.

В таблице представлены средние дневные и ночные концентрации мезосферного озона (60 км) над Апатитами в декабре месяце для шести зимних сезонов и их отношение ночь/день

Концентрация, мол/см ³	Низкая солнечная активность		
	2017/2018	2018/2019	2019/2020
День	$(4.24 \pm 0.05) \cdot 10^{09}$	$(4.64 \pm 0.11) \cdot 10^{09}$	$(4.44 \pm 0.07) \cdot 10^{09}$
Ночь	$(5.24 \pm 0.70) \cdot 10^{09}$	$(5.87 \pm 0.20) \cdot 10^{09}$	$(4.94 \pm 0.09) \cdot 10^{09}$
Н/Д	1.24	1.26	1.11
	Высокая солнечная активность		
	2021/2022	2022/2023	2023/2024
День	$(4.35 \pm 0.09) \cdot 10^{09}$	$(4.38 \pm 0.09) \cdot 10^{09}$	$(4.23 \pm 0.13) \cdot 10^{09}$
Ночь	$(5.17 \pm 0.09) \cdot 10^{09}$	$(4.66 \pm 0.13) \cdot 10^{09}$	$(4.68 \pm 0.09) \cdot 10^{09}$
Н/Д	1.19	1.06	1.11

Как можно оценить изменчивость суточного хода озона, которая определяется фотохимическими процессами? Авторы предлагают брать средние концентрации O₃ для временных интервалов 10 – 14 ч (полдень) и 22 – 2 ч (полночь).и величину их отношения считать амплитудой суточного хода. Анализ данных, которые приведены в таблице, указывает на высокую повторяемость величин дневных и ночных концентраций озона в декабре на протяжении шести зимне-весенних сезонов в сравнении с последующими месяцами. Причем при высокой солнечной активности средняя ночная концентрация O₃ уменьшается на величину около 10%, а дневная менее 5%.

Государственное задание ИПФ РАН (проект FFUF-2024-0034).

СВЯЗЬ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ С ВАРИАЦИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ИОНОСФЕРЫ ПРИ РАЗНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Караханян А.А., Молодых С.И.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, asha@iszf.irk.ru

Электромагнитное взаимодействие между компонентами системы магнитосфера-ионосфера-тропосфера является одной из возможных причин солнечного влияния на климатическую систему. Электрический потенциал (ЭП) ионосферы используется в качестве оптимального гелиогеофизического параметра, исходя из физического механизма влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу, разрабатываемого в ИСЗФ СО РАН. Данный механизм предполагает, что изменения оптических свойств водяного пара в ИК-диапазоне, обусловлены электромагнитными вариациями в верхней и средней атмосфере, вызванными магнитосферной конвекцией, вследствие изменений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) [1].

Известно, что инфракрасный спектр поглощения водяного пара состоит из отдельных спектральных линий и расположенных между ними «окон прозрачности» атмосферы. Поглощение излучения в этих окнах представляет собой слабоселективное (континуальное) поглощение или «континуум» водяного пара. Благодаря своей спектральной протяженности, континуальное поглощение водяного пара может приводить к уменьшению уходящей длинноволновой радиации (УДР), тем самым оказывая влияние на радиационный баланс климатической системы [2]. Целью данной работы является анализ связи вариаций ЭП с метеопараметрами (УДР, поглощение в окне прозрачности 8–12 мкм, верхняя облачность) для спокойных и возмущенных условий межпланетной среды.

Электрический ионосферный потенциал рассчитывался на основе улучшенной полуэмпирической модели Веймера, в которой пространственное распределение потенциала определяется вариациями параметров солнечного ветра, ММП и *AL* индексом геомагнитной активности [3]. Данные о межпланетной среде с часовым разрешением получены из базы данных OMNI – https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html. Мы использовали часовые значения метеовеличин из набора данных [CERES SYN1degEd4.1 Subsetting and Browsing](#) в сетке 1.0°×1.0° [4]. Сравнительный анализ вариаций ЭП и отклика метеопараметров на солнечное воздействие выполнен для широт выше 60° N.

Анализ эквипотенциалей показал увеличение отрицательных и, особенно, положительных значений ЭП во время возмущений, как по величине, так и в пространстве. Усреднение областей каждого знака позволило показать увеличение разности между положительными и отрицательными отклонениями ЭП для возмущенных условий, по сравнению со спокойными условиями в солнечном ветре. На примере отдельных событий, во время которых наблюдается классический корональный выброс массы, приводящий к внезапному началу геомагнитной бури, изучен отклик метеопараметров на солнечное воздействие. Обнаружено, что отклик метеопараметров на солнечное воздействие, усредненный для широт выше 60° N, проявляется в усилении контраста и хорошо коррелирует с изменением ЭП во время возмущений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

1. Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. // Геом. и аэрономия 2020. Т. 60. С. 208.
2. Simonova A.A., Ptashnik I.V., Elsey J., et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 2022. V. 277. 107957.
3. Weimer D.R. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A05306.
4. Wielicki B.A., Barkstrom B.R., Harrison E.F., et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 853–868.

ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВОЛНА–СРЕДНИЙ ПОТОК В ТЕРМОСФЕРЕ И ОБЛАСТИ МНТ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Диденко К.А., Коваль А.В., Ермакова Т.С., Гаврилов Н.М., Головки А.Г.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Россия, didenko@izmiran.ru

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

РГТМУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено влияние солнечной активности на динамику в области мезосферы и нижней термосферы (МНТ) и термосферы с точки зрения взаимодействия средней циркуляции атмосферы с планетарными волнами и атмосферными термическими приливами, с использованием механистической нелинейной модели средней и верхней атмосферы МСВА. Это взаимодействие анализируется в рамках подхода преобразованного Эйлера среднего значения и интерпретируется путем вычисления потока Элиассена-Палма и остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ). В работе используются два ансамбля гидродинамических полей (распределений геопотенциала, температуры, зонального, меридионального и вертикального ветра), соответствующих высокой и низкой солнечной активности. Каждый ансамбль состоит из 16 модельных прогонов, моделировалась общая циркуляция атмосферы для января. Показано, что с увеличением солнечного воздействия при высокой солнечной активности, волновая активность уменьшается в слое 100–170 км, в то время как в более высоких слоях происходит увеличение волновой активности. Такое поведение может быть объяснено рядом факторов, способствующих ослаблению планетарных волн и усилению атмосферных приливов. Среди них – повышение температуры, вязкости и вертикальных температурных градиентов при высокой солнечной активности. При этом обнаруживается доминирующая роль приливов в изменении волновой активности в термосфере, в то время как амплитуды планетарных волн и их потоки Элиассена-Палма имеют значительно меньшие значения. Анализ динамического режима термосферы при увеличении солнечной активности показывает, что усиление ОМЦ выше 200 км определяется изменениями средней Эйлеровой циркуляции. Изменения динамического и температурного режима термосферы, вызванные солнечной активностью, приводят к изменениям ОМЦ в области МНТ до 10%. Основную роль в этих изменениях играет увеличение отражения планетарных волн на высоте более 100 км из-за увеличения вертикальных температурных градиентов при высокой солнечной активности.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом РНФ, грант № 20-77-10006-П.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ: НАСТОЯЩЕЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Руменских М.С.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

ИНАСАН, г. Москва, Россия

marina_rumenskikh@mail.ru

Наблюдения экзопланет развиваются небывалыми темпами. На данный момент обнаружено порядка 6000 экзопланет, и это число продолжает расти. На орбиту выводятся всё новые телескопы, совершенствуются возможности наземных, и мы продолжаем копить массив наблюдательных данных. Но какую пользу они несут? Что нам известно об экзопланетах, и как применить эти знания к решению вопросов, имеющих непосредственное влияние на нашу жизнь?

Несмотря на кажущуюся исключительную фундаментальность исследований экзопланет, они имеют ряд важных прикладных следствий. Одной из самых важных практических задач изучения верхних атмосфер горячих экзопланет является определение параметров космической погоды во внесолнечных планетарных системах для оценки активности звезд на различных стадиях эволюции. Интерпретация наблюдательных данных современными моделями атмосфер экзопланет позволяют оценить физико-химические параметры планетных систем, которые невозможно получить иным путем, и эти данные могут оказаться полезными в решении ряда научных задач ближнего космоса. Например, сведения о ветрах и спектральной плотности мощности тысяч звезд различных спектральных классов помогут в формировании долгосрочного прогноза Солнечной активности, а обнаружение линий элементов в атмосферах планет помогут в определении типа наблюдаемой атмосферы и прочих ее свойств. Кроме того, магнитные поля далеких планет предоставляют бесчисленное количество образцов для развития теории магнитного динамо и для понимания явления планетарного магнетизма.

Доклад представляет собой обзор проблем физики атмосфер экзопланет, связанных с интерпретацией наблюдений. Будут рассмотрены существующие инструменты и подходы, а также перспективные разработки и новые междисциплинарные направления исследований.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ № 23-12-00134

ПРОЯВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО МАГНИТНОГО ЦИКЛА ХЕЙЛА В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Веретененко С.В.¹, Дмитриев П.Б.¹, Обридко В.Н.²

¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, s.veretenenko@mail.ioffe.ru*

²*ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкина, г. Москва, Россия*

Колебания с периодами ~22 лет, близкими к магнитному циклу Хейла на Солнце, наблюдаются во многих климатических характеристиках (повторяемости засух, ураганов над Атлантическим и Тихим океанами, колебаниях приземных температур и давления и т.д.). Отмечается, что амплитуда ~22-летних колебаний не только соизмерима с амплитудой ~11-летних, но может даже превышать ее [1]. В данной работе рассматриваются проявления солнечного магнитного цикла Хейла в различных геофизических характеристиках, которые могут способствовать формированию бидекадных колебаний в земном климате. Показано, что в четных и нечетных 11-летних циклах наблюдаются статистически значимые различия в вариациях потока галактических космических лучей, составляющих магнитного поля солнечного ветра, индексах геомагнитной активности (*aa*-индексе и повторяемости магнитных бурь с постепенным началом). Полученные результаты позволяют предположить, что бидекадные вариации в климатических характеристиках могут быть связаны с солнечным циклом Хейла, который способствует формированию бидекадных вариаций в потоках энергичных заряженных частиц (космических лучей и авроральных электронов), поступающих в атмосферу и вызывающих изменения скорости ионизации. Изменения ионизации могут влиять на химический состав и температурный режим высокоширотной атмосферы, что, в свою очередь, приводит к изменениям циркуляции.

1. Raspopov O.M., Dergachev V.A., Kolström T. // Sol. Phys. 2004. V. **224**. P. 445.

ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ НА ЧАСТОТЫ ШУМАНОВСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Сурков В.В.

ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, surkovvadim@yandex.ru

Шумановские резонансы, возбуждаемые в волноводе Земля-ионосфера, обусловлены энергией электромагнитного шума, производимого глобальной грозовой активностью. Рентгеновское излучение (РИ) солнечной вспышки увеличивает ионизацию ионосферной плазмы дневного полушария вплоть до глубин D-слоя, тем самым изменяя отражающие свойства верхней стенки волновода Земля-ионосфера на солнечной стороне ионосферы. Небольшие изменения частот шумановских резонансов, связанные с этим эффектом, были обнаружены и выделены на фоне флуктуаций естественных электромагнитных шумов [1]. Предполагается, что причина этого явления заключается в изменении эффективной высоты ионосферы h_1 , на которой глубина проникновения поля из резонатора вглубь его верхней стенки (глубина скин-слоя для частот шумановского резонанса) равняется по порядку величины характерному вертикальному масштабу изменения электропроводности ионосферы [1,2].

Для теоретического анализа этого явления в работе рассматривается модель, в которой плоский поток рентгеновских фотонов падает на Землю. Предполагается, что коэффициент поглощения энергии фотонов зависит как от энергии падающих фотонов, так и от плотности воздуха. Зависимость этого коэффициента от энергии фотонов получена с помощью аппроксимации табличных данных. Для этого случая найдено решение уравнений, описывающее изменение с высотой концентрации фотонов и скорости образования электрон-ионных пар под действием РИ.

Для оценок, в качестве примера, используются данные измерений, зарегистрированных во время солнечной вспышки 09 августа 2011 г на спутнике GOES-15 с помощью двух датчиков РИ со спектрами в интервалах длин волн 0.5 – 4.0 Å и 1.0 – 8.0 Å. Предполагается, что распределение фотонов по энергиям подчиняется планковскому закону, с температурой, которая подбирается таким образом, чтобы потоки энергии в обоих каналах спутниковых датчиков равнялись измеряемым значениям. Изменения концентраций электронов, а также положительных и отрицательных ионов, описывается системой дифференциальных уравнений, учитывающих рекомбинационные процессы, присоединение электронов к нейтральным молекулам, скорость образования частиц под действием РИ солнечной вспышки и космических лучей. Все константы реакций, являющиеся функциями высоты, аппроксимируются с помощью табличных данных.

Решение этих уравнений с учётом изменения подвижности частиц с высотой используется в дальнейшем для расчёта средних по времени вспышки высотных распределений концентраций электронов и ионов, а также скалярной электропроводности нижней ионосферы. Результаты расчётов показывают, что РИ солнечной вспышки приводит к уменьшению эффективной высоты h_1 и, соответственно, к увеличению средневзвешенной частоты шумановских резонансов на величину $\Delta f \sim 0.1 - 0.2$ Гц, что согласуется с данными наблюдений [1]. Теория также объясняет близкую к линейной зависимость Δf от логарифма интенсивности РИ солнечной вспышки.

1. Швец А.В. и др. // Изв. Вузов. Радиофизика. 2017. Т. LX. № 3. С. 208-222.
2. Greifinger C., Greifinger P. // Radio Sci. 1978. V. 13(5). P. 831-837.

УДК 519

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО ОПОВЕЩЕНИЯ О СОСТОЯНИИ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Г.Р. Воробьева¹, А.В. Воробьев²

¹Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия, vorobeve.gulya@yandex.ru

²Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

Наивысшие риски снижения уровня техносферной безопасности, связанные с эффектами воздействия космической погоды на объекты высокоширотной инфраструктуры в арктическом регионе, определяются в области аврорального овала. Применение прогностических моделей для прогнозирования вероятности наблюдения полярных сияний в процессе принятия решений в различных областях напрямую связано с возможностью оперативного оповещения о предстоящих событиях с заданной временной периодичностью. Вместе с тем на сегодняшний день отсутствуют действующие системы массового оперативного оповещения, причем актуальность такого рода решений в свете важности своевременного получения информации о предстоящих полярных сияниях не вызывает сомнений.

В этой связи разработан проект «Aurora forecast», который представляет собой веб-ориентированное мультифункциональное приложение, реализующее анализ, обработку и визуализацию геопрограммной информации в области аврорального овала посредством специализированного комплекса геоинформационных и геостатистических инструментов. Отличительной особенностью указанного приложения является его интерактивность, позволяющая конечному пользователю взаимодействовать с геопрограммным изображением (виртуальным глобусом), варьируя состав и способ отображения соответствующих геопрограммных данных. В отличие от известных проектов схожего назначения, проект «Aurora forecast» обеспечивает поддержку рендеринга нескольких пространственных слоев, что позволяет оценивать комплексный характер пространственного распределения соответствующих параметров. Еще одной важной особенностью проекта «Aurora forecast» является то, что в отличие от других известных приложений он не генерирует простые статичные изображения: формируемое изображение является интерактивным, в частности, пользователь может по своему усмотрению изменять угол обзора пространственного региона, масштаб, последовательность размещения слоев. Поддержка интерактивности приложения выражена и в возможности напрямую взаимодействовать с пространственными слоями, например, посредством информационных окон (объекты типа InfoWindow), соответствующих определенному фрагменту слоя (в частности, одной из множества изолиний). Кроме того, приложение обеспечивает поддержку функции обратного геокодирования, что позволяет пользователю оперативно переключиться в искомую пространственную точку по ее полнотекстовому описанию.

Представляется важным отметить, что в проекте «Aurora forecast» визуализация предусмотрена не только в виде так называемых моментальных снимков (snapshot в веб-разработке), но и обеспечивает динамическую визуализацию как последовательность сменяющих друг друга пространственных слоев, соответствующих заданному временному интервалу с определенным пользователем шагом дискретизации. Данная функция также выгодно отличает проект «Aurora forecast» от иных приложений подобного типа.

Также предложена система оперативного оповещения в общедоступном Telegram-канале, которая в режиме реального времени с пятиминутным интервалом уведомляет пользователей о высокой (> 50 %) вероятности наблюдения полярного сияния в ночные часы в высокоширотных регионах планеты (<https://t.me/AuroraAlert>).

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ НА ДЛИТЕЛЬНЫХ ВРЕМЕНАХ И ЕЕ ВОЗМОЖНОЕ ВЛИЯНИЕ НА КЛИМАТ ЗЕМЛИ

Наговицын Ю.А.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, nag-gao@yandex.ru

В докладе рассмотрены длительные изменения солнечной активности (СА) в контексте ее возможного влияния на изменения климата Земли.

Солнечная активность – это изменения магнитного поля Солнца и его проявления на разных временных шкалах. Этим изменениям присуща цикличность на нескольких типичных временах. Отдельные циклы каждого временного масштаба различаются и по продолжительности, и по амплитуде. Поэтому изучение СА на временах от десятилетий до тысячелетий – нетривиальная задача, требующая специальных подходов.

Для изучения солнечной активности и составления ее реконструкций в длительном аспекте развивается т.н. «подход временных шкал», согласно которому в зависимости от возможностей наблюдательного материала (прямых и косвенных данных) выделяются следующие временные интервалы в прошлое:

~ 150 лет – надежные данные: служба Солнца;

~ 400 лет – отдельные прямые инструментальные наблюдения;

1000-2000 лет – не прямые данные (полярные сияния; пятна, видимые невооруженным глазом из летописей; космогенные изотопы ^{14}C , ^{10}Be);

~ 10000 лет (голоцен) – косвенные данные: ^{14}C (^{10}Be).

Шкалы последовательно «вложены» друг в друга, так что предыдущая служит опорной для последующей. Предложены методы такого последовательного приведения в единую систему индексов: метод мультимасштабных регрессий MSR и декомпозиции в псевдофазовом пространстве DPS с применением вейвлет-преобразования и подхода Такенса соответственно.

Приемлемая реконструкция изменений СА на временах порядка голоцена может продвинуть нас в важном вопросе солнечного влияния на земной климат и даже такого «острого» вопроса, как выявление техногенного вклада в современное глобальное потепление. В докладе приводится реконструкция, основанная на выравнивании амплитуд СА в отдельных вейвлет-компонентах по инструментальным и радионуклидным данным. Полученные данные и их сравнение с профилем климатических изменений в голоцене дают надежду на реальное действие одного из предложенных разными авторами трех известных физических механизмов влияния СА на климат.

Коротко в докладе обращается внимание на место СА в ее экстремальных проявлениях среди солнцеподобных звезд.

Автор выражает благодарность своим соавторам по работам, результаты которых обобщены в докладе: А. Певцову, К. Георгиевой, А.А. Осиповой, И.В. Кудрявцеву, В.Г. Иванову, А.И. Ларионовой (Кулешовой), С.Н. Федосеевой.

ПРОСТЕЙШАЯ МОДЕЛЬ ГЕОДИНАМО И ПЛАНЕТАРНЫЕ МАГНИТНЫЕ КАТАСТРОФЫ

С.В. Старченко

(ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия), sstarchenko@mail.ru

Из интегралов от уравнений геодинамо получена простая динамическая система для эволюции всей магнитной и кинетической энергий в ядре Земли. Система при известной скорости конвекции ~ 1 мм/сек и мощности силы Архимеда ~ 1 ТВт физически обосновывает следующие наблюдаемые характерные времена. Диффузионное время (~ 1 тыс. лет) определяется турбулентной вязкостью и магнитной диффузией. Время вековых вариаций (десятки лет) определяет периодическая во времени часть возврата системы к равновесию после небольшого отклонения от него. Самое короткое время (порядка нескольких месяцев) определяется экспоненциальной частью этого возврата и может соотноситься с джерками, а возможно, и с другими явлениями.

Определен новый структурный параметр – косеканс (~ 500 в ядре Земли) типичного угла между вектором магнитного поля и вектором скорости, который характеризует параллельность магнитного поля и течения проводящей жидкости. Произведение этого косеканса на характерный размер магнитного поля дает еще один новый, по сути, критический параметр L , который на порядок превышает радиус ядра Земли, свидетельствуя о том, что критический уровень возбуждения геодинамо существенно превышен. Траектория динамо-системы через размер L и этот косеканс соответствует ранее не обсуждаемому механизму равновесия величины магнитного поля за счет обратного влияния на течение при доминировании магнитной энергии над кинетической энергией. В значительной степени такое равновесие обусловлено тенденцией к установлению параллельности магнитного поля и скорости течений. При этом не требуется существенного подавления величин скорости для достижения равновесия, а достаточно лишь изменения структуры генерируемого магнитного поля, чтобы оно стало преимущественно параллельно скорости течения.

Рассматривается малоизученное отношение E удельной кинетической (~ 1 мкДж/кг) и магнитной энергий, которое мало для систем подобных геодинамо. Для геодинамо $E \sim 10^{-4}$ при полученном тут сильном (по терминологии С.И. Брагинского) поле ~ 10 мТл.

Найдено аналитическое решение полученной динамической системы в условиях типичного для геодинамо доминирования магнитной энергии над кинетической энергией, когда $E \ll 1$. При стационарной во времени и как обычно положительной мощности силы Архимеда это аналитическое решение при любом возможном начальном условии со временем асимптотически стремится к постоянным значениям, которые задаются устойчивыми стационарными точками полученной динамической системы. Стационарные точки определяются из алгебраической системы, которая получается при нулевых производных от рассматриваемых энергий.

Обычно положительная мощность силы Архимеда на значимое время (от тысячи лет) может, в принципе, стать отрицательной по величине в результате огромной и маловероятной (но допустимой в рамках времени жизни планеты) флуктуации. При этом вся магнитная энергия сможет убывать практически до нуля (нулевое поле – всегда является решением) вблизи частично устойчивых стационарных точек, несмотря на его доминирование вблизи других – устойчивых стационарных точек. Это может привести к глобальным катастрофическим вариациям, которые будут гораздо разрушительнее общеизвестных инверсий/экскурсов. Подобные катастрофы актуальны для планет и особенно для известных экзопланет, которые преимущественно близки (и соответственно легче выявляются) к материнской звезде, что усиливает взаимодействие атмосфер с внешними космическими факторами. Поэтому долговременное моделирование атмосфер планет невозможно без учета магнитного поля.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И АТМОСФЕРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КАК БИОТРОПНЫЕ ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

Рагульская М. В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ra_mary@mail.ru

В докладе рассматриваются постоянные экзогенные факторы воздействия на биосферу, такие как солнечная активность (СА), геомагнитная активность, космические лучи и атмосферное воздействие на разных временных промежутках, от нескольких часов и суток до нескольких столетий.

Показано, что на коротких временах основным действующим фактором является солнечная активность, а не геомагнитное возмущение [1].

- В диапазоне нескольких суток основная реакция организма человека происходит примерно через сутки после вспышки (за день до начала магнитной бури). Максимально биоэффективными оказываются рентгеновские вспышки, после них реакция биологических объектов наблюдается в диапазоне нескольких часов [1, 2].

- На десятилетнем масштабе динамика инфекционной заболеваемости также совпадает с максимумом именно солнечной, а не геомагнитной активности [3].

На масштабах цикла Гляйсберга бактерии и грибы – отслеживают вспышки и 11-летний цикл СА. Для бактериальных инфекционных заболеваний основной внешний агент - СА, основной объект воздействия – возбудитель инфекции. Бактериологические пандемии 20 века возникают вблизи максимума солнечной активности, как и было показано в работах А. Л. Чижевского на материале эпидемий второй половины 19 века. Возможный модулятор – солнечные космические лучи и коротковолновое излучение Солнца.

Вирусные эпидемии – отслеживают квази- столетний цикл СА. Возможный модулятор – галактические космические лучи. В связи с этим при анализе биомедицинских данных необходимо учитывать еще и атмосферные факторы, например – облачность. Интенсивность такого мутагенного фактора как вторичные космические лучи, на поверхности Земли отличается до 1,5 раз в зависимости от локальной облачности [4]. Этот фактор может оказать существенное влияние на появление новых мутаций патогенного вируса и развития локальных эпидемий.

Вирусные пандемии происходят как в максимуме, так и в минимуме 11-летнего солнечного цикла. В квазистолетнем цикле солнечной активности количество вирусных пандемий утраивается в минимуме, на начальной фазе роста и конечной фазе спада цикла. Это явление может быть использовано в качестве эффективного предиктора минимума цикла Гляйсберга за 15-20 лет до его наступления [3].

Также изучение взаимодействия вирусной и бактериальной биосферы Земли с факторами космической погоды, атмосферой и геомагнитным полем представляет особую ценность при моделировании возможных биосфер экзопланет [5].

1. Рагульская М. В. // Циклы СА и парадоксы пандемии Covid-19. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2023, v 63, №7, p 122, DOI: 10.1134/S0016793223070198
2. Belisheva N, Lammer H, Biernar H, Vashenuyk E. // The effect of cosmic rays on biological systems. *ASST* 8, 7-17 (2012).
3. M. V. Ragul'skaya, V. N. Obridko // Heliogeophysical Features and Viral Epidemics of the 21st Century. *GA*, 2024, Vol. 64, No. 8, pp. 86–92, DOI: 10.1134/S0016793224700397
4. Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космической погоды. Москва, Наука, 1972
5. M. V. Ragul'skaya // Search for Extraterrestrial Life: the “Goldilocks Zone” vs. the “Snow Maiden Zone”, ISSN 0038-0946, *Solar System Research*, 2024, Vol. 58, Suppl. 1, pp. S30–S39 DOI: 10.1134/S0038094624601099

ВЛИЯНИЕ БОЛИДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА СОСТАВ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Бережной А.А.¹

¹ ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, a_tolok@mail.ru

Рассмотрены химические процессы в горячих облаках, образующихся при вхождении метеороидов в атмосферу Земли. На начальной стадии торможения метеороидов в верхних слоях атмосферы Земли (высота 70-90 км) химический состав ударного облака не является равновесным и контролируется процессами абляции вещества метеороида. В рамках равновесного приближения оценен химический состав ударно-образованных облаков области высот 20-50 км. Оценены условия закалки химического состава таких облаков в зависимости от давления и высоты. Показано, что метеороиды являются важным источником атомов щелочных металлов в верхней атмосфере Земли.

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА ПОГОДУ ЗЕМЛИ

Костров А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kstr@ipfran.ru

Космическая пыль, как свидетельствуют наблюдательные данные, непрерывно осаждается на поверхность нашей планеты и активно влияет на электрические и погодные явления на Земле. В работе [1] показано, что в балансе токов и зарядов глобальной электрической цепи Земли надо учитывать потоки отрицательно заряженной пыли, которая беспрепятственно проникает через магнитное поле и вторгается в атмосферу. Стационарное состояние достигается за счет тока положительно заряженных ионов, которые проникают через авроральные широты в нижнюю ионосферу.

Анализ экспериментальных данных о состоянии атмосферы позволил установить, что на фоне квазистационарного потока пыли две тонны в секунду наблюдаются неоднородные и нестационарные потоки, которые определяют погодные явления на Земле. Анализ ежедневных карт озона в атмосфере Северного полушария позволили связать локальные нестационарные возмущения озона с флуктуациями потоков пыли, которая, двигаясь к поверхности Земли из стратосферы со скоростью 2-3 км/сутки, за счет вязкого трения увлекает сверху холодный воздух, что приводит к аномальным изменениям погоды. Наблюдается достаточно высокая корреляция образования озона на высотах 20-25 км с повышенными потоками космической пыли в локальных областях поверхности Земли и аномальными погодными явлениями на поверхности Земли, которые возникают через 10-12 суток в Евразии и 8-9 суток в Северной Америке.

Такой результат позволяет сделать вывод, что заряженные пылевые частицы являются катализаторами, на поверхности которых в разреженном газе происходит химическая реакция с образованием из атомов больших молекул. Этот вывод в отличие от модели Чепмена позволяет объяснить распределение озона в атмосфере Земли.

В работе приводятся примеры аномального поведения погоды, которые в некоторых случаях можно предсказать за 10-12 дней. Вертикальные локальные потоки космической пыли в зависимости от интенсивности потока приводят к возникновению циклонов и антициклонов на поверхности Земли. По возмущениям озона можно предсказать изменение погоды в локальной местности, например, похолодание, дождь, смерч, торнадо.

1. Kostrov A.V. Cosmic Dusty Plasma and the Global Electric Circuit of the Earth // Plasma Physics Reports. 2020. V. 46. P. 443.

КОСМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ СПРАЙТОВ

Храмова Е. Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, sinop@yandex.ru

Сравнительно недавно, около тридцати лет назад, в верхних слоях атмосферы были обнаружены необычные вспышки света – джеты, эльфы, спрайты – виды электрических разрядов, необходимым условием появления которых является грозовая туча непосредственно под ними, в тропосфере. Изучению этих явлений мешает то, что мезосфера, в которой они находятся, представляет собой для полетов «мертвую зону» – слишком разреженную для самолетов или аэростатов и слишком плотную для искусственных спутников. Пока приходится довольствоваться дистанционными наблюдениями. Джеты – редкое явление, а вот количество фотографий со спрайтами уже перевалило за тысячу.

Спрайты – электрические разряды холодной плазмы, обычно похожие на огромных красных медуз с длинными щупальцами. Появляются на высоте 50-130 км, часто группами, в длину достигают 60 км, до 100 км в диаметре. В верхней части спрайта можно различить вертикальные столбы «свечи» высотой до 20 км. Продолжительность свечения менее 100 миллисекунд.

В этом докладе будет предложена новая гипотеза, касающаяся природы спрайтов, основанная на визуальном наблюдении с учетом некоторых физических процессов, которые должны иметь место в грозовых облаках. Повторяющаяся пространственная структура спрайтов позволяет предположить наличие некоего единого фактора, запускающего их свечение. Дополнительным обстоятельством в поддержку гипотезы является и то, что она предлагает объяснение еще одной дискуссионной проблемы, касающейся мезосферы – происхождения серебристых облаков.

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЗАСОРЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА, ВЛИЯЮЩЕГО НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. Ю. Кузьмичева¹, С. С. Вениаминов², С. И. Козлов^{1,2}

¹ИДГ РАН, г. Москва, Россия, mukuzm@idg.ras.ru

²НИИЦ ВКС МО РФ, г. Москва, Россия

Рост количества космического мусора (КМ) в околоземном пространстве уже представляет угрозу для деятельности в космосе и может привести к негативным экологическим последствиям на Земле [1]. В данной работе получены оценки массы КМ, с которых начнется заметное влияние на прохождение солнечного излучения в диапазоне длин волн от вакуумного ультрафиолета до инфракрасного.

Для моделирования параметров космического мусора использовались данные о значениях потоков мелкого КМ на поверхности космических аппаратов, а также их распределения по размерам. Спектральный диапазон солнечного излучения, рассматриваемый в статье, составлял 0.1 – 100 мкм. В этот диапазон попадает область вакуумного ультрафиолета, содержащая линии La- α , La- β , определяющие ионизацию нижней и средней ионосферы, части областей видимого излучения, ближнего и дальнего инфракрасного излучения, играющего важную роль в тепловом балансе Земли. При моделировании рассматривалась атмосфера от высоты 200 до 1800 км. Предполагалось, что фрагменты КМ состоят из алюминия, так как известно, что в составе КМ преобладают металлы: Al, сталь (Fe), немного Cu и Ti.

По результатам моделирования было показано, что распределения КМ по размерам имеют существенное значение для получения критической оценки влияния КМ на солнечное излучение.

Полученная в работе на основании принятой модели оценка критической засоренности КМ показывает, что при экспоненциальном увеличении его количества в 20 раз он может потенциально представлять экологическую угрозу для окружающей среды. По оценкам скорости накопления массы мелкого КМ в настоящее время [2], это может произойти примерно через 50 лет.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий FMWN-2022-0021 и FMWN-2025-001.

1. Adushkin V.V., Kozlov S.I., Aksenov O.Y., Veniaminov S.S., Tyuzenkova V.V.// Acta astronautica 2020. V. 168. P. 591-597.

2. Адушкин В. В., Аксенов О.Ю., Вениаминов С.С., Козлов С.И.// Воздушно-космическая сфера 2019. №3. С.72 - 81.

ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ КАК ФАКТОР ПОЯВЛЕНИЯ ДЕПРЕССИВНО-ТРЕВОЖНОГО ТЕКСТОВОГО КОНТЕНТА В ИНТЕРНЕТЕ

Ожередов В.А., Бреус Т.К.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

Наша группа продолжает исследование влияния солнечных событий на психологию человека, применяя для этого анализ текстового контента с крупнейшего научного форума dxdu.ru, существующего без малого 19 лет. В данной работе мы оцениваем вклад краткосрочной динамики вспышечной активности на Солнце в диапазоне мягкого рентгена на увеличения интереса пользователей dxdu.ru к «хайповым» темам типа искусственного интеллекта и конспирологии. Представленные в широком доступе языковые модели выполняют задачу оценивания эмоциональной окраски текста (*положительный/отрицательный/нейтральный*) либо создания сжатого пересказа его содержания. Вторая функция для оценки психологического влияния космической погоды на психику человека бесполезна, а первая решает слишком узкий класс задач. В самом деле – человек может фрагментарно и поверхностно обсуждать «рациональные» темы типа науки, работы и развлечений, испытывая при этом сильные эмоции, но в то же время спокойно и последовательно излагать бред про опасность появления сознания у искусственного интеллекта. Отсюда следует необходимость создания лингвистических моделей на основе кластеров, группирующихся вокруг соответствующих определенным тематическим обсуждениям семантических ядер. В данной работе создан и апробирован алгоритм генерации ядер для двух конкретных тем (конспирология и ИИ) и проверена гипотеза о корреляции появления элементов этих ядер и разработанной нами для данной задачи специфически параметризованной интегральной характеристикой вспышечной активности.

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА, КЛИМАТ И ГЕОТЕКТОНИКА

Б. Комитов, В.Кафтан

БАН- Институт по астрономии с НАО; komitovboris97@gmail.com

Предметом настоящей презентации является обзор полученных нами результатов анализа данных о влиянии космической погоды и климата на земные тектонические процессы (вулканизм и сейсмичность). Представленная, на данном этапе исследований, информация о влиянии явлений космической погоды в большей мере относится к вулканизму, чем к сейсмичности. Анализу подвергнуты данные о 6215 вулканических извержениях, произошедших в календарном интервале 1550-2020 гг. Эти данные содержат полную совокупность вулканических событий, включенных в базу данных проекта Global Volcanism Program Смитсоновского музея естественной истории. В отличие от вулканических извержений соответствующая информация о землетрясениях пока проанализирована частично и носит предварительный характер. На данный момент эта информация ограничена десятью сильнейшими землетрясениями, произошедшими за последние ~ 120 лет. Более обширное исследование будет осуществлено позднее.

Нами использован обширный набор данных о космической погоде за последние ~150 лет. В исследование включены: 1) Суточные значения геомагнитного aa-индекса в календарном интервале 1868-2020 гг.; 2) Суточные данные о площади и морфологическом классе наблюдаемых на солнечном диске групп солнечных пятен в интервале 1874-2020 гг.; 3) Суточные непрерывные данные о внезапных ионосферных возмущениях (SID) между 1958 и 2020 гг.; 4) Спутниковые данные о рентгеновской вспышечной активности Солнца в интервале 1976-2020 гг.; 5) Аномалии приземного радиационного фона (GLE-события) с 1942 по 2020 гг.

В результате выявлена статистически значимая концентрация мощных вулканических извержений с эруптивным индексом $VEI \geq 5$ около экстремальных фаз 11-летних солнечных циклов Швабе-Вольфа. Эта тенденция строго выполняется для самых мощных извержений с индексом $VEI \geq 6$. Она указывает на наличие двух групп процессов со сходной физической природой. У одной из них максимальная частота событий наблюдается возле максимумов, а у второй – возле минимумов циклов Швабе-Вольфа.

Анализ временного ряда общей вулканической активности при помощи T-R периодограммного алгоритма и вейвлет-анализа указывает на наличие статистически значимых циклов продолжительностью 5-6, 11, 62, а также и мультиплета в диапазоне 18-24 лет. При этом самая мощная осцилляция соответствует периодам порядка 240-250 лет. Все выявленные колебания имеют аналоги в гелио-геофизических процессах, а цикл продолжительностью 240-250 лет отражается в гравитационно – приливных взаимодействиях Земли и Венеры. Интересно, что после исключения 250-летнего цикла, при помощи демодуляционной процедуры, в T-R спектре образуется слабый, но тоже статистически значимый цикл продолжительностью 178 лет, который, с одной стороны, соответствует аналогичным циклам пятнообразовательной активности Солнца, а с другой – проявляется в кинематике барицентра Солнечной системы.

Дальнейший анализ вулканических и сейсмических данных указывает на то, что, по всей видимости, связь между солнечно-геофизическими и тектоническими явлениями имеет триггерный характер. Активные солнечные явления, такие как солнечные вспышки в XEUV области провоцируют быстрые колебания электрических полей между ионосферой и верхними слоями литосферы Земли. В эпохах низкой солнечной активности подобная роль играют потоки галактических космических лучей (ГКЛ). На этих предпосылках также анализируются новые данные о физической связи между космическим и земным климатом.

О ВЛИЯНИИ КВАЗИ-ОДИННАДЦАТИЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ЭЛЬ-НИНЬО - ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ

Серых И.В.

ИО РАН, г. Москва, Россия, iserykh@ocean.ru

В работах [1-5] показано, что Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) является элементом Глобальной атмосферной осцилляции (ГАО). На ЭНЮК и ГАО оказывают влияние следующие внешние квазипериодические силы: годовой ход поступления тепла от Солнца, 14-месячное чандлеровское колебание полюсов Земли, 11-летнее изменение солнечной активности, 18.6-летняя лунно-солнечная нутация оси вращения Земли. Из-за несоизмеримости периодов воздействия этих внешних сил есть основания полагать, что динамика ЭНЮК является не хаотической, а может быть описана математической моделью Странного нехаотического аттрактора. Таким образом, динамика ЭНЮК может быть прогнозируема статистическими методами с достаточно большой заблаговременностью [6,7].

Показано, что ГАО помимо ЭНЮК содержит также моду связанную с Антарктическим колебанием – Южную кольцевую моду (ЮКМ) [8]. С помощью кросс-вейвлетного анализа исследованы связи между индексами ЭНЮК и ЮКМ. Найдены отрицательные связи между этими индексами на периодах колебаний около 11 лет. Выдвинута гипотеза о влиянии синхронизации и рассинхронизации квази-11-летних изменений солнечной активности и ЭНЮК на ослабление и усиление отрицательных связей между ЭНЮК и ЮКМ на периодах колебаний около 11 лет.

1. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Global El Niño – Southern oscillation teleconnections in CMIP6 models // Atmosphere. 2024. V. 15. P. 500.

2. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо - Южного колебания в моделях CMIP6 // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 607-631.

3. Serykh, I.V., Sonechkin D.M. El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 1443.

4. Серых И.В. О роли Эль-Ниньо - Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329-370.

5. Serykh I.V., Sonechkin D.M. interrelations between temperature variations in oceanic depths and the global atmospheric oscillation // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. 177. P. 5951-5967.

6. Серых И.В. Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо - Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей CMIP6 // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 474-506.

7. Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. International Journal of Climatology. 2021. V. 41. P. 3781-3792.

8. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Взаимосвязь Эль-Ниньо - Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов Глобальной атмосферной осцилляции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. С. 614-630.

СВЯЗЬ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ С 15 ПО 22 С МОЩНЫМ 198–ЛЕТНИМ КОЛЕБАНИЕМ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ, ОРБИТАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЮПИТЕРА И КВЕБЕКСКИМ СОБЫТИЕМ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Рассмотрены 8 солнечных циклов (SC) с SC15 по SC22, которые находятся в интервале между минимумами SC15 и SC23 (minSC15 и minSC23). Определена средняя длительность (L_m) этих 8 циклов в соответствии с данными таблицы солнечных циклов по версии (ISNv2.0), равная 10.38 лет. Интервал между minSC15 и minSC23, равный 83.04 лет, содержит не только 8 средних солнечных циклов L_m длительностью 10.38 лет ($\text{minSC23} - \text{minSC15} = 8 \times 10.38 \text{ л} = 83.04 \text{ л}$), но и 7 периодов орбитального периода Юпитера J ($83.02 \text{ л} = 7 \times 11.86 \text{ л}$, где $J = 11.86 \text{ л}$). Таким образом в интервале между minSC23 и minSC15 обнаружена связь длительности средних солнечных циклов $L_m = 10.38$ лет с орбитальным периодом движения Юпитера вокруг Солнца. Следует помнить, что Юпитер — единственная планета солнечной системы, у которой центр масс с Солнцем (барицентр) находится вне Солнца и отстоит от него примерно на 7 % солнечного радиуса.

Обнаруженный нами ранее мощный цикл в модуле межпланетного магнитного поля (ММП) имеет средний период 198 лет, который также содержит 19 периодов по 10.42 года ($198 = 10.42 \times 19$). Близкий период 198.6 лет содержит 10 периодов соединения Юпитер-Сатурн JS ($198.6 = 19.86 \times 10$, где $JS = 19.86$). Показано, что 198-летний цикл модуля ММП достиг сглаженного максимума вблизи максимума SC22 в ноябре 1989 года. В настоящее время продолжается медленный спад этого цикла (прогноз минимума модуля ММП в 2090 г).

За 40 лет в КрАО и других пяти обсерваториях мира сделано более 18.5 тыс. среднесуточных измерений общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды [1]. Там сообщается о загадочной существенной периодичности с средним периодом 19.8 лет, которая является 10м обертоном мощного колебания модуля ММП с средним периодом 198 лет, обнаруженного нами в и обсуждаемого здесь.

В 1989 году 13–14 марта произошла известная сильнейшая геомагнитная буря с начала космической эры, названная Квебекским событием. Сейчас многие полагают, что геомагнитная буря, вызвавшая событие в Квебеке, явилась результатом двух отдельных событий, известных как выбросы корональной массы (СМЕ) 10 и 12 марта 1989 года, а 13 марта на Землю обрушилась геомагнитная буря. Однако, существует целый ряд наблюдений, когда СМЕ регистрируются без каких-либо явлений на солнечном диске, в том числе и без солнечных вспышек. Вывод - необходим учет влияния мощных вековых циклов Солнца — таких, как 198 – летний цикл модуля ММП.

Литература

1. Котов В.А. 2009. Сорок лет измерений общего магнитного поля Солнца. Известия Крымской астрофизической обсерватории. Т. 105, № 1, С. 75 - 90. <https://jncrao.ru/index.php/izvcrao/article/view/883>

ВРАЩЕНИЕ СОЛНЦА, 27 СУТОК И КЛИМАТ ЗЕМЛИ

В. А. Котов

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым 298409, Россия

На основе измерений общего магнитного поля (ОМП) Солнца сделан вывод, что глобальное потепление на Земле может быть вызвано “космической аномалией”: разрушением 27-суточной когерентности вращения секторной структуры ОМП после 1993 г. Это явление, опосредованное межпланетной средой, могло привести к нарушению динамики магнитосферы и ионосферы Земли, а также сезонного поведения облачного покрова, регулярности теплообмена и погоды на Земле. Более того, в 2024 г. наблюдалось нарушение когерентности вращения и Солнца-как-звезды (оно как бы “остановилось”), следствием чего может быть продолжение земного “потепления”. Физический механизм влияния “вращение Солнца — климат Земли” неясен, но подчеркнута новая солнечно-земная парадигма: “беспорядок на Солнце — хаос погоды и стихийные бедствия на Земле?”.

Особое внимание обращено на принципиальный характер 27-суточного резонанса, загадочного происхождения и неясной физики, между переменностью ОМП и периодическими движениями Солнца, Меркурия, Венеры и Земли. Отмечена также связь между 22-летним циклом Хейла, вращением Солнца и движениями Земли: земной климат, по-видимому, существенно зависит от степени выполнения соответствующих резонансов. Эти факты усиливают опасения насчёт аномального поведения магнитного Солнца в настоящее время: пока нет оснований говорить о восстановлении его нормального вращения и, следовательно, об улучшении — стабилизации, регулярном характере, — атмосферы, погоды и климата Земли, а также о снижении частоты экстремальных погодных явлений и стихийных бедствий.

РАСПОЛОЖЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ НА ПРОТЯЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МАГНИТНЫХ ЛИНИЙ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ

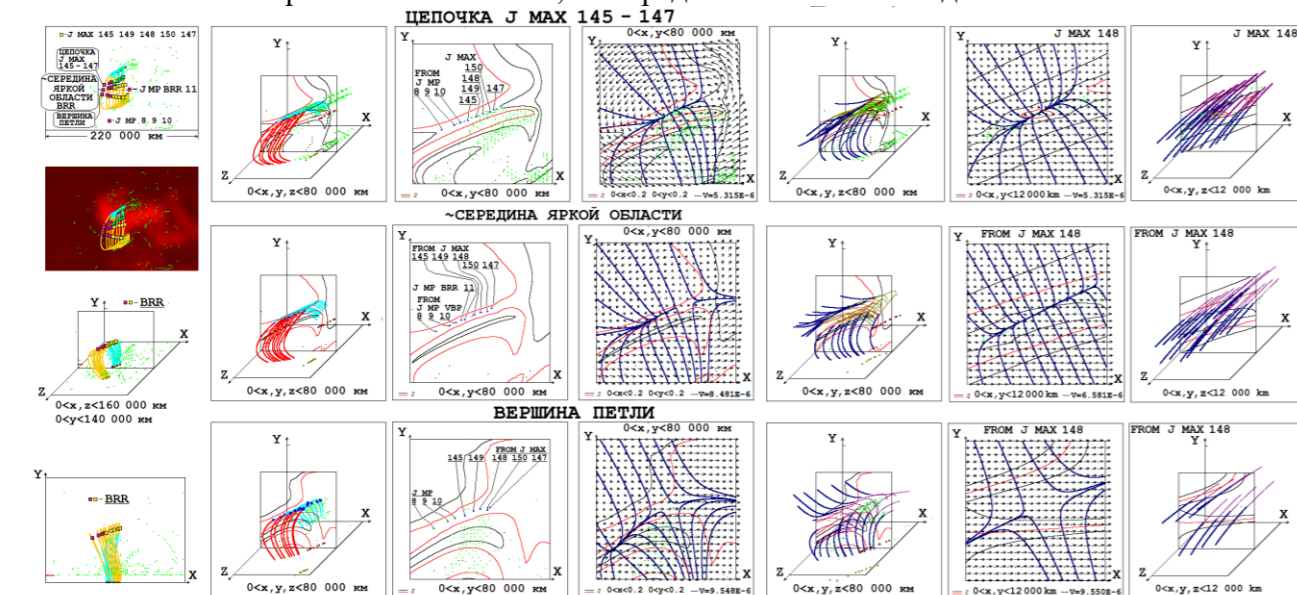
Подгорный А.И.¹, Подгорный И.М.²

¹ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Продолжено исследование протяженной поверхности магнитных линий с повышенной плотностью тока. Линии этой поверхности образуют аркаду. Появление такой поверхности, по-видимому, может решить проблему совпадения положений вспышек, найденных из результатов МГД моделирования с наблюдаемыми положениями вспышек, представляющие собой яркие области вспышечного излучения.

Согласно имеющимся представлениям, во время солнечной вспышки освобождается энергия магнитного поля токового слоя, образовавшегося в результате накопления возмущений в окрестности особой линии магнитного поля X-типа. Определить возможность появления вспышки и ее положение по результатам МГД достаточно трудно, из-за сложности конфигурация магнитного поля в короне. Поле сильно запутано, на конфигурацию X-типа может быть наложено расходящееся магнитное поле, так что по виду магнитного поля, полученного в результате МГД моделирования, непосредственно определить положение особой линии практически невозможно, даже если в ее окрестности начинает появляться или уже образовался токовый слой. Для этой цели создана графическая система поиска положений вспышек, основанная на поиске максимумов плотности тока и исследовании конфигураций магнитного поля в их окрестностях. Предполагается, что в центре токового слоя абсолютная величина плотности тока достигает максимума. Однако, как показал анализ рассчитанного поля, это предположение не всегда выполняется.



Для изучения возможности и мест появления вспышечной неустойчивости, проведен анализ конфигураций магнитного поля в областях с центрами в различных точках аркады. Эти конфигурации, а также расположение поверхности аркады в пространстве и на солнечном диске представлены на рисунке. Анализ показывает, что условия определяемые конфигурацией магнитного поля, лучше способствуют развитию вспышечной неустойчивости не в месте максимума плотности тока, а в вершине арки.

ГЛОБАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗОНОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ДО ВЫСОТ 130 КМ В СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ НА СОЛНЦЕ

Криволуцкий А.А.^{1,2}

¹Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета, г. Долгопрудный М.О., Россия, krivolutsky@mail.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В работе использована глобальная трехмерная фотохимическая модель CHARM-DE до высоты 130 км, включающая нейтральные и заряженные компоненты. Расчеты описывают суточный и сезонный ход компонент от поверхности Земли до высоты 130 км. Изменения солнечной радиации в цикле активности не учитывались. Расчеты показали согласие с наблюдениями.

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА РАЗВИТИЕ СКЛОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ТЕРРИТОРИИ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ В 2022-2024 ГОДАХ

Мальнева И.В., Черкесов А.А.

ФБГУ ВГИ, г.Нальчик, Россия, malnir@mail.ru

Кабардино-Балкария с точки зрения активизации селей и других парагенетически связанных с ними оползневых и эрозионных процессов летом 2022, 2023 и 2024 годов была наиболее благополучным регионом на Северном Кавказе.

В то же время в XXI веке на территории КБР прошли катастрофические селевые потоки в высокогорье, связанные с гибелью людей. Особенно большие жертвы были в 2000 году, когда была разрушена часть г. Тырнауз. Основным изменяющимся фактором, обуславливающим развитие склоновых процессов, являются метеорологические условия. Во все указанные годы территория находилась под воздействием антициклона пополняемого воздушными массами с севера в тылу проходивших севернее южных циклонов. Синоптические условия за указанные годы мало отличались.

Характер погоды во все указанные годы был обусловлен соответствующим характером атмосферной циркуляции. Для изучения режима ряда природных процессов использовалась типизация макроциркуляционных процессов, разработанная Б.Л. Дзердзеевским и др. (Кононова, 2015). К настоящему времени календарь последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (сокращенно ЭЦМ) составлен с 1899 по 2019 гг. как в публикациях, так и на сайте <https://atmospheric-circulation.ru>. В указанные годы преобладала южная меридиональная циркуляция.

Однако, при сходных метеорологических условиях активизация селей в Приэльбрусье в 2022, 2023 и 2024 годах не произошла. На характеристику космической погоды мы обратили внимание при ежегодных исследованиях условий формирования селей в Приэльбрусье (после катастрофического селя 2000 г.) и в течение 2001—2024 гг. вели наблюдения с целью установить связь между проявлением селей и показателями космической погоды. По материалам сайта spaceweather.com в 2021 году характер активности Солнца начал меняться. Хотя солнечная активность оставалась очень высокой, различные события в эти годы чаще происходят на обратной стороне Солнца и не оказывают очень большого влияния на развитие процессов на Земле. В сравнении с аномально жаркой погодой летом 2000, 2017, 2022, 2023 и 2024 г показатели космической погоды в последние годы различны. В 2022, 2023 и 2024 годах, количество корональных дыр существенно уменьшилось на земной стороне Солнца, инъекций плазмы солнечного ветра практически не происходит. Фактические данные по солнечному ветру помещены в сети Интернет в открытом доступе (например, на сайтах <http://www.swpc.noaa.gov/products>, <http://spaceweather.com/>, www.tesis.xras.ru).

Наибольшие амплитуды всплесков значений скорости солнечного ветра, достигающие до 1800–2300 км/с и протонов до 10–50 ед./см³ и более, наблюдаются тогда, когда он истекает из корональных дыр – открытых магнитных конфигураций с расходимостью магнитных силовых линий. В 2022, 2023 и 2024 годах количество корональных дыр существенно уменьшилось на земной стороне Солнца. Уровень солнечной активности в июне – июле 2023 года достиг максимальных значений за последние 20 лет. Куда дальше двинется Солнце, пока непонятно ([tesis.xras.ru](http://www.tesis.xras.ru)) Можно отметить, что рост активности Солнца пока не привел к симметричному отклику на Земле. Почти все крупные вспышки летом били мимо Земли. По настоящему сильных взрывов на Солнце в этом цикле пока не было, но они возможны в недалеком будущем.

ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЗОН СЕВЕРНОЙ КАЛИФОРНИИ НА СИЛЬНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Лазарева Е.А.¹, Новиков В.А.^{2,3}

¹ИС РАН, г. Бишкек, Кыргызстан, ekaterina.lazareva88@yandex.ru

²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, novikov@ihed.ras.ru

³ИДГ РАН, г. Москва, Россия, novikov.va@idg.ras.ru

Несмотря на последние результаты статистического анализа, демонстрирующие отклик сейсмичности на пульсации геомагнитного поля (ГМП), вызванные сильными вариациями параметров космической погоды [1, 2], механизм триггерного воздействия таких пульсаций, создающих всплески теллурических токов в разломах земной коры с амплитудой до 10⁻⁶ А/м², до сих пор не понят. Исследования динамического триггерного воздействия на очаги землетрясений (ЗТ) показали, что наиболее чувствительными зонами земной коры к внешним воздействиям являются флюидонасыщенные области, такие как геотермальные зоны [3].

С целью выявления возможной роли поведения флюидов в земной коре под воздействием пульсаций ГМП в электромагнитных триггерных эффектах проведен статистический анализ сейсмичности трех геотермальных зон Северной Калифорнии (Long Valley, Coso и Geysers) во время 24 сильных пульсаций горизонтальной компоненты ГМП $|dB_x/dt| \geq 50$ нТл/мин), зарегистрированных на обсерватории Fresno в период 1991-2024 гг. Для анализа использован каталог Центра данных землетрясений Северной Калифорнии (NCEDC), представительность которого для данного периода времени по регистрируемой магнитуде ЗТ составляет $M \geq 1.0, 0.9$ и 1.2 для геотермальных зон Long Valley, Coso и Geysers, соответственно. Для каждой из трех геотермальных зон методом когерентного суммирования получено распределение суточного количества ЗТ в период ± 15 суток от момента пульсации ГМП.

Показано статистически значимое увеличение региональной сейсмичности геотермальных зон на 2-10 сутки после пульсации ГМП, когда суточное количество ЗТ превышает среднее количество ЗТ, определенное для предыдущих 30 суток, плюс утроенное значение среднеквадратичного отклонения σ . Данный эффект может указывать не только на наличие триггерного потенциала пульсаций ГМП, но и на возможную роль флюидов в электромагнитном инициировании ЗТ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00205).

1. Sorokin V., Novikov V. Possible Interrelations of Space Weather and Seismic Activity: An Implication for Earthquake Forecast. *Geosciences*, 2024, 14, 116.
2. Новиков В.А., Сорокин В.М. Электромагнитные триггерные эффекты в системе “ионосфера—атмосфера—литосфера” и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений // *Физика Земли*. - 2024. - №5. - С. 97-112.
3. Aiken, C., and Z. Peng (2014), Dynamic triggering of microearthquakes in three geothermal/volcanic regions of California, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119, 6992–7009.

**ЗАКОН КВАНТИТАТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В
ФУНКЦИЯХ БИОСФЕРЫ А.Л. ЧИЖЕВСКОГО –
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ СКВОЗНОЙ ЗАКОН
ГЕОГРАФИИ**

Голованов Д.Л., Дьяконов К.Н.

*Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
dm_golovanov@mail.ru*

Наследие А.Л. Чижевского имеет всепроникающее значение практически для всех разделов географии. Речь идет как об отзывчивости на циклические флуктуации солнечной активности всех приповерхностных оболочек Земли, так и о неоднородности и даже противоположной направленности отклика в крупных регионах планеты, что было названо законом квантитативной компенсации в функциях биосферы А.Л. Чижевского, законом, сопоставимым по значимости с законом географической зональности Докучаева-Гумбольдта.

С момента выхода в свет книги А.Л. Чижевского «Земное эхо солнечных бурь» в 1973 году, наследие ученого привлекало внимание представителей самых разных направлений географической науки.

Такие направления, как хронобиология и хрономедицина нашли свое оформление в виде комиссии при президиуме РАН. На наш взгляд, пришло время и для оформления такого направления как ХРОНОГЕОГРАФИЯ (Time Geography и/или астрогография) вокруг которых объединятся продолжатели дела А.Л. Чижевского. Хроногеография должна быть ориентирована, прежде всего, на прогноз, в отличие от палеогеографии, но используя ее достижения.

**ИНФРАКРАСНОЕ СВЕЧЕНИЕ ОКИСИ АЗОТА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ
ВЫСЫПАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ**

Кириллов А.С.¹, Рюрик-Андропов И.Л.²

¹ Полярный геофизический институт, г. Анатиты, Россия, kirillov@pgia.ru

² ООО Оборонпродкомплект, г. Москва, Россия

При вторжении высокоэнергичных частиц в высокоширотную атмосферу Земли на высотах потери энергии частиц происходит увеличение концентраций нечетного азота NO_x и нечетного водорода HO_x за счет каскада процессов диссоциации, ионизации и рекомбинации. В настоящем исследовании рассмотрены механизмы образования колебательно-возбужденных молекул NO и N_2 на высотах 40-100 км атмосферы Земли при вторжении высокоэнергетических электронов. Основные результаты расчетов состоят в следующем.

1. Моделирование колебательных населенностей $\text{N}_2(X, v=2-30)$ во время высыпания высокоэнергичных электронов на рассмотренных высотах атмосферы позволило оценить вклады различных механизмов образования колебательно-возбужденных молекул азота $\text{N}_2(X, v>0)$. Возбуждение вторичными электронами является основным для всех колебательных уровней $v=1-10$ основного состояния молекулы азота. Также получено, что внутримолекулярный процесс переноса электронной энергии при неупругих столкновениях $\text{N}_2(A, v=0-5)+\text{N}_2$ и $\text{N}_2(A, v=0-5)+\text{O}_2$ доминирует при колебательном возбуждении высоких колебательных уровней $v=20-30$ основного состояния.

2. Исследование колебательных заселенностей $\text{NO}(X, v=1-20)$ во время высыпаний частиц на высотах высокоширотной атмосферы показало, что химическая реакция метастабильного атомарного азота $\text{N}(^2\text{D})$ с молекулярным кислородом O_2 является основным механизмом образования колебательно-возбужденных молекул окиси азота $\text{NO}(X, v>0)$ и излучения 5,3 мкм и 2,7 мкм инфракрасных полос NO на высотах потери энергии высыпающихся электронов. Показано, что относительный вклад VV' -процесса переноса колебательной энергии с колебательно-возбужденного $\text{N}_2(X, v>0)$ может быть значительно увеличен и сравним с вкладом химического процесса в тех случаях, когда концентрации окиси азота $[\text{NO}]$ возрастают до значений порядка концентраций молекулярного азота $[\text{N}_2]$ в атмосферной смеси газов.

ОСОБЕННОСТИ ПЯТИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ, ВКЛЮЧАЮЩИХ 19 ЦИКЛ С САМЫМ БОЛЬШИМ МАКСИМУМОМ В ИСТОРИИ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Рассмотрен интервал, включающий 5 солнечных циклов (SC) SC(15-19), который начинается с SC15 и заканчивается SC19 с самым большим максимумом 285 ($\max SC19=285$) с 1755 года по настоящее время по версии (ISNv2.0) [1]. В анализируемом интервале циклы были разделены на четные и нечетные.

Показано, что у нечетных циклов длительность (L) каждого цикла увеличивалась одновременно с максимумом цикла – чем больше L цикла, тем больше его максимум: у SC15 $L=10.042$ лет и $\max SC15=176$; у SC17 $L=10.37$ лет и $\max SC17=199$, а у SC19 $L=10.455$ лет и $\max SC19=285$. В результате средняя длительность (L_m) для нечетных циклов 15,17,19 $L_m=10,28$ л. Полученный средний период L_m для этих нечетных циклов, равный 10.28 лет, может быть 35м обертоном периода движения солнца относительно центра масс солнечной системы MC ($2MC/35л=10.21л$, где $MC=178.7$ лет), а также 16м обертоном орбитального периода Нептуна N ($N/16л=10.29$ лет, где $N=164.79$ л).

У четных циклов, как и у нечетных, длительность L также увеличивалась по мере роста максимумов этих циклов: у SC16 длительность $L=10.042$ лет (такая же L, как у SC15, но $\max SC16=130$ гораздо меньше, чем у SC15 с $\max SC15=176$); у следующего SC18 $L=10.123$ лет и $\max SC18=219$. Два четных циклов 16 и 18 имеют среднюю длительность L_m , равную 10.082 лет. Полученный средний период L_m для этих четных циклов, равный 10.082 лет, может быть 17м обертоном соединения Уран-Нептун UN ($UN/17=10.082$ л, где $UN=171.4$ л).

Литература

1. List of solar cycles 1. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛОС МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА НА ВЫСОТАХ НОЧНОЙ МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Куликов Ю.Н., Кириллов А.С.

Полярный геофизический институт, г. Анатиты, Россия, kulikov@pgi.ru

Проведен расчет констант гашения электронно-возбужденного состояния $b^1\Sigma_g^+$ молекулярного кислорода молекулами O_2 и N_2 . Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Рассчитанные коэффициенты гашения синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ используются для определения населенностей различных колебательных уровней ν электронно-возбужденного молекулярного кислорода на высотах ночной мезосферы и нижней термосферы Земли. Выполнены расчёты относительных населенностей синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$, образованного в случае высыпания авроральных электронов и в тройных столкновениях с участием двух атомов кислорода. Сравнение рассчитанных населенностей с результатами имеющихся в научной литературе экспериментальных оценок как для полярной ионосферы, так и для ночного свечения Атмосферных полос O_2 дает хорошее согласие. При этом, сравнение рассмотренных двух случаев образования $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$ на высотах ночной мезосферы и нижней термосферы Земли показывает, что колебательные населенности состояния $b^1\Sigma_g^+$ молекулы O_2 в полярной ионосфере и в ночном свечении значительно различаются.

КВАЗИДВУХЛЕТНЯЯ МОДУЛЯЦИЯ АНТАРКТИЧЕСКОГО СТРАТОСФЕРНОГО ВИХРЯ: СОГЛАСИЕ ИЛИ ПРОТИВОРЕЧИЕ С ЭФФЕКТОМ ХОЛТОНА-ТАНА?

Габис И.П.

Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург, Россия, gabis@aari.ru

Квазидвухлетние осцилляции (КДО) зонального ветра экваториальной стратосферы, как существенная часть глобальной циркуляции атмосферы, оказывают значительное влияние на межгодовые изменения процессов в высоких широтах. Зависимость стратосферного полярного вихря, который является необходимым условием образования озоновой дыры в Антарктике, от фазы КДО общеизвестна как эффект Холтона–Тана, согласно которому при западной фазе КДО зимний вихрь интенсивнее, и температура в полярной шапке ниже, что способствует более сильному понижению содержания озона, чем при восточной фазе КДО. В то время как в Северном полушарии это справедливо в течение зимы, в Южном полушарии зависимость от КДО наблюдается только весной, что обычно объясняют большей интенсивностью зимнего вихря Южного полушария по сравнению с вихрем Северного полушария. Связь интенсивности вихря с КДО зависит от высотного уровня, по направлению ветра на котором определяется фаза цикла КДО. КДО – это непрерывный спуск восточного и западного ветровых режимов. Поэтому, вследствие переменного периода циклов КДО, фазовое соотношение между сезонным циклом и циклом КДО постоянно меняется. Это создает проблемы при изучении КДО модуляции антарктического зимнего вихря и весенней озоновой дыры, потому что приводит к множеству вариантов высотной структуры ветра КДО в период их наблюдения. В настоящее время неизвестно, при каком распределении по высоте восточного и западного ветра КДО оказывает наиболее сильное влияние на внетропическую стратосферу.

В работе использован метод анализа наблюдений, учитывающий сезонные закономерности КДО, и, следовательно, эволюцию ветра КДО относительно сезонов года. Это существенно ограничивает число возможных вариантов совпадения фаз цикла КДО с сезонами и позволяет выявить типичные черты межгодовых изменений интенсивности вихря и озоновой дыры в Антарктике, обусловленные КДО. Результаты анализа указывают на новые особенности КДО модуляции антарктического вихря. Влияние КДО наблюдается не только весной на стадии ослабления зимнего вихря, но и в период его максимальной интенсивности. При этом изменения скорости ветра в период зимнего максимума противоположны изменениям весной в период озоновой дыры – если зимний вихрь интенсивнее (слабее) среднего уровня, то в период озоновой дыры вихрь слабее (интенсивнее).

СЕКЦИЯ «Внешняя гелиосфера»

Понедельник, 10.02.2025 г., Комната 200

		Председатель: <u>Измоленов В.В.</u>	
	Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада
1	11.00 - 11.15	Балюкин И.И.	Пояс энергичных нейтральных атомов: кинетическое Моделирование и сравнение с данными КА IBEX
2	11.15 - 11.30	Годенко Е.А.	Анализ распределения по размерам пыли в локальной Межзвездной среде по данным космического аппарата УЛИСС
3	11.30 - 11.45	Корольков С.Д.	Взаимодействие LIC и G облаков
4	11.45 - 12.00	Титова А.В.	Исследование влияния Н-Р, Н-Н упругих столкновений и углового рассеяния на свойства межзвездных атомов водорода в гелиосфере
		12.00 - 12.15	Официальное открытие конференции

ПОЯС ЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ: КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ КА ИВЕХ

Балиюкин И.И., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, igor.baliukin@cosmos.ru

Одним из главных открытий, сделанных космическим аппаратом (КА) Interstellar Boundary Explorer (IBEX), является обнаружение пояса энергичных нейтральных атомов (ЭНА) — узкой полосы на небе, из которой наблюдаются повышенные потоки ЭНА. Считается, что за формирование пояса ЭНА ответственен механизм вторичной перезарядки, при котором «первичные» энергичные атомы водорода, образующиеся в результате процесса перезарядки между протонами солнечного ветра и межзвездными атомами водорода в гелиосфере, выходят за пределы гелиопаузы и подвергаются еще одной перезарядке с протонами локальной межзвездной среды (ЛМС), образуя захваченные протоны. Некоторые из этих захваченных протонов впоследствии испытывают процесс перезарядки с межзвездными атомами водорода, образуя «вторичные» ЭНА, часть из которых возвращается к Солнцу и наблюдается на КА ИВЕХ.

В докладе будет представлено описание кинетической модели, разработанной для моделирования потоков «вторичных» ЭНА. Моделирование пояса ЭНА было проведено с использованием глобальных распределений плазмы и атомов водорода в гелиосфере, полученных по результатам расчетов кинетико-магнитогидродинамической модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС. Модель учитывает все основные популяции «первичных» ЭНА, включая нейтрализованные тепловые протоны солнечного ветра (нейтральный солнечный ветер), нейтрализованные захваченные протоны, а также ЭНА, которые рождаются во внутреннем ударном слое (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой). Динамика захваченных протонов за пределами гелиопаузы описывается уравнением переноса для гиротропной функции распределения частиц по скоростям в предположении отсутствия рассеяния по питч-углу и диффузии в пространстве скоростей.

Результаты численного моделирования качественно воспроизводят наблюдения пояса ЭНА, выполненные прибором IBEX-Hi (0.5–6 кэВ), и демонстрируют хорошее количественное согласие с данными на низких гелиоширотах. Однако модель предсказывает меньшие величины потоков на высоких гелиоширотах, что, вероятно, является следствием нестационарного поведения солнечного ветра, которое не было учтено в разработанной стационарной модели. В работе подчеркивается важность учета ЭНА из внутреннего ударного слоя — популяции, впервые рассмотренной в рамках кинетической модели при моделировании пояса ЭНА — для корректной интерпретации данных ИВЕХ-Hi на самых высоких энергетических каналах.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗМЕРАМ ПЫЛИ В ЛОКАЛЬНОЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА УЛИСС

Годенко Е.А., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, egor.godenko@cosmos.ru

Межзвездные пылевые частицы проникают в гелиосферу из-за относительного движения Солнца и Локальной межзвездной среды (ЛМС). В гелиосфере и ее окрестностях на частицы действуют три основные силы: гравитационное притяжение к Солнцу, радиационное давление солнечных фотонов и электромагнитная сила. Под действием этих сил траектории частиц отклоняются от первоначального направления, а их распределение становится существенно неоднородным.

Наиболее успешные с научной точки зрения экспериментальные данные по межзвездной пыли были получены на космическом аппарате (КА) Улисс [1]. В течение миссии КА Улисс было обнаружено около 1000 частиц межзвездного происхождения, что стало возможным благодаря особой орбите аппарата, которая была расположена практически перпендикулярно плоскости эклиптики. На основе обнаруженных пылинок были определены потоки межзвездной пыли вдоль траектории аппарата [2], а также распределение частиц по массе. Оказалось, что величина потока пыли существенно меняется в течение миссии, однако с помощью существующих моделей распределения пыли до сих пор не удавалось воспроизвести полученные экспериментальные данные [3].

В данной работе мы проводим моделирование потоков межзвездной пыли вдоль траектории КА Улисс. Преимуществом используемой модели является то, что в ней впервые одновременно учитываются прохождение частиц через гелиосферный ударный слой и нестационарность гелиосферного магнитного поля [4]. Результаты моделирования для частиц отдельных размеров показывают, что:

- потоки мелких пылинок (радиус $a < 200$ нм) равны нулю почти на протяжении всей миссии, за исключением наиболее удаленных участков орбиты аппарата;
- потоки частиц пыли среднего размера (радиус $a = 200-400$ нм) достаточно хорошо воспроизводят экспериментальные данные во второй части миссии (с 1999 г.);
- потоки крупной пыли (радиус $a > 400$ нм) практически не меняются в течение миссии.

С помощью параметрического исследования определено распределение частиц по размерам в ЛМС, с помощью которого наилучшим образом можно одновременно воспроизвести потоки пыли и распределение частиц по массам на КА Улисс. Полученное распределение по размерам существенно отличается от стандартного MRN распределения пыли в межзвездной среде [5]. Показано, что для объяснения данных КА Улисс частиц радиуса $a < 290$ нм в ЛМС должно быть меньше, чем это предсказывается из MRN распределения.

1. Grun E., Zook H.A., Baguhl M. et al. // Nature. 1993. V. **362**. P. 428.
2. Strub P., Kruger H., Sterken V.J. // The Astrophysical Journal. 2015. V. **812**. Id. 140.
3. Sterken V.J., Strub P., Kruger H. et al. // The Astrophysical Journal. 2015. V. **812**. Id. 141.
4. Godenko E.A., Izmodenov V.V. // Astronomy and Astrophysics. 2024. V. **687**. Id. L4.
5. Mathis J.S., Rumpl W., Nordsieck K.H. // Astrophysical Journal. 1977. V. **217**. P. 425.

Взаимодействие LIC и G облаков

Корольков С.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Мы следуем предположениям, сделанным в работе [1] о том, что в настоящее время Солнце находится в области взаимодействия локального межзвездного облака (LIC) и G-облака. В то же время параметры этих облаков, а также локальной межзвездной среды (VLISM), окружающей Солнце, известны с некоторой степенью точности. Поэтому целью данной работы является: (1) моделирование области взаимодействия двух облаков и определение положения Солнца в области взаимодействия с помощью известных параметров VLISM, а также (2) уточнение параметров облаков с использованием более надежных измерений VLISM. Используется решение задачи о распаде произвольного разрыва для получения оценок параметров водорода и плазмы в области взаимодействия облаков для широкого диапазона параметров. Затем моделируется взаимодействие облаков напрямую, с помощью решения кинетического уравнения Больцмана для водорода и газодинамических уравнений Эйлера для плазмы. При этом учитывается эффект обмена зарядами между протонами и атомами водорода (Нр-столкновение), а также упругие столкновения молекул водорода друг с другом (НН-столкновение). Исходя из современных предположений о концентрации водорода в LIC и облаке G, которая не должна превышать $0,1 \text{ см}^{-3}$, мы обнаружили, что Солнце находится в G-облаке, а не в LIC, как считалось ранее. Точнее, Солнце находится в ударном слое, состоящем из нагретой плазмы G-облака. Кроме того, мы значительно сузили возможные параметры для водорода и плазмы в областях LIC, G-облаке и VLISM.

1. Swaczyna, P., Schwadron, N. A., Mobius, E., et al. 2022, ApJ, 937, L32.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ Н-Р, Н-Н УПРУГИХ СТОЛКНОВЕНИЙ И УГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НА СВОЙСТВА МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ

Титова А.В., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, avtitova@hse.ru

Межзвёздные атомы водорода проникают в гелиосферу через область взаимодействия солнечного ветра с межзвёздной средой благодаря их большой длине свободного пробега. Перезарядка атомов с протонами рассматривается как основной процесс взаимодействия между компонентами. В большинстве моделей другие процессы, такие как упругие Н-Н и Н-р столкновения, не учитываются. Более того, предполагалось, что скорость нового атома в точности равна скорости протона до взаимодействия. Это соответствует рассеянию под углом π в системе отсчета центра масс. Цель данной работы — исследовать влияние упругих Н-Н и Н-р столкновений, а также углового рассеяния во время перезарядки на распределение межзвёздных атомов в гелиосфере и на её границе.

Для достижения поставленной цели была разработана простая и легко воспроизводимая стационарная одномерная модель прохождения межзвездных атомов сквозь ударный слой. Рассматривается плоский слой (длины L) плазмы, внутри которого необходимо решить кинетическое уравнение Больцмана для атомов водорода с учетом взаимодействия посредством перезарядки и упругих столкновений. Распределение протонов в слое считается максвелловским, а его параметры (концентрация, средняя скорость, температура) зависят от расстояния и задаются на основе глобальной модели. На внешней границе задается максвелловская функция распределения атомов водорода. Задача решена с помощью имитационного метода Монте-Карло. В итоге, были вычислены функция распределения атомов водорода и ее моменты на разных расстояниях.

Результаты показывают, что существует разница в поведении функции распределения при учете упругих столкновений, а изменения в моментах распределения достигают 10%. Поэтому предположения, ранее использованные в глобальном моделировании, могут оказаться неверными.

СЕКЦИЯ «Атмосферно-магнитосферные связи у планет Солнечной системы»

Понедельник, 10.02.2025 г., Комната 200

Председатель: Федорова А.А.			
Время	Ф.И.О. 1-го автора	Название доклада	
1	15.00 - 15.15	Шайхисламов И.Ф.	Наблюдения горячих экзопланет как новый инструмент исследования и прогноза космической погоды.
2	15:15 - 15.30	Шарипов С.С.	Моделирование поглощения в линиях метастабильного гелия и Бальмер-альфа для горячего юпитера HAT-P-32 b
3	15.30 - 15.45	Шематович В.И.	Высыпания авроральных электронов в верхние атмосферы планет земного типа как важный источник горячих фракций атомов азота и кислорода.
4	15.45 - 16.00	Жилкин А.Г.	Численная МГД модель для исследования высыпания электронов в верхние атмосферы экзопланет типа Венеры.
5	16.00 - 16.15	Беляев Д.А.	Нейтральная атмосфера Марса, от мезосферы до CO ₂ экзобазы, по данным эксперимента ACS миссии «ЭкзоМарс-2016»
6	16.15 - 16.30	Антоненко О.В.	Особенности гашения электронно-возбужденного кислорода в атмосферах планет земной группы с различной концентрацией CO ₂
	16.30 - 17.00	Перерыв на кофе	
Председатель: Федорова А.А.			
7	17.00 - 17.15	Голубовский М.П	Расчёт эксперимента по подтверждению скоростей атомных реакций важных для астрофизики
8	17.15 - 17.30	Грушин В.А.	Обработка данных зонда Ленгмюра в составе прибора ПМЛ в процессе калибровки и измерений на борту станции Луна -25
	18.00 - 18.30	Постерная сессия	

Доклады постерной сессии секции «Атмосферно-магнитосферные связи у планет Солнечной системы»

4.1 Морозова Т.И., Попель С.И. ДРЕЙФОВЫЕ НИЖНЕГИБРИДНЫЕ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СИСТЕМАХ АТМОСФЕРЫ МАРСА

НАБЛЮДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Шайхисламов И.Ф.¹, Бисикало Д.В.², Шематович В.И.², Саванов И.С.², Жилкин А.Г.², Цюриков Г.Н.², Руменских М.С.¹

¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ShaikhislamovIldar@yandex.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Наблюдения космическими телескопами Kepler и TESS обнаружили у других звезд, включая солнце-подобные, супер-вспышки с энергетикой до 10^{38} эрг. Это на 4-5 порядков больше, чем самые сильные наблюдавшиеся на Солнце, $\sim 10^{33}$ эрг. Статистика показывает, что на звездах типа Солнца экстремальные события с энергетикой $\sim 10^{36}$ эрг происходят раз в 5-10 тысяч лет. Такие данные поставили не только вопрос о конкретных механизмах супер-вспышек, но и проблему так называемого «спокойного Солнца».

Для Земли опасность представляют не сами вспышки, а порождаемые ими Корональные Выбросы Массы. При энергетике КВМ сопоставимой с историческим событием Каррингтона их воздействие приведет к катастрофическому повреждению космической и наземной инфраструктуры. Корреляция между энергетикой вспышки и КВМ показывает для Солнца монотонный характер, однако не позволяет экстраполировать на супер-вспышки. Данные для других звезд оказываются слишком ограниченными для достоверных прогнозов.

Проблема состоит в полном отсутствии прямых экспериментальных методов мониторинга параметров плазменного ветра других звезд. В рамках направления ЭЛАГ НЦФМ развивается новый подход для оценки параметров КВМ в коррелированных событиях супер-вспышек [1].

Бурное развитие экзопланетных исследований открывает новые возможности для астрофизики в целом и в прогнозировании космической погоды в частности. Горячие газовые планеты на близких орбитах имеют обширные атмосферы, которые истекают за полость Роша и попадают в область прямого контакта со звездным ветром. В ряде наблюдений космическими и наземными телескопами в сочетании с численным моделированием, показано, что линия Ly α водорода и 1083 нм метастабильного гелия являются, в момент транзита планеты перед диском звезды, индикаторами интенсивности вспышек и плазменного ветра [2-4]. Мы предлагаем новый способ получения количественных измерений о параметрах звездного ветра и КВМ посредством транзитных наблюдений реакции атмосфер горячих экзопланет на активность их родительских звезд. Такие данные позволят качественно дополнить измерения в Солнечной системе, существенно обогатив статистические и эволюционные аспекты экстремальных проявлений космической погоды. Необходимыми этапами на пути решения этой задачи является совершенствование трехмерных численных моделей экзопланетных атмосфер и определение звезд с экзопланетами, наиболее подходящих для систематического наблюдения, в том числе на планируемом к запуску Российском космическом телескопе Спектр-УФ [5].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИЯХ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ И БАЛЬМЕР-АЛЬФА ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА НАТ-Р-32 b

Шарипов С.С., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, stas.sharipov@mail.ru

В последнее время линии Бальмер-альфа (H α) 656,28 нм и He 1083 нм находят широкое применение в исследованиях атмосфер горячих экзопланет. Это обусловлено наличием качественных наблюдательных данных, поскольку линии слабо подвержены влиянию как межзвездной среды, так и атмосферы Земли. К настоящему моменту было зафиксировано поглощение в линиях H α и He 1083 для ряда экзопланет по отдельности, однако, было обнаружено не так много объектов, для которых наблюдается поглощение одновременно в обеих линиях. В данной работе мы исследуем верхнюю атмосферу одного из таких объектов - сверхгорячий юпитер НАТ-Р-32 b [1]. Для моделирования параметров атмосферы и расчета синтетических спектров поглощения мы используем комбинацию из двух моделей. Параметры атмосферы моделируются с помощью многожидкостного трехмерного самосогласованного гидродинамического кода [2]. Для восстановления наблюдаемых спектров поглощения в линии H α мы используем метод Монте-Карло, который рассчитывает перенос Лайман-альфа фотонов по атмосфере планеты [3]. Для линии He 1083 используется не-ЛТР подход.

Система НАТ-Р-32 состоит из быстро вращающейся звезды позднего F-типа и как минимум из одного сверхгорячего юпитера. Звезда имеет массу 1,17 солнечных масс и радиус 1,38 солнечных, также имеет температуру 6000 К. Планета имеет массу 0,75 масс Юпитера и радиус 1,79 радиусов Юпитера, параметры планеты определены с достаточно высокой погрешностью и сильно варьируются в различных работах. Обнаруженное поглощение в линии Бальмер-альфа составляет около 5% в центре транзита. Для линии метастабильного гелия поглощение составило 6,6% [1].

Нами были проанализированы различные условия в атмосфере планеты, такие как температура и давление на нижней границе атмосферы, а также содержание гелия. Подробно рассматривались и параметры звездного излучения, такие как XUV поток с $\lambda < 91,2$ нм, VUV поток с $\lambda \in [100; 300]$ нм и поток в линии Лайман-альфа 121,5 нм. Также рассматривались различные кинетические процессы. Помимо стандартного рассмотрения основного и возбужденного состояний атома водорода, мы включали кинетику более верхних уровней до $n=5$, поскольку, как ожидается для сверхгорячих планет, они играют важную роль в заселении 2l уровня, что важно для правильной интерпретации наблюдаемого в H α поглощения. В результате работы был получен ряд ограничений на параметры системы, дающий согласие с наблюдательными данными одновременно в обеих линиях H α и He 1083.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-72-10060.

1. Czesla S. et al. H α and He I absorption in HAT-P-32 b observed with CARMENES-Detection of Roche lobe overflow and mass loss //Astronomy & Astrophysics. – 2022. – Т. 657. – С. А6.
2. Shaikhislamov I. F. et al. Three-dimensional modelling of absorption by various species for hot Jupiter HD 209458b //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – Т. 491. – №. 3. – С. 3435-3447.
3. Miroshnichenko I. B. et al. Ly α Flux Impact from the Parent Star on H α Absorption in the Atmospheres of the Hot Jupiters HD189733b and HD 209458b //Astronomy Reports. – 2021. – Т. 65. – С. 61-69.

ВЫСЫПАНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНИЕ АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ ЗЕМНОГО ТИПА КАК ВАЖНЫЙ ИСТОЧНИК ГОРЯЧИХ ФРАКЦИЙ АТОМОВ АЗОТА И КИСЛОРОДА

¹Шематович В.И., ^{2,1}Бисикало Д.В., ¹Цуриков Г.Н., ¹Жилкин А.Г.

¹ – Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия, shematov@inasan.ru

² – Национальный Центр Физики и Математики, г. Саров, Россия

Экстремальные солнечные события (мощные вспышки, корональные выбросы плазмы и др.) являются одним из важнейших факторов влияния Солнца на состояние земной атмосферы и во многом определяют изменения климата. Известно, что вследствие экстремальных солнечных событий (ЭСС) в полярную атмосферу Земли высыпаются потоки электронов и протонов в широком диапазоне кинетических энергий, которые проникают на различные высоты, вызывая ионизацию и изменение химического состава атмосферного газа для планет земного типа.

В работах [1-3] представлен комплекс кинетических моделей Монте-Карло, предназначенных для детального анализа вызванных высыпанием потоков электронов и протонов с кинетическими энергиями, вплоть до релятивистских, физических и химических процессов в верхних и средних атмосферах планет земного типа. Данные численные модели в настоящее время используются для интерпретации наземных и космических наблюдений полярных явлений в атмосферах планет земной группы [см., например, 4]. Важнейшим отличием предлагаемого подхода от других актуально используемых моделей прогноза и предсказания полярных явлений является возможность в данных моделях учесть процессы на молекулярном уровне с учетом вклада горячих (надтепловых) атомов водорода, азота и кислорода, образующихся вследствие полярных высыпаний [2,3]. Данный подход позволил детально исследовать нетепловые процессы образования окиси азота в полярных регионах верхней атмосферы Земли и подтвердить, что процесс диссоциации N_2 электронным ударом при взаимодействии солнечного ветра с атмосферой планеты – является важным источником надтепловых атомов азота и кислорода [1,2], которые способствуют значительному увеличению нетеплового образования NO в N_2 - O_2 атмосферах планет земного типа (как локально, в случае наличия собственного магнитного поля у планеты, так и по всей поверхности планеты, в случае его отсутствия) [3]. Это особенно важно, например, для расчета вызванных ЭСС высыпаниями электронов и протонов изменений теплового режима верхней атмосферы и возможным изменениям химического состава и, в частности, к ослаблению озонового слоя. Действительно, горячие атомы азота и кислорода играют важную роль в образовании активных радикалов семейств нечетного азота NOx [3] и нечетного водорода HOx, которые приводят, в частности, к изменениям теплового состояния верхней и средней атмосферы и, как следствие, к возможному ослаблению озонового слоя в полярной атмосфере.

Работа выполнена при частичной поддержке программы 10 «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» Национального центра физики и математики.

1. Bisikalo D., Shematovich V., Hubert B. // Universe 2022. V. 8. P. 437.
2. Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Tsurikov G.N. // Atmosphere 2023. V. 14. P. 1092.
3. Шематович В.И., Бисикало Д.В., Цуриков Г.Н., Жилкин А.Г. // АЖ 2024. Т. 101. С. 770.
4. Bhattacharyya D., Clarke J. T., Mayyasi M., Shematovich V., et al. // JGR-Planets 2023. V. 128. P. e2023JE007801

ЧИСЛЕННАЯ МГД МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНИЕ АТМОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТ ТИПА ВЕНЕРЫ

Жилкин А.Г., Шематович В.И., Цуриков Г.Н., Бисикало Д.В.

Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия, zhilkin@inasan.ru

Представлена трехмерная численная модель для исследования процесса обтекания планеты без собственного магнитного поля (типа Венеры) плазмой солнечного ветра. В основе модели лежит приближение многокомпонентной магнитной гидродинамики [1]. Учитываются процессы ионизации и рекомбинации. Источником ионов является нейтральная корона планеты, состоящая из атомов водорода, гелия и кислорода. При этом каждая нейтральная компонента имеет как холодную (тепловую), так и горячую (надтепловую) фазы. Ранее подобная модель применялась нами для исследования процесса обтекания Марса солнечным ветром [2].

Результаты расчетов дают картину течения в окрестности Венеры, хорошо согласующуюся как с имеющимися данными измерений, так и с численными результатами других авторов. Магнитосфера Венеры является наведенной, поскольку планета не имеет собственного магнитного поля. Взаимодействие солнечного ветра с Венерой приводит к тому, что вокруг планеты устанавливается ударная волна, положение которой в подсолнечной точке соответствует высоте 2200 км. На дневной стороне вблизи поверхности Венеры формируется тонкий и достаточно плотный магнитный барьер. Положение ионопаузы, отделяющей ионосферную плазму Венеры от плазмы солнечного ветра, определяется верхней границей магнитного барьера. В подсолнечной точке высота ионопаузы составляет примерно 300 км, что также согласуется с экспериментальными данными. Максимальные значения магнитного поля порядка 100 нТл достигаются на высотах 180 км, соответствующим внутренней границе магнитного барьера. На ночной стороне Венеры образовавшиеся ионы формируют турбулентный шлейф, тянущийся далеко за планетой. Плазма в магнитосферном хвосте состоит в основном из ионов ионосферного происхождения.

Модель позволяет делать выводы о качественной картине высыпания электронов в верхнюю атмосферу Венеры. Согласно полученным результатам, высыпание энергичных электронов в атмосферу происходит равномерно по всей дневной полусфере планеты. При этом, как поток энергии высыпающихся электронов, так и их средняя кинетическая энергия распределены практически равномерно от подсолнечной точки до терминатора. В условиях спокойного солнечного ветра в этой области поток $Q_e = 0.1$ эрг $см^{-2} с^{-1}$ в верхней части ионосферы, а средняя кинетическая энергия изменяется от 0.07 до 0.2 кэВ. Разработанную модель предполагается использовать для исследования наблюдательных проявлений потенциального биомаркера NO в атмосферах экзопланет без собственного магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке программы 10 «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» Национального центра физики и математики.

1. Zhilkin A.G., Bisikalo D.V. // Universe 2021, V. 7, P. 422.
2. Zhilkin A.G., Bisikalo D.V., Shematovich V.I. // Astron. Repts. 2022, V. 66, P. 245.

НЕЙТРАЛЬНАЯ АТМОСФЕРА МАРСА, ОТ МЕЗОСФЕРЫ ДО CO₂ ЭКЗОБАЗЫ, ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА ACS МИССИИ «ЭКЗОМАРС-2016»

Беляев Д.А., Федорова А.А., Стариченко Е.Д., Коссова Д.А., Трохимовский А.Ю., Кораблев О.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, dbelyaev@cosmos.ru

В данной работе исследуются высоты средней и верхней нейтральной атмосферы Марса, а именно, мезосфера (выше ~50 км) и термосфера (выше 100-120 км) вплоть до экзобазы для молекулы CO₂ (180-220 км). Эти высоты содержат переходные слои: мезопаузу около 80-120 км с температурным минимумом и гомопаузу, расположенную на 10-20 км выше, где атмосфера перестает быть равномерно перемешанной. Вариации высоты и температуры мезо/гомопаузы, а также экзобазы, обусловлены сезонной изменчивостью, солнечной активностью, а также и вертикальным переносом энергии, вызванном глобальной циркуляцией и атмосферными волнами.

В докладе мы представляем результаты измерений вертикального распределения температуры и плотности молекулы CO₂ по данным солнечного просвечивания спектрометрическим комплексом ACS (Atmospheric Chemistry Suite) с борта аппарата TGO (Trace Gas Orbiter) миссии «ЭкзоМарс-2016» [1]. Канал ACS средней инфракрасной области (ACS-MIR) зондирует атмосферу Марса в диапазоне спектра 2.3-4.2 мкм с апреля 2018 года по н.в. Высокое спектральное разрешение и чувствительность эксперимента позволяют измерять плотность и температуру нейтральной атмосферы в полосе поглощения CO₂ около 2.7 мкм в широком диапазоне высот, от 10 до 180 км, охватывая слои тропосферы, мезосферы и термосферы [2]. В работе показаны результаты наблюдений за 2.5 Марсианских года (MY) – с середины MY34 до конца MY36 – с сезонными и широтными вариациями температуры и высоты мезопаузы, гомопаузы и, частично, экзобазы. Зона гомопаузы определяется по сопоставлению коэффициентов молекулярной (CO₂) и турбулентной диффузии при условии насыщения атмосферных гравитационных волн около 80-120 км [3], которые также наблюдаются в вертикальных профилях температуры по данным ACS [4].

Исследование выполняется за счет гранта Российского научного фонда № 25-22-00494, <https://rscf.ru/project/25-22-00494/>.

1. Korablev O.I. et al. // Space Science Reviews 2018. V. **214**(1).
2. Belyaev D.A. et al. // Journal of Geophysical Research: Planets 2022. V. **127**(10), e2022JE007286.
3. Slipski et al. // Journal of Geophysical Research: Planets 2018. V. **123**(11), 2939-2957.
4. Starichenko E.D. et al. // A&A 2024. V. **683**, A206.

НАБЛЮДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Шайхисламов И.Ф.¹, Бисикало Д.В.², Шематович В.И.², Саванов И.С.², Жилкин А.Г.², Цюриков Г.Н.², Руменских М.С.¹

¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ShaikhislamovIldar@yandex.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Наблюдения космическими телескопами Kepler и TESS обнаружили у других звезд, включая солнце-подобные, супер-вспышки с энергетикой до 10³⁸ эрг. Это на 4÷5 порядков больше, чем самые сильные наблюдавшиеся на Солнце, ~10³³ эрг. Статистика показывает, что на звездах типа Солнца экстремальные события с энергетикой ~10³⁶ эрг происходят раз в 5-10 тысяч лет. Такие данные поставили не только вопрос о конкретных механизмах супер-вспышек, но и проблему так называемого «спокойного Солнца».

Для Земли опасность представляют не сами вспышки, а порождаемые ими Корональные Выбросы Массы. При энергетике КВМ сопоставимой с историческим событием Каррингтона их воздействие приведет к катастрофическому повреждению космической и наземной инфраструктуры. Корреляция между энергетикой вспышки и КВМ показывает для Солнца монотонный характер, однако не позволяет экстраполировать на супер-вспышки. Данные для других звезд оказываются слишком ограниченными для достоверных прогнозов.

Проблема состоит в полном отсутствии прямых экспериментальных методов мониторинга параметров плазменного ветра других звезд. В рамках направления ЭЛАГ НЦФМ развивается новый подход для оценки параметров КВМ в коррелированных событиях супер-вспышек [1].

Бурное развитие экзопланетных исследований открывает новые возможности для астрофизики в целом и в прогнозировании космической погоды в частности. Горячие газовые планеты на близких орбитах имеют обширные атмосферы, которые истекают за полость Роша и попадают в область прямого контакта со звездным ветром. В ряде наблюдений космическими и наземными телескопами в сочетании с численным моделированием, показано, что линия Ly α водорода и 1083 нм метастабильного гелия являются, в момент транзита планеты перед диском звезды, индикаторами интенсивности вспышек и плазменного ветра [2-4]. Мы предлагаем новый способ получения количественных измерений о параметрах звездного ветра и КВМ посредством транзитных наблюдений реакции атмосфер горячих экзопланет на активность их родительских звезд. Такие данные позволят качественно дополнить измерения в Солнечной системе, существенно обогатив статистические и эволюционные аспекты экстремальных проявлений космической погоды. Необходимыми этапами на пути решения этой задачи является совершенствование трехмерных численных моделей экзопланетных атмосфер и определение звезд с экзопланетами, наиболее подходящих для систематического наблюдения, в том числе на планируемом к запуску Российском космическом телескопе Спектр-УФ [5].

1. Шематович В.В., и др. ФИЗМАТ, 2023, 1(1), 20-41.
2. Shaikhislamov et al. Astronomy Reports, 2021, 65, 8-25.
3. Shaikhislamov et al. MNRAS, 2021, 500(1), 1404-1413.
4. Rumenskikh et al. The Astrophysical Journal, 2022, 927(2), 238.
5. Tsurikov et al. INASAN Science Reports, 2024, 9(1), 12-31.

РАСЧЁТ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОДТВЕРЖДЕНИЮ СКОРОСТЕЙ АТОМНЫХ РЕАКЦИЙ ВАЖНЫХ ДЛЯ АСТРОФИЗИКИ

Голубовский М.П., Шайхисламов И.Ф., Руменских М.С.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, maxym9121@gmail.com

Скорости ряда атомных процессов, рассматриваемых при моделировании в астрофизике, определялись лишь теоретически. В частности, это верно для метастабильного гелия, скорости возбуждения и девозбуждения которого и будут подтверждены в первую очередь.

Скорость реакции предполагается определить посредством сравнения наблюдательного поглощения в эксперименте с теоретическим вычисленным, при тех же условиях. В данной работе представлены результаты моделирования с целью оценки реализуемости и требований к эксперименту в предполагаемых условиях газо-плазменной среды.

Моделирование поглощения заключается в использовании формулы (1).

$$\tau = n(\text{He}2^3S) \cdot \sigma(\lambda) \cdot L \quad (1)$$

Где $n(\text{He}2^3S)$ – населённость возбуждённого уровня, $\sigma(\lambda)$ – сечение поглощения на длине волны 1083 нм, L – длина среды. В расчетах в первую очередь необходимо найти требуемую длину среды.

В качестве кинетической модели атома гелия используется двухуровневая схема, также включающая основное состояние иона. Рассматриваются такие реакции как рекомбинация, возбуждение и девозбуждение за счёт столкновений с электронами, спонтанный распад и эффект Пеннинга при взаимодействии с атомами и молекулами водорода. Изначальная версия кинетической модели применялась в глобальном МГД коде [1]. Для расчета сечения поглощения используется профиль Фойгта. Ранее используемая кинетическая модель и расчет поглощений использовались для интерпретации наблюдений за транзитными экзопланетами.

Длина плазменной среды в эксперименте составит около 1 м. Проведенное моделирование показывает, что необходим путь в несколько сотен метров. Таким образом определено основное требование к опытам реализация многопроходной оптической схемы с добротность в несколько сотен единиц.

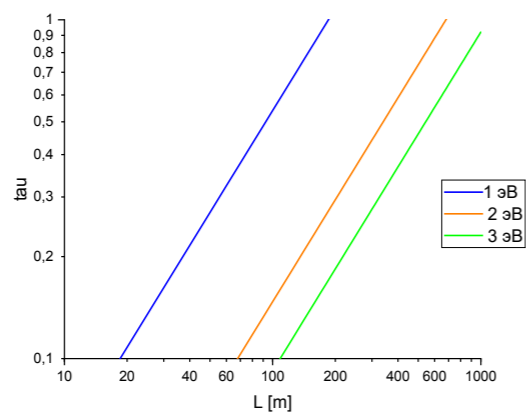


Рис. 1 Оптическая толщина в линии 1083 нм метастабильного гелия как функция длины среды при разной температуре плазмы. Показано поглощение в центре линии.

Работа выполнена в рамках Направления 10 НЦФМ.

1. Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., Berezutsky, A. G., Miroshnichenko, I. B., Rumenskikh, M. S. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2021, V. 500, P. 1404–1413.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЗОНДА ЛЕНГМЮРА В СОСТАВЕ ПРИБОРА ПМЛ В ПРОЦЕССЕ КАЛИБРОВКИ И ИЗМЕРЕНИЙ НА БОРТУ СТАНЦИИ ЛУНА -25

Грушин В.А., Карташева А.А., Докучаев И.Н., Кузнецов И.А., Дольников Г.Г., Ляш А.Н., Афонин В.В., Дубов А.Е., Шашкова И.А., Захаров А.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, vgrushin@cosmos.ru

В состав комплекса научной аппаратуры лунного посадочного аппарата «Луна-25» входил прибор Пылевой мониторинг Луны (Пмл), который, в свою очередь, включал зонд Ленгмюра [1]. В ходе тестовых измерений на лабораторном стенде были получены вольтамперные характеристики разных составов плазмы. Обработка серии измерений, выполненных в ходе термовакuumных испытаний, позволила оценить степень нелинейности изменений сканирующего напряжения при изменении внешней температуры от минус 60° до плюс 60° С. Были построены графики температурных трендов в нескольких точках сканирующего напряжения.

Измерения в процессе лётных испытаний состояли из двух серий – два измерения на перелётной траектории от Земли к Луне и три измерения на окололунной орбите. При вычислении вольтамперных характеристик, были использованы калибровочные функции, приближенные интерполяцией к температуре из телеметрии.

[1] А. В. Захаров, Г. Г. Дольников, И. А. Кузнецов, А. Н. Ляш, А. Е. Дубов, В. В. Афонин, С. А. Бедняков, А. С. Бычкова, В. А. Грушин, И. В. Докучаев, А. А. Карташева, С. И. Попель, И. А. Шашкова, А. В. Шеховцова, А. В. Яковлев, М. М. Васильев, Е. А. Лисин, О. Ф. Петров, Н. Д. Борисов, Л. М. Зеленый. ПРИБОР Пмл НА ПОСАДОЧНОМ АППАРАТЕ ЛУНА-25: ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЭКЗОСФЕРЕ. АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2021, том 55, № 6, с. 589–60

ДРЕЙФОВЫЕ НИЖНЕГИБРИДНЫЕ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СИСТЕМАХ АТМОСФЕРЫ МАРСА**Морозова Т.И., Попель С.И.***ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru*

Пыль может попадать в атмосферу Марса в результате конвективных процессов с поверхности планеты, переноситься туда пылевыми вихрями и ветрами, которые имеют большие скорости из-за перепадов температур с ночной на дневную сторону планеты, а также подниматься с поверхности в результате падения метеорных тел сразу на большие высоты, либо оставаться на больших высотах в результате падения микрометеоритов и сгорания метеорных тел. Данные пылевые частицы приобретают заряды под воздействием солнечного излучения, взаимодействия с заряженными частицами атмосферы и солнечного ветра, а также в результате трибоэффекта в пылевых вихрях.

В таких плазменно-пылевых системах могут возникать различные волновые колебания. В частности, принимая во внимание неоднородности концентрации плазмы марсианских плазменно-полевых облаков и вихрей и наличие хотя и слабого, но существенного для данных процессов магнитного поля Марса, возможным оказывается возбуждение дрейфовых нижнегибридных волн. Рассмотрены условия, при которых оказывается возможным распространение дрейфовых нижнегибридных волн в плазме в пылевых системах Марса и развитие модуляционной неустойчивости данных волн. Показана возможная связь возникновения низкочастотных шумов на Марсе с развитием дрейфовой нижнегибридной турбулентности в плазменно-полевых системах Марса.

СЕКЦИЯ «Космическая погода и медицина»**Вторник, 11.02.2025 г., Комната 200**

		Председатель: Зенченко Т.А.	
	Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада
1	16.30 - 16.45	Балалаева И.В.	Низкоинтенсивные магнитные поля как возможный фактор модуляции роста клеток человека в нормальных и стрессовых условиях
2	16.45 - 17.00	Гайсёнок О.В.	Влияние геомагнитных бурь на работу сердечно-сосудистой системы: обзор исследований по влиянию на исходы и предварительные результаты наблюдательного исследования ГЕФЕСТ
3	17.00 - 17.15	Шибаяев И.Г.	Возрастная динамика взаимосвязи пульса с артериальным давлением и проявление внешних факторов
4	17.15 - 17.30	Сигалева Е.Э.	Функциональное состояние органа слуха человека в условиях моделируемой гипомагнитной среды
5	17.30 - 17.45	Зенченко Т.А.	Связь вариаций геомагнитного поля в частотном диапазоне пульсаций РС5-6 с параметрами сердечного ритма человека
6	17.45 - 18.00	Голованов Д.Л.	Книги по биофизике крови – неотъемлемый элемент мировоззрения А.Л. Чижевского
	18.00 - 18.30	Постерная сессия	

НИЗКОИНТЕНСИВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ФАКТОР МОДУЛЯЦИИ РОСТА КЛЕТОК ЧЕЛОВЕКА В НОРМАЛЬНЫХ И СТРЕССОВЫХ УСЛОВИЯХ

Балалаева И.В.¹, Карпова М.А.¹, Сенча Л.М.¹, Долинин А.А.², Сарафанов Ф.Г.², Ильин Н.В.², Гринберг М.А.¹, Мареев Е.А.², Воденеев В.А.¹

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия irin-b@mail.ru

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород, Россия

За последние десятилетия накоплены многочисленные факты, подтверждающие необходимость определенного магнитного фона для нормальной жизнедеятельности всех земных организмов, включая человека. Несмотря на то, что параметры собственного магнитного поля Земли варьируют в зависимости от географического положения и особенностей локального окружения, в многочисленных экспериментах подтверждено, что отклонение величины магнитного поля от «стандартных» значений, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, приводит к значимым, зачастую негативным, физиологическим последствиям. В то же время молекулярно-клеточные механизмы, лежащие в основе эффектов, проявляющихся на уровне целого организма, являются существенно менее изученными.

В нашей работе мы проанализировали влияние пространственной и временной неоднородности магнитного фона в области низкоинтенсивных полей (менее 1 мТл) на скорость пролиферации клеток человека в оптимальных и стрессовых условиях культивирования. Была исследована реакция нескольких линий невозбудимых клеток человека, для которых вопрос чувствительности к магнитному фону остается наименее изученным. Контролируемые магнитные условия создавали с помощью системы колец Гельмгольца, располагаемой в объеме клеточного инкубатора. Клеточный стресс индуцировали путем снижения концентрации компонентов сыворотки, необходимых для полноценного роста и пролиферации клеток.

Согласно нашим данным, варьирование величины поля в диапазоне 10-120 мкТл приводило к нелинейным биологическим эффектам в отношении клеток эмбриональной почки человека HEK 293T и фибробластов VJ-5ta. Изменения в скорости роста культур были невелики, не превышали 10-15%, однако статистически значимы. В случае клеток карциномы шейки матки HeLa такого влияния зарегистрировано не было. Стоит отдельно отметить чувствительность клеток к временной стабильности магнитного поля. В одной из моделей инкубаторов переход в рабочий режим сопровождался появлением выраженных колебаний величины поля с периодом в несколько секунд. Размах колебаний зависел от положения в объеме камеры и в отдельных точках превышал 50% от усредненного по времени значения величины поля. В таких условиях показано статистически значимое отличие скорости роста культуры клеток в зависимости от размаха колебаний величины поля, эффект был хорошо воспроизводимым и более выраженным в случае стрессовых условий.

Полученные данные требуют дальнейшей проверки и объяснения механизмов, обуславливающих наблюдаемые эффекты. Тем не менее, наши результаты подтверждают точку зрения о чувствительности невозбудимых клеток человека к варьированию величины и стабильности низкоинтенсивных магнитных полей. Регистрируемые эффекты нелинейно зависят от величины магнитного поля и специфичны для клеток разного типа. Стрессовые условия могут модифицировать чувствительность клеток, но значимость эффекта пока не определена.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-00505, <https://rscf.ru/project/25-24-00505/>.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ НА РАБОТУ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ: ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЛИЯНИЮ НА ИСХОДЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДАТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕФЕСТ

Гайсёнок О.В.

ФГБУ ОБП УДП РФ, г.Москва, Россия, ovg.07@bk.ru

Систематический обзор и мета-анализ данных по критериям PRISMA подтвердил влияние геомагнитных бурь (ГМБ) на риски инфаркта миокарда (ИМ), острого коронарного синдрома (ОКС) (ОР 1,3-1,5) и мозгового инсульта (МИ) (ОР 1,25-1,6). Выявлены важные ограничения: небольшое количество включенных исследований, различия в их методологии, методах статистического анализа и выбора геомагнитных индексов, используемых для подтверждения ГМБ. Анализ результатов показал, что основным механизмом негативного влияния ГМБ является их влияние на циркадные ритмы, вариабельность ЧСС, АД и микроциркуляцию. Выявлены методологические ошибки выбора геомагнитного индекса (ГИ) в зависимости от целей исследования и отсутствие учета влияния дополнительных ко-факторов.

Для получения информации о различиях/тождественности различных ГИ в дни спокойного и возмущенного магнитного поля Земли, а также для оценки изменений функциональных показателей работы сердечно-сосудистой системы и общего самочувствия человека в зависимости от степени возмущенности магнитного поля Земли, было спланировано наблюдательное исследование ГЕФЕСТ. В базе данных производился учет и регистрация локальных, региональных и планетарных трехчасовых и суточных К, Кр и Ар-индексов, на основании анализа данных ведущих центров геомониторинга. Анализ результатов показал, что все ГИ коррелировали с друг другом только в рамках того дня, который характеризовал спокойное или возмущенное поле (r от 0,73 до 0,97). Существенные различия получены при сравнении локального и планетарного, а также регионального и планетарного геомагнитных индексов, зарегистрированных в одно время (1К-3 vs 1Кр-3, $p=0,008$; 1АрMos vs 1Ар-24, $p=0,024$). Полученные данные указывают на то, что при планировании исследований важно правильно выбирать тип ГИ в соответствии с задачами, поставленными в исследовании. Представляется, что величине воздействия геомагнитного поля на человека лучше соответствуют локальные индексы, измеряемые в конкретном географическом регионе. В пилотную наблюдательную часть исследования были включены 19 девушек (медиана возраста 19,0 [16,0;26,0]). Оценка самочувствия, активности и настроения проводилась при помощи валидированного опросника САН. Степень возмущения геомагнитного поля оценивалась путем мониторинга Кр и Ар индексов. Корреляционный анализ показал наличие значимых взаимосвязей ($p<0,05$) расчетного сосудистого возраста с геомагнитными индексами Кр-3 ($r=0,46$) и Ар-3 ($r=0,59$), курением ($r=0,61$) и баллом опросника САН по категории Самочувствие ($r= -0,51$). Общий балл по опроснику САН достоверно коррелировал с Ар-3 индексом ($r= -0,5$); балл опросника САН по категории Самочувствие - с расчетным сосудистым возрастом ($r= -0,52$), индексами Кр-3 ($r= -0,49$) и Ар-3 ($r= -0,47$); положительный статус курения с геомагнитными индексами Кр-3 ($r=0,63$) и Ар-3 ($r=0,63$). Расчетный биологический сосудистый возраст у курильщиков был больше (44 [41;49] vs 33 [30;37], $p=0,01$). Сравнительный анализ данных показал уменьшение общего балла оценки состояния испытуемого по опроснику САН во время возмущенного геомагнитного поля. Дополнительные данные по анализу изменений функциональных показателей работы сердечно-сосудистой системы и бальной оценки по валидированному опроснику САН будут представлены в докладе на выборке участников исследования ($n=30$) опрос и анкетирование, которых было проведено в день спокойного геомагнитного поля (визит 1) и в день подтвержденной геомагнитной бури (визит 2: К-индекс, 5 баллов - 19 чел., 6 баллов - 10 чел., 7 баллов - 1 чел.).

ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА ВЗАИМОСВЯЗИ ПУЛЬСА С АРТЕРИАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ И ПРОЯВЛЕНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Шибяев И.Г., Шибяев А.И.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ishib@izmiran.ru

Показания систолического артериального давления (САД), диастолического артериального давления (ДАД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС), взятые из дневника самоконтроля пациента (мужчина, 1940 г. рождения), служат основой исследования. В публикациях [1,2] даны общая оценка и анализ этих показаний более чем за 13 лет.

Рассмотрено влияния геомагнитной активности и атмосферного давления на взаимосвязь показаний мониторинга. Выбран 2000 год, как содержащий подробные комментарии активности пациента -- экспедиции, командировки, праздники и т.д. Удалось описать ряд ситуаций в которых группу показаний ЧСС с АД можно связать с поведением пациента или с проявлением внешних условий, хотя принято считать, что четкой функциональной связи между величинами АД и ЧСС нет.

Для оценки состояния пациента важны характер и динамика связи пульса с давлением. Проведена классификация этих связей за 13 лет и отмечены значимые отличия для утренних и вечерних показаний.

Можно заключить, что утреннее состояние организма более подвержено внешнему влиянию и отметить стабилизирующую роль ритмических нагрузок.

[1]. Isaikina O., Yu. Kuksa, I. Shibaev. Analyses of Characteristics of Long-Term Monitoring of Arterial Pressure and Pulse / Journal of Environmental Science and Engineering, V. 1, № 9 (B), p.1064 -- 1073, 2012.

[2]. Исайкина О.А., Кукса Ю.И., Шибяев И.Г. Оценка характеристик длительного мониторинга артериального давления и пульса / Труды международной конференции «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле» ИКИ РАН, 4-8 июня 2012 г. С. 695 – 707, 2013.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ОРГАНА СЛУХА ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРУЕМОЙ ГИПОМАГНИТНОЙ СРЕДЫ

Сигалева Е.Э., Пасекова О.Б., Мацнев Э.И., Сигалева Т.В., Иванов К.П.

ГНЦ РФ- ИМБП РАН, г. Москва, Россия, obp1710@mail.ru

Проведено двойное слепое рандомизированное плацебо-контролируемое исследование слуховой системы у 8-ми здоровых мужчин-добровольцев в возрасте от 27 до 38 лет, находившихся в условиях 8-часовой экспозиции экспериментально сниженного магнитного поля. Гипомагнитные условия (ГМУ) создавали в ограниченном объеме (установка «Арфа») методом компенсации естественного магнитного поля (МП) системой обмоток с током (колец Гельмгольца), суммарный вектор МП которых был направлен в противоположном направлении геомагнитного поля Земли. Аппаратное компенсирование геомагнитного поля осуществляли по вертикальной компоненте, параллельной максимальному размеру блока экспозиции. «Арфа» позволяла компенсировать геомагнитное поле, создавая в рабочем объеме установки (блоке экспозиции) МП вплоть до нулевых значений индукции МП (0 мкТл), а также возможное получение отрицательных значений (обратного направления вектора геомагнитного поля). Уровень МП контролировали трехкомпонентным датчиком FL3-100 (Stefan Mayer Instruments, Германия). Кратность ослабления геомагнитного поля в режиме «ГМУ» (8 часов) для добровольцев находились в пределах от $K_{cp} = 580.7$ до 1510.1. Средние значения индукции МП в режиме «ГМУ» составили 0.049 ± 0.015 мкТл. Среднее значение МП в режиме «плацебо» – 46.30 ± 0.36 мкТл. Кратность ослабления, рассчитанная из средних значений индукции МП, $K_B = V_{cp\text{Плацебо}}/V_{cp\text{ГМУ}} = 1018$.

Исследование функционального состояния слуховой системы добровольцев проводили в «фоне», в периоде последствия, а также непосредственно во время нахождения добровольцев в установке «Арфа» в 2-х сериях эксперимента: режим «плацебо» (без воздействия ГМУ) и режим «ГМУ» (пребывание добровольцев в условиях сниженного магнитного поля). Для оценки состояния органа слуха использовали методы регистрации задержанной вызванной отоакустической эмиссии (ЗВОАЭ), отоакустической эмиссии на частоте продукта искажения (ПИОАЭ) и коротколатентных слуховых вызванных потенциалов (КСВП). Оценивали средние по группе (N=8) показатели: для ЗВОАЭ, ПИОАЭ - отношение сигнал/шум отоакустического ответа (дБ) в частотном диапазоне 1-5 кГц; для КСВП – латентность (мс), амплитуду(мкВ) I, III, V пиков, также межпиковые латентности (мс) I-III, III-V, I-V. Статистическая обработка результатов проводилась с использованием пакета Statistica для Windows.

Анализ полученных экспериментальных данных не показал существенных изменений функционального состояния органа слуха человека. Параметры ЗВОАЭ, ПИОАЭ и КСВП находились в границах физиологических нормативных значений. Статистически значимых различий указанных параметров не получено.

Таким образом, пребывание добровольцев в условиях экспериментально сниженного магнитного поля (кратностью около 1000 раз), не выявило существенных клинических рисков в малой выборке практически здоровых добровольцев [1].

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания FMFR-0039-2024.

[1]. Куканов В. Ю., Васин А. Л., Демин А. В., Счастливец Д. В., Бубеев Ю. А., Суворов А.В., Попова Ю. А., Лучицкая Е. С., Ниязов А. Р., Поляков А. В., Федяй С. О., Кириченко В. В., Зарипов Р. Н., Гимадиев Р. Р., Кочетов А. Г., Сигалева Е. Э., Пасекова О. Б., Попова О. В., Русанов В. Б., Орлов О. И. Влияние моделируемых гипомагнитных условий на некоторые физиологические показатели при 8-часовой экспозиции. Эксперимент “АРФА-19” // Физиология человека. - 2023. - Том 49. - № 2. - С. 54–64. DOI: 10.31857/S0131164622600343, EDN: MPFIZE

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ ПУЛЬСАЦИЙ РС5-6 С ПАРАМЕТРАМИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ЧЕЛОВЕКА

Зенченко Т.А., Бреус Т.К., Хорсева Н.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, zench@mail.ru

Факторы космической погоды являются важным экологическим факторов, влияющим на живые организмы. В то же время не только механизм такого влияния, но и подробная феноменологическая картина эффекта остается предметом дискуссий. Многочисленные исследования показывают, что на популяционном уровне рост обострения сердечно-сосудистых заболеваний наблюдается не только во время геомагнитных бурь (ГМБ), но и в периоды "магнитного молчания"; самым разрушительным в смысле влияния на здоровье больших групп людей эффектом обладают не самые сильные, а умеренные ГМБ с максимальным $Kp=6-7$; зимой биотропный эффект ГМБ значимо выше, чем летом, и т.д. Одно из возможных объяснений основывается на предположении, что спокойные вариации геомагнитного поля (ГМП) являются эволюционно обусловленным ритмодатчиком для живых систем, а ГМБ выступают как нарушители этой экологически важной связи.

Целью данной работы был анализ особенностей динамики сердечного ритма человека в разные фазы трех ГМБ: №1 25-27.09.2023 ($Dst=-69$ нТл); №2 10-13.05.2024 ($Dst=-403$ нТл) и №3 10-13.10.2024 ($Dst=-333$ нТл). Проанализировано 62 временных ряда (ВР) частоты сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин) длительностью 100 мин каждый. Сравнивали вейвлет-спектры рядов ЧСС и горизонтальной H -компоненты ГМП (в диапазоне периодов 7-40 мин) по ближайшей к месту наблюдений геофизической станции (https://img-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2; <https://forecast.izmiran.ru/>). В качестве характеристики степени сходства/различия вейвлет-спектров рядов ЧСС и H ГМП вычисляли значение $Q=(h_1, h_2)/|h_1| \cdot |h_2|$, где h_1 и h_2 - вектора значений спектральной мощности вейвлет-спектров в диапазоне периодов 7-40 мин. Алгоритм оценки степени сходства подробно описан в [1].

Наибольшие значения степени сходства Q как по всей выборке наблюдений, так и отдельно во всех трех магнитных бурях наблюдается на фазе восстановления, но практически не наблюдаются в главной фазе. Текущую геомагнитную обстановку во время каждой записи ЧСС оценивали по амплитуде колебаний ГМП в диапазоне 7-20 мин (Am) (диапазон геофизических пульсаций РС5-6) и по степени их пространственной когерентности (по величине коэффициента корреляции Rm между синхронными значениями вариаций H -компоненты ГМП по станциям Nurmijarvi ($60^{\circ}50' N / 24^{\circ}60' E$) и Surlari ($44^{\circ}70' N / 26^{\circ}30' E$)).

Наиболее тесная корреляция обнаружена между значениями Q и Rm ($r_s=0.531$, $p=10^{-5}$), в значительно меньшей степени - между значениями Q и Dst -индекса ($r_s=0.313$, $p=0.014$), а между значениями Q и Am оказалось статистически не значимой ($r_s=-0.214$, $p=0.1$). Эти результаты указывают на то, что степень пространственной когерентности колебаний ГМП в диапазоне геомагнитных пульсаций РС5-6 является важной характеристикой геомагнитной обстановки для возникновения эффекта синхронизации сердечного ритма с вариациями ГМП. Во время главной фазы МБ эти условия кардинально нарушаются, что служит аргументом в пользу гипотезы о роли геомагнитных пульсаций как возможного ритмодатчика для живых систем. В данном исследовании возможная экологическая роль данного показателя показана впервые, на ограниченной по объему экспериментальной выборке. Но если этот вывод получит подтверждение на других примерах, это сможет разрешить многие наблюдаемые в настоящее время парадоксы в гелиобиологии.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме "Плазма" ИКИ РАН.

1. Zenchenko T.A., Khorseva N.I., Breus T.K. // Atmosphere 2024. V. 15. P. 134

КНИГИ ПО БИОФИЗИКЕ КРОВИ – НЕОТЪЕМЛЕМЫЙ ЭЛЕМЕНТ МИРОВОЗЗРЕНИЯ А.Л. ЧИЖЕВСКОГО

Голованов Д.Л.*, Кушербаев С.**

**Географический факультет МГУ, dm_golovanov@mail.ru*

***Медицинский институт, Караганда, Казахстан*

Работы по биофизике крови – продолжение выявления механизмов влияния гелиогеофизических факторов на здоровье и самочувствие человека. Этим наиболее плотно занимался А.Л. Чижевский в условиях заключения и ссылки в Караганде (1945-1958). В книгах Чижевского по биофизике крови сформулированы не решенные до сих пор задачи гемодинамики, структурной организации эритроцитов в крови, разработана методика ранней диагностики онкологических заболеваний.

В 1959 году в Москве опубликована первая монография «Структурный анализ движущейся крови», а еще две принципиально важные книги – «Электрические и магнитные свойства эритроцитов» и «Биофизические реакции оседания эритроцитов» – были опубликованы его «светлой музой» Н.В. Чижевской в Киеве и Новосибирске уже после его смерти.

А.Л. Чижевский в условиях лагерного фельдшерского пункта работал не один, а с привлечением талантливых помощников, обладавших физико-математической подготовкой высокого уровня. Это, прежде всего, математик Г.Н. Перлатов.

В книгах Чижевского по биофизике крови сформулированы не решенные до сих пор задачи гемодинамики, структурной организации эритроцитов в кровотоке, их физико-химические свойства и важные для диагностики разного рода заболеваний особенности. На этой основе в условиях лагерного фельдшерского пункта разработана методика ранней диагностики онкологических заболеваний.

По оценке д.м.н. Ю.И. Гурфинкеля (2018, 2024), современная наука с ее высокотехнологичным вооружением, включая компьютерную томографию, пока не способна ни подтвердить, ни опровергнуть модели А.Л. Чижевского по структурной организации эритроцитов в кровотоке.

Лишь недавно (в 2018) А.Л. Головановым в двухтомном сборнике собраны воедино разрозненные труды А.Л. Чижевского по биофизике крови. В сборник включены и воспоминания А.Л. Чижевского о самом трудном периоде жизни в Долинке (1942-1950) и Караганде, где были выполнены эти работы.

СЕКЦИЯ «Нелинейность и самоорганизация в плазме»

Вторник, 11.02.2025 г., Комната 200

Председатель: <u>Чернышов А.А.</u>			
Время	Ф.И.О. 1-ого автора	Название доклада	
1	14.30 - 14.45	Абраменко В.И	Самоорганизация магнитного поля активных областей на солнце
2	14.45- 15.00	Кузнецов А.А.	Конкуренция процессов формирования магнитной и ленгмюровской турбулентностей в максвелловской плазме с пучком электронов
3	15.00 - 15.15	Крот А.М.	О неустойчивости и дисперсии волн в плазме и газопылевых космических средах
4	15.15 - 15.30	Козелов Б.В.	Фрактальные структуры в авроральном овале, статистика по камерам в Апатитах и Верхнетуломском
5	15.30 - 15.45	Свентицкий А.В.	Измерение спектров излучения джетов лазерной плазмы в поперечном магнитном поле
	15.45 - 16.00	запас	

Доклады постерной сессии секции «Нелинейность и самоорганизация в плазме»

3.1 Высикайло Ф.И.

Классификация амбиполярных диффузий Высикайло, обусловленных интерференцией электрического поля и внешних сил, действующих на заряженные частицы неоднородной плазмы с током в гелиосфере, атмосферах и ионосферах планет

САМООРГАНИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

Абраменко В.И.¹, Сулейманова Р.А.¹

¹ ФГБУН КРАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, vabramenko@gmail.com

Магнитное поле Солнца находится в состоянии постоянного само-возобновления. С одной стороны, глобальная природа магнитного поля солнца как звезды создает условия для глобального упорядоченного поведения поля, которое выражается в цикличности активности солнца. Но этот циклический процесс действует в условиях турбулентности конвективной зоны, фотосферы, верхней атмосферы. Любая турбулентная среда – это система с самоорганизацией (возможность спонтанно создавать упорядоченные структуры из хаоса более мелких подсистем), с неизбежной перемежаемостью в пространстве и во времени (длительные промежутки низкой активности перемежаются с короткими промежутками высокой), с негауссовыми функциями распределения параметров, с фрактальными признаками и т.д. Эти свойства магнитного поля будут определять и природу флуктуаций поля, а флуктуации поля, в свою очередь, это ключевой ингредиент работы динамо. В этой связи выявление свойств самоорганизации магнитных полей, особенно в различных условиях по пространству и времени, представляет собой не только познавательный интерес, но и открывает возможности поиска и проверки критериев для динамо-моделей.

Важным подмножеством систем с самоорганизацией являются системы с самоорганизованной критичностью (selforganized criticality, SOC, [1,2]). Это системы, для которых характерен спонтанный переход в критическое состояние, когда происходят лавины всех масштабов, вплоть до масштаба всей системы. Примеры таких систем – солнечные вспышки, землетрясения, горные лавины и т.п. В этой связи следует отметить, что параметры состояния, как правило, измеряются в фотосфере, а вспышка инициируется в короне, и вопрос о том, какова магнитная связь между этими областями, остается пока открытым. В каком состоянии в реальности находится магнитное поле активной области – Самоорганизация или SOC? Достаточно ли для запуска вспышки самоорганизованной критичности только в короне, а фотосферное поле может оставаться в состоянии только самоорганизации?

Один из наиболее эффективных способов диагностики самоорганизации и состояния SOC – это анализ корреляционных функций, как пространственных, так и временных. Коротко-коррелированные системы не обладают состоянием SOC, а появление длинных корреляций является признаком перехода в состояние SOC. Физические предпосылки уходят корнями в теорию перколяций: протекание перколяционного кластера (критическое состояние) связано со спонтанным образованием лавины масштаба всей системы, т.е. увеличением корреляционной длины до максимального масштаба.

В докладе проанализированы результаты исследования корреляционных функций фотосферного магнитного поля и его производных, в частности, токовой спиральности, квадрата плотности вертикального электрического тока. Исследованы различные по магнито-морфологическим свойствам активные области. Результаты показывают, что само магнитное поле вряд ли обладает свойством SOC, а скорее всего находится в состоянии только самоорганизации. Что касается спиральности и диссипативных структур, то здесь ситуация более сложная и, возможно, зависящая от магнито-морфологической структуры активной области.

1. Aschwanden M., et al. // Space Sci Rev 2018. V. **214**, P. 55.
2. Watkins N.W., et al. // Space Sci Rev 2016. V. **198**, P. 3.

КОНКУРЕНЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОЙ И ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЕЙ В МАКСВЕЛЛОВСКОЙ ПЛАЗМЕ С ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

Кузнецов А.А., Нечаев А.А., Гарасев М.А., Кочаровский Вл.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kuznetsov.alexey@ipfran.ru

Наличие пучка энергичных электронов в теплой плазме, имеющей максвелловское распределение частиц по скоростям, характерно для широкого круга задач физики космической бесстолкновительной плазмы, включая солнечный ветер и магнитосферы звезд и планет. В этой ситуации, согласно известному дисперсионному анализу, немагнитная или слабозамагнитная плазма подвержена не только электростатической пучковой неустойчивости, при которой волновые вектора плазменных волн направлены преимущественно вдоль потоковой скорости, но и аperiodической неустойчивости вейбелевского типа с волновыми векторами, в основном ортогональными этой скорости. Как известно, развитие первой ведет к ленгмюровской турбулентности, а второй – к формированию мелкомасштабных токовых филаментов и согласованных с ними квазимагнитостатических турбулентных полей, существенно изменяющих кинетику плазмы.

Доклад посвящен численному исследованию совместной эволюции вейбелевской и ленгмюровской турбулентностей и изучению их взаимного влияния в рамках двумерного приближения немагнитной или слабозамагнитной плазмы, в которой циклотронная частота электронов много меньше плазменной. Использована оригинальная квазилинейная система уравнений, описывающая эволюцию как вейбелевских, так и ленгмюровских пространственных мод (гармоник) распределения частиц по скоростям и связанных с ними электромагнитных полей. Система выведена из уравнений Максвелла-Власова в приближении слабой турбулентности, т.е. при учете взаимодействия всех мод лишь через их интегральное влияние на однородное в пространстве распределение частиц по скоростям. Для получения численных решений квазилинейной системы уравнений создана и использована программа, основанная на стандартном алгоритме Стермера-Верле.

Преимуществом примененной квазилинейной системы является возможность независимого отключения и добавления вейбелевских и ленгмюровских мод в двумерной расчетной плоскости. Это позволило не только по отдельности верифицировать используемое квазилинейное описание вейбелевских и ленгмюровских мод путем сравнения с существующими расчетами [1, 2], но и впервые сравнить их независимую друг от друга динамику с совместной динамикой, в том числе при сопоставимой энергетике обоих турбулентных полей. Показано, что в значительной области параметров ленгмюровская неустойчивость хотя и обладает большим инкрементом, но не способна подавить развитие вейбелевской, а лишь приводит к небольшому снижению величину турбулентного магнитного поля, обычно на несколько процентов. Однако развитие вейбелевской турбулентности способно привести к значительному затуханию ленгмюровской, если под влиянием первой происходит значительная изотропизация функции распределения в области резонансных с плазменными волнами электронов. Полученные результаты актуальны для областей слабого магнитного поля, например, при формировании звездного ветра в верхних слоях короны в областях над полюсами звезды или над корональными дырами.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС (проект № 24-1-5-94-1). Для численных расчетов использованы суперкомпьютерные ресурсы ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

1. Кузнецов А.А., Нечаев А.А., Гарасев М.А., Кочаровский Вл.В. // ЖЭТФ 2023. Т **150**, С. 1098.
2. Appert K., Tran T. M., and Vaclavik J. // Phys. Rev. Lett. 1976. V **37**, P. 502.

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ДИСПЕРСИИ ВОЛН В ПЛАЗМЕ И ГАЗОПЫЛЕВЫХ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Крот А.М.

ОИПИ НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь, alxkrot@newman.bas-net.by

Неустойчивость является отличительной чертой явления самоорганизации в сложных системах. При исследовании плазмы А.А. Власов пренебрег столкновениями и записал самосогласованную систему уравнений [1] для функции распределения и уравнений Максвелла. По сути само уравнение Власова является следствием факта *квазинейтральности* плазмы. После линеаризации и в отсутствие столкновений (ввиду разреженной плазмы) показано существование как поперечных, так и продольных электромагнитных волн, для которых *дисперсионная зависимость* частоты ω от волнового вектора \vec{k} имеет вид [1]:

$$\omega = \omega_L \sqrt{1 + 3(R_D |\vec{k}|)^2}, \quad (1)$$

где $R_D = (k_B T / 4\pi n e^2)^{1/2}$ – радиус Дебая–Хюккеля, определяющий радиус экранирования кулоновского взаимодействия в плазме, ω_L – ленгмюровская частота электронной плазмы, T – температура электронной плазмы, k_B – постоянная Больцмана, n – концентрация электронов в плазме, m_e – масса электрона, e – заряд электрона. Проблема гравитационной конденсации бесконечной распыленной космической среды тесно связана с проблемой *гравитационной неустойчивости*. Линеаризованная теория неустойчивости, построенная Дж. Джинсом [2], показала, что в гравитирующей среде справедливо *дисперсионное* уравнение вида:

$$\omega = |\vec{k}| c_s \sqrt{1 - (k_c / |\vec{k}|)^2}, \quad (2)$$

где $k_c = 2\pi / \lambda_c = \sqrt{4\pi\rho_0} / c_s$ – критическое волновое число Джинса, c_s – скорость звуковой волны.

Взгляд на два дисперсионных уравнения (1) и (2) показывает, что в плазме продольные колебания являются устойчивыми колебаниями, а в связанном гравитационным взаимодействием газе звёзд звуковые колебания, которые можно называть *продольными* гравитационными колебаниями, являются *стабильными* только при условии $k > k_c$. В связанном гравитационным взаимодействием газе звёзд существуют и *поперечные* гравитационные колебания, являющиеся также стабильными при условии $k > k_c$.

В предыдущих работах была предложена статистическая теория формирования космогонического тела [3]. В рамках этой теории изучается распространение плоских монохроматических гравитационных волн в гравитационном поле конденсирующегося космогонического тела. Показано, что в этом случае также имеет место критерий гравитационной неустойчивости вида (2).

1. Власов А.А. // ЖЭТФ 1938. Т. 8 (3) С. 291.
2. Jeans J. Astronomy and cosmogony. – Cambridge: University Press, 1929. –428pp.
3. Krot A.M. A Statistical Theory of Gravitating Body Formation in Extrasolar Systems. – Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne (UK), 2021. –817 pp.

ФРАКТАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В АВРОРАЛЬНОМ ОВАЛЕ, СТАТИСТИКА ПО КАМЕРАМ В АПАТИТАХ И ВЕРХНЕТУЛОМСКОМ

Козелов Б.В.

Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, bob-koz@yandex.ru

Получено описание пространственной структуры полярных сияний фрактальной размерностью флуктуаций свечения и ее анизотропией в зависимости от направления [1, 2]. Фрактальная размерность оценивается из наклона в логарифмических осях спектра в диапазоне 1,5-50 км, полученного дискретным вейвлет-преобразованием флуктуаций интенсивности свечения с использованием вейвлетов Добеши 5 порядка. Вариабельность структур характеризуется наклоном спектра вариации анизотропии во времени [3]. Получена статистика этих характеристик по данным наземной камеры всего неба Полярного геофизического института в г. Апатиты за 2013-2020 годы и сделана привязка по положению внутри аврорального овала и значениям геомагнитного поля в обсерватории Ловозеро [4]. Получены значения фрактальных характеристик для групп различных форм полярных сияний и их локализация по положению по местному магнитному времени, что хорошо соответствует ожидаемой морфологии. Аналогичная статистика получена для наблюдений на полигоне «Верхнетуломский». Для сияний с интенсивностью выше 10 килорелей получены схожие характеристики. Показано, что для меньших интенсивностей необходимо вносить коррекцию из-за влияния фона неба.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Мурманской области, проект № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн»

Литература

1. Козелов Б.В. Пространственно-временные структуры в овале полярных сияний: подходы к моделированию // Космические исследования, 2023, №3, № 3, С. 179-188, DOI: 10.31857/S0023420622700054
2. Б. В. Козелов, В. Г. Воробьев, Е. Е. Титова, Т. А. Попова, Диагностика высокоширотной ионосферы и пространственно-временная динамика авроральных высыпаний // Известия РАН. Серия физическая. 2023, том 88, № 3, с. 466–472/
3. Козелов Б. В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала на основе экспериментальных данных // Известия РАН. Серия физическая. 2024.
4. Козелов Б. В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала по данным камеры всего неба в Апатитах за 2013-2020 гг. // Russ. J. Earth. Sci., 2025.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЖЕТОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Свентицкий А.В.^{1,2}, Руменских М.С.²

¹НГУ, г. Новосибирск, Россия, a.sventitskii@ngsu.ru

²ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Лабораторное моделирование способствовало бурному развитию исследований астрофизических явлений: влияние солнечного ветра на магнитосферу Земли, исследование туманностей, взрывы сверхновых и т.д. На установке КИ-1, на которой проводились эксперименты для данной работы, изучаются явления ближнего и дальнего космоса, происходящие в разреженной низкотемпературной плазме. [1,2]

В данной работе исследовалось взаимодействие джетов лазерной плазмы друг с другом и с фоновой плазмой тета-пинча. Производилась спектральная диагностика плазмы в различных конфигурациях разлёта плазменных джетов в фоновую плазму тета-пинча в поперечном магнитном поле. Изучался разлёт джетов лазерной плазмы в вакуум и в водородную фоновую плазму в поперечном магнитном поле, а также разлёт только фоновой плазмы тета-пинча.

Лазерная плазма создавалась с помощью мощного CO₂ лазера на длине волны 10,6 мкм. Мишень изготовлена из полиэтилена (C₂H₄). Анализировались спектры линий излучения водорода H_α на длине волны 6563 А и иона углерода на длинах волн 6578 А и 6582 А. Была получена температурная характеристика фоновой плазмы тета-пинча. Обнаружена стратификация водорода и углерода при разлёте джетов лазерной плазмы в фоновую плазму тета-пинча в поперечном магнитном поле. Отработана методика измерения относительного количества ионов посредством спектральной диагностики.

Работа выполнена при поддержке направления 10 Национального центра физики и математики.

1. Ю. П. Захаров, А. Г. Пономаренко, В. Н. Тищенко, В. М. Антонов, А. В. Мелехов, В. Г. Посух, П. А. Прокопов, В. А. Терехин, “Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования бесстолкновительных ударных волн в замагниченной космической плазме”, Квантовая электроника, 46:5 (2016), 399–405.

2. М. С. Руменских, А. А. Чибранов, М. А. Ефимов, А. Г. Березуцкий, В. Г. Посух, Ю. П. Захаров, Э. Л. Бояринцев, И. Б. Мирошниченко, И. Ф. Шайхисламов, “Лабораторное моделирование взаимодействия Солнечного ветра с Лунными магнитными аномалиями”, Письма в ЖЭТФ, 111:6 (2020), 335–342

КЛАССИФИКАЦИЯ АМБИПОЛЯРНЫХ ДИФФУЗИЙ ВЫСИКАЙЛО, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ВНЕШНИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ТОКОМ В ГЕЛИОСФЕРЕ, АТМОСФЕРАХ И ИОНОСФЕРАХ ПЛАНЕТ

Высикайло Ф.И.

МГОУ, г. Москва, Россия, filvys@yandex.ru

Воздействие внешних сил на заряженные частицы в плазме с током приводит к амбиполярным дрейфам в плазме с током [1]. Так прокачка нейтрального газа (или перемещение воздушных масс в гелиосфере, короне Солнца, атмосферах или ионосферах планет) со скоростью U в газоразрядной столкновительной плазме приводит к амбиполярному сносу неоднородностей плазмы в направлении потока U . Это свойство плазмы применяется в газоразрядных лазерах для сброса возбужденного газа из рабочего участка. Наличие сил гравитации в гелиосфере приводит к амбиполярным потокам плазмы в направлении сил гравитации, действующих в основном на ионы из-за их большей массы, чем масса электронов. Аналогично действие внешних сил на электроны (например, магнитного поля) приводит к амбиполярному дрейфу структур неоднородной плазмы в направлении силы Лоренца и т.д. Это свойство использовал Штарк для обнаружения обратного движения катодного пятна в поперечном магнитном поле еще в 1903 году. Автор в своих работах доказывает, что ток течет во всех плазменных структурах в галактиках, в звездосферах, гелиосфере, геосфере, атмосфере, ионосфере любых планет [1]. В этой работе автор обращает внимание, что одновременно, с появлением дрейфовых потоков, в неоднородной плазме происходит генерация амбиполярных диффузий, обусловленных интерференцией электрического поля со всеми внешними силами, действующими на заряженные частицы плазмы. Предложен метод расчета коэффициентов всех классифицированных амбиполярных диффузий Высикайло. Для этого автором построена теория возмущений. В нулевом приближении по теории возмущений Высикайло получено модифицированное уравнение типа Навье-Стокса [2]:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} - \partial[(I_{E0}/\mu_{e0})\nabla](\mu_{e0} n_e)/\partial t + (j/e)\nabla(\mu_{i0}/\mu_{e0}) + U\nabla n_e - \nabla(U(I_{E0}/\mu_{e0})\nabla(\mu_{e0} n_e)) - \nabla\{I_{E0}(\mu_{i0} E_0/\mu_{e0}\nabla)(\mu_{e0} n_e)\} - \beta n_e(I_{E0}/\mu_{e0})\nabla(\mu_{e0} n_e) + \mu_i m_i (g/z_i e)\nabla n_i - (\mu_i \mu_e [E \times H]/c)\nabla n_i = I_{i0} - R_{i0}; \quad (1)$$

Из (1) эффективный коэффициент амбиполярной диффузии $D_U \approx U(I_{E0})$, обусловленной интерференцией электрического поля E_0 и прокачки газа U равен скалярному произведению двух векторов U – скорости перемещения (например, воздушных масс) и вектора нарушения электронейтральности $-I_{E0} = E_0/(4\pi n_e)$. Аналогично получим коэффициенты амбиполярных диффузий для всех других воздействий на заряженные компоненты плазмы с током.

1. Vysikaylo P.I. (2022) Quantitative Investigation Nonequilibrium Inhomogeneous Plasma of the Heliosphere With Runaway Electrons // IEEE Trans. Plasma Sci. V. 50, № 4, pp. 810-816 DOI: 10.1109/TPS.2022.3160189 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9745462>
2. Vysikaylo, P. I. (2024). Non-stationary 3D Perturbation Theory for Describing Nonlinear Interaction of Electric Field with Matter in Inhomogeneous Plasma with Current. Vysikaylo's Electric Field Shock Waves and Plasma Nozzles. J Sen Net Data Comm, 4(3), 01-24. <https://www.opastpublishers.com/peer-review/nonstationary-3d-perturbation-theory-for-describing-nonlinear-interaction-of-electric-field-with-matter-in-inhomogeneous-8027.html>