



ДЕВЯТНАДЦАТАЯ  
ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

**5-9.02.2024**



**СБОРНИК ТЕЗИСОВ**

*Уважаемые Коллеги!*

*Перед вами сборник тезисов докладов, представленных на Девятнадцатой конференции по “Физике плазмы в Солнечной системе”. Тезисы даны в авторской редакции на 12 февраля 2024 года. Всего на конференцию было заявлено 360 докладов (274 устных и 86 стендовых). Доклады были доложены в рамках восьми тематических секций, которые проходили параллельно в три потока (в понедельник, вторник и среду) и в два потока (в четверг и пятницу) в течение пяти рабочих дней с 5 по 9 февраля 2024 года. Тезисы в сборнике представлены по секциям, где они идут в хронологическом порядке по дням согласно программе. К сожалению, от тематических секций не было заявлено пленарных докладов, представляющих общий интерес и отражающих достижения 2023 года. Надеемся, что в Программе есть потенциальные заявки на лучшие результаты 2024 года. Мы благодарим всех Авторы тезисов.*

*От имени Программного и организационного комитетов  
Девятнадцатой конференции по “Физике плазмы в Солнечной системе”  
А.Б. Струминский и А.Б. Нечаева*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

*Пленарные доклады:*

Климушкин Д.Ю., Магер П.Н.  
“АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ В РЕАЛИСТИЧНЫХ МОДЕЛЯХ  
МАГНИТОСФЕРЫ: ПАМЯТИ АНАТОЛИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛЕОНОВИЧА” 8

*Секции:*

1. Теория и наблюдения Солнца	9 – 106
2. Солнечный ветер и гелиосфера	107 – 151
3. Магнитосфера	152 – 195
4. Ионосфера	196 – 258
5. Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли	259 – 284
6. Прогноз космической погоды и прикладная физика магнитосферы и ионосферы	285 – 332
7. Волновые явления в космической плазме	333 – 370
8. Теория и наблюдение токовых слоёв	371 – 379

Распределение секций конференции «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ – 2024» по помещениям и on-line каналам ИКИ РАН:

<i>День недели, время</i>		<i>Конференц-Зал (Line 1), время</i>	<i>Комната 202 (Line 2), время</i>	<i>Комната 200 (Line 3), время</i>
<b>05.02.2024 Понедельник</b>	<b>Утро</b>	Теория и наблюдения Солнца 09:30-11:00	Ионосфера 09:30-11:00	Солнечный ветер и гелиосфера 09:30-11:00
	11:00-11:30	<b>Кофе</b>		
	<b>11:30-11:45</b>	<b>ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>		
		Теория и наблюдения Солнца 11:45-13:15	Ионосфера 11:45-13:15	Солнечный ветер и гелиосфера 11:30-13:15
	13:15-14:00	<b>Обед</b>		
	<b>День</b>	Теория и наблюдения Солнца 14:00-15:30	Ионосфера 14:00-15:30	Токовые слои 14:00-15:30
	15:30-16:00	<b>Кофе</b>		
	<b>Вечер</b>	Теория и наблюдения Солнца 16:00-17:30	Ионосфера 16:00-17:30	Токовые слои 16:00-16:30 Магнитосфера 16:30-17:30
Постерная сессия до 18:00		Постерная сессия до 18:00	Постерная сессия до 18:00	
<b>06.02.2024 Вторник</b>	<b>Утро</b>	Теория и наблюдения Солнца 09:30-11:00	Магнитосфера 09:30-11:00	Атмосфера и климат Земли 09:30-11:00
	11:00-11:30	<b>Кофе</b>		
		Теория и наблюдения Солнца 11:30-13:00	Магнитосфера 11:30-13:00	Атмосфера и климат Земли 11:30-13:00
	13:00-14:00	<b>Обед</b>		
	<b>День</b>	Теория и наблюдения Солнца 14:00-15:30	Магнитосфера 14:00-15:30	Атмосфера и климат Земли 14:00-15:30
	15:30-16:00	<b>Кофе</b>		
	<b>Вечер</b>	Теория и наблюдения Солнца 16:00-17:30	Магнитосфера 16:00-17:30	Атмосфера и климат Земли 16:00-17:30
		Постерная сессия до 18:00	Постерная сессия до 18:00	Постерная сессия до 18:00
<b>07.02.2024 Среда</b>	<b>Утро</b>	Солнечный ветер и гелиосфера 09:30-11:00	Ионосфера 09:30-11:00	Теория и наблюдения Солнца 09:30-11:00
	11:00-11:30	<b>Кофе</b>		
		Солнечный ветер и гелиосфера 11:30-13:00	Ионосфера 11:30-13:00	Теория и наблюдения Солнца 11:30-13:00
	13:00-14:00	<b>Обед</b>		

	<i>День</i>	Солнечный ветер и гелиосфера 14:00-15:30	Волновые явления 14:00-15:20	Теория и наблюдения Солнца 14:00-15:30	
		<b>15:30-16:00 Кофе</b>	<b>15:20-16:00 Кофе</b>	<b>15:30-16:00 Кофе</b>	
	<i>Вечер</i>	Солнечный ветер и гелиосфера 16:00-17:30	Волновые явления 16:00-17:40	Теория и наблюдения Солнца 16:00-17:30	
		Постерная сессия до 18:00	Постерная сессия до 18:00	Постерная сессия до 18:00	
	18:00-19:00				
	<b>19:00-21:00</b>	<b>БАНКЕТ</b>			
<b>08.02.2024 Четверг</b>	<i>Утро</i>	Волновые явления 09:30-10:40	Космическая погода 09:00-10:30	(свободно)	
		<b>10:40-11:00 Кофе</b>	<b>10:30-11:00 Кофе</b>		
		Волновые явления 11:00-13:00	Космическая погода 11:00-11:30		
		13:00-14:00	<b>Обед</b>		
	<i>День</i>	Волновые явления 14:00-16:00	Космическая погода 14:00-15:30	(свободно)	
		<b>15:20-16:00 Кофе</b>	<b>15:30-16:00 Кофе</b>		
	<i>Вечер</i>	Постерная сессия до 18:00	Постерная сессия до 18:00		
	<b>18:00-19:00</b>	<b>Заключительная постерная сессия</b>			
<b>09.02.2024 Пятница</b>	<i>Утро</i>	Космическая погода 09:30-11:00	Волновые явления 10:20-11:00	(свободно)	
		11:00-11:30	<b>Кофе</b>		
	<i>Утро</i>	Космическая погода 11:30-13:00	Волновые явления 11:30-13:00	(свободно)	
		<b>13:00</b>	<b>ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>		

**АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ В РЕАЛИСТИЧНЫХ МОДЕЛЯХ МАГНИТОСФЕРЫ: ПАМЯТИ АНАТОЛИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛЕОНОВИЧА**

**Климущкин Д.Ю., Магер П.Н.**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, klimush@iszf.irk.ru

Одним из основных направлений работы Анатолия Сергеевича Леоновича было изучение альфвеновских волн в реалистичных моделях магнитосферы, принимающих во внимание неоднородность магнитосферы поперек магнитных оболочек, вдоль силовых линий, а также в азимутальном направлении. Еще в 1970-х годах было установлено, что в 1-мерно неоднородной геометрии (неоднородность поперек L-оболочек) альфвеновский резонанс (AR) происходит на магнитной поверхности, где локальное уравнение дисперсии для альфвеновской моды выполняется с заданными значениями частоты волны и параллельного волнового вектора. На резонансной магнитной оболочке мода имеет тороидальную поляризацию, амплитуда волны бесконечна. В начале 1990-х годов в работах А.С. Леоновича и В.А. Мазура была детально изучена структура AR в более реалистичных моделях. Была выявлена новая особенность альфвеновских волн, обусловленная кривизной силовых линий: распространение энергии поперек L-оболочек. В этом случае волна может иметь как тороидальную, так и полоидальную поляризацию. Волна может распространяться только в канале, ограниченном поверхностями, где частота волны соответствует тороидальной и полоидной собственной частоте. Энергия вытекает с полоидной поверхности и накапливается на тороидальной, последняя служит резонансной поверхностью. Преобразование монохроматической полоидальной альфвеновской волны в тороидальную наблюдалось с помощью спутника RBSP-A. В работах А.С. Леоновича был также изучен случай трехмерно-неоднородной модели, когда разница между полоидальными и тороидальными поверхностями исчезает, и обе они служат источником потока энергии в поперечном направлении. Внутри канала есть поверхность (сепаратриса), где накапливается эта энергия. Поверхность сепаратрисы и играет роль резонансной поверхности. Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 22-77-10032.

1. Leonovich A.S., Mazur V.A. // Planet. Space Sci. 1993. V. 41. P. 697.
2. Leonovich A.S., Mazur V.A. // Planet. Space Sci. 1995. V. 43. P. 881.
3. Klimushkin D.Yu., Leonovich A.S., Mazur V.A. // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 9527.

**СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца»**

**Понедельник, 05.02. 2024 г., Конференционный Зал**

Председатель: <u>Ишков В.Н.</u>			
	Время	Докладчик	Название доклада
1	09.30 - 09.45	Клиорин Н.	Динамо звёзд солнечного типа и физика Солнца
2	09.45 - 10.00	Пипин В.В.	Параметры генерации полоидального поля Солнца по данным наблюдений и моделей динамо
3	10.00 - 10.15	Окатьев Р.С.	Воспроизведение сплошной компоненты спектра солнечной активности в рамках простых моделей динамо
4	10.15 - 10.30	Кузанын К.М.	Предсказание солнечной активности с помощью нейронной сети, управляемой солнечным динамо средних полей
5	10.30 - 10.45	Копьев А.В.	О возможном механизме подавления мелкомасштабного динамо в конвективной оболочке Солнца
6	10.45 - 11.00	Соколов Д.Д.	Динамический хаос и долговременные колебания солнечной активности
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
	11.30 - 11.45	<b>ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	
Председатель: <u>Соколов Д.Д.</u>			
7	11.45 - 12.00	Шибяев И.Г.	Образ эпох повышенной / пониженной солнечной активности
8	12.00 - 12.15	Козлов В.И.	Анализ по космическим лучам фазы роста и максимума циклов 24-25
9	12.15 - 12.30	Ишков В.Н.	Солнечный цикл 25 в ряду достоверных наблюдений: эволюция, характеристики, прогноз развития
10	12.30 - 12.45	Кацова М.М.	Существует ли синхронизирующее воздействие планет на циклическую активность Солнца и звёзд?
11	12.45 - 13.00	Герашенко М.А.	Взаимное расположение солнечных пятен в группах и динамика солнечной активности
	<b>13.00 - 14.00</b>	<b>Обед</b>	
Председатель: <u>Кацова М.М.</u>			
12	14.00 - 14.15	Наговицын Ю.А.	Две популяции групп солнечных пятен: магнитный поток, времена жизни, горизонтальное поле скорости
13	14.15 - 14.30	Плотников А.А.	Анализ радиальных течений около медленнозатухающих униполярных активных областей
14	14.30 - 14.45	Зимовец И.В.	Магнитная энергетика активных областей различных классов

15	14.45 - 15.00	Феденёв В.В.	Статистический анализ спектров гирорезонансного излучения солнечных активных областей по данным Сибирского Радиогелиографа
16	15.00 - 15.15	Жукова А.В.	Северо-южная асимметрия магнитных потоков регулярных и нерегулярных активных областей в 23-м и 24-м циклах
17	15.15 - 15.30	Степанов А.В.	О природе "светлых мостиков" в солнечных пятнах
	<b>15.30 - 16.00</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>Председатель: Степанов А.В.</b>			
18	16.00 - 16.15	Кочаровский Вл.В.	Развитие вейбелевской турбулентности в бесстолкновительной плазме с магнитным полем
19	16.15 - 16.30	Юшков Е.В.	Влияние локальной неоднородности плазменной турбулентности на генерацию магнитной энергии
20	16.30 - 16.45	Аллахвердиев Р.Р.	Численный анализ влияния анизотропии среды на порог мелкомасштабной генерации магнитного поля
21	16.45 - 17.00	Абушзаде И.З.	Изучение порога генерации мелкомасштабного динамо в рамках каскадной модели
22	17.00 - 17.15	Шивидов Н.К.	Дисперсия акустических волн в высокотемпературной плазме
23	17.15 - 17.30	Дертеев С.Б.	Нелинейные акустические волны в высокотемпературной плазме
	17.30 - 18.00	<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии 05.02.2024 «Теория и наблюдения Солнца»

- 1.1.1 Морозова Е.И., Магнитная структура солнечных циклов
- 1.1.2 Шибяев А.И. Прогнозирование циклов ряда чисел Вольфа с помощью метода главных компонент
- 1.1.3 Костюченко И.Г., Вернова Е.С., Илларионов Е.А. Вращение крупных групп пятен, наблюдавшихся на активной долготе на спаде активности цикла 24
- 1.1.4 Березин И.А., Шрамко А.Д., Тлатов А.Г., Дормидонтов Д.В. Система удалённого доступа к оперативным данным наблюдений ГАС ГАО РАН драйверов космической погоды
- 1.1.5 Якунина Г.В. Исследование ультрафиолетового излучения Солнца
- 1.1.6 Лобода И.П., Рева А.А., Богачев С.А., Кириченко А.С., Ульянов А.С. Разделение залимбовых эмиссионных компонент ионов He II и Si XI в канале 304 Å
- 1.1.7 Голубчина О.А. Физические характеристики радиоизлучения северной полярной области Солнца, открытой во время максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 г., по данным наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600

Вторник, 06.02.2024 г., Конференционный Зал

Председатель: Григорьева И.Ю.			
	Время	Докладчик	Название доклада
1	09.30 - 09.45	Шабалин А.Н.	Квазипериодические пульсации вспыхивающего жесткого рентгеновского излучения в локальных источниках
2	09.45 - 10.00	Анфиногентов С.А.	Квазипериодические пульсации микроволнового излучения, сопровождающиеся квазипериодическими быстрыми волновыми пакетами
3	10.00 - 10.15	Нечаева А.Б.	Незатухающие колебания солнечных корональных петель как предвестники вспышек
4	10.15 - 10.30	Старченко С.В.	Автокорреляция фрагментов ряда чисел Вольфа, цикличность и прогноз
5	10.30 - 10.45	Андреева О.А.	База данных наблюдений Солнца в ближней инфракрасной области полученных на телескопе БСТ-2 КрАО
6	10.45 - 11.00	Биленко И.А.	Характеристики меридиональной циркуляции солнечных магнитных полей
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>Председатель: Илларионов Е.А.</b>			
7	11.30 - 11.45	Тлатов А.Г.	Приповерхностные азимутальные магнитные поля и их роль в циклах солнечной активности
8	11.45 - 12.00	Киселюс В.	Восстановление карт полярности магнитного поля Солнца методами машинного обучения
9	12.00 - 12.15	Вернова Е.С.	Широтное распределение слабых магнитных полей фотосферы Солнца
10	12.15 - 12.30	Абраменко В.И.	Корреляционные и фрактальные свойства магнитных полей активных областей
11	12.30 - 12.45	Григорьева И.Ю.	О роли магнитных полей различных масштабов в реализации СПС и КВМ
12	12.45 - 13.00	Обридко В.Н.	Циклическая вариация структуры и энергетики солнечных магнитных полей
	<b>13.00 - 14.00</b>	<b>Обед</b>	
<b>Председатель: Обридко В.Н.</b>			
13	14.00 - 14.15	Алтынцев А.Т.	Наблюдения корональных дыр на Сибирском Радиогелиографе
14	14.15 - 14.30	Илларионов Е.А.	Построение индекса корональных дыр, согласованного с вариациями солнечного ветра
15	14.30 - 14.45	Богод В.М.	Тонкая структура короны по радио наблюдениям с высоким частотным разрешением
16	14.45 - 15.00	Богод В.М.	Обнаружение линии поглощения гидроксила (OH) в солнечной короне на микроволнах
17	15.00 - 15.15	Чернов Г.П.	О совершенствовании модели на ДПР на фоне сложных спектров

18	15.15 - 15.30	Смирнова В.В.	Численное моделирование распространения волн альфвеновского типа из короны в фотосферу и оптическое излучение солнечных вспышек
	<b>15.30 - 16.00</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>Председатель: <u>Куприянова Е.Г.</u></b>			
19	16.00 - 16.15	Каракотов Р.Р.	Исследование медленных волн в корональных структурах по данным наблюдений SDO/AIA
20	16.15 - 16.30	Скопцова Е.В.	Влияние процессов тепловыделения на гравитационную стратификацию солнечной атмосферы
21	16.30 - 16.45	Агапова Д.В.	Изучение дисперсии магнитоакустических волн в магнитноструктурированной плазме при наличии теплового дисбаланса и теплопроводности
22	16.45 - 17.00	Фролова А.С.	Анализ эволюции слабых возмущений инициированных в основании горячих корональных петель
23	17.00 - 17.15	Цап Ю.Т.	Электрические токи в короне Солнца и скрученность корональных петель
24	17.15 - 17.30	Мерзляков В.Л.	Особенности локального нагрева короны Солнца
	17.30 - 18.00	<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии 06.02.2024 «Теория и наблюдения Солнца»

- 1.2.1 Богод В.М. Наблюдение структуры субсекундных импульсов в радиоизлучении рентгеновских точек в диапазоне 1-3 ГГц
- 1.2.2 Кашапова Л.К. Каталог солнечных вспышек по наблюдениям Сибирского Радиогелиографа
- 1.2.3 Ахтемов З.С. Рентгеновские вспышки на фазе спада 24-го цикла: энергия и пространственное расположение
- 1.2.4 Завершинский Д.И. Статистический анализ дифференциальной меры эмиссии нановспышек с помощью алгоритма SITES
- 1.2.5 Бакунина И.А. Пространственная структура магнитных жгутов и электрических токов во вспышечно-активных областях
- 1.2.6 Шамсутдинова Ю.Н. Применение машинного обучения для распознавания солнечной вспышки в микроволновом диапазоне
- 1.2.7 Рящиков Д.С., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И., Агапова Д.В. Создание каталога наблюдений МГД волн в солнечной короне для определения параметров плазмы на основе аналитического решения эволюционного уравнения

Среда, 07.02. 2024 г., комната 200

<b>Председатель: <u>Шарькин И.Н.</u></b>			
	<b>Время</b>	<b>Докладчик</b>	<b>Название доклада</b>
1	09.30 - 09.45	Косовичев А.Г.	Эффекты протонных пучков в солнечных вспышках
2	09.15 - 09.30	Лобода И.П.	Статистика солнечных джетов ВУФ диапазона
3	09.45 - 10.00	Рева А.А.	Ассоциация вспышек с КВМ и роль пересоединения в ускорении КВМ
4	10.00 - 10.15	Малютин В.А.	Необходимость модели неоднородных облаков для объяснения оптического излучения над фотосферного газа в линиях водорода, гелия и кальция
5	10.10 - 10.30	Мельников В.Ф.	Динамика размеров вспышечных петель
6	10.45 - 11.00	Леденцов Л.С.	Метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>Председатель: <u>Кашапова Л.К.</u></b>			
7	11.30 - 11.45	Тульников Е.Д.	Характеристики оптической системы научной аппаратуры "Солнце-ТЕРАГЕРЦ"
8	11.45 - 12.00	Моторина Г.Г.	О природе суб-терагерцового излучения солнечной вспышки 04.05.2022 на фазе спада
9	12.00 - 12.15	Кириченко А.С.	Пространственное распределение микровспышек на диске Солнца
10	12.15 - 12.30	Смирнов Д.А.	Микроволновая диагностика параметров солнечных вспышек 20 января 2022 года и 16 июля 2023 года методом фитирования по данным Сибирского Радиогелиографа
11	12.03 - 12.45	Шарькин И.Н.	Ультрафиолетовые предвестники эруптивной солнечной вспышки 22 июня 2015 г. М6.5 класса по данным AIA и IRIS
12	12.45 - 13.00	Думин Ю.В.	"Топологический триггер" как механизм возникновения униполярных солнечных вспышек
	<b>13.00 - 14.00</b>	<b>Обед</b>	
<b>Председатель: <u>Мельников В.Ф.</u></b>			
13	14.00 - 14.15	Кашапова Л.К.	О возможных механизмах генерации излучения во время длительной фазы спада слабой вспышки
14	14.15 - 14.30	Мешалкина Н.С.	Проявления нагрева в начале вспышки 29 июня 2012
15	14.30 - 14.45	Купряков Ю.А.	Наблюдение, теоретический расчет и анализ вспышки SOL2012-05-11
16	14.45 - 15.00	Шамсутдинова Ю.Н.	Пространственная и спектральная эволюция источников микроволнового и рентгеновского излучения во время лимбовой вспышки 5 февраля 2023 года

17	15.00 - 15.15	Соловьев А.А.	Бессиловой магнитный жгут как модель солнечной вспышки
18	15.15 - 15.30	Кузнецов А.А.	Энерговыделение и ускорение частиц в солнечной вспышке 6 марта 2023 г.
	<b>15.30 - 16.00</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Струминский А.Б.</u>			
19	16.00 - 16.15	Головко А.А.	Особенности поля скоростей в активной области 12673, связанные со вспышками 6 сентября 2017г.
20	16.15 - 16.30	Филатов Л.В.	Об эффективности ускорения нетепловых электронов на турбулентности вистлеров в зависимости от формы их частотного спектра
21	16.30 – 16.45	Курт В.Г.	Экспериментальное определение времени и места ускорения протонов с энергиями $\geq 300$ МэВ в эруптивных солнечных вспышках различной мощности
22	16.45 – 17.00	Юронин М.В.	Обзор миссии с участием наноспутников для исследования Солнца
23	17.00 - 17.15	Богачёв С.А.	Измерения рентгеновского излучения Солнца с использованием космического аппарата типа кубсат
24	17.15 - 17.30	Богомоллов А.В.	Наблюдение жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек на спутниках формата кубсат группировки Московского университета
	17.30 - 18.00	<b>Постерная сессия</b>	
	18.00 - 19.00		
	<b>19.00 - 21.00</b>	<b>Банкет</b>	

### Доклады постерной сессии 07.02.2024 «Теория и наблюдения Солнца»

- 1.3.1 Шарькин И.Н. Особенности динамики активной области поаа 12230 перед началом серии гомологичных солнечных вспышек C класса
- 1.3.2 Цап Ю.Т. Горячие предвестники и ускорение электронов в солнечных вспышках
- 1.3.3 Лысенко А.Л. Совместные наблюдения солнечных вспышек и кросс-калибровка инструментов KONUS-WIND и SOLO/STIX
- 1.3.4 Горюнова В.Д. Признаки предвспышечного состояния солнечных активных областей в микроволновом излучении
- 1.3.5 Абрамов-Максимов В.Е. Предвестники солнечных вспышек по данным RSTN и NoRH
- 1.3.6 Струминский А.Б. Ускорение электронов и протонов во вспышках 16 июля (C5.7, M4.0) и 14 декабря (X2.8) 2023 года
- 1.3.7 Mauburov S. N. Correlations of electromagnetic solar activity with variations of Fe-55 and Co-60 nucleus decay parameters

## ДИНАМО ЗВЁЗД СОЛНЕЧНОГО ТИПА И ФИЗИКА СОЛНЦА

**Клиорин Н.**<sup>2,3</sup>, **Гершберг Р. Е.**<sup>5</sup>, **Кузанын К.М.**<sup>1,2</sup>, **Сафиуллин, Н.Т.**<sup>2,4</sup>, **Обридко В.Н.**<sup>1,2</sup>, **Рогачевский И.**<sup>3</sup>, **Поршнев, С.В.**<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>3</sup> Ben Gurion University, Beer-Sheva, Israel, [nat@bgu.ac.il](mailto:nat@bgu.ac.il)

<sup>4</sup> Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

<sup>5</sup> КРАО, пос. Научный, Крым, Россия.

В докладе приводятся результаты моделирования магнитной активности звёзд поздних спектральных классов. Наш теоретический и численный анализ показал, что для мало массивных звезд главной последовательности (спектральных классов от M5 до G2), вращающихся значительно быстрее, чем Солнце, генерируемое крупномасштабное магнитное поле вызвано, в основном,  $\alpha^2$  – динамо среднего поля. При этом временное поведение  $\alpha^2$  – динамо заметно модифицируется даже слабым дифференциальным вращением. В присутствии дифференциального вращения, поведение магнитной активности резко меняется от апериодического режима к нелинейным колебаниям, сопровождающимся хаотическим поведением по мере роста дифференциального вращения. Периоды магнитных циклов уменьшаются с увеличением дифференциального вращения и их длительность меняется от тысяч до десятков лет. Такое долговременное поведение магнитных циклов может быть связано с характерным временем эволюции плотности спиральности мелкомасштабного магнитного поля. Выполненный анализ основан на численном моделировании  $\alpha^2\Omega$  динамо среднего поля в рамках «по г» модели динамо и аналитическом развитии нелинейной маломодовой модели  $\alpha^2$  – динамо. Обе модели были откалиброваны с использованием турбулентных параметров, типичных для солнечной конвективной зоны.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-72-20067.

1. Kleorin N., Rogachevskii I., Safiullin N., Gershberg R., Porshnev S., // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2023, v. 526, 1601-1612.



## ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАЦИИ ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛЕЙ ДИНАМО

**Пипин В.В.**

*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [pip@iszf.irk.ru](mailto:pip@iszf.irk.ru)*

Базовый сценарий гидромагнитного солнечного динамо предполагает циклическое преобразование тороидального и полоидального магнитного поля под действием дифференциального вращения и циклонических конвективных движений ( $\alpha$  эффект). В динамо среднего поля турбулентный  $\alpha$  эффект создает эффективную азимутальную ЭДС,  $\mathcal{E}_\phi$ , в направлении, которое в северном полушарии совпадает с направлением осесимметричного тороидального магнитного поля,  $V_\phi$ . Турбулентная ЭДС,  $\mathcal{E}_\phi$ , генерирует осесимметричное полоидальное магнитное поле. С полярной стороны динамо-волны тороидального магнитного поля полярность генерируемого радиального магнитного поля совпадает со знаком  $V_\phi$ , если на севере  $\alpha > 0$ . Для приэкваториальных областей знак радиального магнитного поля противоположный, и в целом, в зоне пятнообразования наблюдается  $V_r V_\phi < 0$ . Во время магнитного цикла высокоширотная ветвь  $V_r$  дрейфует к полюсу. Эта часть крупномасштабного магнитного поля является затравочной для генерации тороидального поля и солнечных пятен нового динамо цикла. Низкоширотная  $V_r$  дрейфует вместе с зоной пятнообразования к экватору, где постепенно затухает за счет диффузии полей противоположного знака из северного и южного полушария Солнца. В нелинейном режиме динамо эффекты турбулентной диффузии и генерации сбалансированы. Таким образом, количество генерируемого потока радиального магнитного поля в полушарии определяется диффузией магнитного потока на экваторе.

Используя данные наблюдений радиального магнитного поля Солнца, а также модель динамо среднего поля [1], включающую, помимо турбулентных эффектов, существенные элементы сценария Бэбкока-Лейтона, мы оценили скорости генерации полоидального магнитного потока в полушариях Солнца, а также эффекты радиальной диффузии и диффузии потока через экватор. Наши оценки показывают, что эффект радиальной диффузии определяет скорость генерации (при заданном  $\alpha$ ) полоидального магнитного потока в полушарии для динамо, распределенного по конвективной зоне Солнца. Для сценария Бэбкока-Лейтона важна диффузия магнитного потока поперек экватора [2]. Скорости генерации радиального магнитного поля Солнца в последних 3-х солнечных циклах показывают, что диффузии поля поперек экватора недостаточно и необходимо учитывать глубинные эффекты турбулентной диффузии и генерации полоидального магнитного поля.

1. Pipin V.V., Kosovichev A.G., Tomin V.E // ApJ 2023. V. 949. P.7.
2. Yeates A.R., Cheung M. C. M., Jiang J., Petrovay K., Wang, Y.-M., 2023, SSRv, 219, 31

## ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ СПЛОШНОЙ КОМПОНЕНТЫ СПЕКТРА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В РАМКАХ ПРОСТЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМО

**Окательев Р.С., Фрик П.Г., Соколов Д.Д.**

*ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия, [okatev.r@icmm.ru](mailto:okatev.r@icmm.ru), МГУ, г. Москва, Россия, ИЗМИРАН, г. Москва, Россия*

Хорошо известно, что поведение солнечной активности является периодическим. Однако, наблюдаемый спектр солнечной активности, является сплошным с некоторыми выделенными частотами. Физические механизмы, ответственные за существование выделенных частот, хорошо известны, однако открытым остается вопрос о том, какие именно механизмы отвечают за генерацию заполненного спектра на фоне основного цикла. В рамках данной работы делается попытка воспроизвести непрерывную компоненту с использованием различных модификаций модели Паркера [1].

Соотношения исследуемых моделей основываются на нелинейной модели Паркера [2] с учетом механизма подавления магнитного поля (альфа-квенчинга). Помимо модели с классическим квенчингом, рассмотрена также модификация со знакопеременным альфа-эффектом. Показано, что обе упомянутые модификации позволяют получать ограниченные решения с дипольной симметрией магнитного поля.

Для возмущения чисто периодических решений используется введение стохастических вариаций в виде поправки к среднему значению динамо-числа с учетом некоторого корреляционного времени, в течение которого динамо-число остается постоянным.

Известно, что сплошной спектр также характерен для систем, в которых реализуется динамический хаос. По этой причине в работе также рассматривается четырехмодовая модификация модели Паркера, содержащая по две моды для тороидальной и полоидальной компонент магнитного поля [3, 4].

Показано, что с использованием модификаций модели Паркера принципиально можно воспроизвести спектр солнечной активности, качественно схожий с наблюдаемым, однако зачастую это возможно лишь при специфичном подборе управляющих параметров.

1. Parker E.N. // Astrophys. J. 1955. V. 122. P. 293.
2. Sokoloff D.D., Fioc M., Nesme-Ribes E. // Magnetohydrodynamics 1996. V. 31. P. 18.
3. Nefedov S.N., Sokoloff D.D. // Astron. Rep. 2010. V. 54. P. 247.
4. Frick P., Okatev R., Sokoloff D. // Russian J. Nonlin. Dyn. 2022. V. 18. P. 289.

## ПРЕДСКАЗАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ, УПРАВЛЯЕМОЙ СОЛНЕЧНЫМ ДИНАМО СРЕДНИХ ПОЛЕЙ

Кузьян К.М.<sup>1,2</sup>, Клиорин, Н.<sup>2,3</sup>, Сафиуллин, Н.Т.<sup>2,4</sup>, Обридко В.Н.<sup>1,2</sup>, Рогачевский И.<sup>3</sup>, Поршнева, С.В.<sup>4</sup>, Степанов, Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [kuzanyan@izmiran.ru](mailto:kuzanyan@izmiran.ru)

<sup>2</sup>ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

<sup>3</sup>Ben Gurion University, Beer-Sheva, Israel

<sup>4</sup>Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия

Развита нелинейная динамическая модель альфа-Омега динамо с эволюцией магнитной спиральности, которая непосредственно опирается на систематические наблюдения солнечной активности и доступные данные по признакам магнитной спиральности на Солнце [1]. На основе этой модели мы разработали метод, позволяющий предсказывать 13-и месячные сглаженные значения индекса числа солнечных пятен с высокой точностью. Наш метод использует нелинейную динамическую модель динамо для создания управляющего сигнала для нейронной сети. Разработанная нейронная сеть фактически играет роль дополнительного звена, связывающего нашу динамо модель с массивом имеющихся и вновь поступающих наблюдательных данных.

Ежемесячный прогноз производится начиная с конца 2017 года (и ежемесячно выкладывается в сеть <https://github.com/rodionstepanov/SolarActivityPrediction> начиная с октября 2021 г.) и действительно демонстрирует высокую точность. Мы провели качественное сравнение наших результатов с результатами других методов прогноза.

Мы показали, что вполне возможен прогноз с заблаговременностью на 6 - 12 - 18 месяцев даже при отсутствии коррекции этих прогнозов с помощью реальных наблюдений 13-и месячных сглаженных средних; его точность остается на уровне существующих методов, разработанных другими авторами. Примечательно, что использование нейронной сети в совокупности с нелинейной динамической динамо-моделью, позволяет достичь точности предсказаний на горизонте 6 - 18 месяцев, сравнимой с точностью ежемесячных прогнозов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-72-20067.

1. Safiullin, N. ; Kleeorin, N. ; Porshnev, S. ; Rogachevskii, I. ; Ruzmaikin, A. // Journal of Plasma Physics, 2018, Volume 84, Issue 3, article id. 735840306.

## О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ПОДАВЛЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ДИНАМО В КОНВЕКТИВНОЙ ОБОЛОЧКЕ СОЛНЦА

Копьев А.В., Ильин А.С., Сирота В.А., Зыбин К.П.

ФИАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва, Россия, [kopyev@lpi.ru](mailto:kopyev@lpi.ru)

Хорошо известно явление Солнечной активности, механизм которой, как правило, связывают с теорией  $\alpha$ - $\Omega$  динамо [1]. С помощью этой теории удается объяснить возникновение квазипериодических крупномасштабных неоднородных магнитных полей в согласии с наблюдениями [2]. Механизм образования мелкомасштабных магнитных полей в конвективных оболочках Солнца до сих пор не ясен и может быть связан как с дроблением крупномасштабного поля [3], так и с его генерацией мелкомасштабной турбулентностью (мелкомасштабное динамо) [4].

Общепринятая теория мелкомасштабного динамо (теория Казанцева-Крайчнана [5]) предсказывает наличие генерации мелкомасштабного поля в условиях Солнечной плазмы, что не согласуется с интерпретацией некоторых наблюдательных данных [6]. Эта теория рассматривает обратимые во времени случайные потоки, однако, известно, что реальные турбулентные потоки необратимы во времени: наличие энергетического каскада является неотъемлемым свойством турбулентности [7]. Мы обобщаем 'стандартную' модель, чтобы учесть необратимость и показываем, что даже небольшая временная асимметрия приводит к значительному подавлению динамо-эффекта, увеличивает порог генерации и может сделать генерацию невозможной [8].

Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС 23-1-3-46-1 "Негауссовы поправки в задаче турбулентного динамо".

1. Brandenburg, A., Subramanian, K. // Phys. Rep. 2005, V. **417**, P. 1.
2. Brandenburg, A., Elstner, D., Masada, Y., Pipin, V. // Space Sci. Rev. 2023, V. **219**, P. 55.
3. Kuznetsov, E. A., Mikhailov, E. A. // Ann. Phys. 2022, V. **447**, P. 169088
4. Rempel, M., Bhatia, T., Bellot Rubio, L., Korpi-Lagg, M. J. // Space Sci. Rev. 2023, V. **219**, P. 36.
5. Казанцев А.П. // ЖЭТФ 1967, Т. **53**, С. 1806.  
Kraichnan R. H., Nagarajan S. // Phys. Fluids 1967, V. **10**, P. 859.
6. Stenflo, J. O. // Proceedings of the International Astronomical Union 2012, V. **8**, P. 119.  
Stenflo, J. O. // A&A 2012, V. **541**, P. A17.
7. Alexakis, A., Biferale, L. Phys. Rep. 2018, V. **767**, P. 1.
8. Kopyev, A. V., Il'yn, A. S., Sirota, V. A., Zybin, K. P. // MNRAS 2024, V. **527**, P. 1055.

## ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС И ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Соколов Д.Д., Окатьев Р.С., Фрик П.Г.

МГУ, г. Москва, Россия, [sokoloff.dd@gmail.com](mailto:sokoloff.dd@gmail.com), ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ИМСС, г. Пермь, Россия

В этом докладе мы предлагаем сценарий того, как в рамки представлений теории солнечного динамо можно вписать возникновение таких явлений солнечной активности, как ее долговременные колебания с характерными временами, составляющими столетия. Подобные колебания действительно обнаруживаются в имеющихся наблюдательных данных о поведении различных трассеров солнечной активности, прежде всего числа солнечных пятен. К ним прежде всего относится известный цикл Гляйсберга, составляющий около ста лет. По-видимому, подобные колебания относятся к непрерывной компоненте спектра колебаний активности Солнца. По-видимому, наиболее естественно связать эти колебания с динамическим хаосом, возникающим в работе солнечного динамо. С другой стороны, индивидуальные 11-летние циклы солнечной активности не обнаруживают сильной ангармоничности, поэтому можно предполагать, что уравнения солнечного динамо факторизуются на составляющую, описывающую индивидуальные циклы и не описывающую хаотическое поведение, и другую составляющую, ответственную за долговременное поведение амплитуды солнечного цикла, в которой и возникает динамический хаос. Для возникновения этого хаоса вторая система должна иметь порядок не менее трех. Предлагается набор переменных, которые могут входить в эту систему.

## ОБРАЗ ЭПОХ ПОВЫШЕННОЙ / ПОНИЖЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

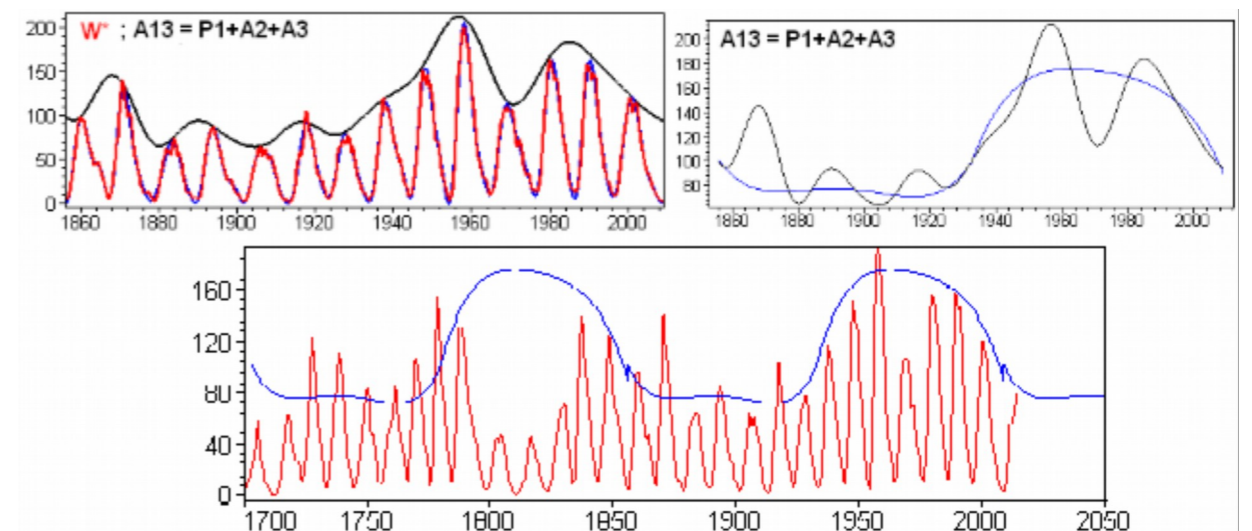
Шибяев И.Г.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, [ishib@izmiran.ru](mailto:ishib@izmiran.ru)

Наличие групп циклов с большими / меньшими амплитудами и **чередование** этих групп позволяет предположить существование длиннопериодного цикла солнечной активности (СА) с эпохами повышенной / пониженной активности. Так как СА и её изменение существенно влияют, через околоземное пространство, на климат и человека, то разумно иметь портрет (шаблон), отражающий основные характеристики этих групп, что позволит давать качественную и полу количественную оценку эпох СА в прошлом и будущем.

Рассматривается старая версия ежемесячных чисел Вольфа (WSN, v.1) из следующих соображений. При переходе к новой версии циклы 1÷21 сохранили длительности цикла и ветви роста. У групп циклов 1÷9 и 11÷17 отношение максимумов циклов обеих версий постоянно. Фактически свойства **16 циклов**, включая всю восстановленную часть ряда, сохранены и перенесены в новую версию. Начиная с 18 цикла трансформация имеет более сложный амплитудный характер (особенно циклы 22÷24). Возникают вопросы о согласованности различных фрагментов, т. к. к «дефектам» старой версии добавятся «дефекты» перехода к новой. Наблюдения по новым правилам ведутся *восемь лет* (нет даже полного цикла) и наработки по старой версии вполне могут быть актуальными.

В работе свойства эпох максимума / минимума СА определяются характеристиками достоверных циклов  $10 \div 23$  (14 циклов, полный период в 153 года и учитывается связь амплитуды циклов с их длительностью). В основу формирования шаблона положена «огibaющая» максимумы этих циклов  $A_{13} = P_1 + A_2 + A_3$ , которая включает длиннопериодную компоненту (P1) и огibaющие основной (A2) и второй (A3) гармоник достоверной части ряда WSN. Соответствие  $A_{13}$  и  $W^*$  показано слева на верхнем рисунке, справа  $A_{13}$  и один из вариантов его шаблона. На нижнем рисунке сопоставлены ряд годовых значений чисел Вольфа и несколько циклов шаблона.



## АНАЛИЗ ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ ФАЗЫ РОСТА И МАКСИМУМА ЦИКЛОВ 24-25

Козлов В.И., Петухов И.С.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, [1\\_cosmoprognoz@mail.ru](mailto:1_cosmoprognoz@mail.ru)

Несомненный интерес представляет изучение экстремальных проявлений активности Солнца: солнечных вспышек в различных диапазонах энергий, выбросов корональной массы (СМЕ), ударных волн (УВ) и других проявлений спорадической активности. При этом важно, по возможности заблаговременно, определить начало активизации процесса на Солнце. Заблаговременное обнаружение подобной активизации процесса в среднесрочном <http://www.forshock.ru/predlong.html> режиме, и подтверждение полученного результата в оперативном <http://www.forshock.ru/pred.php> режиме является целью данной работы.

Метод анализа динамики флуктуаций интенсивности галактических лучей (ГКЛ) в окрестности фронта УВ, основан на учете высших моментов функции распределения Вейбулла-Гнеденко. По результатам среднесрочного мониторинга выявлена годовая, в среднем, периодичность регистрации предвестников в окрестности максимума 24 цикла. По данным космического аппарата ACE (США), установлена заметно выраженная годовая вариация дисперсии ММП. Аналогичный результат получен коллегами из ИСЗФ (г. Иркутск), по солнечным данным. В итоге, сделан вывод, что предвестник в космических лучах является индикатором перестройки магнитного поля Солнца в окрестности фазы роста и максимума *спорадической* активности весной-летом 2012 г., т.е. индикатором смены знака общего магнитного поля Солнца.

Результаты оперативного мониторинга по заблаговременному обнаружению источников активности, подтверждаются, во-первых, данными измерений «штормовых» частиц, предшествующих приходу межпланетных УВ. Факт прихода УВ определялся по регистрации МАРКЕРОВ УВ в параметре флуктуаций ГКЛ, как правило - экстремально низких, по сути - диагностических значений параметра флуктуаций космических лучей. Результаты расчетов по параметру флуктуаций ГКЛ согласуются с результатами модельных расчетов проведенных для анализируемых событий в Goddard Space Weather Lab (NASA) с учетом данных измерений на Космических аппаратах.

## Солнечный цикл 25 в ряду достоверных наблюдений: эволюция, характеристики, прогноз развития

В.Н. Ишков

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [ishkov@izmiran.ru](mailto:ishkov@izmiran.ru)

Вторая эпоха пониженной солнечной активности (СА) продолжилась текущим 25 циклом, который начался в январе 2020 г. и на февраль 2024 г. (49 месяцев) уже занял своё место в семействе солнечных циклов (СЦ) средней величины, ещё раз подтвердив, что на статистике достоверных (10–24) СЦ внутри эпох СА, наблюдательные правила и закономерности развитие отдельных СЦ неуклонно выполняются. К январю 2024 г. СА уже вошла фазу максимума текущего цикла и наиболее вероятная точка максимума должна быть достигнута в марте – июне 2024 г., если текущий СЦ будет односторонним, как и все известные достоверные СЦ средней величины. Признаком этого возможно является сравнительно слабая асимметрия появления активных областей по полушариям. Одним из самых значительных ожидаемых событий фазы максимума для всех СЦ является процесс переполусовки общего магнитного поля Солнца. Этот процесс включает в себя последовательную смену знака поля на полюсах Солнца и хорошо определяется по служебным наблюдениям солнечной обсерватории Wilcox (USA), из которых следует, что процесс переполусовки в текущем СЦ уже начался в июле 2023 г. с северного полушария и на данный небольшой период (~0.7 г.) Солнце осталось практически без магнитных полюсов. Начало процесса переполусовки показывает, что Солнце находится на пороге максимума текущего СЦ с величиной  $W^* = 100 \pm 10$  ( $150 \pm 15$  в системе V2). Наиболее вероятный аналог текущего СЦ является СЦ13. Минимум текущего цикла следует ожидать в первой половине 2031.

Текущий СЦ уникален своими наблюдательными возможностями, предоставляемыми космическими проектами, запущенными во внутреннюю гелиосферу (Solar Orbiter, Parker Solar Probe, BepiColombo), впервые предоставляя отличные возможности для изучения различных активных, в том числе и геоэффективных, явлений на Солнце с помощью нескольких космических аппаратов в сочетании с высокой частотой солнечных, гелиосферных и наземных наблюдений в различных диапазонах электромагнитных и корпускулярных излучений. Значимо повысились возможности наблюдений за вспышечными событиями с высоким качеством и разрешением с разных точек зрения, включая наземные радиосредства, чем это было возможно до сих пор.

К середине января 2024 г. на видимом диске Солнца наблюдалось не менее 800 групп пятен. из которых 37 группы пятен имели площадь  $\geq 500$  мдп и 4 –  $\geq 1000$ . Особенно быстрый рост относительного числа солнечных пятен и активных областей наблюдался с началом 2023 г., когда резко увеличилось число вспышечно-активных групп пятен и, соответственно, число вспышечных событий средних и больших баллов. По количеству солнечных протонных событий с потоками частиц  $> 1$  pfu за одинаковый период развития последних 3 циклов, текущий солнечный цикл значимо (~на четверть) превосходит СЦ24 и в два раза СЦ23 (24), что является рекордом по их количеству за всю историю наблюдений солнечных протонов. Это позволяет сделать вывод о сохранении облегчённого выхода протонов во вспышечных событиях, как и наблюдалось в СЦ24. При сравнении СЦ 23–25 по воздействию на околоземное космическое пространство, текущий 25 является промежуточным вариантом между СЦ 23 и 24, но ближе к СЦ 24, хотя и опережает его по всем проявлениям СА (эпоха пониженной СА), но значительно меньше, чем СЦ 23 – переходный от эпохи повышенной СА к эпохе повышенной.

## СУЩЕСТВУЕТ ЛИ СИНХРОНИЗИРУЮЩЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАНЕТ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА И ЗВЁЗД?

**Кацова М.М. (1), Обридко В.Н. (2), Соколов Д.Д. (2, 3), Емельянов Н.В. (1)**

(1) ГАИШ МГУ им.М.В.Ломоносова г. Москва, Россия, [mkatsova@mail.ru](mailto:mkatsova@mail.ru)

(2) ИЗМИРАН им. Н.В.Пушкова, г. Троицк, г. Москва, Россия

(3) Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

Рассмотрен вопрос о том, насколько наличие планетной системы влияет на циклическую активность Солнца и других холодных звёзд. Мы продолжили поиск связи долговременной активности звёзд с их планетами. В частности, нами проанализированы не только уточнённые данные о рассмотренных ранее F, G и K звёздах с выявленными циклами, но и результаты анализа долговременной переменности 15 более холодных M карликов с экзопланетами. Если цикличность активности определяется сильным приливным воздействием планеты, то длительность цикла у звезды должна быть синхронизована с периодом обращения планеты вокруг неё. Мы рассчитали гравитационное воздействие планеты на родительскую звезду. Подтверждается полученный нами ранее вывод об отсутствии влияния экзопланеты на формирование цикла звезды. Однако оно может проявляться в регулярности цикла, вплоть до его исчезновения. Возможно, оно проявляет себя как внешнее воздействие, модулирующее амплитуду (высоту) цикла. Нами рассмотрено изменение положения барицентра Солнечной системы относительно центра Солнца на протяжении 420 лет. Сопоставление этих данных с наиболее достоверным 120-летним рядом SSN- индекса солнечной активности позволяет убедиться в отсутствии их синхронизации.

## ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В ГРУППАХ И ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**Герашенко М.А.<sup>1,2</sup>, Илларионов Е.А.<sup>1,2</sup>, Кузанын К.М.<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [mikhail.gerashchenko@math.msu.ru](mailto:mikhail.gerashchenko@math.msu.ru)

<sup>2</sup>ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия, [kuzanyan@izmiran.ru](mailto:kuzanyan@izmiran.ru)

<sup>3</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, Россия.

Ранее в работе Magnetic Helicity from Multipolar Regions on the Solar Surface [1] были высказаны предположения о зависимости взаимного расположения солнечных пятен и знака спиральности магнитных полей в солнечной конвективной зоне. Используя известные закономерности поведения магнитных полей в циклах активности Солнца, мы предположили, что может существовать связь между ориентацией пятен в группах, ее распределением по полушариям и различными проявлениями солнечной активности.

Мы использовали набор данных Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН, содержащий подробную информацию о группах солнечных пятен, наблюдавшихся в обсерватории с 1955 по 2023 гг., что соответствует периоду от 19-го до 25-го циклов солнечной активности. Для описания взаимного расположения и ориентации пятен в группе были введены данных два индекса, основанные на смешанном произведении векторов, базирующихся на координатах трех самых больших пятен группы и их площадей.

Было проведено подробное исследование поведения индексов на вышеуказанном наборе данных с помощью методов математической статистики и анализа данных. Особое внимание уделялось поиску и проверке закономерностей в распределениях индексов по полушариям Солнца в отдельных одиннадцатилетних циклах. В итоге не было обнаружено изначально предполагаемое статистическое преобладание групп с одинаковой ориентацией по полушариям Солнца в пределах определенных периодов солнечной активности. Во всех рассматриваемых ситуациях количество групп с положительными и отрицательными значениями индексов было практически одинаково. Также в 85% случаев была обнаружена общая нестабильность динамики индексов одной и той же группы в разные дни наблюдений.

Также исследовался вопрос динамики построенных индексов в течение всего периода наблюдений, и была показана связь с одиннадцатилетним солнечным циклом.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-72-20067.

1. Bourdin, P.-A., Brandenburg, A. // The Astrophysical Journal, 2018 Volume 869, Number 1, Issue 1, article id. 3

## ДВЕ ПОПУЛЯЦИИ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН: МАГНИТНЫЙ ПОТОК, ВРЕМЕНА ЖИЗНИ, ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ПОЛЕ СКОРОСТИ

Наговицын Ю. А.<sup>1,2</sup> Осипова А. А.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [nag-yury@yandex.ru](mailto:nag-yury@yandex.ru)

<sup>2</sup> ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

Продолжены исследования статистических свойств групп солнечных пятен. Уточнено значение времени жизни групп  $LT^*$ , разделяющее популяции на крупные долгоживущие и мелкие короткоживущие группы. На основании предложенной процедуры рандомизации времен жизни получено  $LT^* = 5.57 \pm 0.27$  дней. Впервые изучено изменение со временем статистического распределения площадей, логнормального для обеих популяций. Найдено, что параметры распределений можно разделить на два типа, аналогичные «первичным» индексам Куклина-Копецкого, так что один из них изменяется с 11-летним циклом (частота), а другой имеет более длительные вариации (мощность). Кроме того, в плане исследования горизонтального поля скорости групп солнечных пятен, показано, что средние значения индивидуальных меридиональных скоростей групп линейно зависят от их долготных скоростей с высоким коэффициентом корреляции 0.95. При этом зависимости для популяций мелких короткоживущих и крупных долгоживущих групп разные. Меридиональные движения групп в соответствии с ранними работами не имеют какого-то выраженного глобального закона распределения с широтой, а зависят именно от индивидуальной долготной скорости во вращающейся системе координат, близкой к кэррингтоновской.

## АНАЛИЗ РАДИАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО МЕДЛЕННОЗАТУХАЮЩИХ УНИПОЛЯРНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Плотников А.А., Куценко А.С., Абраменко В.И.

КрАО РАН, п. Научный, Россия, [plotnikov.andrey.alex@yandex.ru](mailto:plotnikov.andrey.alex@yandex.ru)

В предыдущих работах было показано наличие кластера медленно затухающих униполярных активных областей [1]. Данные АО демонстрируют скорость затухания, существенно меньшую, чем ожидается из общей степенной зависимости, исходя из их величины магнитного потока.

Модель затухания пятен в рамках механизма турбулентной эрозии [2] предполагает, что темп потери площади пятна не постоянен по времени, а уменьшается по мере процесса затухания. Другими словами, более «старое» пятно будет терять площадь (а, следовательно, и поток) медленнее, чем «молодое» тех же размеров.

Однако сравнение наблюдаемых скоростей затухания для ряда униполярных АО показало, что в некоторых случаях скорости затухания оказываются аномально малы и не могут быть объяснены выше приведенным предположением (оцениваемая продолжительность жизни пятна, требуемая для такого эффекта, составляла бы несколько лет).

Другим фактором, влияющим на затухание пятна, в работе [2] были названы горизонтальные радиальные течения, направленные от пятна. Согласно приведенной оценке, подобные течения должны повышать эффективность эрозии и ускорять процесс диссипации пятна.

В данной работе на основании данных SDO/HMI с помощью метода локальной корреляции [3] были проведены оценки радиальных скоростей для ряда АО. Для быстро- и медленнозатухающих АО не обнаружено существенных различий в скоростях радиальных течений. Таким образом, вопрос о причинах аномально низкой скорости затухания в ряде АО остается открытым.

1. Plotnikov A.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. // MNRAS 2023. V. **521**, I. 2, P. 2187
2. Petrovay K., Moreno-Insertis F. // ApJ 1997. V. **485**, I.1, P. 398.
3. November L.J., Simon G.W. // ApJ 1988. V. **333**, P. 427

## МАГНИТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ

**Зимовец И.В., Шарыкин И.Н.**

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ivanzim@cosmos.ru](mailto:ivanzim@cosmos.ru)*

Представлены результаты статистического анализа магнитной энергии активных областей (АО) Солнца всех классов Макинтоша и Хейла за период времени с 2010 по 2023 г. Также рассмотрен ряд других параметров магнитного поля и электрического тока, таких как полный знаковый и беззнаковый магнитный поток (для вертикальной и горизонтальной компоненты), суммарный знаковый и беззнаковый вертикальный электрический ток, максимальные и средние значения различных компонент магнитного поля, суммарная площадь солнечных пятен и областей магнитного поля выше заданного порога. Магнитное поле рассчитано с помощью GX Simulator в потенциальном и нелинейном бессиловом приближении на основе информации об АО, содержащихся в ежедневных SRS файлах, предоставляемых NOAA SWPC. Для всех рассмотренных параметров определены общие распределения суммарно для всех АО и отдельно для каждого класса, установлены минимальные, максимальные и средние значения, среднеквадратичные отклонения. Обсуждается связь параметров АО со вспышечной активностью и применимость результатов для ежедневного прогнозирования вспышек. Даются оценки максимально возможного рентгеновского класса вспышек.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ГИРОРЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПО ДАННЫМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

**Феденёв В.В., Лесовой С.В.**

*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [fedenev@iszf.irk.ru](mailto:fedenev@iszf.irk.ru)*

В конце 2023 года был введён в эксплуатацию Сибирский радиогелиограф [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, наблюдает с сентября 2023 года. Данная работа использует радиоизображения со всех частотных диапазонов инструмента для статистического анализа спектров мощности излучения из невьшечных активных областей Солнца.

Исследование направлено на определение номеров гармоник гирочастоты, дающих наибольший вклад в гирорезонансное излучение активных областей, наблюдаемых с 2021 года по январь 2024 г. В этом докладе мы обсудим нашу методологию получения спектров, применяемые алгоритмы синтеза изображений для Сибирского Радиогелиографа на текущий момент времени, и предварительные результаты по выявлению взаимного соотношения 2, 3 и 4 гармоник гирочастоты, с учётом уже известных закономерностей.

Полученные результаты будут сравниваться с результатами исследований, проведённых при помощи наблюдений на других солнечных радиотелескопах, таких как РАТАН-600 [2] и радиогелиограф Нобеяма, с обсуждением применимости подходов к обработке спектров.

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
2. Яснов Л.В., Богод В.М., Ступишин А.Г. // Астрофизический бюллетень 2020. (1) Т 75, С. 56-65

## СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ РЕГУЛЯРНЫХ И НЕРЕГУЛЯРНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В 23-М И 24-М ЦИКЛАХ

Жукова А.В.

КрАО РАН, пгт. Научный, Крым, Россия, [anastasiya.v.zhukova@gmail.com](mailto:anastasiya.v.zhukova@gmail.com)

Каталог магнито-морфологических классов (ММК) активных областей (АО) КрАО [1–3] (<https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmcs-ars>), содержащий магнитные потоки АО, рассчитанные на основе данных инструментов HMI/SDO и MDI/SOHO, был использован для исследования циклических вариаций и корреляционного анализа данных о 3046 АО, появившиеся на диске с мая 1996 по декабрь 2021 гг. Все АО (помимо одиночных пятен) были распределены между двумя классами: регулярные биполярные АО (подчиняющиеся закону полярностей Хейла, закону Джоя, правилу о доминировании лидирующего пятна) и нерегулярные АО (все остальные). Для совокупности всех исследованных АО и для АО каждого ММК класса рассматривались также составляющие общего магнитного потока, скомпилированные на основе потоков северного (С) и южного (Ю) полушарий как четная и нечетная функции. В осесимметричном приближении результат компиляции может рассматриваться как прокси дипольной (нечетная часть) и квадрупольной (четная часть) составляющих подфотосферного тороидального магнитного потока [4].

Анализ полученных данных показал следующее. Временные профили АО каждого ММК класса в каждом из полушарий демонстрируют многопиковую структуру. Двупиковая структура цикла формируется совместно группами обоих классов в обоих полушариях. Профили для индексов асимметрии показывают, что асимметрия нерегулярных АО выражена сильнее. Изменения знака абсолютного индекса асимметрии могут быть связаны с изменением ориентации дипольной (в минимумах) и квадрупольной (в остальных случаях) составляющих магнитного поля. Использование авто-корреляционных функций позволило определить значение периода осцилляций четной составляющей потока как близкое к 15 годам (для всех исследованных АО и для нерегулярных АО), что согласуется с полученными ранее оценками для квадрупольной составляющей глобального поля [4,5]. Для регулярных АО осцилляции четной составляющей потока не выявлены. Изучение кросс-корреляции нерегулярных АО в разных полушариях показало сильную взаимосвязь между активностью северного полушария (23-й цикл) и южного полушария (24-й цикл), как и предсказано теоретическими исследованиями для решений смешанной четности [6]. Между активностью нерегулярных АО в южном полушарии (23-й цикл) и северном полушарии (24-й цикл) связь, напротив, выражена слабо. Для регулярных групп наблюдается стандартный корреляционный паттерн с высоким центральным пиком и более слабыми боковыми пиками.

Автор благодарит В.И.Абраменко за ценные советы и Р.А.Биктимирову за данные 23-го цикла, предоставленные для каталога ММК АО КрАО.

## О ПРИРОДЕ "СВЕТЛЫХ МОСТИКОВ" В СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ

Зайцев В.В.<sup>1</sup>, Степанов А.В.<sup>2</sup>, Куприянова Е.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия, <sup>2</sup> ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, [astep44@mail.ru](mailto:astep44@mail.ru)

Исследовано событие light bridge (LB) 13 марта 2024 г., которое Louis et al. (A&A 2021 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141456>) связывают с джоулевым нагревом хромосферы при повышенном сопротивлении Каулинга. В отличие от указанной работы, мы предложили модель LB в виде токнесущей магнитной трубки, формирующейся конвекцией. При этом показано, что фотосферная конвекция в полутени солнечного пятна обеспечивает величину электрического тока, необходимую для нагрева плазмы и формирования структур типа LB. Рассмотрен стационарный режим нагрева LB, так как длительность их существования (часы) много больше характерного времени нагрева (минуты). Потери на оптическое излучение определяют величину тока  $I > 8 \times 10^{10} \text{ A}$ , необходимую для нагрева LB до температуры (5300-6800) К. Определены параметры плазмы LB и объяснена наблюдаемая двойная структура излучения LB.

1. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomag. Aeron. 2018. **58**. 1159.
2. Abramenko V.I. // MNRAS, 2021, **507**, 3698.
3. Zhukova A.V., Sokoloff D.D., Abramenko V.I., Khlystova A.I. // Adv. Space Res., 2023, **71**, 1984.
4. Kitchatinov L.L. // Geomag. Aeron., 2022, **62**, 817.
5. Schüssler M., Cameron R. H., 2018, A&A, **618**, A89.
6. Sokoloff D., Nesme-Ribes E., 1994, A&A, **288**, 293.



## РАЗВИТИЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Кочаровский Вл.В., Гарасев М.А., Емельянов Н.А., Кузнецов А.А., Нечаев А.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [kochar@ipfran.ru](mailto:kochar@ipfran.ru)

Доклад посвящен анализу влияния внешнего магнитного поля на формирование и нелинейную эволюцию мелкомасштабной квазимагнитостатической турбулентности, вызванной развитием апериодической неустойчивости вейбелевского типа в нерелятивистской бесстолкновительной плазме с анизотропным распределением электронов по скоростям. Полученные качественные и количественные выводы сравниваются с найденными ранее закономерностями эволюции спектра турбулентности в отсутствие внешнего магнитного поля (см., например, работы [1 - 3] и указанную там литературу) и основаны как на аналитических оценках, включающих линейную стадию нарастания и насыщение данной неустойчивости, так и на разнообразном численном моделировании методом частиц в ячейках долговременной динамики подобной турбулентности в магнитоактивной плазме.

Рассмотрены начальная задача для однородной магнитоактивной плазмы с одноосной анизотропией распределения электронов по скоростям, в том числе пучкового типа, и граничная задача об инжекции горячих электронов в теплую магнитоактивную плазму, в том числе неоднородную. Основное внимание уделено случаю сонаправленности внешнего магнитного поля и оси наибольшей температуры анизотропно нагретой плазмы или средней скорости инжекции горячих электронов в изотропную теплую плазму, хотя кратко проанализирован также случай ортогональной ориентации внешнего магнитного поля по отношению к указанной оси температурной анизотропии или средней скорости инжектируемых электронов.

В большей части конкретных расчетов использовались параметры магнитоактивной плазмы, характерные для различных активных процессов в солнечной короне или в лазерной плазме, создаваемой абляцией мишеней мощными фемтосекундными импульсами и позволяющей проводить частичное моделирование корональных явлений. Поэтому полученные качественные теоретические результаты могут быть использованы для интерпретации ряда неравновесных, переходных явлений в корональной или лазерной плазме, сопровождающихся или связанных с той или иной филаментацией электронных токов.

Общим итогом проведенных аналитических и численных исследований является определение условий заметного влияния внешнего магнитного поля на характер и уровень развития вейбелевской турбулентности, а также выяснение ряда особенностей нелинейных эффектов в магнитоактивной плазме, включая нерезонансное квазилинейное и резонансное четырехволновое взаимодействие гармоник (мод) пространственного спектра этой турбулентности.

Для численных расчетов использованы суперкомпьютерные ресурсы, предоставленные ЦКП ВР МСЦ РАН, ИПФ им. А.В. Гапонова-Грехова РАН и ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

1. Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В., Мартыанов В.Ю., Тарасов С.В. // УФН. 2016. Т. 186. С. 1267-1314.
2. Кузнецов А.А., Нечаев А.А., Гарасев М.А., Кочаровский Вл.В. // ЖЭТФ. 2023. Т. 164. С. 1098-1119.
3. Емельянов Н.А., Кочаровский Вл.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2023. Т. 66. Вып. 9.

## ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ГЕНЕРАЦИЮ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

Юшков Е.В., Аллахвердиев Р., Соколов Д.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [yushkov.msu@mail.ru](mailto:yushkov.msu@mail.ru)

Генерация средней магнитной энергии в турбулентных потоках проводящей плазмы описывается теорией магнитного динамо. Первоначально это теория, сформированная в середине XX века, в частности в работах Юджина Паркера, была сосредоточена на описании генерации крупномасштабного поля Солнца и солнечного цикла [1]. Сейчас же она используется как для описания формирования средних магнитных полей (планет, звезд и галактик), так и для описания генерации магнитной энергии при нулевом среднем поле, сосредоточенной в мелкомасштабных структурах турбулентной плазмы типа токовых слоев или магнитных петель. Однако, как для описания крупномасштабных процессов (модели типа Штеенбека-Краузе-Рэдлера [2]), так и для описания мелкомасштабных процессов (модели типа Казанцева [3]) в теории динамо предполагается локальная однородность случайных полей. В настоящем же докладе пойдет речь о результатах, полученных при попытках отойти от предположения о локальной плазменной однородности.

Вывод уравнений теории динамо в рамках мГД-подхода строится на усреднении уравнения магнитной индукции по случайному полю скорости. Методы могут быть разные, но практически во всех методах предполагается локальная однородность и изотропия турбулентности. Другими словами, если и рассматриваются эффекты неоднородности и анизотропии, то на масштабах много больших характерной корреляционной длины случайного поля скорости. Однако среди всех методов есть и методы, допускающие включение локальных эффектов, одним из которых является метод мультипликативных интегралов, предложенный для задач динамо Молчановым, Рузмайкиным и Соколовым в 1983 году [4]. В нашей работе мы лишь немного изменяем этот метод, используя векторный потенциал вместо вектора магнитного поля, что позволяет вынести пространственные производные и обобщить как уравнение среднего поля, так и уравнения турбулентного динамо на неоднородные случаи [5]. Для полученных уравнений анализируется влияние локальной неоднородности на возможность генерации энергии и проводится сравнение с локально однородными и изотропными классическими случаями.

Работа выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС», проект № 21-1-3-63-1.

1. Parker E.N. // *Astrophys. J.* V. **122**. P. 293.
2. Krause F., Rädler K.H. // *Mean-field magnetohydrodynamics and dynamo theory*. 2016.
3. Kazantsev A.P. // *Soviet Physics JETP* 1967. V. **26**(5). P. 1031.
4. Молчанов С.А., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. // *УФН* 1985. V. **145**(4), P. 593-628.
5. Allahverdiyev R.R., Yushkov E.V., Sokoloff, D.D. // *Geo. Aeron.* 2023. V. **63**(7). P. 882-891.

## ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ СРЕДЫ НА ПОРОГ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Аллахвердиев Р.Р., Юшков Е.В., Соколов Д.Д.

*ADA University, г. Баку, Азербайджан, [ramin.a.verdi@gmail.com](mailto:ramin.a.verdi@gmail.com)*

Модель Казанцева описывает эволюцию второго момента магнитного поля в турбулентном плазменном потоке [1]. В частности, эта модель используется для описания мелкомасштабного динамо-процесса, при котором экспоненциально растет энергия магнитного поля, в то время как среднее магнитное поле остается нулевым. Традиционно такая генерация рассматривается в локально анизотропной однородной турбулентности, однако, используя метод мультипликативных интегралов, можно расширить применение этой модели и на анизотропный неоднородный случай. Используемый мультипликативный подход, предложенный Молчановым, Рузмайкиным и Соколовым, базируется на двух предположениях: во-первых, рассматривается поле скорости с короткими временными корреляциями, что позволяет развязать усреднение по магнитному полю и полю скорости, во-вторых, траектории жидких частиц заменяются на пучки виннеровских траекторий, усреднение по которым позволяет учесть диссипативные эффекты [2]. Записывая решение уравнения магнитной индукции в виде мультипликативных интегралов и вычисляя производные по времени от корреляционных функций магнитного поля, мы выводим анизотропную модель Казанцева [3] и аналитически анализируем ее в простейшем случае аксиальной симметрии. Полученные уравнения эволюции корреляционных функций магнитного поля численно анализируются и исследуется зависимость порогового значения магнитного числа Рейнольдса, с которого начинается мелкомасштабная генерация, от меры анизотропии поля скорости.

1. Kazantsev A.P. // Soviet Physics JETP 1967. V. **26**(5). P. 1031.
2. Молчанов С.А., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. // УФН 1985. V. **145**(4), P. 593-628.
3. Allahverdiyev R., Yushkov E.V., Sokoloff, D.D. // Geo. Aeron. 2023. V. **63**(7). P. 882-891.

## ИЗУЧЕНИЕ ПОРОГА ГЕНЕРАЦИИ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ДИНАМО В РАМКАХ КАСКАДНОЙ МОДЕЛИ

Абушзаде И.З., Юшков Е.В., Фрик П.Г., Соколов Д.Д.

*БГУ, г. Баку, Азербайджан, [ilyasabushzade@gmail.com](mailto:ilyasabushzade@gmail.com)*

Модели турбулентного магнитного динамо были созданы около пятидесяти лет назад для описания роста средней магнитной энергии в случайных конвективных потоках плазмы. Типичной особенностью таких моделей является порог генерации, когда экспоненциальный рост магнитной энергии начинается только при достаточно больших магнитных числах Рейнольдса. В частности, одна из первых моделей, предложенная в 70-х годах Казанцевым [1] и Крайчнаном [2], предсказывает порог генерации в районе чисел Рейнольдса порядка 100. Этот порог трудно достичь даже для современных лабораторных экспериментов, поэтому во многих исследованиях последние годы были посвящены уточнению этого важнейшего явления. Однако в используемых обычно подходах имеется существенный недостаток – предположение о дельта-коррелированном во времени случайном поле скоростей. Это нефизическое предположение заставляет сомневаться в правильности оценки порога динамо. В данной работе с помощью каскадной МГД-модели [3] мы пытаемся выяснить, насколько точна оценка Казанцева порога генерации и как этот порог зависит от скорости потока, коэффициентов диффузии и гидродинамической спиральности. Работа выполнена при поддержке гранта Фонда БАЗИС №. 21-1-3-63-1.

1. Kazantsev A.P. // Soviet Physics JETP 1967. V. **26**(5). P. 1031.
2. Kraichnan R.H., Nagarajan S. // Phys. Fluids. 1967. V. **26**. P. 859.
3. Frick P., Sokoloff D. // Phys. Rev. E 1998. V. **57**. P. 4155-4164.

## ДИСПЕРСИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

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

КалмГУ им. Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия, [zhr550mail.ru](mailto:zhr550mail.ru)

В наших предыдущих работах [1-2] была предложена модель неадиабатических акустических волн в разреженной высокотемпературной плазме, для которой были учтены эффекты теплопроводности и радиационных потерь. Для примера плазмы солнечной короны принимались классическая спитцеровская теплопроводность и функция излучения, построенная по известному коду CHIANTI [3].

В ситуациях, где наблюдаются квазипериодические колебания в волнах сжатия, возможно их объяснение дисперсией акустических волн [4]. Моделирование показывает, что под воздействием дисперсии из начального локализованного импульса могут возникать квазипериодические осцилляции, при этом вейвлет-спектр по своей форме напоминает бумеранг [5]. Данный бумеранг возможен и в случае дисперсии акустических волн. Мы связываем его появление с наличием локальных экстремумов групповой скорости и предлагаем процедуру расчета появляющихся при этом пар периодов.

Образование наблюдаемых квазипериодических осцилляций возможно в результате распада локализованного импульса на отдельные периодические составляющие. Данный процесс обычно изучается с применением вейвлет-анализа, где хорошо изучены примеры с выделенными периодами. Распад импульса возможен в результате дисперсии начального импульса под действием теплопроводности и нагрева/радиационных потерь. Кривая групповой скорости имеет два локальных минимума, один находится вблизи нуля, он менее выражен, обусловлен нагревом/радиационными потерями, другой минимум обусловлен теплопроводностью, он более выражен. Дисперсия на минимуме групповой скорости дает пары периодов, что часто наблюдается в практике. Она может быть использована при определении параметров плазмы.

Работа направлена на развитие теоретических основ исследований космической плазмы, разработку методов формулирования и решения обратных задач для нахождения параметров плазмы.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№075-03-2023-121/3 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

1. Бембитов Д.Б., Шивидов Н.К., Михалыев Б.Б. Акустические волны в разреженной высокотемпературной плазме // Вестник МИФИ. 2022. Т. 11. № 4. С. 288.
2. Derteev S., Shividov N., Bembitov D., Mikhalyaev B. Damping and dispersion of non-adiabatic acoustic waves in a high-temperature plasma: A radiative-loss function // Physics. 2023. V. 5. P. 215.
3. Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E. CHIANTI – An atomic database for emission lines. XVI. Version 10, further extensions // Astrophys. J. 2021. V. 909. 38.
4. Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. 082113.
5. Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Moss G., Shellard P. Fast magnetoacoustic wave trains: from tadpoles to boomerangs // Month. Not. R. Acad. Sci. 2021. C. 505. P. 3505.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Дертеев С.Б., Сапралиев М.Е. Михалыев Б.Б.

КалмГУ им. Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия, [derteevsergei@mail.ru](mailto:derteevsergei@mail.ru)

Проведено исследование продольных колебаний в горячих корональных петлях в нелинейном гидродинамическом приближении. Для объяснения его быстрого затухания используется механизм теплопроводности, который имеет ключевое значение при высоких температурах. В ряде работ уже проведен линейный анализ поведения волн [1,2].

Поперечные и продольные волны в корональных петлях наблюдаются повсеместно в различных диапазонах электромагнитного излучения [3]. Продольные волны наблюдаются как движущиеся неоднородности и интерпретируются как области сжатия плазмы. При их теоретическом исследовании используется представление медленных магнитозвуковых или акустических волн. Волны сжатия имеются в различных корональных структурах, корональных дырах и петлях, в настоящей работе берутся послевспышечные горячие корональные петли [4], где используется аппарат стоячих продольных волн [4,5]. Наблюдения горячих петель дают довольно большой перечень событий с указанием многих физических параметров петель и их колебаний, например, Wang et al. 2007 [6]. Полученные данные позволяют оценивать параметры горячей корональной плазмы, а также изучать роль физических эффектов в наблюдаемых явлениях.

Исследование выполнено по госзаданию Минобрнауки РФ (№ 075-03-2023-121/3 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

1. Derteev S.B., Shividov N.K., Bembitov D.B., Mikhalyaev B.B. // Physics 2023. V. 5. P. 215-228.
2. Mikhalyaev B.B., Derteev S.B., Shividov N.K., Sapraliev M.E., Bembitov D.B. // Sol. Phys. 2023. V. 298. P. 102.
3. Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2020. V. 58. P. 441.
4. Ofman L., Wang T. // Astrophys. J. 2002. V. 580. P. L85.
5. De Moortel I., Hood A.W. // Astron. Astrophys. 2003. V. 408. P. 755.
6. Wang T., Innes D.E., Qiu J. // Astrophys. J. 2007. V. 656. P. 598.

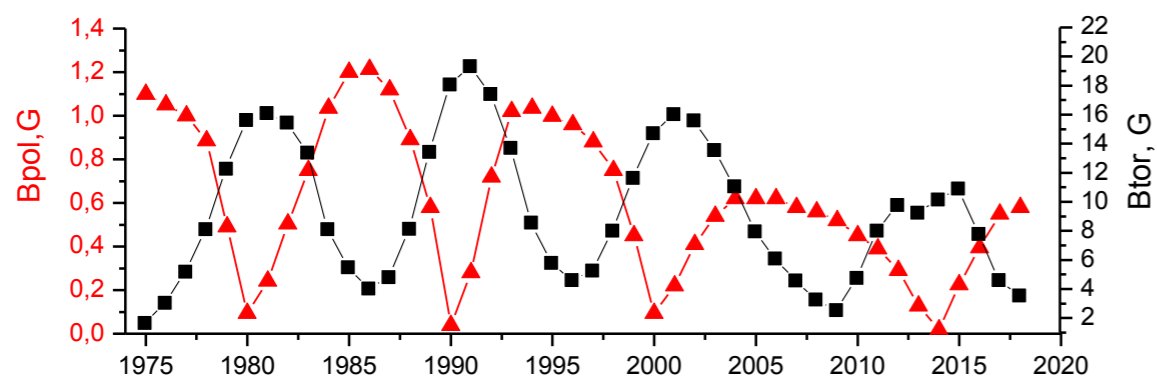
## Магнитная структура солнечных циклов

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

Институт космических исследований РАН, [morozova.evgeniya@yandex.ru](mailto:morozova.evgeniya@yandex.ru)

В современных моделях формирование 11-летнего солнечного цикла связывают с двумя процессами: процесс преобразования полярного магнитного поля (полоидальное) в тороидальное магнитное поле (широтное), и далее процесс, который создает новое полярное поле из тороидального поля. Меридиональная циркуляция магнитных потоков используется как основной механизм, определяющий динамику солнечной активности (динамику солнечных пятен). В статье проведен совместный анализ динамики числа солнечных пятен (SSN), временной динамики полярного поля ( $V_{pol}$ ) и тороидального магнитных полей ( $V_{tor}$ ) для периода 1975-2020 г. (21-24 солнечных циклы). Для  $V_{pol}$  (широта  $\pm 45^\circ$  --  $\pm 78^\circ$ ) и  $V_{tor}$  (широта  $\pm 45 - 0^\circ$ ) использовались данные, представленные на сайте The Wilcox Solar Observatory. На фазе роста солнечной активности при увеличении  $V_{tor}$  и SSN полярное поле, сформированное в предыдущем цикле, уменьшается, максимум  $V_{pol}$  регистрируется в начале цикла, при максимуме  $V_{tor}$  и SSN полярное поле меняет знак. На фазе спада активности начинается строительство нового  $V_{pol}$ , максимум этого поля регистрируется при минимуме SSN и  $V_{tor}$ . В статье получено ряд численных параметров для описания процесса меридиональной циркуляции. Скорость меридиональной циркуляции магнитных потоков на фазе роста активности (на фазе спада) равна  $\sim 12$  м/с (8,7 м/с),  $\sim 15$  м/с (7,4 м/с),  $\sim 12$  м/с (1,8 м/с),  $\sim 9,6$  м/с (2,4 м/с) соответственно для 21-24 циклов. Эти величины определяют длительность солнечного цикла. В работе показана связь амплитуды (SSN в максимуме) цикла с величиной  $V_{tor}$  в области источника и показана широтная и временная динамика  $V_{tor}$ . В качестве примера на рис. показана взаимная динамика полярного и тороидального полей.

ДД



Динамика полярного и тороидального магнитных полей в 1975-2020 г. 21-24 солнечных циклы.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

**Шибяев А.И.**

МГУ им.М.В Ломоносова, г. Москва, Россия, [alexshibaev@yandex.ru](mailto:alexshibaev@yandex.ru)

В рассматриваемой работе анализируется и прогнозируется солнечная активность, выраженная среднемесячным рядом чисел Вольфа SSN. В качестве инструмента исследования использовался метод главных компонент (PCA). Объектами по которым выделялись главные компоненты выступают циклы ряда SSN приведенные к средней длине в 133 „месяца“. Из-за хорошей степени корреляции между значениями в цикле, PCA оказался эффективен и всего первых двух компонент достаточно для хорошего качества аппроксимации циклов.  $C_i = \mu + c_{1i} * PC_1 + c_{2i} * PC_2$  где  $C_i$  -  $i$ -ый цикл,  $\mu$  - усредненный цикл, а  $PC_1, PC_2$  - первые две компоненты, соответственно,  $c_{1i}, c_{2i}$  - коэффициенты, зависящие от цикла. Более того, сами компоненты (собственные вектора PCA) оказались интерпретируемые. Первая компонента  $PC_1$  характеризует средний уровень активности Солнца за данный цикл, то есть насколько „в среднем“ кривая данного цикла выше или ниже чем линия усредненного типичный цикл SSN. Вторая же компонента  $PC_2$  говорит о степени асимметрии циклов, то есть характеризует соотношение длин ветвей роста и спада в цикле.

Высокая степень корреляции ( $> 0.9$ ) между коэффициентами циклов при  $PC_1$  со средними значениями циклов, а также возможность прогноза будущих средних значений циклов, позволяет оценить форму текущего (25-го) цикла.

Корреляция коэффициентов циклов при  $PC_2$  (отвечающей за асимметрию) с самими коэффициентами асимметрии циклов хуже.

Прогнозируя данные коэффициенты для текущего цикла возможно оценить его форму и построить прогноз.

## ВРАЩЕНИЕ КРУПНЫХ ГРУПП ПЯТЕН НАБЛЮДАВШИХСЯ НА АКТИВНОЙ ДОЛГОТЕ НА СПАДЕ АКТИВНОСТИ ЦИКЛА 24

**Костюченко И.Г., Вернова Е.С., Илларионов Е.А.**

*НИФХИ им.Л.Я.Карпова, г. Москва, Россия, [irkost46@gmail.com](mailto:irkost46@gmail.com)*

Механизм, обеспечивающий многократно повторяющееся появление долгоживущих областей повышенной активности в узком интервале долгот на Солнце (активных долгот) остается непонятым. Считается, что большое количество групп пятен, наблюдаемых в такой полосе долгот, и их повышенная активность связана с непрерывным поступлением в эту область магнитного потока от локального долгоживущего источника. Ранее [1] было показано, что на фазе спада активности 24 цикла зона активной долготы и, следовательно, её возможный источник вращаются со скоростью, превышающей Кэррингтоновскую. В этом случае следует ожидать, что группы пятен на активной долготе, в которые регулярно поступает новый магнитный поток, а это, наиболее вероятно, крупные и долгоживущие группы, должны вращаться со скоростью, близкой к скорости вращения самой активной долготы.

В данной работе проведен анализ скорости вращения наиболее крупных групп пятен, наблюдавшихся на активной долготе в рассмотренный период. В отличие от [1], использовались более точные и полные измерения их координат, а также их ежедневных изображений, предоставленных Кисловодской Горной Станцией [2]. Исследовалась взаимосвязь изменений положения центра группы и ее долготных границ, ее площади и ее морфологии. Анализ показал, что все крупные группы вращаются со скоростью, близкой к скорости вращения зоны активной долготы, в том числе в результате поступления в них нового магнитного потока. Исключение составляет группа S12673, в которой одновременно с поступлением нового магнитного потока быстро изменялась морфология, что было, по-видимому, связано с серией происходивших в ней мощных вспышек.

1. *Kostyuchenko, I.G., Vernova, E.S.* / Geomagnetism and Aeronomy, 2023, Vol. 63, No. 8, pp. 100–107.
2. *Illarionov, E.A., Tlatov, A.G.*, SolPhys., 2022 (<https://doi.org/10.1007/s11207-022-01955-0>)

## СИСТЕМА УДАЛЁННОГО ДОСТУПА К ОПЕРАТИВНЫМ ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ГАС ГАО РАН ДРАЙВЕРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

**Березин И.А., Шрамко А.Д., Глатов А.Г., Дормидонтов Д.В.**

*Кисловодская Горная Астрономическая Станция ГАО РАН, Россия, [iberalex@ya.ru](mailto:iberalex@ya.ru)*

На Кисловодской Горной Астрономической Станции (ГАС ГАО РАН) организована система хранения и удалённого доступа к данным спектральных и спектрополяриметрических наблюдений полного диска Солнца. Архив состоит из данных двух уровней и основан на наблюдениях магнитографа СТОП и патрульных спектрогелиографов в линии Н-альфа и Ca II К с 2012 г. по настоящее время. Данными первого уровня являются полные спектры на полном диске Солнца, для патрульных спектрогелиографов пространственное разрешение составляет  $\approx 1.5''$ , а спектральное разрешение – 40 000. Данные второго уровня – это результаты простой обработки измеренных спектров с помощью однокомпонентной модели, они представляют собой распределение по солнечному диску интенсивности излучения в ядре линии, доплеровских скоростей, уширения спектральных линий и продольной компоненты магнитного поля. Система хранения в режиме реального времени пополняется данными с патрульных телескопов и магнитографа, общий объём архива составляет порядка 200 Тб, удалённый доступ предоставлен по FTP.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2023-121/3.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Якунина Г.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, [yakunina45@yandex.ru](mailto:yakunina45@yandex.ru)

Проведено исследование крайнего ультрафиолетового (КУФ) излучения Солнца в 22-24 циклах. Были использованы архивные данные наблюдений Solar Dynamics Observatory SDO/EVE. Оценено изменение интенсивности КУФ-линий. Поток в линиях гелия по-разному изменяются в 24-м цикле. Поток в линии He I ( $\lambda=58.4$  нм) уменьшился примерно на 45%, в линии He II ( $\lambda=30.4$  нм) примерно на 25% от величины в максимуме активности..

Поток излучения от Солнца в УФ-области составляет малую часть в общем потоке излучения Солнца, но при этом играет заметную роль в формировании верхней атмосферы Земли. КУФ-излучение Солнца является основным источником нагрева и ионизации верхних слоев земной атмосферы. Оно полностью поглощается атмосферой Земли и определяет основные параметры ее верхней атмосферы. Изучение вариаций КУФ-излучения (ежедневных и долгопериодических в 11-летнем цикле) важно, так как они несут в себе информацию о солнечной хромосфере и короне, а также о процессах, происходящих во время солнечных вспышек. Величины потоков ультрафиолетового и рентгеновского излучения являются входными параметрами для многих ионосферных моделей земной атмосферы

Анализ 24 цикла солнечной активности, самого слабого среди всех циклов за последние сто лет показал, что относительные различия в амплитудах вариаций индексов активности от минимума к максимуму цикла существенно изменяются при переходе от циклов 22 и 23 к 24 циклу. Число солнечных пятен и поток в линии FLa сильно уменьшились уже в 23 цикле по сравнению с циклом 22. Все остальные индексы активности в 22 и 23 циклах имеют примерно одинаковые амплитуды и уменьшаются примерно в 2 раза в 24 цикле.

Текущий 25-й солнечный цикл оказался более активным, чем ожидалось. Активность Солнца растет существенно быстрее прогноза. Повышенная активность включает в себя сильные солнечные вспышки, выбросы корональной массы. Уровень солнечной активности на данный момент примерно в 1.5 раза выше по числу пятен от ожидаемого прогноза. Число вспышек в 1.8 раза больше. Северо-южная асимметрии незначительна.

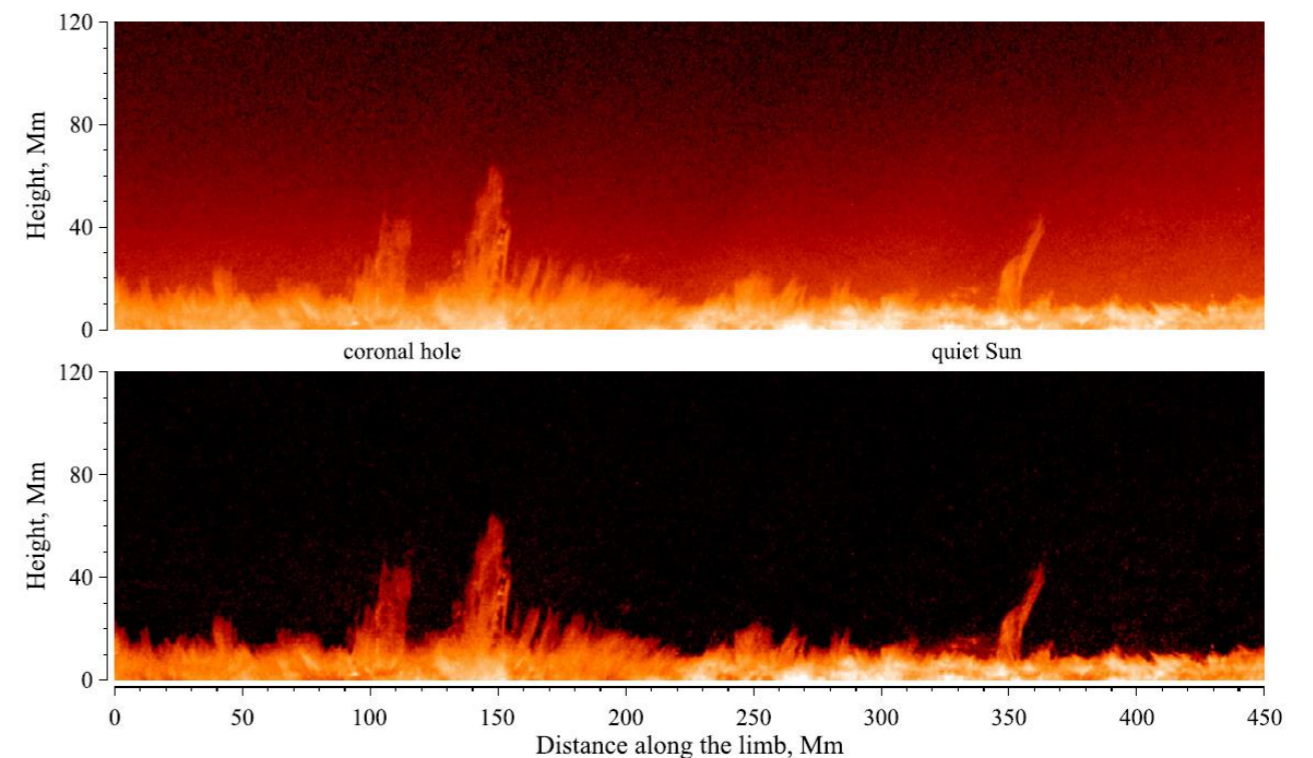
## РАЗДЕЛЕНИЕ ЗАЛИМБОВЫХ ЭМИССИОННЫХ КОМПОНЕНТ ИОНОВ He II И Si XI В КАНАЛЕ 304 Å

Лобода И.П., Рева А.А., Богачев С.А., Кириченко А.С., Ульянов А.С.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ivan.loboda@cosmos.ru](mailto:ivan.loboda@cosmos.ru)

Канал 304 Å является одним из наиболее широко используемых в ВУФ наблюдениях Солнца, в первую очередь для изучения динамики структур переходного слоя. Однако, помимо сложного механизма формирования доминирующей линии He II 303.8 Å, при залимбовых наблюдениях существенный вклад в регистрируемый сигнал даёт корональная линия Si XI 303.3 Å, что существенно затрудняет интерпретацию наблюдений в этом канале и снижает их контраст. В общем случае определение вклада фонового излучения иона Si XI и его устранение требуют спектроскопических наблюдений.

В данной работе мы используем метод восстановления дифференциальной меры эмиссии для получения синтетических профилей излучения в линии Si XI 303.3 Å и показываем, что на высотах выше 20 тыс. км именно она формирует фоновое излучение короны. На основании полученных результатов мы обосновываем модель залимбового профиля излучения в линии Si XI 303.3 Å, позволяющей производить оценку и вычитание фона в участках спокойной короны только по наблюдениям в канале 304 Å, что может найти применение в исследованиях мелкомасштабной активности Солнца.



Пример вычитания фонового сигнала иона Si XI в канале 304 Å SDO/AIA на границе корональной дыры: исходное изображение (сверху) и результат вычитания (снизу). Интенсивность дана в логарифмическом масштабе, проведено полярное преобразование залимбовой области короны.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-10157, <https://rscf.ru/project/21-72-10157>.

**ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА, ОТКРЫТОЙ ВО ВРЕМЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ФАЗЫ СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29.03.2006 Г., ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН – 600**

**Голубчина О.А.**

СПб Ф САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, *golubchina\_olga@mail*

В работе представлен обзор результатов наблюдений максимальной фазы ( $\Phi = 0.998$ ) солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопе РАТАН – 600 в сантиметровом диапазоне длин волн. При обработке наблюдений использовалось моделирование радиоизлучения Солнца. В работе приводятся полученные результаты яркостной температуры полярной корональной области Солнца, результаты наблюдения открытого серпа западного лимба Солнца, высокоширотного протуберанца полярной области Солнца. Обсуждаются полученные распределения электронной концентрации сантиметрового радиоизлучения Солнца и распределение электронной концентрации атмосферы Солнца по данным наблюдений полных солнечных затмений в белом свете. Приводятся данные о возможной нижней границы формирования солнечного ветра в открытой полярной корональной области Солнца во время максимальной фазы солнечного затмения (29.03.2006 г.) на РАТАН-600 в сантиметровом диапазоне длин волн.

**КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ ВСПЫШЕЧНОГО ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКАХ**

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

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, taoastronomer@gmail.com*

В работе проведен анализ квазипериодических пульсаций (КПП) жесткого рентгеновского (ЖР) излучения локальных источников для солнечных вспышек SOL2014-04-18T12:50:40 и SOL2014-10-22T13:48:00 по наблюдениям SDO/AIA и RHESSI. В событии SOL2014-04-18T12:50:40 обнаружены пульсации с квазипериодами в диапазоне 16—70 с в области энергий 20—50 кэВ и в ультрафиолетовом (УФ) излучении на длине волны 1600 Å. Локальные ЖР источники ассоциированы с основаниями вспышечной аркады, магнитное поле которой получено согласно нелинейной бессиловой экстраполяции данных SDO/HMI. ЖР пульсации в различных локальных источниках не возникают одновременно. В событии SOL2014-10-22T13:48:00 ЖР пульсации в различных локальных источниках совпадают по времени появления. Обнаруженные квазипериоды находятся в диапазоне 10—70 с в области энергий 18—50 кэВ.

Для обоснования наблюдаемых пульсаций в ЖР излучении, произведены численные расчеты функции распределения ускоренных электронов в модели осциллирующей ловушки и в модели ансамбля последовательно коллапсирующих ловушек с нестационарными распределениями магнитного поля и плазмы в магнитной петле. Оценено влияние бетатронного и Ферми ускорения электронов в каспе на КПП ЖР излучения локальных источников. К вариациям ЖР потока приводят осцилляции магнитного поля в корональной области с величинами порядка 5 - 15 Гс/с, амплитуда которых на ~30% больше среднего значения магнитного поля в вершине вспышечной петли. Такие вариации магнитного поля приводят к периодически изменяющемуся конусу потерь и изменению концентрации плазмы в корональной области петли в 2—10 раз. При меньших величинах вариаций магнитного поля, КПП в ЖР излучении могут быть результатом квазипериодического ускорения электронов. Таким образом, в модели осциллирующей ловушки с величиной вариации магнитного поля <30% от средних значений в вершине модуляция концентрации плазмы и магнитного поля не приводят к существенному изменению потока ЖР излучения во времени.

## КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕСЯ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИМИ БЫСТРЫМИ ВОЛНОВЫМИ ПАКЕТАМИ

Анфиногентов С.А.

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

В докладе представлен анализ наблюдений квазипериодических пульсаций микроволнового радиоизлучения в диапазоне 3-6 ГГц во время солнечной вспышки М-класса, произошедшей 13 июня 2022 года. Колебания потока микроволнового излучения с периодом около 2 минут отчетливо наблюдались на фазе роста вспышки около 03:15 UT. В это же время колебания с тем же периодом были обнаружены во вспышечных лентах, видимых в ультрафиолетовом и крайнем ультрафиолетовом излучении на длинах волны 1600 и 171Å. Кроме того во время данной вспышки наблюдалась серия волновых пакетов быстрых магнитозвуковых волн, распространяющихся из вспышечной активной области. Время наблюдения нескольких таких пакетов совпадает со временем появления квазипериодических пульсаций в микроволновом излучении и демонстрирует ту же периодичность. Было установлено, что во время наблюдения квазипериодических пульсаций и быстрых волновых пакетов одна из вспышечных лент проходила через тень одного из пятен активной области.

На основе имеющихся наблюдательных данных предложен следующий сценарий одновременной генерации квазипериодических пульсаций микроволнового излучения и быстрых магнитозвуковых волн. (1) Во время прохождения вспышечной ленты через тень пятна область магнитного пересоединения оказалась магнитосвязанной с тенью пятна – постоянным источником трёхминутных колебаний, распространяющихся в корону в виде медленных магнитозвуковых волн. (2) Распространяющиеся волны, связанные с трёхминутными колебаниями, оказываются в области пересоединения. (3) Эти возмущения становятся причиной периодической модуляции процесса вспышечного энерговыделения, что проявляется в виде квазипериодических пульсаций микроволнового радиоизлучения и влияет на генерацию быстрых магнитозвуковых волн.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10139.

## НЕЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ КАК ПРЕДВЕСТНИКИ ВСПЫШЕК

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

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [nechaeva.workspace@gmail.com](mailto:nechaeva.workspace@gmail.com)*

Солнечная вспышка – это внезапный, быстрый и сильный магнитно-энергетический выброс, характеризующийся усилением яркости излучения в широком спектре, наблюдаемого вблизи солнечных пятен. Как правило, солнечные вспышки классифицируются на А-, В-, С-, М- и Х-классы в соответствии с их максимальным потоком на длинах волн мягкого рентгеновского излучения (XRS) 1,0-8,0Å, измеренного спутником GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Хотя и существует общее согласие относительно причин вспышек, связанных с магнитным пересоединением в солнечной атмосфере, остается еще много нерешенных проблем, касающихся физики этого процесса. Солнечную вспышку можно разделить на три фазы относительно потока XRS GOES: предвспышечную, фазу нарастания потока от условного начала до максимума и фазу спада после максимума. Естественно, очень важно определять предвестники солнечных вспышек как для понимания самого процесса накопления и выделения энергии во вспышечных областях, так и для прогнозирования вспышек.

В данной работе в качестве одного из предвестников вспышек мы рассматриваем незатухающие колебания солнечных корональных петель, и их связь с потоком XRS GOES. В отличие от затухающих кинк-колебаний, возбуждаемых импульсными динамическими процессами, этот тип поперечных колебаний, по всей видимости, не связан с каким-либо внешним импульсным воздействием, таким как вспышка или выброс корональной массы, и не демонстрирует значительного затухания. Более того, амплитуда этих незатухающих колебаний обычно ниже, чем у затухающих, поэтому для их детектирования нужны дополнительные методы обработки изображений. При этом корональные петли можно рассматривать как прокси линий магнитного поля в активных областях Солнца. Таким образом, незатухающие колебания существуют вне зависимости от динамических триггеров, и изменения в характере их поведения можно рассматривать в контексте предвспышечной активности по перестройке магнитной конфигурации активной области. Мы представляем результаты предварительного анализа незатухающих колебаний петель в нескольких активных областях и их связи с вариациями потока рентгеновского излучения перед вспышками. В частности, исследована АО 13514, где 14 декабря 2023 г. произошла вспышка класса X2.8, перед которой в рентгеновском потоке наблюдались колебания с нарастающей амплитудой.



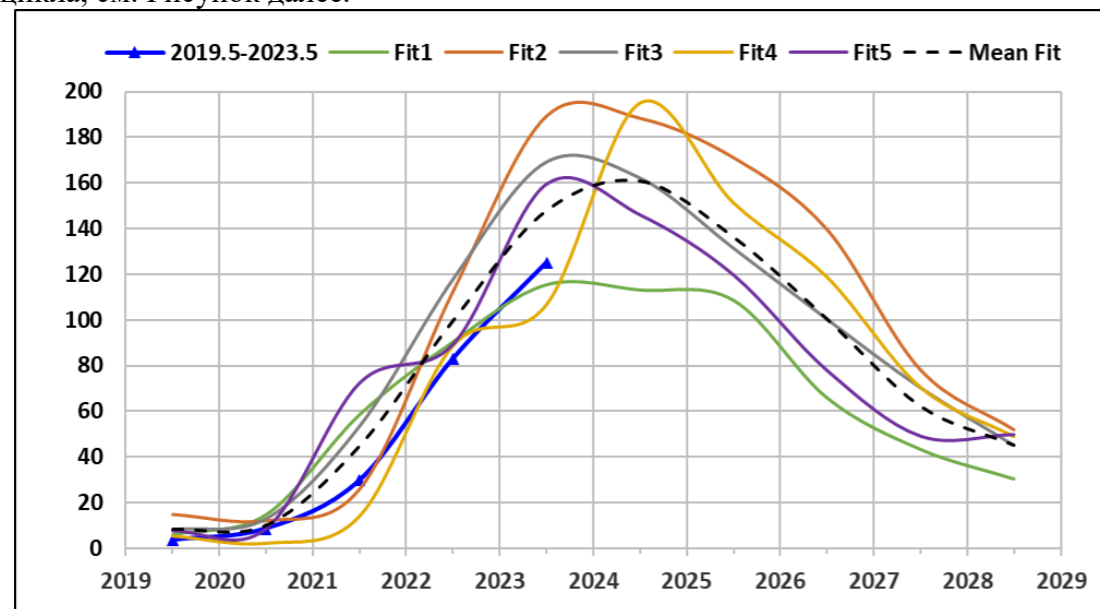
## АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ФРАГМЕНТОВ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА, ЦИКЛИЧНОСТЬ И ПРОГНОЗ

Старченко<sup>1</sup> С.В., Яковлева<sup>1</sup> С.В.  
<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия  
[sstarchenko@mail.ru](mailto:sstarchenko@mail.ru)

Предлагается исследование автокорреляции фрагментов ряда чисел Вольфа ( $v_2$ ) с целью прогнозирования на 6 лет (полцикла). Суть разработанного нами метода заключается в том, чтобы сравнить выбранный с целью прогноза фрагмент с некоторыми (подходящими по определенным критериям) фрагментами в прошлом и найти пары с наибольшим коэффициентом корреляции. Затем мы продлеваем прогностический ряд (фрагмент) с учетом его сдвига и амплитуд относительно фрагментов рядов, на которых мы базируемся. Интересующим нас фрагментом является часть полного 22-летнего цикла, включающего 24-ый цикл и начало 25-го. Целью поиска являлась пара четный - нечетный циклы с наибольшим коэффициентом корреляции на временном интервале 1830-2010 годы, охватывающем как достоверные циклы солнечной активности, начиная с 10-го, так и «условно достоверные» 8 и 9.

Для апробации авторской методики были проведены тестовые расчеты, для которых были выбраны три пары фрагментов с коэффициентом корреляции больше 0.9. Методика нормировки позволила довести точность аппроксимации до приемлемых пределов. В процессе исследований рядов различной длительности мы пришли к выводу, что оптимальной с точки зрения наибольшей корреляции является длительность около 16ти лет или полтора полных цикла. Физически такую длительность можно обосновать тем, что полный магнитный цикл – это два (нечетный-четный) цикла активности и для прогноза естественно использовать  $\frac{3}{4}$  полного цикла, чтобы сделать прогноз на оставшуюся четверть.

Опираясь на тестовые расчеты, были сделаны прогнозы следующих за 2023г шести лет 25-го цикла, см. Рисунок далее.



**Рисунок.** Прогнозные кривые исходят из фиксированных фрагментов: Fit1 (1977.5-1992.5), Fit2 (1900.5-1915.5), Fit3 (1921.5-1936.5), Fit4 (1963.5-1978.5), Fit5 (1984.5-1999.5). Коэффициенты детерминации этих фрагментов со сдвигаемым фрагментом (2008.5-2023.5) составляют  $0.7 \pm 0.1$ .

## БАЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ТЕЛЕСКОПЕ БСТ-2 КРАО

Андреева О.А., Малащук В.М., Плотников А.А.

КрАО РАН, Научный, Крым, Россия, [olga@craocrimea.ru](mailto:olga@craocrimea.ru)

Данная работа является заключительной из серии работ [1, 2], посвященных формированию унифицированной базы наблюдений Солнца в ближней инфракрасной области на телескопе БСТ-2 КрАО.

Инфракрасный солнечный спектр содержит множество физических данных о нашем Солнце и исследуется с помощью современных детекторов и технологий наземных солнечных телескопов. Спектроскопические наблюдения в линии He I 1083 нм (He I) дают важную диагностическую информацию о структуре и динамике хромосферы и вышележащей короны. Спектрогелиограммы He I показывают, как хромосферные, так и корональные структуры, такие как корональные дыры (КД), волокна и активные области и, в основном, используются для наблюдения КД с Земли. КД хорошо известны как источник высокоскоростного солнечного ветра благодаря своим открытым магнитным полям, поэтому они считаются важным компонентом прогнозирования космической погоды.

Во второй половине 80-х годов прошлого века в КрАО на телескопе БСТ-2 под руководством Н.Н. Степанян были начаты работы по подготовке технических возможностей и программного обеспечения для наблюдений в линии He I [3]. Регулярные наблюдения в ближней инфракрасной области проводятся в КрАО с 1999 года по настоящее время. На телескопе БСТ-2 накоплен уникальный наблюдательный материал за более чем два солнечных цикла, получено свыше 4500 карт полного диска Солнца в линии He I. В связи с тем, что за этот период процесс наблюдений неоднократно претерпевал модернизацию разной сложности и вносились изменения в программы обработки, мы имели несколько рядов спектрогелиограмм разного вида. На данный момент работа по унификации архива в основном завершена и мы представляем обновленную базу данных.

В результате формирования унифицированной базы наблюдений в линии He I, полученных на Универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2 КрАО в период с 1999 по 2023 год мы получили удобную для просмотра, анализа и сравнения единую визуализацию наблюдательного материала. База данных пополнилась недостающими ранее картами полного диска Солнца. Стали доступны для пользователей не только JPEG-файлы, но и FITS-файлы. Унифицированная база данных может быть полезна при проведении научных исследований в области изучения природы и эволюции КД и их связи с другими структурами на Солнце. Это способствует решению таких важных проблем солнечной физики как структура, вращение и эволюция крупномасштабного магнитного поля, формирование потоков солнечного ветра. Надеемся, что эти данные будут востребованы специалистами широкого круга.

1. Андреева О.А., Плотников А.А., Малащук В.М. // Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. 2023. Т. 119. № 4. С. 35
2. Андреева О.А., Малащук В.М., Плотников А.А. // XXVII Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика - 2022» 9 – 13 октября 2023 года. ГАО РАН, Санкт-Петербург. Труды. 2023. С.15.
3. Букач А.Б., Дидковский Л.В., Степанян Н.Н., Суница Г.А., Щербакова З.А., 1990. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 82. С. 172.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

**Биленко И.А.**

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, [bilenko@sai.msu.ru](mailto:bilenko@sai.msu.ru)

Меридиональная циркуляция магнитных полей играет важную роль во многих процессах на Солнце. Изучение характеристик меридиональных магнитных потоков важно для понимания работы солнечного динамо и построения реалистичных моделей динамо. Исследования циклических вариаций меридиональных потоков позволяют прогнозировать амплитуду и продолжительность циклов солнечной активности.

На основе данных магнитных полей наземных: WSO (Wilcox Solar Observatory) и Kitt-Peak KPVT (Kitt Peak Vacuum Telescope) и космических: SOHO/MDI (Solar and Heliospheric Observatory/Michelson Doppler Imager) и SDO/HMI (Solar Dynamics Observatory/Helioseismic and Magnetic Imager) обсерваторий рассмотрены характеристики меридиональных циркуляций солнечных магнитных полей разного масштаба в 21 – 25 циклах.

Результаты свидетельствуют, что в зависимости от напряженности фотосферного магнитного поля могут быть выделены три типа динамики магнитных полей. Первый – это динамика магнитных полей низкой напряженности. Они распределены равномерно по диску Солнца и изменения величины их напряженности не зависят от циклических вариаций магнитных полей активных областей. Второй – магнитные поля средней напряженности. Их меридиональная циркуляция представляет собой противофазную миграцию магнитных полей положительной и отрицательной полярности от одного полюса к противоположному в каждом цикле с периодом порядка 22 лет. Они характеризуют динамику глобального магнитного поля Солнца и определяют процесс смены знака магнитного поля на полюсах в максимумах солнечной активности. К третьему типу относятся локальные магнитные поля высокой напряженности активных областей. Показано, что магнитные потоки соответствующие как полярности лидирующих, так и хвостовых пятен мигрируют от высоких широт к низким симметрично в обоих полушариях Солнца.

Приведены результаты расчета вариаций скорости меридиональных потоков магнитных полей разной напряженности на разных фазах солнечной активности и сопоставления их характеристик в разных циклах.

## ПРИПОВЕРХНОСТНЫЕ АЗИМУТАЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ИХ РОЛЬ В ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**Тлатов А.Г.**

ГАС ГАО РАН, г. Кисловодск, Россия, [tlatov@mail.ru](mailto:tlatov@mail.ru)

Рассмотрены вариации азимутальных магнитных полей Солнца в 24-25 циклах активности циклах активности по данным телескопов SDO/HMI, SOHO/MDI и Kislovodsk/STOP. Для выделения азимутальных магнитных полей выполнен анализ ежедневных наблюдений LOS магнитных полей из областей около солнечного лимба. Показано, что при достаточном большом усреднении данных выделяются крупномасштабные структуры, которые можно интерпретировать горизонтальные магнитные поля, направленные вдоль линии Восток-Запад. Азимутальные магнитные поля видны как низкоширотной зоне, так и на высоких широтах. Азимутальные поля на одинаковых широтах имеют противоположные направления в северном и южном полушарии, и также меняют знак в четных и нечетных циклах активности [1].

Обсуждается механизм образования глобальных азимутальных магнитных полей и их роль в цикле солнечной активности. Приповерхностное азимутальное магнитное поле тесно связано с циклом активности. По видимому, азимутальное поле формируются из U-образных силовых трубок активных областей (AR). Из-за наличия тильт- угла АО при дифференциальном вращении происходит вытягивание подповерхностных магнитных полей в азимутальном направлении. Рассмотрена роль азимутальных магнитных полей в циклах солнечной активности. Предложена схеме генерации магнитного поля по схеме отличной от моделей динамо типа Бэбкока-Лейтона.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 23-22-00165, и госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2023-121/3.

1. Tlatov A.G. //Solar Phys. 2023. V. 298. P. 147.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ КАРТ ПОЛЯРНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Киселюс В., Илларионов Е.А.**

*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [waclove@yandex.ru](mailto:waclove@yandex.ru)*

Анализ наблюдательных данных по солнечной активности играет ключевую роль в понимании процессов, происходящих на Солнце, и в прогнозировании космической погоды. Одним из способов изучения солнечной активности является построение карт крупномасштабного магнитного поля, на которых, в частности, представляет интерес положение нейтральной линии магнитного поля. Существует несколько подходов к восстановлению положения нейтральной линии и одним из них является восстановление линии по положениям волокон (протуберанцев), задающим фрагменты этой линии. Зачастую, эта процедура реализуется вручную и результат оказывается неоднозначным. В нашем исследовании мы представляем нейросетевой подход для решения этой задачи.

Ключевой идеей стало создание полносвязной нейронной сети, аппроксимирующей некую функцию, линией уровня нуль которой являлась бы искомая нейтральная линия. Важнейшим этапом стало создание функции потерь, необходимой для обучения модели, которая бы учитывала множество факторов, влияющих на форму нейтральной линии. Стоит отметить, что при составлении карт полярности магнитного поля Солнца помимо данных о волокнах используется множество другой дополнительной информации, которую трудно формализовать. Мы компенсируем это тем, что наша модель может получать на вход помимо данных о волокнах еще и предполагаемый знак полярности в некотором числе вспомогательных точек.

Для оценки качества работы модели мы использовали архив рукописных синоптических карт, составленный Патриком Макинтошем, который включает в себя интересующие нас данные о положении волокон и карты полярностей. Эксперименты показали, что результаты восстановления карт полярностей нашей моделью согласуются с данными в архиве Макинтоша.

Стоит отметить, что наблюдение за солнечными волокнами началось задолго до систематических наблюдений за магнитным полем Солнца. В этом ключе мы надеемся, что с помощью предлагаемого нами подхода в будущем получится создать однородный ряд солнечных данных, представляющий интерес для изучения. Этот подход открывает новые перспективы для автоматизации и повышения точности анализа солнечной активности, что важно как для научных, так и для практических целей, например, для прогнозирования космической погоды.

## ШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ФОТОСФЕРЫ СОЛНЦА

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

*ИЗМИРАН, СПб филиал, г. Санкт-Петербург, Россия, [elnavernova96@gmail.com](mailto:elnavernova96@gmail.com)*

Исследованы вариации слабых магнитных полей фотосферы с периодами порядка магнитного цикла Солнца на основе данных синоптических карт фотосферного магнитного поля (NSO Kitt Peak) за период с 1978 по 2016 г. С целью изучения слабых магнитных полей был установлен порог насыщения для синоптических карт, равный 5 Гс. Преобразованные синоптические карты были использованы для построения диаграммы широта-время. Выделены на диаграмме и проанализированы 18 временных профилей магнитного поля для широт, равномерно распределенных по синусу от северного до южного полюса. Временные зависимости усреднялись скользящим сглаживанием по 21 кэррингтоновскому обороту.

Аппроксимация временных зависимостей синусоидальной функцией позволила выделить в слабых магнитных полях циклическую компоненту с почти постоянным периодом около 22.3 года (период магнитного цикла Хейла). Кроме общеизвестного 22-летнего изменения околополярного поля были обнаружены аналогичные вариации для полей на всех широтах. Исключение составляют широты  $26^\circ$  и  $33^\circ$  в северном и  $26^\circ$  в южном полушарии. Амплитуда вариации уменьшалась в 6 раз от полюсов к широте  $40^\circ$ . В зоне пятнообразования (от  $+40^\circ$  до  $-40^\circ$ ) амплитуда вариации магнитного поля показывает сильную корреляцию для двух полушарий. Максимум амплитуды приходится на широты  $12.5^\circ$  и  $40^\circ$ ; минимум расположен на широте  $26^\circ$ .

Известно, что 22-летние вариации магнитного поля высоких широт двух полушарий изменяются в противофазе. Неожиданным результатом данной работы является то, что магнитные поля экваториальных широт находятся в фазе с высокоширотными полями северного полушария и в противофазе с полями южного полушария.

Фаза 22-летней вариации монотонно меняется при изменении широты, но на широте  $\sim 26^\circ$  происходят резкие скачки фазы. На этой широте присутствуют только короткопериодные вариации. На широтах выше и ниже  $26^\circ$  вариации с периодом 22 года изменяются в противофазе. Полученные результаты показывают, что в слабых магнитных полях вариации с периодом 22 года стабильно присутствуют на большей части гелиоширот.

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ И ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Абраменко В.И.<sup>1</sup>, Сулейманова Р.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН КРАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, [vabramenko@gmail.com](mailto:vabramenko@gmail.com)

Структура фотосферного магнитного поля активных областей (АО) на Солнце неизбежно подчиняется динамике турбулентных потоков плазмы. Как любой процесс в турбулентной среде, магнитное поле обладает свойством самоорганизации: наряду с прямым турбулентным каскадом, имеет место обратный каскад – образование более крупных структур из мелких. У систем с самоорганизацией есть ряд других эмпирических признаков, в частности, наличие фрактальных свойств, см., например, [1]. Важным подмножеством систем с самоорганизацией являются системы с само-огранизованной критичностью (self-organized criticality, SOC). Для SOC-систем характерен спонтанный переход в критическое состояние, когда флуктуации всех масштабов (вплоть до самых больших) становятся нередкими и определяющими развитие системы. Диагностировать SOC-состояние можно с помощью корреляционных функций, как пространственных, так и временных. Согласно [2], в SOC-системе корреляционные функции обладают «тяжелыми хвостами» и подчиняются степенным законам, в то время как системы с самоорганизацией (но без SOC) обладают экспоненциальными (быстро спадающими) корреляционными функциями. Появляется возможность диагностировать фотосферное магнитное поле АО с точки зрения самоорганизации и SOC. Пространственные корреляционные функции как средство для исследования фотосферных структур до сих пор применяются крайне редко. Мы решили исследовать проблему на контрасте и выбрали по данным SDO/HMI магнитограммы sharp\_sea\_720s для 8 АО: четыре из них были регулярными билочиями магнитоморфологического класса (ММК, [3]) A1, и четыре были весьма нерегулярными сложными АО (ММК-класс B3). Для каждой из них были вычислены корреляционная функция (Рис.1) и спектр мультифрактальности. Оказалось, что на интервале 1-36 мегаметров корреляционные функции всех АО хорошо аппроксимируются экспоненциальным законом, а степенной закон не в состоянии обеспечить приемлемую аппроксимацию данных. Кроме того, все АО обладают мультифрактальными свойствами, причем эти свойства более выражены для нерегулярных АО класса B3. Сделан вывод о том, что фотосферное поле АО является системой с самоорганизацией и мультифрактальными свойствами, но не обладает свойством самоорганизованной критичности.

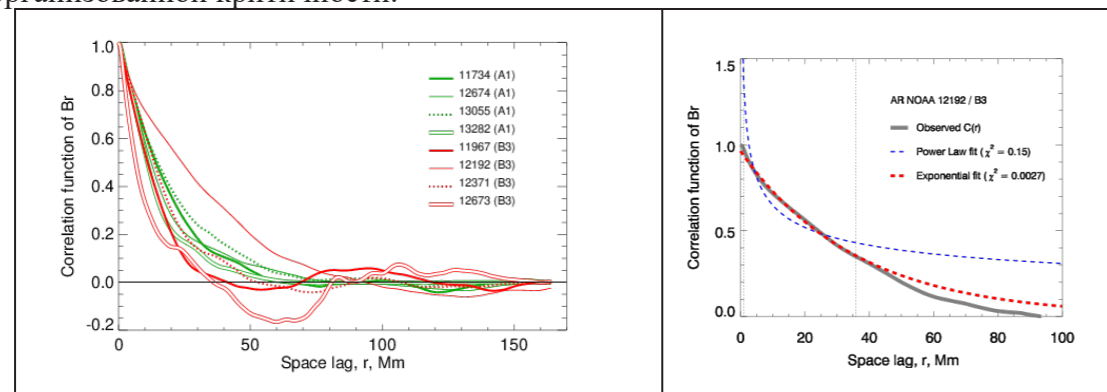


Рисунок 1. Слева: Корреляционные функции всех АО. Справа: типичный пример аппроксимации степенным законом и экспонентой для одной из АО.

## О РОЛИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ В РЕАЛИЗАЦИИ СПС И КВМ

Григорьева И.Ю.<sup>1</sup>, Струминский А.Б.<sup>2</sup>, Ожередов В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [irina.2014.irina@mail.ru](mailto:irina.2014.irina@mail.ru)

<sup>2</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия

В настоящее время появляется все больше свидетельств того, что для реализации солнечных протонных событий (СПС) и корональных выбросов массы (КВМ) важно взаимодействие крупномасштабного магнитного поля Солнца с локальным полем активной области (АО). Для объяснения частоты появления экстремальных геомагнитных бурь в различных фазах солнечных циклов в [1] предложена качественная схема взаимодействия крупномасштабного магнитного поля Солнца с локальным полем АО. В [2] показано, что события с наземными возрастаниями интенсивности космических лучей (GLE) группируются в периоды по десять дней неравномерно внутри цикла, возможно из-за индивидуальной продуктивности конкретных АО, и следуют 11-летним солнечным циклам. По всей видимости, частота и характеристики КВМ в *сильных* и *слабых* циклах различны [3]. Длительность периодов без СПС различна в *сильных* и *слабых* циклах.

Вспышки, в которых не ускоряются КВМ, выделяются вертикальной структурой магнитного поля [4]. Нет взаимосвязи между областями с различной плотностью, то есть нет взаимодействия крупномасштабных и локальных магнитных полей, происходящего при расширении нижних областей вверх в корону (например, нет тиринг-неустойчивости). По нашим представлениям эруптивные вспышки, которые сопровождаются СПС и КВМ, развиваются на высотах >50 Мм, что также предполагает необходимость учета внешнего крупномасштабного магнитного поля в энергетике вспышек/КВМ [5]. Для реализации эруптивных вспышек, сопровождающихся КВМ и СПС в межпланетном пространстве, необходимо выполнение энергетического соотношения магнитного давления к газовому  $B^2/8\pi = \rho V^2/2$ , где  $B$  — магнитное поле, доступное для пересоединения;  $V$  — вторая космическая скорость равная скорости Альвена на высотах 0.1 - 0.5  $R_{\text{sun}}$ . Магнитная 3D-структура АО расширяется до высот крупномасштабного магнитного поля, благодаря задействию последовательно всех масштабов магнитного поля, и делает вспышку мощной (большой SXR балл, Long Duration Event, КВМ, СПС и т.д.).

В *сильных* солнечных циклах крупномасштабное (полюсное) магнитное поле сильнее, его характерные высоты (размеры) меньше. В *слабых* циклах оно слабее, его характерные высоты (размеры) больше. В *сильных* циклах в результате интенсивного образования пятен промежутков времени без СПС короче, чем в *слабых* циклах, СПС случаются чаще и они мощнее.

1. Owens et al., Extreme Space-Weather Events and the Solar Cycle, Sol. Phys. (2021) 296:82
2. Owens et al., Solar Energetic-Particle Ground-Level Enhancements and the Solar Cycle, Sol. Phys. (2022) 297:105
3. Webb et al., Is There a CME Rate Floor? CME and Magnetic Flux Values for the Last Four Solar Cycle Minima, ApJ (2017) 851:142
4. Vasantharaju N. et al., Confinedness of an X3.1-class Solar Flare Occurred in NOAA 12192: Analysis from Multi-instrument Observations, ApJ (2023) 950:183 (16pp)
5. Струминский и др. Расширение источника мягкого рентгеновского излучения и “магнитная детонация” в солнечных вспышках, ПАЖ (2023) том 49, № 11, с. 806–818

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.
3. Abramenko V.I. // MNRAS 2021. V. **507**, P. 3698.

Циклическая вариация структуры и энергетике солнечных магнитных полей.

В.Н. Обридко,1,2, А.С. Шибалова, 1, Д.Д. Соколов 1,3,4,

1. IZMIRAN, 4, Kaluzhskoe Shosse, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

2. Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

3. Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia

4. Moscow Center of Fundamental and Applied Mathematics, Moscow, 119991, Russia

Проведен анализ энергетике основных мод симметрии крупномасштабных магнитных полей на Солнце. Выполнен анализ энергетике зональных, секториальных и тессаральных мод как на уровне фотосферы, так и на уровне поверхности источника. Подробно описано их эволюция в течение четырех циклов. Обнаружилось, что все моды показывают сильный постепенный спад со временем. Проведена нормировка на суммарную энергию магнитного поля. Оказалось, что после нормировки исчезает долговременный спад и внутреннее распределение гармоник в каждом цикле повторяется. Поэтому внутреннюю структуру каждого цикла для средних полей вполне можно описать классическими принципами динамо. Однако непосредственно описать широтно-временную диаграмму пятен не удастся. Бабочки Маундера имеют несколько иную структуру и располагаются на границах двух волн на общей широтно-временной диаграмме. Высказывается предположение, что пятнообразовательная активность является следствием суммарного действия трех механизмов – классического динамо, внешней модулирующей причины (или долговременного цикла) и непосредственного механизма образования пятен. Для появления пятен важно не только наличие концентрированных полей, но и биполярности, замыкание силовых линий в ближних окрестностях.

АШ и ДС благодарны фонду Базис, грант 21-1-1-4-1 за поддержку работы.

## Наблюдения корональных дыр на Сибирском РадиоГелиографе

Алтынцев А.Т., Глоба М.В., Мешалкина Н.С., Сыч Р.А.

### Аннотация

Впервые выполнены многоволновые микроволновые наблюдения корональной дыры (25 апреля 2023) в диапазоне частот от 2.8 до 12 ГГц с двумерным пространственным разрешением. Показано, что на частотах ниже 6 ГГц средняя яркость по дыре уменьшается в 1.5 раза относительно яркости спокойного Солнца. Уменьшение яркости происходит неоднородно: яркостная температура может уменьшаться до величин порядка  $10 \times 10^3$  К. На низких частотах наблюдаются участки КД со значимой степенью поляризации (до 20% на частотах около 3 ГГц) разного знака. На частотах выше 5 ГГц заметная поляризация не наблюдается. На частотах выше 6 ГГц контраст температур между КД и участками спокойного Солнца быстро исчезает, и остаются неоднородности, которые проявляются как яркие относительно уровня спокойного Солнца компактные источники. Наиболее удивительным является появление неоднородностей с высокими степенями поляризации (больше 20 %) на частотах около 3 ГГц, которые на порядок превышают средние значения, полученные ранее в наблюдениях РАТАН-600 (Borovik et al., 1999).

## ПОСТРОЕНИЕ ИНДЕКСА КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР, СОГЛАСОВАННОГО С ВАРИАЦИЯМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Илларионов Е.А., Березин И.А., Тлатов А.Г.

МГУ, г. Москва, Россия, [egor.illarionov@math.msu.ru](mailto:egor.illarionov@math.msu.ru)

Корональные дыры (КД) рассматриваются как основные источники высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ). Для более детального изучения этой связи обычно рассматривают отдельные КД и соотносят их параметры со скоростью солнечного ветра. Полученные соотношения затем могут использоваться при построении моделей прогноза космической погоды. Однако такие исследования часто ограничиваются небольшими выборками КД из-за множества сложных деталей и неопределенностей при выявлении источников СВ. В нашем исследовании мы рассматриваем гораздо более простой вопрос о том, в какой степени вариации параметров КД могут объяснить глобальные вариации скорости солнечного ветра. Для решения этого вопроса мы рассматриваем каталог КД и основных параметров КД на период 2010–2023 годов, подготовленный Кисловодской горной астрономической станцией. Мы показываем, что можно построить подходящую комбинацию этих параметров (индекс КД), которая обеспечивает значительно большую связь со скоростью солнечного ветра по сравнению с каждым параметром в отдельности, в частности, с площадью КД. Предлагаемый индекс состоит из площади низкоширотных КД, взвешенной по относительную интенсивность КД. Мы также учитываем, что один только коэффициент корреляции может быть не вполне показательной мерой связи двух временных рядов, и предлагаем более устойчивый подход, который основан на интегральной характеристике, построенной по разным временным масштабам.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 23-22-00165.

## ТОНКАЯ СТРУКТУРА КОРОНЫ ПО РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ С ВЫСОКИМ ЧАСТОТНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

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

САО РАН, Санкт-Петербургский филиал, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[m.k.lebedev@gmail.com](mailto:m.k.lebedev@gmail.com)

Солнечная корона хранит в себе ряд неразгаданных астрофизических загадок. Этот внешний слой солнечной атмосферы характеризуется тем, что он горячий и разреженный, со средней температурой в несколько миллионов кельвинов, в сотни раз выше, чем у нижележащей фотосферы. В этом заключается известная проблема нагрева короны. На сегодняшний день путь ее решения видится в необходимости изучения множества малоконтрастных структур [1] на фоне мощного сигнала спокойного Солнца. Большой объем данных по наземным и спутниковым наблюдениям указывает на локализацию вспышечных процессов в вершинах корональных петель, отражающих структуру коронального магнитного поля в активной области [2].

Наличие непрерывных процессов охлаждения и нагрева является важным условием, определяющим существование горячей солнечной короны. Однако их изучению в оптическом диапазоне препятствует низкая плотность плазмы. Приемная аппаратура в радиодиапазоне обладает более высокой чувствительностью, поэтому дециметровые волны оптимальны для исследования малоконтрастных корональных структур.

Таким образом, существует необходимость в большом динамическом диапазоне для регистрации тонкой структуры в короне в диапазоне от  $10^{-3}$  с.е.п. до сигналов, превышающих уровень потока от спокойного Солнца в десятки раз при вспышечных процессах. При практической реализации этих параметров возникают различные ограничения для достижения большого динамического диапазона и высокой чувствительности при предельно высоком частотном разрешении, которые в значительной степени удалось решить на радиотелескопе РАТАН-600 путем использования бездетекторного приема и современных средств цифровой обработки радиоастрономических сигналов, применения статистических методов факторного анализа при обработке данных, а также повышения чувствительности наблюдений за счет внедрения режима сопровождения исследуемых структур [3].

В докладе приведены примеры регистрации ряда новых структур, существующих в короне, как в активных областях, так и в областях спокойного Солнца, и предложены возможные их интерпретации.

1. Parker E. N. // *Astrophys. J.* 1989. V. **330**. P. 474.
2. Sigalotti L. D. G., Cruz F. // *Physics Today* 2023. V. **76** (4). P. 34.
3. Bogod V. M., Lebedev M. K., Ovchinnikova N. E., Ripak A. M., Storozhenko A. A. // *Cosmic Research* 2023. V. **61** (1). P. 27.

## ОБНАРУЖЕНИЕ ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ГИДРОКСИЛА (ОН) В ХОЛОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ КОРОНЫ СОЛНЦА

**Овчинникова Н.Е., Богод В.М., Лебедев М.К.**

*САО РАН, Санкт-Петербургский филиал, г. Санкт-Петербург, Россия,  
n.e.ovchinnikova@gmail.com*

При наблюдениях Солнца на РАТАН-600 с использованием спектрополяриметрического комплекса диапазона 1-3 ГГц в радиоизлучении отдельных активных областей (АО) было обнаружено поглощение в области спектра 1.5-1.7 ГГц вблизи системы линий поглощения гидроксила ОН. Поглощение наблюдалось в тех АО, которые перекрывались холодным волокном, видимым на снимках солнечного диска в линии H-alpha, и на лимбе в присутствии протуберанца. При прохождении АО через ножевую диаграмму направленности антенны телескопа полоса поглощения плавно смещается по частоте, что может быть интерпретировано как влияние сдвига энергетических уровней молекулы ОН в магнитном поле, величина которого также плавно меняется в направлении вдоль волокна.

Структура полосы поглощения, наблюдавшейся 18 июня 2022 года, в точности соответствует разности частот сверхтонкого расщепления основного состояния  $X^2\Pi$  гидроксила (1612, 1665, 1667 и 1720 МГц); при перемещении вдоль АО частотные компоненты полосы изменяются синхронно от 10 до 30 МГц относительно своих несмещенных положений.

27 марта 2023 года были проведены наблюдения в режиме сопровождения с частотным разрешением 4 МГц АО NOAA 13258 у основания крупного вихреобразного протуберанца на западном лимбе Солнца. Наблюдалась полоса поглощения, форма которой соответствует оценочным модельным расчетам для условий в холодном волокне в солнечной короне ( $T \sim 7500$  К,  $p \sim 10^{-6}$  атм.).

В наблюдениях в режиме сопровождения с частотным разрешением 1 МГц 27 и 28 сентября 2023 года АО NOAA 13435 с волокном в области  $0.05-0.055$  см<sup>-1</sup> присутствовала группа линий, предположительно возникающих в результате расщепления уровней  $X^2\Pi_{3/2}$  0-0 и 1-1 в основном состоянии молекулы гидроксила, обусловленного аномальным эффектом Зеемана.

## О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МОДЕЛИ НА ДПР НА ФОНЕ СЛОЖНЫХ СПЕКТРОВ

**Чернов Г.П.\*, Фомичев В.В.**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, Троицк, 108840, Россия*

*\* e-mail: [gchernov@izmiran.ru](mailto:gchernov@izmiran.ru)*

Понимание природы тонкой структуры радиоизлучения является одним из важнейших критериев проверки механизмов радиоизлучения. Дискуссия о происхождении зебра-структуры (ЗС) продолжается более 50 лет [1]. В этих работах обычно постулируется, что механизм Двойного Плазменного Резонанса (ДПР) всегда работает, если в магнитной ловушке есть быстрые частицы. Однако он сталкивается с трудностями при объяснении динамики полос ЗС (резкое изменение частотного дрейфа полос, большое число гармоник, частотное расщепление полос, их сверхтонкая структура в виде миллисекундных спайков, переход радиоволн в полосы зебры и обратно). Поэтому стали появляться работы по его усовершенствованию (в основном в десятке статей Карлицкого и Яснова). Вся игра идет на изменчивости отношения шкал высот магнитного поля и плотности и допуском некой турбулентности плазмы в источнике. Еще неясно, что отношение шкал высот может быстро меняться в петле — источнике ЗС. Ранее было отмечено, что реализация ДПР на многих гармониках циклотронной частоты сталкивается с трудностями выбора моделей плотности и магнитного поля в источнике (книга [2], стр. 215—220). Было показано, что все основные детали спорадической зебра-структуры в явлении 1 августа 2010 г. (и во многих других явлениях) удастся объяснить в рамках единой модели зебра-структуры и радиоволн при взаимодействии плазменных волн с вистлерами. Основные изменения полос зебра-структуры вызываются за счет рассеяния быстрых частиц на вистлерах, приводящих к переключению неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный.

1. Chernov G.P. 2011, Fine Structure of Solar Radio Bursts, Heidelberg, Springer. 282 p.
2. Chernov G.P. 2019, Latest data on the fine structure in solar radio emission, LAMBERT Academic Publisher, 284 pp. Riga, Latvia, [www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН АЛЬФВЕНОВСКОГО ТИПА ИЗ КОРОНЫ В ФОТОСФЕРУ СОЛНЦА И ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВСПЫШЕК

Смирнова В.В.<sup>1</sup>, Цап Ю.Т.<sup>1</sup>, Живанович И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КРАО РАН, пгт. Научный, Россия, [vsvid.smirnova@yandex.ru](mailto:vsvid.smirnova@yandex.ru)

<sup>2</sup>Astronomical Observatory of Belgrade, Belgrade, Serbia

Согласно стандартной модели солнечных вспышек, нагрев вспышечной плазмы фотосферы, ответственной за оптическое излучение, вероятнее всего, связан либо с ускоренными электронами, либо с «переизлучением» хромосферы (back-warming), либо с альфвеновскими волнами. Первый механизм из-за сильных столкновительных потерь предполагает необходимость ускорения большого числа заряженных частиц до энергий в сотни кэВ, тогда как второй – далеко не всегда может обеспечить наблюдаемые потоки оптического излучения. В связи с этим, сравнительно недавно вновь появился интерес к механизму нагрева фотосферы альфвеновскими волнами секундных периодов, предложенного в работе [1] более 40 лет назад. Между тем, вопрос о времени распространения альфвеновских волн из короны в нижнюю атмосферу Солнца до сих пор детально не рассматривался.

В представленной работе с помощью методов численного моделирования проведен анализ распространения МГД волн для модели солнечной атмосферы, предложенной в работе [2]. Получены оценки времени распространения волн альфвеновского типа с учетом различных конфигураций магнитного поля в области вспышечного энерговыделения. Найденные типичные значения времени распространения волн (минуты-десятки минут) несколько противоречат наблюдаемым особенностям вспышек в белом свете I типа с мощным оптическим излучением, и предполагают важную роль механизмов нагрева в фотосфере Солнца.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФ (No. 22-12-0030, Цап Ю.Т.).

1. Emslie, A.G., and Sturrock P.A. // Sol. Phys. 1982. V. 80. P.99.
2. Avrett E.H., Loeser R. // ApJ Suppl. Ser. 2008. V.175. P.229.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕДЛЕННЫХ ВОЛН В КОРОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ SDO/AIA

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

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [r.r.karakotov97@mail.iszf.irk.ru](mailto:r.r.karakotov97@mail.iszf.irk.ru)

Одним из проявлений медленных волн в корональных петлях являются так называемые плещущиеся («sloshing») колебания. Они представляют собой видимые в ультрафиолетовом диапазоне возмущения, перемещающиеся по петле и отражающиеся от ее оснований. Такие колебания имеют характерное время затухания порядка их периода, что позволяет наблюдать возмущение в течение нескольких периодов. Рассматриваются эти колебания, например, в работах [1]-[4]. Целью текущего исследования является проверка того, как меняются параметры колебаний от цикла к циклу. Мы представляем результаты исследования плещущихся колебаний, наблюдавшихся в промежутке 2021-2023 гг.; использованы данные SDO/AIA на длине волны 131 Å. Для каждого события при помощи построенных пространственно-временных диаграмм были определены периоды зафиксированных колебаний. Длина петли определялась по координатам ее оснований в приближении полукруглой петли для учета ее трехмерной геометрии.

При рассмотрении зависимости периода колебаний от длины петли, в которой они наблюдались, была замечена линейная связь исследуемых величин. Угол наклона соответствует скорости  $V = 446 \pm 62$  км/с (коэффициент корреляции Пирсона 0.88). Данные событий прошлого цикла (2013-2014 гг.) показывают схожее поведение (рис. 1). Отмечаем, что в работах [1]-[3] использовались данные канала 131 Å SDO/AIA, в то время как в работе [4] использовался фильтр “Be-Thin” Hinode/XRT (10 МК). В работе [4] приведены длины проекции петли, поэтому получаемые по этим данным скорости имеют значения меньшие, чем реальные, поскольку компонента скорости вдоль луча зрения не учитывается.

Таким образом, замечено, что параметры колебаний от цикла к циклу демонстрируют схожее поведение и меняются достаточно слабо.

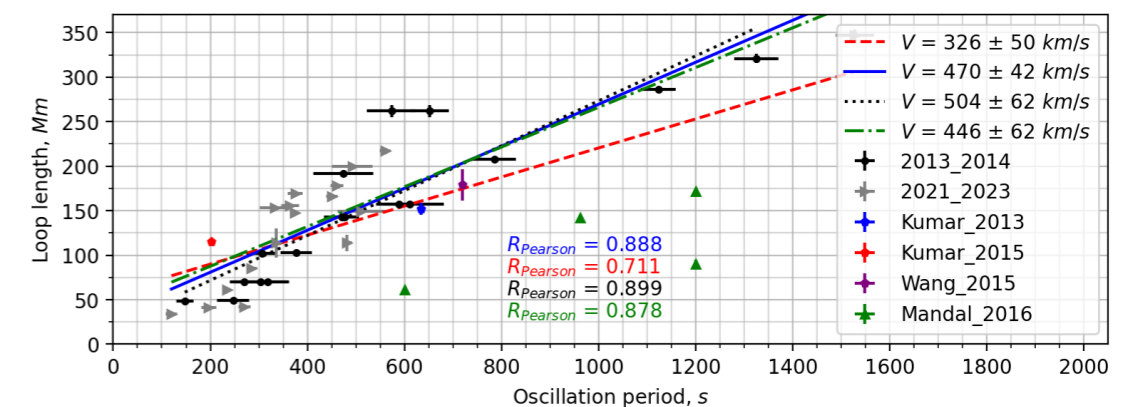


Рисунок 1. Зависимость длины петли от периода колебаний. Черная пунктирная линия обозначает линейный тренд по данным 2013-2014 гг., зеленая пунктирная линия – тренд по данным 2021-2023 гг., синяя сплошная линия – тренд по данным 2013-2014 и 2021-2023 гг., красная пунктирная линия – тренд по объединенным данным за 2013-2014, 2021-2023 гг. и работам [1-4].

1. Kumar P., D. E. Innes, B. Inhester // ApJL 2013. V. 779. L.7.
2. Kumar P., V. M. Nakariakov, Kyung-Suk Cho // ApJL 2015. V. 804. 4.
3. Wang T., Ofman L, Sun X., Provornikova E., and Davila J. M. // ApJL 2015. V. 811. L. 13
4. Mandal S., Yuan D., Fang X., Banerjee D., Pant V., Van Doorselaere T. // ApJ 2016. V. 828.



## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ НА ГРАВИТАЦИОННУЮ СТРАТИФИКАЦИЮ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Скопцова Е.В., Рящиков Д.С., Завершинский Д.И.

Самарский университет, г. Самара, Россия [lizascop88@gmail.com](mailto:lizascop88@gmail.com)

СФ ФИАН, г. Самара, Россия

Солнечная атмосфера является естественной лабораторией для изучения физики плазмы. Одной из особенностей данной среды является наличие в ней процессов нагрева и охлаждения, зависящих от термодинамических параметров плазмы. Баланс этих процессов обеспечивает существование самой солнечной атмосферы. Причем, этот баланс должен соблюдаться на различных высотах, на которых различны плотность и температура плазмы, а также величина магнитного поля. Таким образом, высотные профили термодинамических параметров должны определяться, с одной стороны, градиентом давления, вызванным солнечной гравитацией, и с другой стороны, балансом нагрева и охлаждения, мощности которых зависят, например, от плотности и температуры плазмы. В случае нагрева и охлаждения, заданных в виде степенных функций температуры и плотности, были получены аналитические профили термодинамических параметров от высоты и показана их зависимость от показателей степеней.

В работе [1] было предложено использовать наблюдательные данные о высотных профилях температуры и плотности в гравитационном поле Солнца для получения информации о нагреве солнечной короны. В предположении, что в областях спокойного Солнца и долгоживущих корональных структурах мощности нагрева и охлаждения среды равны, показано, что высотные профили температуры и плотности определяются видом функциональных зависимостей нагрева и охлаждения от плотности и температуры среды.

В текущей работе используется известная модель охлаждения среды, рассчитанная с помощью базы данных CHIANTI [2], и полученные на основании измерений в статье [3] высотные профили температуры и концентрации электронов. Функция нагрева была смоделирована в виде степенной зависимости от температуры и плотности и найдены такие показатели степеней, при которых реализуются наблюдаемые высотные профили и среда является устойчивой. Кроме того, для рассматриваемых областей были рассчитаны характерные времена затухания МГД-волн, связанные с эффектом теплового дисбаланса.

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

1. Riashchikov D.S., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. // MNRAS 2023, V. **522**. P. 572
2. Del Zanna G., K.P.Dere, P.R.Young, E.Landi // ApJ 2021, V. **909**. P. 38.
3. D.J. Pascoe, A.Smyrli, T. Van Doorsselaere // ApJ 2019, V. **884**. P. 43.

## ИЗУЧЕНИЕ ДИСПЕРСИИ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МАГНИТНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛООВОГО ДИСБАЛАНСА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Агапова Д.В.<sup>1,2</sup>, Молевич Н.Е.<sup>1,2</sup>, Завершинский Д.И.<sup>1,2</sup>, Белов С.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский университет, г. Самара, Россия, [agapovadaria2019@gmail.com](mailto:agapovadaria2019@gmail.com);

<sup>2</sup> СФ ФИАН, г. Самара, Россия;

Изучение физических процессов, происходящих в солнечной атмосфере, представляет собой важную область солнечной физики. Одним из ключевых аспектов этого исследования является анализ магнитоакустических (МА) волн, их взаимодействие с механизмами теплопроводности, а также явлений затухания волн, связанные с эффектами, присущими солнечной короне, нагреву и радиационному охлаждению. Корональное радиационное охлаждение зависит от плотности и температуры, в то время как нагрев плазмы до сих пор является предметом исследований и часто моделируется как функция плазменных параметров. Зависимость мощности нагрева и охлаждения от термодинамических параметров плазмы может привести к возмущениям баланса между этими процессами, что в свою очередь приводит к тепловому дисбалансу, влияющему на доминирование нагрева или охлаждения. Таким образом, возникает положительная или отрицательная обратная связь между возмущениями и окружающей средой, что влечет за собой усиление или затухание волн, а также изменение их фазовой скорости.

Для изучения совместного воздействия теплопроводности и теплового дисбаланса на МА-волны, на основе предположения о сильном магнитном структурировании, получены дисперсионные соотношения для изгибных и осесимметричных волн, распространяющихся внутри плазменного слоя. Путем численного решения уравнений для параметров солнечной короны было установлено, что фазовая скорость медленных МА-волн подвержена влиянию как дисперсии из-за конечной ширины плазменного слоя, так и дисперсии, вызванной наличием неадиабатических процессов, таких как теплопроводность, нагрев и охлаждение. Основное влияние теплового дисбаланса приходится на длинноволновую часть спектра. Так длинноволновым пределом является не классическое выражение для адиабатической трубной скорости, а модифицированное выражение, учитывающее влияние мощностей нагрева и охлаждения плазмы. В коротковолновом пределе фазовая скорость медленных магнитоакустических волн отличается от случая магнитноструктурированной плазмы, где учитывается только тепловой дисбаланс, в частности, изотермическая звуковая скорость стала коротковолновым предельным значением для фазовой скорости медленных волн, что можно объяснить только наличием теплопроводности в уравнении переноса тепла.

Рассмотренные в данной работе механизмы нагрева, предполагали затухание всех мод сжатия. При учете теплопроводности как неадиабатического процесса зависимость декремента медленных волн от волнового числа изменяется: декремент увеличивается до определенного волнового числа из-за теплового дисбаланса, после чего происходит его дальнейшее увеличение из-за наличия теплопроводности. Таким образом, учет теплопроводности для описания волн в термически активном магнитном слое оказывает важное влияние на затухание и фазовую скорость медленных волн в высокочастотном пределе. Зависимость инкремента/декремента быстрых МА-волн становится монотонной и при достижении определенного значения больше не стремится к нулю в высокочастотном пределе как случае, когда учитывается только тепловой дисбаланс, а также увеличивается.

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

## АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ СЛАБЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ИНИЦИИРОВАННЫХ В ОСНОВАНИИ ГОРЯЧИХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

**Фролова А.С., Завершинский Д.И.**

Самарский национальный исследовательский университет, г. Самара, Россия,  
[ArtificialDarkness@yandex.ru](mailto:ArtificialDarkness@yandex.ru)

Магнитоакустические (МА) волны наблюдаются в различных областях солнечной короны. Большое количество полученных данных позволяет использовать МА волны в качестве диагностического инструмента корональной плазмы и ее структур, таких как корональные петли.

Рассматривая динамику плазмы в приближении бесконечно сильного магнитного поля с помощью теории возмущений может быть получено эволюционное уравнение, описывающее динамику медленных МА волн в линейном приближении. Для диагностики плазмы обычно применяют дисперсионное уравнение, соответствующее эволюционному уравнению. И в частности, используют дисперсионные характеристики медленных МА волн для анализа наблюдений. Такой подход применим только тогда, когда наблюдаемое возмущение может быть однозначно проассоциировано только с данной волной. Однако, фактически в корональной петле существуют не только магнитоакустические волны, но и энтропийные волны, и наблюдаемое возмущение является суперпозицией данных волн. Вследствие этого наблюдаемое затухание возмущения, например, плотности, определяется не только декрементом обеих волн, но и начальным распределением энергии между ними. Для получения данной информации уже необходимо использовать точное, а не частное решение эволюционного уравнения.

В данной работе рассматривалась граничная задача об эволюции возмущения сжатия. Было получено решение эволюционного уравнения для медленных МА волн в корональных петлях в рамках приближения бесконечно сильного. Рассматривался случай коротких волн, для которых влияние процессов нагрева и радиационного охлаждения пренебрежимо мало. Гравитационная стратификация не учитывалась. Основным механизмом затухания волн считалось затухание посредством теплопроводности. Для получения точного решения использовался метод разделения переменных (метод Фурье) и принцип Дюамеля. С помощью полученного решения была исследована различных типов начальных возмущений заданных на границе.

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

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ В КОРОНЕ СОЛНЦА И СКРУЧЕННОСТЬ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

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

КрАО РАН, пгт. Научный, [yur\\_crao@mail.ru](mailto:yur_crao@mail.ru)

В соответствии с парадигмой Паркера [1], магнитные трубки фотосферы Солнца представляют собой изолированные образования, для которых внешним магнитным полем можно пренебречь. В частности, считается, что полный продольный электрический ток, протекающий через сечение трубки, равен нулю из-за экранировки внешнего магнитного поля поверхностным (нейтрализующим) током, а определяемые из измерений поперечной компоненты магнитного поля вертикальные фотосферные токи активных областей являются артефактом. Если же продольный ток магнитной трубки отличен от нуля, то его называют не-нейтрализованным (некомпенсированным) [2], и, по мнению некоторых авторов, он может быть ответствен за вспышечное энерговыделение и корональные выбросы массы [3]. Между тем изучение электрических токов в солнечной короне вызывает большие трудности. Вплоть до настоящего времени наиболее надежным индикатором корональных электрических токов являются спиралеобразные волокнистые структуры, отождествляемые со скрученностью магнитных силовых линий корональных петель, которые довольно редко наблюдаются как в ультрафиолетовом, так и оптическом диапазоне. Это предполагает необходимость разработки новых методов диагностики корональных токов, основанных на изучении условий стабилизации наиболее легко возбуждаемых МГД неустойчивостей петель, к которым можно отнести винтовую (изгибающую) моду.

Ранее на основе вариационного принципа в рамках идеальной МГД нами было показано, что экранированные токовые жгуты с нейтрализованными продольными токами должны быть устойчивы по отношению к винтовым модам [4]. Это предполагает, что число витков магнитных силовых линий вокруг оси трубки  $N$  может быть сколь угодно большим. В свою очередь, для неэкранированных жгутов с не-нейтрализованными токами последнее утверждение также остается в силе из-за стабилизирующего действия, как считалось ранее, азимутального поверхностного тока [5]. Однако в работе [5] мы ограничились лишь поиском собственных значений системы линеаризованных МГД уравнений. В представленной работе с помощью энергетического метода в приближении тонкой магнитной трубки проведен анализ собственных мод изгибающих колебаний токового жгута с некомпенсированным электрическим током в условиях солнечной короны. Показано, что собственные функции наряду с собственными значениями накладывают дополнительные ограничения на условия возбуждения винтовой МГД устойчивости магнитных жгутов. Полученные аналитические оценки и наблюдаемая слабая скрученность корональных петель с типичными значениями  $N < 2-3$  свидетельствуют о доминировании некомпенсированных электрических токов в короне Солнца.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ (№. 22-12-00308, Цап Ю.Т., Степанов А.В.).

1. Parker E.N. // ApJ 1996. V.471. P.485.
2. Stepanov A.V., Zaitsev V.V. // Ge&Ae 2016. V.56. P.952.
3. Melrose D.B. // ApJ 1991. V.381. P.306.
4. Tsap Y., Fedun V., Cheremnykh O. et al. // ApJ 2020. V.901. P.99.
5. Tsap Y., Stepanov A., Kopylova Y. // ApJ 2022. V.114. P.939.

## ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОГО НАГРЕВА КОРОНЫ СОЛНЦА

Мерзляков В.Л.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [mvl@izmiran.ru](mailto:mvl@izmiran.ru)

Исследования температурного распределения солнечной короны выявили зоны экстремальной электронной температуры  $\sim 10$  МК. Эти зоны располагались на трех дискретных уровнях в интервале расстояний 1.3 – 2.7 радиусов Солнца от центра. На этих уровнях электронная температура имела два максимума на средних гелиоширотах и один в приэкваториальной области. Очевидно, что в областях, где наблюдаются эти максимумы, происходит выделение энергии. Особенности такого выделения были изучены на основе модельных построений и наблюдаемых величин температурных экстремумов. Оказалось, что величина электронной температуры зависит от скорости медленной магнитозвуковой волны. И амплитуда этой волны пропорциональна корню квадратному из величины локальной электронной плотности.

## НАБЛЮДЕНИЕ СТРУКТУРЫ СУБСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В РАДИОИЗЛУЧЕНИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОЧЕК В ДИАПАЗОНЕ 1-3 ГГц

Богод В.М., Овчинникова Н.Е., Лебедев М.К., Кальтман Т.И.

САО РАН, Санкт-Петербургский филиал, г. Санкт-Петербург, Россия, [vbog\\_spb@mail.ru](mailto:vbog_spb@mail.ru)

При наблюдениях Солнца на РАТАН-600 с использованием спектрополяриметрического комплекса диапазона 1-3 ГГц 16 марта 2023 года в диапазоне 1-1.5 ГГц наблюдались импульсы радиоизлучения J-формы длительностью 0.5 с и шириной 200-300 МГц, совпавшие по времени с динамическим развитием рентгеновских точек (X-Ray bright points), зарегистрированных AIA (SDO) в нескольких линиях.

Вероятно, энерговыделение в области рентгеновских точек было вызвано локальным магнитным пересоединением и сопровождалось ускорением электронов и образованием плазменной турбулентности. Рассеяние нетепловых электронов и плазменных волн на турбулентных колебаниях электрического и магнитного полей предположительно привели к возникновению наблюдаемого на РАТАН-600 некогерентного электромагнитного излучения, (например, плазменного или переходного излучения).

## КАТАЛОГ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

Рожкова Д. В., Кашапова Л.К.

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

Мы представляем первые результаты работы над каталогом солнечных вспышек, наблюдавшихся на Сибирском радиогелиографе. Для отбора событий-кандидатов предложена методика, основанная на анализе поведения производной временного профиля микроволнового излучения. На первом этапе, для каждой спектральной полосы (частоты или диапазона длин волн) вычисляется стандартное отклонение производной для интервала времени, где отсутствуют события. Если значения производной временного профиля находятся вне интервала, определяемого как три значения стандартного отклонения, то принимается, что наблюдалось событие. Начало события определяется как момент времени, где производная меняет знак на положительный, а конец события - момент, где производная перестает быть отрицательной. Момент максимума определяется как максимальное значение временного профиля между найденными моментами начала и окончания события.

Методика протестирована на данных КА GOES и применена для наблюдений в диапазоне 3-24 ГГц Сибирского радиогелиографа. Обсуждаются результаты сравнения отобранных событий со списком событий КА GOES, возможные формы визуализации результата отбора, а также пути улучшения методики.

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

## Рентгеновские вспышки на фазе спада 24-го цикла: энергия и пространственное расположение

*З.С. Ахтемов, В.А.Перебейнос*

На фазе спада 24 цикла солнечной активности (2015 – 2017гг, кэррингтоновские обороты CR 2164 – CR 2188) рассмотрены 1371 оптических вспышек, сопровождавшихся рентгеновским излучением мощностью  $f \geq 10^{-7} \text{ w m}^{-2}$  в диапазоне 1 – 8 Å. Числовой ряд мощности вспышек, соответственно и сами вспышки разделены на 2 группы с  $10^{-7} \text{ w m}^{-2} \leq f < 5 * 10^{-6} \text{ w m}^{-2}$  и  $5 * 10^{-6} \text{ w m}^{-2} \leq f$ . При сравнении характеристик вспышек первой группы (количество их - 1184) получено, что на данном промежутке времени в S-полусфере Солнца больше суммарная мощность вспышек, чем в N-полусфере. Зарегистрировано 607 вспышек в N-полусфере и 577 в S-полусфере, но суммарная мощность их соответственно равна  $8.8 * 10^{-4} \text{ w m}^{-2}$  и  $9.6 * 10^{-4} \text{ w m}^{-2}$ . Для второй группы вспышек (количество- 187), S-полусфера Солнца более активна как по числу, так и по мощности вспышек, чем N-полусфера. Зарегистрировано 74 вспышек в N-полусфере и 113 в S-полусфере, их суммарная мощность соответственно равна  $9.5 * 10^{-4} \text{ w m}^{-2}$  и  $14.5 * 10^{-4} \text{ w m}^{-2}$ . Для рассматриваемых нами данных по вспышкам на Солнце (за 2 года наблюдений) можно выделить несколько долготных интервалов с повышенной вспышечной активностью. Они существуют в течении всего периода времени с июня 2015 по июнь 2017 года. Активные долготы в одной полусфере в это же время, с большой вероятностью, являются долготами с низкой вспышечной активностью в другой полусфере.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МЕРЫ ЭМИССИИ НАНОВСПЫШЕК С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА SITES

Завершинский Д.И.<sup>1,2</sup>, Белов С.А.<sup>1,2</sup>, Леденцов Л.С.<sup>1,3</sup>, Богачев С.А.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет, г. Самара, Россия, [zavershinskiy.di@ssau.ru](mailto:zavershinskiy.di@ssau.ru)

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Самара

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, г. Москва

<sup>4</sup>Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва

Плазма солнечных вспышек и, по всей видимости, нановспышек, имеет сложное распределение по температуре, характеризующееся так называемой дифференциальной мерой эмиссии (ДМЭ). Определение ДМЭ является важной задачей, поскольку позволяет получить информацию о распределении электронов по температуре. Тем не менее, данное определение может быть только приблизительным, из-за ограничений наблюдений, связанных с нехваткой линий и из-за ширины функции отклика телескопа.

В данном исследовании мы восстанавливаем ДМЭ солнечных нановспышек с помощью метода SITES, который ранее применялся только для обычных и крупных вспышек. Результаты нашего анализа подтверждают характерный диапазон температуры нановспышек в 1-2 млн. К. Восстановленные нами ДМЭ нановспышек в основном имеют один максимум, расположенный в данном температурном диапазоне. Построенное нами распределение вспышек по температуре состоит из двух максимумов около 1.2 и 1.7 млн. К, соответственно. По нашему мнению, данный факт может быть возможным свидетельством существования двух типов солнечных нановспышек, однако данное утверждение требует дополнительного исследования.

Кроме того, мы исследовали точность метода SITES и в результате чего показали, что методы определения ДМЭ, разработанные для обычных вспышек, такие как SITES, хорошо применимы для нановспышек в однопиковом приближении, однако, в двухпиковых и иных приближениях могут давать некорректные результаты.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 22-22-00879).

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ ЖГУТОВ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ ВО ВСПЫШЕЧНО-АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ

Бакунина И.А.<sup>1</sup>, Мельников В.Ф.<sup>2</sup>, Шаин А.В.<sup>2</sup>, Кузнецов С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия, [rinbak@mail.ru](mailto:rinbak@mail.ru)

<sup>2</sup>ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Хорошей количественной характеристикой магнитных жгутов в атмосфере активных областей на Солнце является ротор магнитного поля  $rot \mathbf{B}$ , восстановленного в нелинейном бессиловом приближении на основе векторных магнитограмм фотосферного поля на основе данных SDO/HMI. Эту характеристику можно использовать как для поиска и идентификации магнитных жгутов, так и для анализа пространственной структуры поля электрических токов в активной области, учитывая, что плотность тока  $\mathbf{j} = c/4\pi \cdot rot \mathbf{B}$ .

В данной работе для анализа пространственной структуры магнитных жгутов и электрических токов во вспышечно-активных областях мы рассмотрели две активные области (АО), в которых произошли рентгеновские вспышки класса М. Одна из них сопровождалась СМЕ, а другая не сопровождалась. Проведённый анализ геометрии и величин электрических токов показал, что поле электрических токов представляет собой дискретные отчётливо различимые петлеобразные структуры. Их пространственные масштабы варьируются от 2 до 80 тыс. км. Токи большой величины (5-20 тыс. статА/см<sup>2</sup>) сконцентрированы в относительно тонких вытянутых структурах и располагаются довольно низко в короне (высоты 2000-8000 км). Электрические токи малой величины ( $j < 0.6$  тыс. статА/см<sup>2</sup>) протекают в высоких токовых арках (до высот 30 тыс. км). Такие токовые арки часто ориентированы квазиперпендикулярно тонким токовым волокнам с сильным током.

В рассмотренных АО ярко выраженные магнитные жгуты обнаружены не только в области максимальной яркости вспышки, но и в других местах АО. Причём, они существуют как до, так и после вспышки. Установлено, что вспышка без СМЕ произошла в закрытой магнитной конфигурации с магнитными жгутами, ориентированными почти перпендикулярно к вышележащим магнитным аркам. Вспышка с СМЕ произошла в той области, где наблюдается практически параллельное расположение магнитного жгута к вышележащим магнитным силовым линиям.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ИСТОЧНИКОВ МИКРОВОЛНОВОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ЛИМБОВОЙ ВСПЫШКИ 5 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА

Шамсутдинова Ю.Н.<sup>1</sup>, Ли Дж.<sup>2</sup>, Кашапова Л.К.<sup>1</sup> и Су Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [yulia@iszf.irk.ru](mailto:yulia@iszf.irk.ru)

<sup>2</sup> Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, China

Мы представляем результаты исследования динамики ускорения и высыпания электронов во время солнечной лимбовой вспышки 5 февраля 2023 года. Событие было зарегистрировано Сибирским Радиогелиографом (СРГ) на частотах 3-12 ГГц и Advanced Space-based Solar Observatory / Hard X-ray imager (ASO-S/HXI) в диапазоне 10-300 кэВ. Сопоставление структуры вспышечных источников, наблюдавшихся в двух диапазонах позволило выявить пространственную структуру вспышечной петли и установить, что она представляла собой маленькую компактную петлю. Спектральный анализ микроволнового излучения на начальной фазе развития вспышки позволил выявить переход гиросинхротронного излучения вспышки от тепловых электронов к излучению нетепловых электронов. Результаты спектрального и пространственного анализа излучения вспышки обсуждаются с точки зрения сценария высвобождения энергии во время солнечной вспышки и стандартной модели вспышки.

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

## СОЗДАНИЕ КАТАЛОГА НАБЛЮДЕНИЙ МГД ВОЛН В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ

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

СФ ФИАН, Самарский университет, г. Самара, Россия, [ryashchikovd@gmail.com](mailto:ryashchikovd@gmail.com)

Данная работа посвящена изучению МГД волн и осцилляций, широко распространенных в магнитных структурах солнечной короны. Свойства наблюдаемых волн являются отражением свойств структур, внутри которых они распространяются, а также следствием протекающих в корональной плазме физических процессов. Следовательно, с помощью наблюдений волн можно получить дополнительную информацию как о свойствах корональных структур, так и о процессах, в них протекающих.

В рамках данной работы на основе открытых литературных источников был создан каталог наблюдений МГД волн в солнечной короне (<https://tinyurl.com/276b2jh9>). Каждая запись каталога состоит из трех частей: параметров наблюдаемого волнового процесса (тип (стоячая волна, бегущая волна, sloshing wave), период, длина волны, фазовая скорость, время затухания и т. д.), параметров волновода (корональное перо или корональная петля, характерные размеры, температура и величина магнитного поля) и информации об использованном литературном источнике. Затем был создан алгоритм для обработки изображений с космического аппарата SDO, который позволяет определять в событиях из каталога информацию о периоде и времени затухания волнового процесса, фазовой скорости распространения возмущения, а также получать временные профили температуры и электронной концентрации.

Последующая обработка данных будет производиться с помощью фитирования наблюдений полученным в текущей работе аналитическим решением эволюционного уравнения [1]. Это позволит оценить такие свойства среды, как коэффициент теплопроводности, обобщенный показатель адиабаты и оценить возможные значения степеней плотности и температуры в функции нагрева.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10008 (<https://rscf.ru/project/23-22-10008/>) и Правительства Самарской области.

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

## ЭФФЕКТЫ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

**Косовичев А.Г., Садыков В.М., Стефан, Д.**

*Техн. Инст. Нью-Джерси, Универ. Джорджия, США, [alexander.g.kosovichev@njit.edu](mailto:alexander.g.kosovichev@njit.edu)*

Наблюдения на Обсерватории Солнечной Динамики (SDO) выявили класс солнечных вспышек со значительным воздействием энергии и импульса на фотосферу, приводящим к излучению в белом свете и возбуждению гелиосейсмических волн, известными как солнцетрясения. Детальный спектро-поляриметрический анализ фотосферных источников в линии Fe I 6173Å выявил импульсные изменения излучения в континууме с быстрым ростом и медленным затуханием длительностью 3-4 минуты, совпадающими по времени с импульсами жесткого рентгеновского излучения, наблюдаемого прибором «Конус» на борту космического аппарата «Винд». Наиболее существенной особенностью вариаций профиля линии является кратковременная эмиссия в ядре линии, указывающая на интенсивный импульсный нагрев нижней хромосферы и фотосферы. Моделирование взаимодействия ускоренных частиц с атмосферой Солнца показало, что только модели с протонными пучками, проникающими в глубокие слои, могут объяснить наблюдаемые спектральные вариации и возбуждение сейсмических волн. Дополнительное моделирование эффектов протонных пучков выявило возможный механизм формирования быстрых корональных и хромосферных возмущений – волн Мортонна («солнечных цунами»).

1. Kosovichev A.G., Sadykov V.M., Stefan J. // *Astrophys. J.* 2023. V. **958**. id. 160.
2. Sadykov V.M., Stefan J., Kosovichev A.G., et al. // *Astrophys. J.* 2024. V. **960**. id. 80.

## СТАТИСТИКА СОЛНЕЧНЫХ ДЖЕТОВ ВУФ ДИАПАЗОНА

**Лобода И.П., Богачев С.А., Кириченко А.С., Рева А.А., Ульянов А.С.**

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ivan.loboda@cosmos.ru](mailto:ivan.loboda@cosmos.ru)*

Солнечные джеты ВУФ диапазона, часто также называемые макроспикулами, занимают промежуточное положение между хромосферными спикулами и корональными рентгеновскими джетами. Несмотря на то, что они наблюдаются несколько десятилетий, эта разновидность солнечных джетов остаётся сравнительно малоизученной, что во многом обусловлено широкой вариацией их характеристик, затрудняющей идентификацию и моделирование. В частности, не ясно, обусловлены ли они единым механизмом формирования.

Данное исследование основано на большом массиве наблюдений SDO/AIA в каналах 304, 171 и 193 Å, полученных с 2010 по 2016 г., и использовании пространственно-временных карт в канале 304 Å для регистрации всех наблюдающихся джетов за лимбом. Это позволило идентифицировать более 200 различных джетов, для которых были определены их основные пространственные, динамические и морфологические характеристики. Помимо этого, по наблюдениям в «горячих» каналах AIA 171 и 193 Å изучалось наличие в них плотной хромосферной компоненты и высокотемпературного коронального вещества. На основе полученных данных было выделено несколько групп джетов, существенно различающихся по своим характеристикам и, вероятно, имеющие различный механизм формирования.

Первая группа представляет собой узкие (3-5 тыс. км), коллимированные потоки вещества, сонаправленные линиям магнитного поля, и не имеющие различимой внутренней структуры. Среди наблюдавшихся событий такие джеты имеют наименьшую высоту (около 25 тыс. км), и практически не видны в «горячих» каналах AIA, что также говорит об их сравнительно низкой температуре и плотности. Помимо этого, такие джеты в большинстве случаев характеризуются параболическими профилями движения их вершин, при том что соответствующие значения ускорения в отдельных случаях превышают ускорение свободного падения, а также наблюдается сильная корреляция между начальной скоростью движения и ускорением, аналогичная той, что была зарегистрирована для хромосферных спикул, и которая может быть объяснена в рамках модели ускорения вещества ударными магнитозвуковыми волнами. По этой причине мы полагаем, что именно данная группа джетов больше всего заслуживает названия макроспикул.

Джеты из второй группы имеют заметно больший размер (ширина около 15 тыс. км., высота 40–60 тыс. км) и обладают сложной внутренней структурой и динамикой, характеризующейся вращением заполненных плазмой протяжённых структур. У таких джетов часто имеется плотное ядро в виде эруптивного минифиламента, видимое в поглощении в «горячих» каналах AIA, а также наблюдаются более быстрые потоки горячего коронального вещества на начальной фазе движения, видимые в излучении. Таким образом, в формировании данной разновидности джетов, по всей видимости, активную роль играют процессы магнитного прересоединения и перестройки лежащей в их основе конфигурации магнитного поля, происходящие вследствие эрупции мелкомасштабных филаментов. Интересно также, что взаимосвязь ряда масштабных характеристик этих джетов продолжает обнаруженные ранее закономерности для мелкомасштабных спокойных и эруптивных протуберанцев.

Наконец, была идентифицирована промежуточная группа джетов, имеющих вид нескольких коллинеарных потоков вещества, и по своей динамике схожих с первой группой джетов, но являющихся значительно более крупными, приближаясь по данной характеристике ко второй группе. В то же время такие джеты не отличаются параболическими профилями движения, и имеют лишь слабое поглощение в «горячих» каналах. Механизм формирования этих джетов остаётся неясным и требует дальнейшего изучения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-10157, <https://rscf.ru/project/21-72-10157>.

## АССОЦИАЦИЯ ВСПЫШЕК С КВМ И РОЛЬ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В УСКОРЕНИИ КВМ

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

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [reva.antoine@gmail.com](mailto:reva.antoine@gmail.com)

Вопрос ассоциации корональных выбросов массы (КВМ) с солнечными вспышками связан с вопросом необходимости пересоединения для эрупции КВМ. Действительно, если пересоединение происходит во время развития КВМ, то оно нагреет плазму, которая будет наблюдаться как вспышка.

В данной работе мы исследуем ассоциацию КВМ с солнечными вспышками, используя данные спектрогелиографа Mg XII, который работал на спутнике КОРОНАС-Ф. На изображениях спектрогелиографа присутствует сигнал только от плазмы с температурой более 4 МК, что делает его удобным инструментом для детектирования вспышечной активности.

Во время нашего анализа мы сперва осуществили поиск КВМ, которые были зарегистрированы коронографами LASCO в то время, когда работал спектрогелиограф Mg XII. Затем мы визуально проверили изображения Mg XII на наличие вспышечной активности.

Мы обнаружили, что во время наблюдения спектрогелиографа Mg XII (2001-2003) LASCO зарегистрировал 198 КВМ. Из них 160 (81%) были ассоциированы со вспышками, наблюдавшимися на изображениях Mg XII. GOES класс вспышек, ассоциированных с узкими КВМ (джето-образные эруптивные явления), равномерно распределен в диапазоне А-С. Скорость узких выбросов не зависит от силы вспышек. GOES класс вспышек, ассоциированных с нормальными КВМ (движение магнитного поля и плазмы, «классические» КВМ), распределен в диапазоне А-Х с пиком в районе С класса. Медианная скорость (рассчитанная в пределах одного класса вспышек) нормальных КВМ слабо зависит от силы вспышки для слабых вспышек (класс С и ниже) и сильно для мощных вспышек (класс М и Х).

Наши результаты показывают, что в солнечном максимуме пересоединение происходит во время большинства КВМ. Во время сильных вспышек (класс М и Х) вспышечное пересоединение это доминирующий механизм ускорения КВМ. Для слабых вспышек (класс С и ниже) другие механизмы начинают играть главенствующую роль.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-72-10157).

## НЕОБХОДИМОСТЬ МОДЕЛИ НЕОДНОРОДНЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАДФОТОСФЕРНОГО ГАЗА В ЛИНИЯХ ВОДОРОДА, ГЕЛИЯ И КАЛЬЦИЯ

Малютин<sup>1</sup> В.А., Белова<sup>1</sup> О.М., Бычков<sup>2</sup> К.В., Купряков<sup>2</sup> Ю.А., Горшков<sup>2</sup> А.Б.

<sup>1</sup>Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [malyutin@list.ru](mailto:malyutin@list.ru)

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

В настоящем докладе излагаются результаты моделирования свечения вещества в линиях атомов водорода, гелия и иона CaII для условий протуберанцев и хромосферных вспышек. Расчёты проведены для протуберанца 22.10.2013 и вспышки 27.04.2012. Моделируется излучение в линиях бальмеровской серии водорода H $\alpha$ , H $\beta$ , H $\gamma$ , линиях HeI D3, CaII H и CaII  $\lambda$ 8542. Особенность расчётов оптического излучения в линиях протуберанцев и хромосферных вспышек заключается в необходимости учёта химической кинетики многих возбуждённых состояний. Например, согласно критерию Инглиса-Теллера у водорода при электронной плотности не выше  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  реализуется более тридцати дискретных уровней. Мы изучили влияние числа учитываемых уровней N на спектр излучения бальмеровской серии и убедились, что при N>18 дальнейшее увеличение N практически не меняет величину состояния ионизации водорода и теоретического потока в бальмеровских линиях. Это обусловлено термализацией дискретных уровней процессами ударной ионизации и тройной рекомбинации [1]. Для водорода мы приняли N=18, у атома гелия учитывались 29 уровней, у иона кальция — 22 уровня.

Выполнены расчёты населённостей дискретных уровней и состояния ионизации при известной электронной температуре, турбулентной скорости, концентрации и толщине слоев газа, а также заданном поле излучения. Включены связанно-связанные, свободно-связанные и связанно-свободные ударные и радиационные переходы. Поле излучения принято чернотельным. Для водорода и гелия температура излучения принята равной 5500 К. В случае иона CaII она варьировалась с учётом возможного вклада хромосферного излучения в линиях лаймановской серии, начиная с Ly $\beta$ . Рассеяние в линиях учитывалось в рамках модели Бибермана-Холстейна-Соболева, для гелия взят профиль Фойгта, для иона кальция - доплеровский профиль, для водорода - свёртка доплеровского и хольцмарковского контуров. Теоретические параметры подбирались таким образом, чтобы вычисленные потоки излучения в линиях максимально приближались к наблюдаемым.

Получены следующие результаты.

- 1) Наблюдаемые потоки в линиях нельзя объяснить в рамках однородной модели ни при каком наборе параметров.
- 2) Относительные потоки в линиях объясняются в модели двух- или трёхслойных облаков, при этом полное теоретическое излучение протуберанца равно наблюдаемому, а излучение вспышки - в несколько раз меньше наблюдаемого.
- 3) Следовательно, во вспышке мы наблюдаем суммарное излучение нескольких (от пяти до десяти) облаков, не накладывающихся друг на друга по лучу зрения. Каждое облако даёт лишь часть полного потока.
- 4) Концентрация газа вспышки 27.04.2012 превышает  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , что на два порядка величины больше типичного значения для протуберанцев. Следовательно, газ вспышки происходит не из протуберанца. Возможно, он является следствием выброса из участка хромосферы на высоте около 500 км.

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



## ДИНАМИКА РАЗМЕРОВ ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЕЛЬ

Мельников В.Ф., Мешалкина Н.С.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [v.melnikov@gaoran.ru](mailto:v.melnikov@gaoran.ru)

В 2000-х годах в солнечных вспышках было открыто явление сокращения размеров вспышечных петель на импульсной фазе вспышки и увеличение размеров петель на фазе спада вспышек [1]. В нашей недавней работе [2] рассмотрена вспышка 15 января 2022 г, в которой обнаружен противоположный процесс: подъём петли на фазе роста вспышки и опускание петли на фазе спада. Мы интерпретировали такую пространственную динамику вспышечной петли резким увеличением вихревой компоненты магнитного поля  $B_\varphi$  (и, соответственно, электрического тока) в петле в самом начале вспышки в результате наблюдаемого слияния двух петель разных размеров вблизи одного из оснований большей из них, и, наоборот, уменьшением  $B_\varphi$  (и тока) из-за джоулевых потерь на фазах максимума спада вспышки.

В данной работе мы представляем ещё один пример сокращения размера корональных петель на фазе спада вспышки. Это явление было обнаружено во вспышке 24 февраля 2023 г. На основе анализа ультрафиолетового излучения по фильмам AIA/SDO установлено, что уменьшение высоты корональных петель на фазе спада мощности вспышки происходило со скоростью от ~5 до 25 км/с, близкой к величине, установленной нами ранее для вспышки 15.01.2022 г. Отличительной особенностью этого явления во вспышке 24.02.2023 г. явилось то, что резкое уменьшение высоты совпадает по времени с длинной серией ярких нестационарных выбросов горячей ( $T \sim 10^7$  К) плазмы, наблюдаемых в непосредственной близости от изучаемой системы петель. В связи с этим быстрое сжатие системы петель объяснено уменьшением свободной магнитной энергии (уменьшением вихревой компоненты их магнитного поля), вызванной наблюдаемыми нестационарными эрупциями плазмы с замороженным магнитным полем из окрестностей этих петель.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-12-00308.

1. Sui, L., & Holman, G. D.. ApJ, 2003,596, L251
2. Melnikov V.F., Meshalkina N. S. // Geomag. Aeronomy, 2023, 63, 192

## МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРИОДА ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Леденцов Л.С.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, [leonid.ledentsov@gmail.com](mailto:leonid.ledentsov@gmail.com)

С целью анализа современных спутниковых наблюдений аркад вспышечных корональных петель предложен метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках. Метод основывается на применении Фурье анализа к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Работа метода продемонстрирована на примере наблюдения Бастильской вспышки с космического аппарата TRACE в канале 171 Å. Среднее значение пространственного периода энерговыделения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составляет 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-72- 30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/> ).

*Леденцов Л. С. Метод оценки пространственного периода энерговыделения в солнечных вспышках // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. — 2023. — т. 49, № 11, с. 819-828 [ <https://elibrary.ru/RYSFIE> ]*

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”

Тулник Е.Д., Логачев В.И., Махмутов В.С., Филиппов М.В., Квашнин А.А., Разумейко М.В., Соков С.В., Мизин С.В.

ФИАН, г. Москва, Россия, [e.tulnikov@lebedev.ru](mailto:e.tulnikov@lebedev.ru)

В работе представлен краткий обзор современных исследований радиоизлучения Солнца и солнечных вспышек в области частот, прилегающей к неисследованному терагерцевому диапазону волн ( $10^{12}$ - $10^{13}$  Гц). Описаны основные научные задачи проекта “Солнце-Терагерц”. В рамках указанного проекта в ФИАН проводится изготовление научной аппаратуры (НА) для установки на Российском сегменте МКС.

Оптическая система каждого из восьми приемников излучения НА состоит из системы зеркал, оптического прерывателя, отрезающего и полосового фильтров. Для каждого элемента данной системы получены спектральные характеристики. При калибровке прибора используется источник – имитатор черного тела (ИЧТ), поэтому методами численного интегрирования рассчитывалась интенсивность излучения от ИЧТ, которая проходит через систему фильтров. Для оценки характерного сигнала от спокойного Солнца методами численного интегрирования рассчитывалась интенсивность излучения, проходящая через систему фильтров с использованием стандартного солнечного спектра ASTM E-490 [1].

1. 2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00. (n.d.). Grid Modernization NREL. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>

## О ПРИРОДЕ СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 04.05.2022 НА ФАЗЕ СПАДА

Моторина Г.Г., Цап Ю.Т., Смирнова В.В., Моргачев А.С.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [g.motorina@yandex.ru](mailto:g.motorina@yandex.ru)

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

Настоящая работа направлена на анализ послеимпульсной фазы солнечной вспышки SOL2022-05-04T08:45 рентгеновского класса M5.7, зарегистрированной на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частоте 93 ГГц. Исследуется связь суб-терагерцевого (суб-ТГц) и крайнего ультрафиолетового излучения (94, 131, 171, 193, 211 и 335 Å) с вариациями температуры и меры эмиссии корональной плазмы по данным AIA/SDO и GOES. На основе расчета дифференциальной меры эмиссии сделан вывод о существенном вкладе оптически тонкой корональной плазмы в суб-ТГц излучение. Показано, что конденсация коронального вещества может приводить к заметному росту суб-ТГц компоненты вследствие увеличения оптической толщины источника. Сравнение временных профилей температуры, меры эмиссии, крайнего ультрафиолетового и суб-ТГц излучения, а также соответствующих изображений, полученным по данным AIA/SDO, свидетельствуют о возможном существенном вкладе коронального дождя в миллиметровую компоненту. Это предполагает, что суб-ТГц наблюдения могут быть использованы для диагностики процесса конденсации коронального вещества на фазе спада вспышечного энерговыделения.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ No.22-12-00308 (Цап Ю.Т., Моргачев А.С.), РФФ No.20-72-10158 (Моторина Г.Г.) и Государственного задания № 0040-2019-0025, 122022400224-7.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОСПЫШЕК НА ДИСКЕ СОЛНЦА

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

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kirichenko@cosmos.ru*

В работе проведен анализ пространственного распределения солнечных микроспышек на диске Солнца в период минимума солнечной активности 2009 года. Основная мотивация исследования заключалась в поиске возможного перехода между обычными вспышками, положение которых на диске Солнца, как правило, жестко привязано к поясам активности, и нановспышками, пространственное распределение которых носит скорее однородный характер, и не имеет четко выраженной локализации. Было проанализировано несколько сотен микровспышек, самые слабые из которых имеют рентгеновский класс порядка A0.01. Показано, что по мере уменьшения мощности событий пространственное распределение становится все более размытым, и имеет явную тенденцию к переходу в равномерное. Мы полагаем, что полученные результаты представляют интерес с точки зрения проблемы коронального нагрева в части роли в этом процессе вспышечных событий малой мощности.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект 21-72-10157).

## МИКРОВОЛНОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК 20 ЯНВАРЯ 2022 ГОДА И 16 ИЮЛЯ 2023 ГОДА МЕТОДОМ ФИТИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

Смирнов Д.А., Мельников В.Ф.

*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [astronom.v.cube@gmail.com](mailto:astronom.v.cube@gmail.com)*

Недавно проведенное исследование, основанное на микроволновой радиодиагностике лимбовой солнечной вспышки 06.09.2017 (Fleishman et al. Science 2020) выявило неожиданно большую скорость уменьшения магнитного поля ( $\sim 5$  Гс/с в течение 2 мин). Авторы сделали заключение о высокой скорости диссипации магнитной энергии, способной привести к возникновению супер-драйсеровского электрического поля и к очень эффективному нагреву плазмы и ускорению частиц. Этот интересный результат требует как тщательной проверки примененного метода диагностики, так и выяснения физической причины столь быстрой диссипации магнитного поля. Необходимы наблюдения и соответствующая диагностика для других вспышек. Недавно пущенный в строй Сибирский Радиогелиограф представляет для это хорошие возможности.

В настоящей работе проведен анализ изображений и частотного спектра излучения в максимуме яркости радиоисточников во вспышках 20 января 2022 года и 16 июля 2023 года, зарегистрированных Сибирским Радиогелиографом в диапазонах 3-6 ГГц и 6-12 ГГц. Полученные данные о спектре использовались для радиодиагностики напряженности и ориентации магнитного поля, плотности плазмы и параметров ускоренных частиц в радиоисточнике. Радиодиагностика проводилась методом, основанным на минимизации функционала, содержащего интенсивности теоретически рассчитываемых и наблюдаемых частотных спектров лево-поляризованного и право-поляризованного излучения. Так как форма такого многомерного функционала довольно сложна, и минимизировать его стандартными подходами не представляется возможным, использовался генетический метод минимизации. В результате проведенной радиодиагностики получены значения магнитного поля, концентрация и показатель энергетического спектра нетепловых электронов в разные моменты времени на фазах роста и спада интенсивности микроволнового излучения анализируемых вспышек.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-12-00308.

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЭРУПТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 22 ИЮНЯ 2015 Г. M6.5 КЛАССА ПО ДАННЫМ AIA И IRIS

**Шарыкин И.Н.**

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ivan.sharykin@phystech.edu](mailto:ivan.sharykin@phystech.edu)

В работе рассматривается эруптивная солнечная вспышка M6.5 GOES класса 22 июня 2015 г., для которой произведен анализ ультрафиолетовых предвспышечных источников излучения в хромосферном канале 1600 Å по данным AIA/SDO, а также анализируется УФ спектры по данным IRIS.

В результате анализа карт ультрафиолетовых предвестников по данным AIA и их сравнения с картами магнитного поля HMI удалось получить некоторые параметры, характеризующие предвспышечную активность вблизи нейтральной линии и места будущей вспышки. Была исследована временная динамика данного параметра. Данный параметр за 10 часов до анализируемой вспышки испытывал множественные скачки. После вспышки активность УФ всплесков падала. Возможно, что с помощью данной методики получится разработать новую гибридную модель прогноза солнечных вспышек, учитывающую как магнитное поле, так и предвспышечное ультрафиолетовое излучение хромосферы в активной области.

По данным IRIS мы выявили усиленные потоки по лучу зрения плазмы и нетепловые уширения линий Si IV в области НЛ. Характер уярчений носил транзитную форму и морфология источников излучения соответствовала компактным уярчениям и лентам вблизи НЛ. Однако основным результатом является тот факт, что площадь предвспышечных возмущений примерно за час до вспышки (характеризующиеся большими нетепловыми ширинами и большими величинами скоростей плазмы по лучу зрения в линии Si IV) были в два раза больше чем площади после вспышки. Обсуждается возможность усиления течений плазмы и турбулентности с диссипацией электрических токов в предвспышечной области.

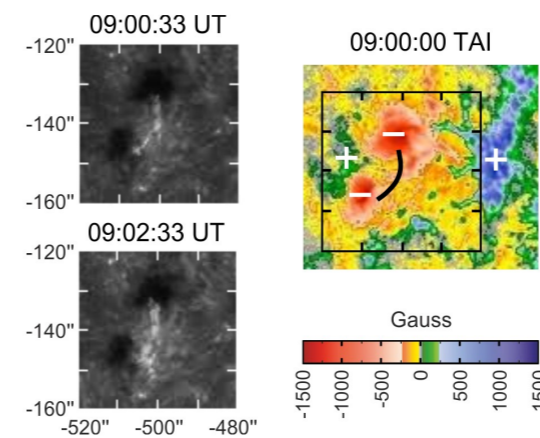
## “ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ТРИГГЕР” КАК МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УНИПОЛЯРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

**Думин Ю.В.<sup>1,2</sup>, Сомов Б.В.<sup>2</sup>**

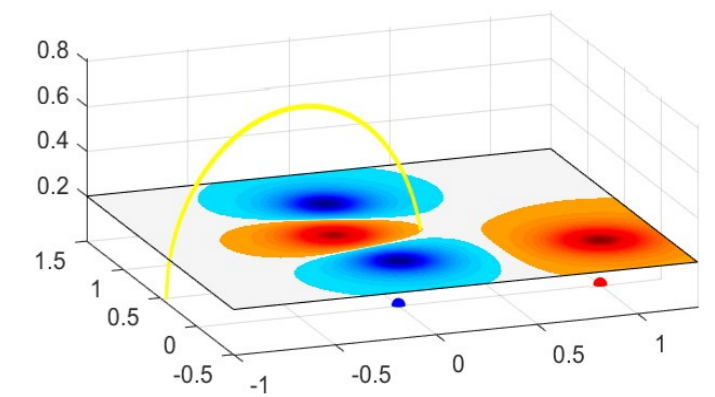
<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [dumin@yahoo.com](mailto:dumin@yahoo.com)

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

При анализе хромосферных микровспышек, например, регистрируемых прибором SOT на спутнике *Hinode* в хромосферной линии Ca II, иногда наблюдаются “униполярные” эмиссионные дуги, основания которых локализованы в солнечных пятнах одинаковой полярности либо же в областях без заметных магнитных полей (Рис. 1) [1]. Таким образом, эти дуги заведомо не могут быть ассоциированы с арками магнитных силовых линий, как это обычно имеет место в солнечных вспышках. Подобные события являются хотя и нечастыми, но достаточно регулярными; и весьма удивительно, что им до сих пор не уделялось должного внимания – по-видимому, они просто отбраковывались как заведомый “шум”.



**Рис. 1.** Униполярная микровспышка 1 октября 2014г. в линии Ca II (слева) и магнитограмма соответствующей области (справа).



**Рис. 2.** Траектория бифурцированной нулевой точки, формируемая механизмом “топологического триггера”, в сравнении с модельной магнитограммой.

Однако, как показано в нашей недавней работе [2], униполярные эмиссионные дуги могут иметь вполне разумную физическую интерпретацию в рамках модели так называемого “топологического триггера” магнитного пересоединения [3], которая была предложена ещё в 1988г., однако мало использовалась в дальнейшем. В рамках этой модели нулевые точки магнитного поля, в которых реализуется процесс пересоединения, формируются не под действием локальных токовых систем, а в результате специфической суперпозиции воздействий от удалённых источников (солнечных пятен). При этом оказываются, что существуют определённые “топологически неустойчивые” конфигурации источников, такие что их малые смещения приводят к зарождению (бифуркации) и последующему быстрому движению новой нулевой точки по дуге высоко над плоскостью расположения источников (фотосферой). Траектория этой точки не связана с локальной конфигурацией магнитных силовых линий. Магнитное пересоединение, развивающееся вдоль соответствующей дуги, как раз и может быть отождествлено с униполярной солнечной вспышкой (Рис. 2).

1. Dumin Yu.V., Somov B.V. // Res. Not. Amer. Astron. Soc. 2017. V. 1. P. 15.

2. Dumin Yu.V., Somov B.V. // MNRAS Lett. 2024. V. 528. P. L15.

3. Gorbachev V.S., Kel'ner S.R., Somov B.V., Shvarts A.S. // Sov. Astron. 1988. V. 32. P. 308.

## О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ФАЗЫ СПАДА СЛАБОЙ ВСПЫШКИ

Кашапова Л.К. (1), Полухина С.А. (2), Мотык И.Д. (1)

(1) ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [lk@iszf.irk.ru](mailto:lk@iszf.irk.ru)

(2) СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Мы представляем результаты исследования механизмов энерговыделения во время солнечной вспышки класса С1 по GOES произошедшей 03 февраля 2022. Особенностью данной вспышки является ее необычный временной профиль, наблюдавшийся в широком спектральном диапазоне - быстрая импульсная фаза сопровождалась относительно длительной фазой спада для событий такого класса. Наблюдения Сибирского радиогелиографа в диапазоне 6-12 ГГц позволили локализовать вспышечный источник и связать его со вспышкой, произошедшей в тени солнечного пятна. Анализ микроволнового спектра указывает на переход от гиротронного излучения ускоренных электронов к тепловому тормозному. Проведено сравнение временного профиля вспышки в УФ и крайнем УФ со средними профилями, полученными в других работах. Обсуждаются возможные причины необычного поведения временного профиля на фазе спада.

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

## ПРОЯВЛЕНИЯ НАГРЕВА В НАЧАЛЕ ВСПЫШКИ 29 ИЮНЯ 2012

Мешалкина Н.С., Алтынцева А.Т.

Спектроскопический анализ вспышки 29 июня 2012 GOES C4.6 подтверждает наличие нагретой плазмы с температурами превышающими 10 МК на начальной стадии вспышки и показывает, что нетепловое излучение обнаруживается позже. Это говорит о том, что альтернативные механизмы нагрева, помимо нагрева пучками ускоренных электронов, могут быть более значимыми на этой ранней фазе вспышки.

В данной работе ставится задача исследования взаимосвязи нагретой плазмы со вспышечной структурой и ее динамикой, используя данные наблюдений в рентгеновском, EUV и микроволновом диапазонах.

Особое внимание привлекает обнаружение тонких временных структур узкополосного микроволнового излучения на фазе роста вспышки с частотными дрейфами разного направления и скорости. По данным Сибирского Солнечного Радио Телескопа (5.7 ГГц) удалось локализовать положение источника тонкой структуры дрейфующих всплесков. Примечательно, что он был удален от главного источника вспышки, где произошло основное энерговыделение и эрупция. Как правило, ССИ находятся в непосредственной близости от места основного энерговыделения. Тем самым продемонстрирована важность наблюдений с пространственным разрешением.

**Наблюдение, теоретический расчет и анализ вспышки SOL2012-05-11  
Ю.А. Купряков (1,2), К.В. Бычков (1), О.М. Белова (1), А.Б. Горшков (1),  
В. А. Малютин (1), Л.К. Кашапова (3), Р. Kotrč (2)**

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

(2) *Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic, [kupry@asu.cas.cz](mailto:kupry@asu.cas.cz)*

(3) *Институт солнечно-земной физики, Сибирское отделение РАН, 6640333 Иркутск, Россия*

Вспышка SOL2012-05-11 наблюдалась нами в Астрономическом институте Чешской Академии Наук на HSFA-2 – горизонтальной установке для исследования Солнца. После обработки спектров были определены интегральные потоки излучения в линиях водорода, гелия и кальция.

В рамках модели нагретого газа выполнен теоретический расчет параметров плазмы с учётом физических условий в хромосфере, включая самопоглощение в спектральных линиях. Сопоставление сразу по шести линиям позволило с большой степенью уверенности восстановить температуру, плотность и пространственную структуру излучающего газа.

Также был проведен поиск квазипериодических пульсаций (КПП) по данным рентгеновских наблюдений на RHESSI, FERMI/GBM и данным микроволнового излучения Radio Solar Telescope Network (RSTN). Для поиска КПП мы использовали также данные полученные нами на HSFA-2. Несмотря на обилие данных, у этой вспышки не удалось выявить КПП. По данным HSFA-2 мы обнаружили только слабый пик с периодом 0.5 мин.

При расчете теоретических значений потоков излучения по линиям CaII H, Hβ, D3, Hα и CaIR 8542 Å предлагается следующая модель светящегося газа — излучение объекта складывается из многих сравнительно небольших облаков размером около 100 км. Одновременное присутствие в спектре заметного излучения в линии D3 атома гелия и резонансной линии H иона CaII для своего объяснения требует модели неоднородных облаков, каждое из которых содержит по крайней мере два слоя с разной температурой и концентрацией газа. Значения температуры лежат в диапазоне 18000–7100 K, концентрации — в диапазоне 0.5–8.0 10<sup>12</sup> см<sup>-3</sup>.

**ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ  
ИСТОЧНИКОВ МИКРОВОЛНОВОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ЛИМБОВОЙ ВСПЫШКИ 5 ФЕВРАЛЯ 2023  
ГОДА**

**Шамсутдинова Ю.Н.<sup>1</sup>, Ли Дж.<sup>2</sup>, Кашапова Л.К.<sup>1</sup> и Су Я<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [yulia@iszf.irk.ru](mailto:yulia@iszf.irk.ru)*

<sup>2</sup> *Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, China*

Мы представляем результаты исследования динамики ускорения и высыпания электронов во время солнечной лимбовой вспышки 5 февраля 2023 года. Событие было зарегистрировано Сибирским Радиогелиографом (СРГ) на частотах 3-12 ГГц и Advanced Space-based Solar Observatory / Hard X-ray imager (ASO-S/HXI) в диапазоне 10-300 кэВ. Сопоставление структуры вспышечных источников, наблюдавшихся в двух диапазонах позволило выявить пространственную структуру вспышечной петли и установить, что она представляла собой маленькую компактную петлю. Спектральный анализ микроволнового излучения на начальной фазе развития вспышки позволил выявить переход гиротронного излучения вспышки от тепловых электронов к излучению нетепловых электронов. Результаты спектрального и пространственного анализа излучения вспышки обсуждаются с точки зрения сценария высвобождения энергии во время солнечной вспышки и стандартной модели вспышки.

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

## БЕССИЛОВОЙ МАГНИТНЫЙ ЖГУТ КАК МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Соловьев А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН

Представлена новая модель бессилового магнитного жгута с высокой концентрацией электрического тока на оси. Общее свойство осесимметричных бессиловых магнитных жгутов состоит в том, что с выходом вершины петельного жгута в корону внешнее давление, удерживающее его от бокового расширения, неуклонно падает, и при некотором критическом его уменьшении продольное магнитное поле жгута обращается в нуль на поверхности смены знака электрического тока (current inversion surface – CIS). При этом бессилового параметр  $\alpha$  и азимутальный электрический ток испытывают на этой поверхности разрыв второго рода, так что в окрестности CIS их значения начинают неограниченно нарастать (по модулю). Токовая (дрейфовая) скорость электронов здесь неизбежно превысит скорость ионного звука. Это служит триггером к разогреву неизолированной плазмы (так что  $T_e \gg T_i$ ) и возбуждению плазменной ионно-звуковой неустойчивости не только вблизи CIS, но и в центральной области жгута, на его оси, где плотность тока особенно велика. Появление аномального сопротивления ведет к быстрой диссипации магнитного поля и генерации супер-дрейсеровского электрического поля. Эффект Паркера, связанный с выравниванием (с некоторой задержкой) вращающего момента вдоль оси жгута за счет переноса вдоль его оси азимутального магнитного поля, приводит к квазипериодическим пульсациям жесткого излучения вспышки, и, в конечном итоге, этот перенос обеспечивает вспышечное выделение большей части свободной магнитной энергии, накопленной во всем жгуте.

## ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ И УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 6 МАРТА 2023 Г.

Кузнецов А.А.<sup>1</sup>, Wu Zh.<sup>2</sup>, Анфиногентов С.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, a\_kuzn@iszf.irk.ru

<sup>2</sup> Shandong University, Weihai, China

Исследование процессов энерговыделения и ускорения частиц в солнечных вспышках требует использования взаимодополняющих наблюдений в различных спектральных диапазонах. Мы представляем результаты анализа солнечной вспышки класса M5.8, произошедшей 6 марта 2023 г. Данное событие было одной из первых крупных солнечных вспышек, наблюдавшихся недавно построенным Сибирским Радиогелиографом, что позволило получить микроволновые изображения на различных частотах в диапазоне 3-12 ГГц с высоким пространственным и временным разрешением. Мы также использовали микроволновые наблюдения радиополяриметров Нобелямы, спектрометра Чаньшаньской обсерватории и сети RSTN, рентгеновские наблюдения космических инструментов ASO-S/HXI и Konus-Wind, и наблюдения SDO в оптическом, УФ и КУФ диапазонах.

Вспышка 6 марта 2023 г. состояла из двух отдельных эпизодов. На первом этапе вспышка имела преимущественно «тепловой» характер, когда рентгеновское излучение на относительно низких энергиях (до 50 кэВ, включая диапазон GOES) достигло максимума; в то же время, рентгеновское излучение на энергиях более 50 кэВ отсутствовало, и микроволновое излучение было относительно слабым. Для этого временного интервала доступны также пространственно разрешённые рентгеновские наблюдения ASO-S/HXI. Сравнение микроволновых изображений с результатами экстраполяции фотосферных магнитограмм показало, что микроволновое излучение генерировалось в аркаде относительно низких магнитных петель. Динамика микроволновых и рентгеновских изображений отражала динамику процесса энерговыделения, которое происходило в различных частях аркады в различные моменты времени.

На втором этапе вспышки роль нетепловых частиц существенно возросла: поток GOES снизился, но наблюдалось рентгеновское излучение на более высоких энергиях с достаточно жестким спектром, а также интенсивное микроволновое излучение. Установлено, что источником микроволнового излучения были ускоренные электроны, захваченные вблизи вершин вспышечных петель (видимых также в КУФ диапазоне); временные профили и динамика микроволновых изображений отражали динамику инжекции и последующего накопления ускоренных частиц. С использованием всего комплекса доступных наблюдений и системы GX Simulator нами была создана трёхмерная модель вспышки; с помощью численного моделирования и сравнения полученных микроволновых спектров и изображений с наблюдениями были определены параметры ускоренных электронов в различные моменты. Мы также обсуждаем влияние МГД турбулентности на перенос ускоренных частиц в рассматриваемой вспышке.

Авторы благодарят команды Сибирского Радиогелиографа и ASO-S за обеспечение работы данных инструментов и помощь в обработке наблюдений.

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ 12673, СВЯЗАННЫЕ СО ВСПЫШКАМИ 6 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Головко А.А., Салахутдинова И.И.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [golovko@iszf.irk.ru](mailto:golovko@iszf.irk.ru)

Проведен анализ структуры и динамики поля скоростей в активной области №12673 по данным орбитальных обсерваторий Hinode и SDO, содержащих информацию о движениях плазмы как перед мощными вспышками X2.2 и X9.3, так и в течение этих событий.

Два основных центра активности в окрестности основной линии раздела полярностей [1] показали сильную турбулентность. Пиковые значения скорости в них показывают 1-минутные всплески до вспышек, опускание газа во время вспышек и квазипериодические пульсации после мощной эруптивной вспышки X9.3 (Рис.1). В начале суток 6 сентября в активной области был явно выражен центр активности А, после чего произошло формирование второго (южного) центра активности В, сопровождаемое ростом общего беззнакового магнитного потока. После мощных вспышек и перестройки магнитной конфигурации, турбулентные движения стали более интенсивными в центре активности В, чем в центре А

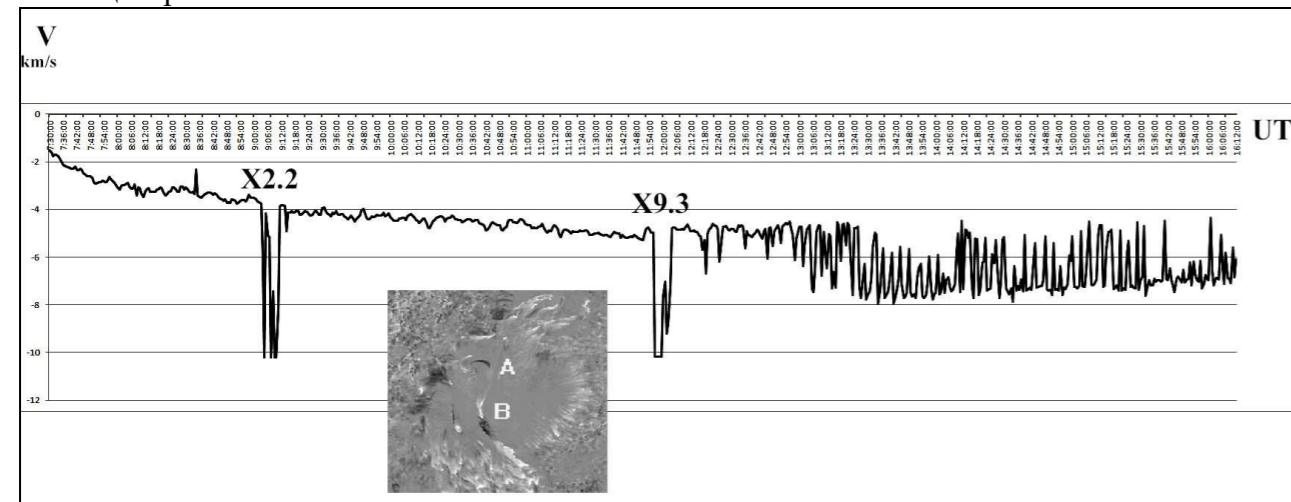


Рис 1. Кривая изменения пиковой скорости опускания вещества в центре активности А 6 сентября 2017 г. Видно интенсивное опускание во время мощных вспышек и пульсации со средним квазипериодом 4 мин после вспышки X9.3. Врезка – карта поля скоростей в АО по данным SOT Hinode.

1. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. // Geomagn. and Aeronom. 2023. V. 63. P. 975-983.

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСКОРЕНИЯ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФОРМЫ ИХ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА

Филатов Л.В.<sup>1</sup>, Мельников В.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, [filatovlv@yandex.ru](mailto:filatovlv@yandex.ru)

<sup>2</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Известно, что вистлеры (свисты) могут играть важную роль в кинетике нетепловых электронов во вспышечных петлях. При взаимодействии с вистлерами инжектированные в петлю электроны изменяют свою энергию и импульс. Это приводит как к процессам рассеяния электронов по питч-углам, так и к процессам их ускорения. В работах Filatov and Melnikov (Geom.Aeron. 2017-2023) мы рассмотрели рассеяние, ускорение и микроволновое излучение нетепловых электронов в предположении колмогоровского спектра плотности энергии вистлеровских волн (с максимумом на низких частотах). Однако колмогоровский спектр свойственен стационарной турбулентности. При вспышке же, как на фазе роста, так и на фазе спада инжекции, имеет место нестационарное изменение, как формы частотного спектра, так и плотности энергии турбулентности вистлеров. Причём форма спектра и его параметры неопределенны и могут сильно отличаться от колмогоровского. В данной работе мы учли это обстоятельство.

Исследование проводится в рамках одномерной модели неоднородной магнитной ловушки, с заданной инжекцией нетепловых электронов и турбулентностью вистлеров. Задавая различные параметры спектров турбулентности (в основном с гауссовой формой) и решая кинетическое уравнение Фоккера-Планка для нетепловых электронов, мы исследовали нестационарные распределения электронов по положению в петле, питч-углам и энергиям. Рассмотрены особенности, связанные с локализацией и изотропизацией инжектированных электронов в петле и изменениями их энергетического спектра. В частности, показано, что изначально степенной энергетический спектр инжектированных электронов, в зависимости от вида спектра турбулентности вистлеров, может сильно видоизменяться, «уплощаясь» (при ускорении) или «укручаясь» (при рассеянии) на определенных энергетических интервалах в диапазоне от 30 до 10000 кэВ. Выявлены спектры турбулентности при которых ускорение инжектированных электронов происходит наиболее эффективно.

Полученные результаты численного моделирования процессов рассеяния и ускорения нетепловых электронов могут быть использованы для интерпретации спектров жёсткого рентгеновского, гамма и микроволнового излучений и диагностики спектральных свойств турбулентности волн во вспышечной петле.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ И МЕСТА УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ $\geq 300$ МэВ В ЭРУПТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ.

Курт В.Г

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, [vgk@srd.sinp.msu.ru](mailto:vgk@srd.sinp.msu.ru)

Электрическое поле в эруптивных солнечных вспышках, способное ускорять протоны до субрелятивистских энергий, может быть создано различными процессами, такими как падение напряжения в месте пересоединения, МГД-турбулентность, генерируемая вдоль токового слоя, или различные виды МГД-ударных волн. Ускоренные протоны с энергиями выше  $\sim 200\text{--}300$  МэВ при взаимодействии с плотными слоями солнечной атмосферы испускают  $\gamma$ -излучение  $\pi$ -распада почти мгновенно. Спектр этого излучения имеет широкий максимум в области энергий фотонов приблизительно 50-100 МэВ. В принципе, ускоренные до таких энергий электроны, генерируют тормозное излучение таких же энергий. Однако, за все время наблюдений солнечных вспышек, начиная с 1980 г, тормозное излучение электронов с энергией выше 90 МэВ было зарегистрировано в коротком импульсе в самом начале лишь одной вспышки. Поэтому можно утверждать, что регистрация фотонов с энергиями  $E_\gamma \geq 90$  МэВ обусловлена пионным излучением и является свидетельством появления ускоренных субрелятивистских протонов во вспышечном объеме.

Для выявления одной из указанных выше возможностей ускорения протонов этих и более высоких энергий данные о пионном излучении были сопоставлены с временным поведением энерговыделения, и с процессом пересоединения магнитного поля во время вспышки. Для 7 дисковых вспышек различной мощности между X17.2 – M2 и для одной лимбовой вспышки балла X8.9 с регистрацией пионного излучения  $E_\gamma \geq 90$  МэВ представлены данные: (a) - пересоединенный магнитный поток  $\phi(t)$ , рассчитанный на основе разделения вспышечных лент в фильтрограммах Na/UV и картах фотосферного магнитного поля, и скорость пересоединения магнитного потока,  $d\phi/dt(t)$ ; (b) Поток SXR и производная потока  $dI_{SXR}/dt(t)$ , которая представляет собой “ргоxi” энерговыделения вспышки. Временной ход вспышки был разделен на три фазы на основании очевидных изменений этого параметра, а именно: фазу раннего подъема, фазу основного подъема и фазу основного энерговыделения; (c) - зависимости от времени потока жесткого рентгеновского излучения HXR и  $\gamma$ - излучения электронов, которые качественно отражают поведение ускоренных электронов различных энергий во вспышке; (d)- временной ход эмиссии  $\pi$ -распада, который дает информацию о моменте времени появления и профиле образования протонов с энергиями  $\geq 200\text{--}300$  МэВ;

Обнаружена общая закономерность эволюции не зависящая от мощности события. Подобие поведения  $d\phi/dt(t)$  и энерговыделения на обеих фазах роста согласуется с моделями пересоединения. Однако показано, что основное энерговыделение вспышки и ускорение протонов до субрелятивистских энергий происходит после существенного изменения топологии вспышки, когда  $d\phi/dt(t)$  уже прошла через максимум. Описанные выше процессы были ассоциированы с возрастанием высоты точки пересоединения – “X-point”. Эту высоту, в свою очередь, можно ассоциировать с “cusp location” и с основанием токового слоя, вдоль которого генерирована МГД-турбулентность.

В работе использованы данные, любезно предоставленные В. Гречневым, А. Верониг, результаты, опубликованные в открытой печати, данные <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/>; <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/fermi/data/>; <https://www.ioffe.ru/LEA/Solar/>

## ОБЗОР МИССИЙ С УЧАСТИЕМ НАНОСПУТНИКОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА

Юронин М.В., Щербаков М.С.

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»; [myronin@yandex.ru](mailto:myronin@yandex.ru)

На данный момент мировая наука не располагает достаточно точными данными о многих явлениях во внутреннем и внешнем слое солнечной короны, таких как: нагрев солнечной короны, свойства корональных петель, солнечное динамо и т.п. Важно получать новые данные, которые помогут спрогнозировать различные явления на Солнце. Одним из современных направлений в изучении Солнца является использование наноспутников (далее НС), в частности, целесообразным представляется создание группировки НС для исследования различных проявлений солнечной активности.

С конца 1990-х годов достаточно активно проводится изучение космических объектов при помощи НС. По действующим международным стандартам НС – это малые космические аппараты, имеющие массу от 1 до 10 кг, по данному критерию в классификации они находятся между пикоспутниками (до 1 кг) и сверхмалыми спутниками (от 10 до 100 кг). Наиболее интенсивно НС используются в ДЗЗ, однако, предпринимаются также и попытки их применения для сбора информации о небесных телах, в том числе о Солнце.

Проведенное исследование позволило оценить успешность миссий НС, в том числе НС типа CUBESAT (рассмотрены все миссии, которые изучают Солнце и его влияние на Землю):



Рис.1 Оценка успешности миссий НС

Следует отметить, что на данный момент в России практически нет собственных космических аппаратов (далее КА), специально предназначенных для исследования Солнца (на сегодняшний день используются в рассматриваемой сфере КА нанокласса Ярило и Норби, включенные в программу Универсат, а также спутник «Монитор-1» НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, предназначенный для наблюдения за солнечными вспышками). Также нет своих солнечных космических станций и солнечных космических телескопов, тогда как в зарубежных странах такая работа ведется. Чтобы в дальнейшем получить новые данные о свойствах солнечной короны предлагается организовать миссию с применением технологии группового полета НС. Целесообразно в перспективе создать единую группировку, в которой каждый космический аппарат будет нести на борту один-два научных прибора, что позволит одновременно проводить разнотипные измерения, что на данный момент является перспективной идеей. Такие исследования важны, так как солнечная активность напрямую влияет на нашу планету и возможность организации межпланетных перелетов, поэтому важно и в нашей стране создавать данные аппараты, которые будут заниматься исследованием Солнца, чтобы обеспечить технологическое лидерство в этом направлении.

Проведенное исследование привело к следующим выводам:

1. Изучение солнечной активности требует комплексного подхода путем создания группировок НС, где одна часть НС будет изучать явления, происходящие на Солнце, а другая – влияние солнечной активности на Землю.
2. Из проведенного анализа миссий следует, что большая доля неисправностей приходится на НС формата 1U и 3U по сравнению с НС формата 6U и 12U.
3. Было установлено, что самыми популярными приборами для исследования Солнца являются: устройства для изучения радиопомех, спектрометры, ионозонды
4. Сегодня нет планируемых запусков НС с солнечными телескопами или коронографами.

## Измерения рентгеновского излучения солнца с использованием космического аппарата типа кубсат

**Богачёв С.А.<sup>1</sup>, Кузин С.В.<sup>1,2</sup>, Перцов А.А.<sup>2</sup>, Кириченко А.С.<sup>1</sup>**

*1 ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [bogachev.sergey@gmail.com](mailto:bogachev.sergey@gmail.com)*

*2 ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Наблюдения Солнца в мягком рентгеновском диапазоне представляют собой эффективный способ мониторинга солнечной активности и, в частности, широко используются для регистрации и измерения балла солнечных вспышек. Принцип мониторинга основан на том, что корона (а тем более поверхность) Солнца при обычных условиях не формируют интенсивного излучения в области длин волн 1-10 Å, и если при наблюдениях Солнца обнаруживается значительный рост излучения в этой области спектра, это свидетельствует о развитии активного процесса, связанного с нагревом значительных объемов корональной плазмы до температур порядка и более 10 млн. К. Как правило, такими процессами являются солнечные вспышки. Наиболее известными приборами данного типа являются спектрофотометры XRS, работающие на аппаратах GOES [1], используемые для формирования каталогов солнечных вспышек (см. например, [2]). Приборы данного типа работали также на российских космических обсерваториях КОРОНАС-Ф (прибор RESIK; [3]) и КОРОНАС-Фотон (прибор SphinX; [4]).

В 2023-м году, 27 июня, с космодрома «Восточный» был осуществлен успешный запуск спутника «Метеор-М» с попутной нагрузкой из нескольких десятков наноспутников (преимущественно формата кубсат), среди которых на орбиту был выведен КА «Импульс-1» размерности 6U с малоразмерным спектрофотометром Рефос, предназначенном для мониторинга солнечной активности в мягком рентгеновском диапазоне. Прибор данного назначения с таким форм-фактором создан в нашей стране впервые. В настоящее время космический аппарат ориентирован на Солнце с необходимой точностью и предоставляет измерения спектров и потоков солнечного излучения в ежедневном режиме.

Мы представляем информацию о конструкции прибора, его основных характеристиках, а также приводим первые результаты его работы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>.

1. Chamberlin P. C. et al. Next generation x-ray sensor (XRS) for the NOAA GOES-R satellite series //Solar physics and space weather instrumentation III. – SPIE, 2009. – Т. 7438. – С. 11-20.
2. Plutino N. et al. A new catalogue of solar flare events from soft X-ray GOES signal in the period 1986–2020 //Advances in Space Research. – 2023. – Т. 71. – №. 4. – С. 2048-2058.
3. Sylwester J. et al. Observations of Solar X-ray Spectra by the DIOGENESS and RESIK Spectrometers Onboard the CORONAS-F Satellite //Solar System Research. – 2005. – Т. 39. – С. 479-488.
4. Gburek S. et al. SphinX: The solar photometer in X-rays //Solar Physics. – 2013. – Т. 283. – С. 631-649.

## НАБЛЮДЕНИЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА СПУТНИКАХ ФОРМАТА КУБСАТ ГРУППИРОВКИ МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Богомолов А.В., Богомолов В.В., Июдин А.Ф., Мягкова И.Н., Свертилов С.И.**

*МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, [aabboogg@srd.sinp.msu.ru](mailto:aabboogg@srd.sinp.msu.ru)*

В рамках реализуемой в МГУ программы освоения космоса с использованием малых космических аппаратов 27 июня 2023 г. состоялся запуск нескольких спутников формата кубсат. В настоящей работе используются данные пяти кубсатов, на которых установлены сцинтилляционные детекторы ДеКоР, ДеКоР-2 и ДеКоР-3 для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения и заряженных частиц, специально разработанные в НИИЯФ МГУ для подобных экспериментов. Это спутники Авион, Монитор-2, Монитор-3, Монитор-4 и UTMN2. Спутники Авион и Монитор-2 наряду с традиционными радиопередатчиками в УКВ-диапазоне оснащены передатчиками в S-диапазоне, позволяющими проводить фактически непрерывные измерения.

Основным типом передаваемых данных является мониторинг с временным разрешением 1 с., причем имеется возможность изменить эту цифру в процессе полета в несколько раз в большую или меньшую сторону. Нижний порог регистрации квантов составляет несколько десятков кэВ, он также может быть изменен в процессе полета, с учетом фоновых условий на околоземной орбите, при этом детекторы можно настроить неодинаково. Дополнительно реализован режим «по-событийной» записи, при котором на Землю передается время регистрации каждого взаимодействия с микросекундной точностью, а также параметры сцинтилляции, позволяющие определить энергию и тип события (квант или частица).

Данные кубсатов группировки МГУ доступны в виде графиков и таблиц данных мониторинга на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу <https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php>.

В работе показаны возможности использования наноспутников для наблюдения солнечного жесткого рентгеновского излучения на примере нескольких солнечных вспышек классов С и М, зарегистрированных в 2023-2024 гг.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №23–42-10005.

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 12230 ПЕРЕД НАЧАЛОМ СЕРИИ ГОМОЛОГИЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК С КЛАССА

**Шарыкин И.Н.**

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

В работе рассматривается развитие активной области NOAA 12230 в период времени 8 – 10 декабря 2014 г. В течение 12 часов 9 декабря в данной АО произошла серия гомологичных вспышек C5 – C9 класса. Причем энерговыделение носило квазипериодический характер ~2 часов. Данная небольшая активная область является отличным примером быстрого нарастания солнечной активности и ее быстрого спада. В отличие от крупных АО мы смогли зафиксировать динамику ее вспышечной активности от первых слабых вспышек до полного исчезновения активности. В данной работе мы исследуем динамику магнитного поля по векторным магнитограммам HMI, ультрафиолетовые изображения хромосферы и короны по данным AIA, а также появление рентгеновских всплесков (данные RHESSI), предшествующих серии вспышек в данной АО. Обсуждаются особенности предвестников, как отдельных вспышек, так и всего активного периода АО.

## ГОРЯЧИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ И УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

**Цап Ю.Т., Мельников В.Ф.**

*КрАО РАН, г.м. Научный, [yur\\_crao@mail.ru](mailto:yur_crao@mail.ru)*

Как известно, потоки мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек лежат в диапазоне от  $10^{-8}$  до  $10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>, тогда как максимальные температуры варьируются от 5 до 25 МК. Столь существенная разница в диапазоне значений предполагает, что высокая температура вспышечной корональной плазмы является неотъемлемым атрибутом вспышечного энерговыделения. В частности, это может свидетельствовать о наличии тесной связи между значением температуры плазмы и ускорением заряженных частиц.

Сравнительно недавно Hudson et al. [1] получили указания о предимпульсном нагреве плазмы до температуры 10-15 МК для четырех вспышек, включая микровспышку рентгеновского класса B9.4. Статистические исследования da Silva et al. [2] также по данным GOES показали, что 75% из 745 вспышечных событий, наблюдавшихся с 2010 по 2011 гг., имели температуру плазмы на предимпульсной фазе, превышающую 8.6 МК. Горячие предвестники импульсной фазы удалось обнаружить не только на GOES, но и на Solar Orbiter/STIX для вспышек рентгеновского класса B1.2 – X6.9 [3]. В связи с этим возникает вопрос о возможных причинах высокой температуры плазмы в предимпульсной фазе вспышек, а также механизмах ее нагрева.

Исходя из модели коллапсирующей магнитной ловушки, мы рассмотрели влияние температуры максвелловской плазмы на эффективность бетатронного ускорения быстрых квази-тепловых электронов в области каспа корональных петель [4]. Нами было показано, что рост температуры приводит к резкому (на порядки величины) увеличению числа квази-тепловых электронов, способных преодолеть кулоновский барьер потерь энергии. Это предполагает необходимость преднагрева области ускорения до температуры ~ 10 МК. Причиной такого нагрева может быть, в частности, коллапс магнитной ловушки. Предложенный подход позволяет лучше понять не только происхождение, но и роль рентгеновских горячих источников в предимпульсной фазе солнечных вспышек.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (No. 22-12-00308).

1. Hudson, H. S., Simões, P. J. A., Fletcher, L. et al. // MNRAS 2021. V. 501. P.1273.
2. da Silva, D. F., Hui, L., Simões, P. J. A. et al. // MNRAS 2023. V. 525. 4143.
3. Battaglia A. F., Hudson, H., Warmuth, A. et al. // A&A 2023. V. 679. id.A139.
4. Tsap Yu.T., Melnikov V.F. // Astron. Lett. 2023. V. 49. P.200.

## СОВМЕСТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И КРОСС-КАЛИБРОВКА ИНСТРУМЕНТОВ KONUS-WIND И SOLO/STIX

Лысенко А.Л., Куприянова Е.Г., Ридная А.В., Моторина Г.Г.

*ФТИ им. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия, [alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru](mailto:alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru)*

Konus – спектрометр на борту КА Wind, который находится вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце-Земля и проводит практически непрерывные наблюдения всего неба в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах с 1994 г. по настоящее время. Энергетический диапазон Konus-Wind составляет приблизительно 20 кэВ – 15 МэВ (в триггерном режиме). В 2020 г. на гелиоцентрическую орбиту был выведен рентгеновский телескоп SolO/STIX, что позволило проводить регулярные стереоскопические наблюдения Солнца в диапазоне от нескольких кэВ до ~150 кэВ. Совместное исследование солнечных вспышек инструментами Konus-Wind и SolO/STIX позволит, с одной стороны, расширить диапазон наблюдений от единиц кэВ, где излучение обусловлено нагретой плазмой, до ~15 МэВ, где за излучение ответственны ускоренные ионы и релятивистские электроны. С другой стороны, позволит стереоскопические исследования вспышек, скрытых от земного наблюдателя солнечным лимбом, так называемых частично затенённых или залимбовых вспышек.

Список солнечных вспышек, совместно наблюдавшихся Konus-Wind и SolO/STIX доступен онлайн [http://www.ioffe.ru/LEA/kw\\_stix/index.html](http://www.ioffe.ru/LEA/kw_stix/index.html) и содержит более 500 событий. В представленной работе проводится подробный анализ вспышки класса X1.2, произошедшей 6 января 2023 г. Эта вспышка наблюдалась на диске Солнца как для Konus-Wind, так и для SolO/STIX, что делает её подходящим кандидатом для проведения кросс-калибровки двух инструментов. Konus-Wind зарегистрировал излучение этой вспышки на энергиях выше 1 МэВ. Мы исследуем спектральную эволюцию вспышечного излучения и проводим сравнение параметров и фотонных спектров, полученных из данных Konus-Wind и SolO/STIX.

## Признаки предвспышечного состояния солнечных активных областей в микроволновом излучении

Горюнова В.Д., Анфиногентов С.А.

*ФГБОУ ВО "ИРНИТУ", г. Иркутск, Россия, [veronic-g@mail.ru](mailto:veronic-g@mail.ru)*

Солнечные вспышки являются одним из основных проявлений солнечной активности, влияющих на состояние околоземного космического пространства. С солнечными вспышками связаны самые сильные возмущения солнечного ветра, потоки ускоренных частиц солнечного происхождения, а также гамма и рентгеновское излучение. Эти факторы оказывают негативное влияние на функционирование космических аппаратов, состояние здоровья космонавтов и функционирование систем связи и позиционирования. Поэтому прогноз солнечных вспышек имеет высокую практическую значимость и актуальность. По нашему мнению, ключом к созданию надежных методов прогноза солнечных вспышек является анализ наблюдений магнитных полей, а также других параметров, таких как температура и плотность плазмы в корональной плазме солнечных активных областей. Наиболее полная информация об этих параметрах содержится в пространственном распределении и спектре солнечного радиоизлучения.

В данном докладе представлены результаты поиска признаков предвспышечного состояния активных областей в их микроволновом радиоизлучении. Мы проанализировали многоволновые радиоизображения Солнца, полученные Сибирским Радиогелиографом (СРГ) за 1-3 суток до солнечных вспышек M и X классов для ряда активных областей. В качестве контрольной группы были выбраны наблюдения других активных областей, в которых не происходило вспышек M-класса или выше в течении 5 суток до и после времени наблюдения. Для каждого набора данных были построены спектры яркостной температуры и потока микроволнового излучения в диапазоне 6-12 ГГц. В результате сравнительного анализа спектров вспышечно-продуктивных областей и спокойных областей из контрольной группы удалось выделить ряд особенностей, отличающих микроволновое излучение активных областей в предвспышечном состоянии. Данные особенности в будущем возможно использовать для налаживания краткосрочного прогноза солнечных вспышек по их наблюдениям в микроволновом диапазоне.

## ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ RSTN И NORH

Абрамов-Максимов В.Е.<sup>1</sup>, Бакунина И.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [beam@gaoran.ru](mailto:beam@gaoran.ru)

<sup>2</sup>НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Представлен случай одновременной регистрации предвспышечных флуктуаций радиоизлучения Солнца на радиогелиографе Нобейма (NoRH) и на радиотелескопе, входящем в сеть Radio Solar Telescope Network (RSTN). Были использованы корреляционные кривые, полученные на NoRH на частоте 17 ГГц, и наблюдения полного потока радиоизлучения Солнца на частоте 245 МГц в обсерватории Лермонт в западной Австралии. В данных, полученных на обоих инструментах, перед вспышкой класса М6.7 (по данным GOES) наблюдается предвспышечный цуг колебаний. Цуг на частоте 17 ГГц начинается примерно на 2 минуты раньше.

## УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ ВО ВСПЫШКАХ 16 ИЮЛЯ (С5.7, М4.0) И 14 ДЕКАБРЯ (Х2.8) 2023 ГОДА

Струминский А.Б.<sup>1</sup>, Садовский А.М.<sup>1</sup>, Лысенко А.Л.<sup>2</sup>, Григорьева И.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия [astrum@cosmos.ru](mailto:astrum@cosmos.ru)

<sup>2</sup> ФТИ РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются два события 2023 года, которые сопровождались регистрацией солнечного HXR излучения с  $E > 100$  кэВ и солнечных протонов (СП) детектором ACS SPI (рис. 1) и также показали «подобные» временные профили SXR температуры плазмы (рис. 2). На рисунках за ноль времени (0 мин) взято начало радиоизлучения на частоте 8.8 ГГц (наибольшая зарегистрированная частота RSTN). Отметим, что HXR и SXR излучение до (-4 мин) не сопровождалось радиоизлучением, т.е. вспышки C5.7 16 июля и X2.8 14 декабря были «radio quite». Однако был отклик на частотах RSTN  $< 8.8$  ГГц позднее, во время второго возрастания температуры (рис. 2). Именно после (0 мин) выполнялись три необходимых условия для ускорения протонов: нагрев плазмы  $> 12$  МК, ускорение электронов  $> 100$  кэВ более 5 мин, развитие вспышки вверх в корону (плазменное радиоизлучение). По первому приходу СП на орбиту Земли (рис. 1) определен темп ускорения протонов. «Ранний» приход протонов на орбиту Земли ( $< +13$  мин), наблюдавшийся в М4.0 16 июля 2023, соответствует темпу ускорения протонов ( $> 1.7$  МэВ/с). «Поздний» приход протонов 14 декабря 2023 ( $> +35$  мин) соответствует темпу ( $< 0.1$  МэВ/с).

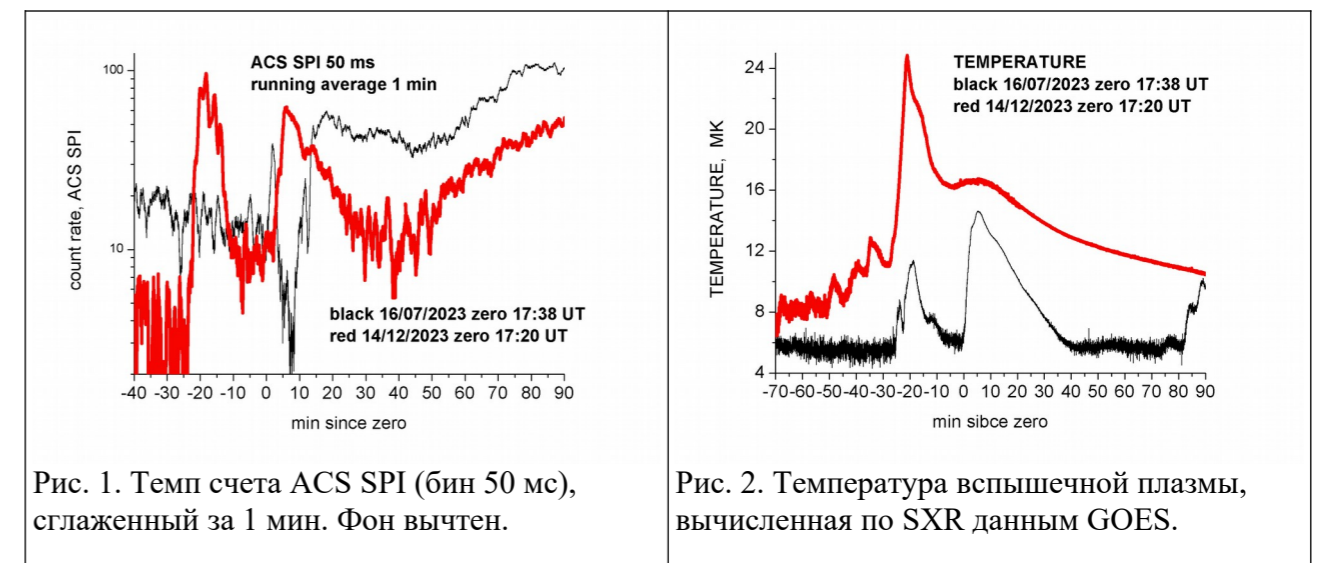


Рис. 1. Темп счета ACS SPI (бин 50 мс), сглаженный за 1 мин. Фон вычтен.

Рис. 2. Температура вспышечной плазмы, вычисленная по SXR данным GOES.

По наблюдениям Konus-Wind М4.0 16 июля 2023 сделана оценка времени ускорения электронов до 100 кэВ по кросс-корреляции между HXR каналами G2-G1. Задержка  $-0.001$ с (т.е. G1 на  $0.001$ с впереди), погрешность снизу  $0.017$ с, погрешность сверху  $0.014$ с. Эти времена согласуются с оценкой темпа ускорения протонов. Эти времена согласуются с оценкой темпа ускорения протонов. Изменения нетепловой энергии электронов, оцененные в рамках модели толстой мишени, соответствуют значительно большим временам их ускорения. В «протонной» фазе вспышки 14 декабря 2023 наблюдений Konus-Wind не было.

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

**CORRELATIONS OF ELECTROMAGNETIC SOLAR ACTIVITY WITH VARIATIONS OF FE-55 AND CO-60 NUCLEUS DECAY PARAMETERS**

S. N. Mayburov

Lebedev Institute of Physics, Moscow, Russia, [mayburov@mail.ru](mailto:mayburov@mail.ru)

Temporal variations of nucleus decay parameters were studied extensively in the last years, their observation can be the signal of unknown physical effects of cosmic origin. Several experiments reported the annual and daily decay rate oscillations in alpha and beta-decays of some radioactive nuclides at the level of .05 % [1,2]. Also, correlations of Mn-54  $\beta$ -decay rate with solar activity, in particular, with solar flares, was reported [1]. Theoretical models of such decay rate variations considered in [1, 3, 4]. BSTU - PhIAN - INF-ITEP collaboration studies decay rate variations in Co-60  $\beta$ -decay and Fe-55 inverse  $\beta$ -decay (*e*-capture) isotopes. 1.3 MeV  $\gamma$ -quanta from Co-60  $\beta$ -decay were registered by Germanium semiconductor detector. X-ray with energy 5,9 or 6,5 KeV from Fe-55 decay were registered by semiconductor Si-Pin detector.

Possible influence of solar activity on nucleus decay rate was studied during 2015 – 2023 for Fe-55 decay rate in Moscow, Co-60 decay rate was measured in Novosibirsk INF in 2013-2020 [5]. The deviations of similar form and size from exponential decay low rate at the average level (.55 +/- .004)% were detected in both experiments during October- December 2018. Supposedly, they can be related to solar activity minimum started in the beginning of 2018 and continued till the end of 2020. Similar deviations were observed at this period in Baksan Po-214  $\alpha$ -decay experiment [6]. Ten significant decay rate deviations from expected exponential decay rate of the order .5 % with duration from 50 to 208 hours were found. It was shown that such rate dips occur 48 – 80 hours before solar flare events of M and X class with significant reliability. Existence of such correlations can have important applications to radiation safety of space flights [5]. SOLARIS project plans to perform simultaneous measurements of Fe-55, Co-60 decay parameters at International Space Station and Earth labs. to study their correlations with solar flare events .

1. E. Fischbach et al. , Rev. Space Sci. 145, 285 (2009); Astrop. Phys. 59,47 (2014)
2. E. Alekseev et al. , Phys. Part. Nucl. 47, 1803 (2016); ibid. 49, 557 (2018)
3. S. Mayburov Int. J. Theor. Phys. 60, 630 (2021)
4. S. Mayburov Phys. Part. Nucl. 51, 458 (2020)
5. S. Bogachev et al. J. Phys.: Conf. Series 1690, 012028-012035 (2020)
6. E. Alekseev et al. , submitted to Phys. Part. Nucl.

**СЕКЦИЯ «Солнечный ветер и гелиосфера»**

**Понедельник, 05.02. 2024 г., Комната 200**

		Председатель: <u>Малыхин А.Ю.</u>	
	Время	Докладчик	Название доклада
1	09.30 - 09.45	Дуканов И. А.	Исследование эволюции энергетического спектра флуктуаций солнечного ветра в рамках оболочечной модели
2	09.45 - 10.00	Галикян Н.Г.,	Моделирование возмущений магнитного поля в гелиосфере
3	10.00 - 10.15	Кодуков А.В.	МГД-моделирование спокойного солнечного ветра на основе наблюдательных данных Кисловодской ГАС ГАО РАН
4	10.15 - 10.30	Евдокимова М.А.	Особенности течения солнечного ветра в окрестности токовых слоев
5	10.30 - 10.45	Стожков Ю.И.	Солнечная активность и ее прогноз
6	10.45 - 11.00	Сухарева Н.А.	Векторные графы и траектории в фазовом пространстве гелиосферы
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
	<b>11.30 - 11.45</b>	<b>ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	
		Председатель: <u>Рязанцева М.О.</u>	
7	11.45 - 12.00	Малыхин А.Ю.	Анализ границ поворотов магнитного поля в солнечном ветре по наблюдениям Parker Solar Probe
8	12.00. - 12.15	Лукманов В.Р.	Короткие структуры и магнитная буря 1-2 декабря 2023 г. по наблюдениям межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН
9	12.15 - 12.30	Абунина М.А.	Исследование временных параметров межпланетных возмущений, содержащих магнитные облака
10	12.30 - 12.35	Белова Е.А.	Форбуш-эффекты и геомагнитные бури
11	12.45 - 13.00	Анохин М.В.	Образование и эволюция локальной короткодействующей области взаимодействия двух разноскоростных струй солнечного ветра
	<b>13.00 - 14.00</b>	<b>Обед</b>	

Среда, 07.02. 2024 г., Конференционный Зал

Председатель: <u>Ермолаев Ю.И.</u>			
Время	Докладчик	Название доклада	
1	Ковалев И.И.	Спектры вариаций и анизотропия космических лучей в периоды форбуш-эффектов в марте 2023г.	
2	Кислов Р.А.	Влияние квазинейтральности солнечного ветра на соотношение температур альфа частиц и протонов	
3	Хохлачев А.А.	Вариации содержания гелия в разных типах течений солнечного ветра	
4	Титова А.В.	Исследование влияния упругих столкновений на распределение межзвездных атомов водорода в гелиосферном ударном слое	
5	Корольков С.Д.	Влияние числа Кнудсена на структуру астросферы и спектры поглощения в линии Лайман-альфа	
6	Годенко Е.А.	Исследование влияния гелиосферного ударного слоя на распределение межзвездной пыли во внутренней гелиосфере	
<b>11.00 - 11.30</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Ермолаев Ю.И.</u>			
7	Балюкин И.И.	Гелиосферные атомы водорода: исследование несоответствия между модельными и наблюдаемыми на КА IBEX потоками на энергиях менее 1 кэВ	
8	Рязанцева М.О.	Динамика турбулентных флуктуаций на пути от Солнца к Земле	
9	Бородкова Н.Л.	Анализ динамики цугов колебаний магнитного поля и потока ионов солнечного ветра перед рампом межпланетной ударной волны	
10	Сапунова О.В.	Анализ спектров флуктуаций величины потока плазмы и модуля магнитного поля на обратных ударных волнах	
11	Тревес Т.В.	Сравнение характеристик спектров турбулентных флуктуаций межпланетного магнитного поля с количеством токовых слоев	
12	Рахманова Л.С.	Влияние среднемасштабных плазменных структур на изменение турбулентного каскада за головной ударной волной	
<b>13.00 - 14.00</b>		<b>Обед</b>	
Председатель: <u>Калинин М.С.</u>			
13	Рахманова Л.С.	Изменение свойств турбулентного каскада на околоземной ударной волне: статистические результаты	
14	Павлов Д.А.	Об МГД-симуляции коротирующих областей взаимодействия солнечного ветра для исследования вариаций ГКЛ	

15	14.30 - 14.45	Крайнев М.Б.	О характеристиках ГКЛ около Земли в периоды последних минимумов солнечных циклов
16	14.45 - 15.00	Крайнев М.Б.	Наблюдения и описание интенсивности ГКЛ и гелиосферного магнитного поля в периоды его инверсии
17	15.00 - 15.15	Юлбарисов Р.Ф.	Анализ энергетического спектра амплитуд 27-дневных вариаций ГКЛ в 2015/2016 году
18	15.15 - 15.30	Власова Н.А.	О влиянии процессов на солнце и в межпланетной среде на солнечное протонное событие 30.03.2023
<b>15.30 - 16.00</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Власова Н.А.</u>			
19	16.30 - 16.45	Белов С. М.	Веб-приложение для исследования вариаций космических лучей
20	16.45 - 17.00	Шлык Н.С.	Некоторые особенности взаимодействующих возмущений солнечного ветра
21	17.00 - 17.15	Калинин М.С.	Коротирующие области взаимодействия солнечного ветра и интенсивность гкл в 2d задачах модуляции
22	17.15-17.30	Зельдович М.А.	Энергетические спектры ионов $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ , C, O и Fe надтепловых энергий в потоках частиц из долгоживущей корональной дыры в 2006- 2008 гг
17.30 - 18.00		<b>Постерная сессия</b>	
18.00 - 19.00			
<b>19.00 - 21.00</b>		<b>Банкет</b>	

Доклады постерной сессии 07.02.2024 «Солнечный ветер и гелиосфера»

- 2.2.1 Ширяев А.О., Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Калегаяев В.В. объединенный каталог МКВМ НИИЯФ МГУ ЗА 2010-2023 годы и использование обратной drag-based model для определения начальных параметров источником мквм на примере события 5-7 июля 2022 года
- 2.2.2 Корягин С.А., Викторов М.Е. Роль магнитных пробок в развитии ионной вейбелевской неустойчивости в экспериментальной плазменной арке типа корональной солнечной петли
- 2.2.3 Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Рязанцева М.О., Ермолаев М.Ю., Хохлачев А.А. Статистика крупномасштабных явлений в 4м году 25 солнечного цикла.
- 2.2.4 Струминский А.Б., Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Григорьева И.Ю. Об изменениях фазы вариаций галактических космических лучей в 21-25 циклах солнечной активности
- 2.2.5 Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Реакция геомагнитной активности и жесткости обрезания космических лучей на изменения параметров солнечного ветра и ММП на масштабе магнитной бури: явления гистерезиса
- 2.2.6 Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А. Определение показателя политропы плазмы солнечного ветра в короне по зарядовому составу многозарядных ионов
- 2.2.7 Сарычев В.Т. Гелиосфера и Крабовидная туманность – что общего?
- 2.2.8 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Петух А.И., Журавлев Р.Н. Научные задачи и перспективы комплекса плазменных приборов в проекте ВЕНЕРА-Д

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАМКАХ ОБОЛОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ

Дуканов И.А., Юшков Е.В., Соколов Д.Д.

*МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, [dukanov.ia21@physics.msu.ru](mailto:dukanov.ia21@physics.msu.ru)*

Солнечный ветер - ключевое связующее звено в системе Солнце-Земля, однако ни физика его формирования, ни физика эволюции еще до конца не ясны. Это факт являлся основной причиной запуска в 2018 году специальной спутниковой миссии Parker Solar Probe (PSP), по большей части сконцентрированной на вопросе исследования солнечного ветра. За первые пять лет работы эта миссия обеспечила специалистам огромный приток новых данных с высоким временным разрешением и большой вариацией гелиоцентрических расстояний. В частности, она позволила в деталях изучить спектры флуктуаций полей солнечного ветра: поля скорости и магнитного поля, и по-новому взглянуть на турбулентный каскад, формирующийся в межпланетной плазме.

Данные PSP подтвердили ранее обнаруженное наличие в картине спектральной плотности флуктуаций энергии магнитного поля двух изломов, первый из которых расположен вблизи субионного масштаба, другой - 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, ограничивающих инерционный интервал и определяющих турбулентный каскад, является ключевым. И если для описания околорассеивающего излома необходимым кажется привлечение кинетического подхода, то эволюцию крупномасштабного излома, видимо, можно описать, оставаясь в рамках магнитогидродинамической парадигмы. В настоящей работе, используя в качестве основы данные миссии PSP, мы описываем свободное вырождение турбулентного каскада с помощью оболочечной изотропной МГД-модели и стараемся повторить реально наблюдаемую эволюцию излома спектра.

Для описания турбулентного каскада мы используем оболочечную (от англ. shell model) или, по-другому, каскадную модель, разработанную Ф. Плунианом и П.Г. Фриком. Класс оболочечных моделей для систем гидродинамического типа представляет из себя Фурье-образы системы МГД-уравнений, в которых образы нелинейных слагаемых приближены суммой квадратичных нелинейностей таким образом, чтобы в бездиссипативном случае выполнялись законы сохранения трехмерной МГД: сохранения полной энергии, магнитной и перекрестной спиральности. При этом непрерывная спектральная шкала заменяется набором дискретных спектральных 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. Работа поддержана грантом фонда БАЗИС N 21-1-3-63-1.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Галикян Н.Г., Алексеев В.В., Майоров А.Г., Юлбарисов Р.Ф.

*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [norayrgalikyan@gmail.com](mailto:norayrgalikyan@gmail.com)*

Решение некоторых важных задач о поведении заряженных космических лучей в гелиосфере, например, о долговременных и короткопериодических вариациях потоков частиц или о радиационной обстановке, неразрывно связано с определением в гелиосфере регулярного магнитного поля и его возмущений.

Регулярная компонента магнитного поля в работе задается классическим способом: с использованием спирали Паркера, вид которой основан на предположении о вмороженности магнитного поля вращающегося источника в плазму солнечного ветра [1]. Однако значительной переработке подверглось описание гелиосферного токового слоя (ГТС), т.е. поверхности, при переходе через которую вектор магнитного поля меняет свое направление. По результатам анализа спутниковых данных о компонентах магнитного поля предложено новое аналитическое определение формы поверхности ГТС, которая лучше согласуется с наблюдениями и более удобна в численных расчётах.

Возмущенная компонента связана с турбулентными неоднородностями в плазме солнечного ветра. Для её добавления в работе реализованы два подхода и проведено их сравнение между собой, а также с наблюдаемыми значениями магнитного поля космическими аппаратами ACE, Ulysses, и др.

Первый подход заключается в независимом задании Slab (с волновыми векторами вдоль регулярного поля) и 2D (с волновыми векторами поперек регулярному полю) компонент турбулентного магнитного поля; такой алгоритм является общепринятым для моделирования возмущений в физике плазмы [2]. В работе в области гелиосферы рассчитываются моды векторного потенциала этих компонент и берётся ротор суммы полученных полей.

Во втором подходе генерируется векторное гауссово случайное поле на поверхности источника поля, в качестве которого рассматривается сфера в несколько радиусов Солнца. Для генерации случайного на сфере в четырёхмерном пространстве генерируются моды возмущений, а далее вырезается сфера, соответствующая поверхности источника и временной динамики возмущений. После этого сгенерированное поле выносится в гелиосферу вдоль силовых линий регулярного поля.

Для сравнения подходов вычисляются значения поля (с учетом турбулентностей и без них) вдоль траектории разных космических аппаратов в некоторый интервал времени, получая моделируемые и наблюдаемые значения поля. Полученные временные ряды, во-первых, преобразуются в гистограммы распределения турбулентной компоненты магнитного поля (наблюдаемое поле минус моделируемое регулярное поле), а во-вторых, используются для вычисления спектров мощности. Гистограммы и спектры мощности сравниваются между собой, делаются выводы о согласии магнитного поля, полученного в разных подходах, а также с наблюдаемыми значениями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72- 10161П).

1. Parker E.N. // *Astrophys. J.* 1958. V. **128**. P. 664.
2. Laitinen T., Dalla S., Waterfall C.O.G., Hutchinson A. // *Astrophys. J.* 2023. V. **520**. P. 108.



## МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОКОЙНОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ КИСЛОВОДСКОЙ ГАС ГАО РАН

**Кодуков А. В.<sup>1</sup>, Арутюнян С. Н.<sup>1</sup>, Березин И. А.<sup>2</sup>, Павлов Д. А.<sup>1,3</sup>, Субботин М. О.<sup>1</sup>, Тлатов А. Г.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), d.a.-pavlov@spbu.ru

<sup>2</sup> Кисловодская горная астрономическая станция ГАО РАН

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет

Представлена методика расчёта прогноза плотности и скорости частиц солнечной плазмы в околоземном пространстве на основе МГД-моделирования, граничные условия для которого построены по ежедневным синоптическим картам радиального магнитного поля фотосферы, получаемым в Кисловодской ГАС ГАО РАН. Для расчёта граничных условий на сфере радиусом 0.1 а.е. использованы модели PFSS (на 2.5 Rs), SCS (2.5 - 21.5 Rs), WSA. Применяется методика вычисления карт электронной плотности, температуры и долготной составляющей магнитного поля на 0.1 а. е. по известным инвариантам (что необходимо для МГД-симуляции), а также эмпирические поправки и ограничения, используемые в SWPC. МГД-моделирование производится с помощью пакета PLUTO на диапазоне 0.1 - 1.7 а.е. по расстоянию и -60° - 60° по широте. Проведено сравнение полученных прогнозов с аналогами (SWPC) и измерительными данными в околоземном пространстве (OMNI). Обозначены направления дальнейшего развития: сравнение различных моделей солнечной короны (от фотосферы до 0.1 а. е.) и их влияния на прогноз солнечного ветра; непрерывная калибровка моделей по данным OMNI.

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ОКРЕСТНОСТИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

**Евдокимова М.А.<sup>1</sup>, Хабарова О.В.<sup>2,3</sup>, Кислов Р.А.<sup>2,4</sup>, Малова Х.В.<sup>1,5</sup>, Попов В.Ю.<sup>1,6,7</sup>**

<sup>1</sup> ИКИ РАН, Москва, e-mail: [evdokimari@mail.ru](mailto:evdokimari@mail.ru)

<sup>2</sup> ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

<sup>3</sup> Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

<sup>4</sup> Ariel University, Ariel, Israel

<sup>5</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>6</sup> Физический факультет МГУ, Москва, Россия

<sup>7</sup> ВШЭ, Москва, Россия

В работе представлен анализ поведения скорости солнечного ветра в окрестности сильных токовых слоев на орбите Земли по данным космического аппарата Wind с разрешением 3 секунды. Исследование проведено для годов максимума и минимума солнечной активности 23 и 24 циклов. Токовые слои определялись по методике автоматической идентификации этого типа разрывов [1]. В статистику вошли более 300000 слоев. Гистограммы распределения компонент скорости солнечного ветра вне токовых слоев показывают стандартное распределение для всех компонент скорости без особенностей. Вблизи токовых слоев наблюдается существенное смещение гистограммы горизонтальной Y-компоненты (GSE) в сторону высоких значений, особенно выраженное в годы максимума солнечной активности. При смене полярности направление движения частиц с большими скоростями вдоль Y меняется на противоположное. Детальный анализ показывает, что эффект в Y-компоненте скорости солнечного ветра соответствует формированию узкого потока плазмы в непосредственной окрестности токовых слоев. Проведено сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями модели [2], [3]. Анализ показывает, что изменение направления движения протонов является следствием эффекта квазиadiaбатического движения частиц в токовых слоях с нормальной компонентой магнитного поля. Потоки плазмы, распространяющиеся в X направлении от Солнца, внутри токового слоя разворачиваются в перпендикулярном направлении и текут в азимутальном (Y) направлении, обеспечивая усиление наблюдаемой гидродинамической скорости. Направление сдвига зависит от полярности магнитного поля Солнца. Представлены видео моделирования процесса в 3D, подтверждающие эффект. Таким образом, влияние токовых слоев на движение частиц солнечного ветра проявляется на кинетических масштабах в ближайшей окрестности токовых слоев.

[1] Khabarova O., Sagitov T., Kislov R., Li G. Automated Identification of Current Sheets—A New Tool to Study Turbulence and Intermittency in the Solar Wind // Journal of Geophysical Research: Space Physics., 2021, v. 126, doi: 10.1029/2020JA029099.

[2] Malova H.V., Popov V.Yu., Grigorenko E.E., Petrukovich A.A., Delcourt D., Sharma A.S., Khabarova O.V., Zelenyi L.M. Evidence for Quasi-adiabatic Motion of Charged Particles in Strong Current Sheets in the Solar Wind // The Astrophysical Journal, 2017. Vol. 834. Issue 1. doi: 10.3847/1538-4357/834/1/34

[3] Малова Х.В., Попов В.Ю., Хабарова О.В., Григоренко Е.Е., Петрукович А.А., Зеленый Л.М. Структура токовых слоев с квазиadiaбатической динамикой частиц в солнечном ветре, Космические Исследования, 2018, Т. 56, № 6, с. 451-460

## СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ЕЕ ПРОГНОЗ

Стожков<sup>1</sup> Ю.И., Охлопков<sup>2</sup> В.П.

<sup>1</sup>ФИРАН, г. Москва, Россия, [stozhkovyi@lebedev.ru](mailto:stozhkovyi@lebedev.ru)

<sup>2</sup>НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, [ovpetrovich@yandex.ru](mailto:ovpetrovich@yandex.ru)

Экспериментальные данные о солнечной активности (числе солнечных пятен  $R_z$ , индукции полоидального магнитного поля Солнца в полярных шапках  $B_p$  и другие), характеристики межпланетной среды и потоки космических лучей свидетельствуют о том, что Солнце вступило в глубокий минимум своей активности, подобный минимуму Дальтона.

Оказалось, что все продолжительные минимумы солнечной активности происходили в периоды, когда расстояние между центром масс солнечной системы и центром Солнца было равно или больше 2-х солнечных радиусов.

С нашей точки зрения временное совпадение глубоких минимумов солнечной активности с максимальным удалением центра масс солнечной системы от центра Солнца не является случайным. Возможно, это свидетельствует о влиянии гравитационных полей планет на солнечную активность.

Обнаружена почти функциональная связь максимальной величины  $B_{\text{пmax}}$ , наблюдаемой в минимумах солнечной активности, с предстоящим максимумом солнечных пятен. На основе этой связи разработан метод прогнозирования максимального числа солнечных пятен  $R_{z\text{max}}$  и временного хода значений  $R_z$  в текущем (в настоящее время 25-ом) цикле солнечной активности.

## ВЕКТОРНЫЕ ГРАФЫ И ТРАЕКТОРИИ В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ГЕЛИОСФЕРЫ

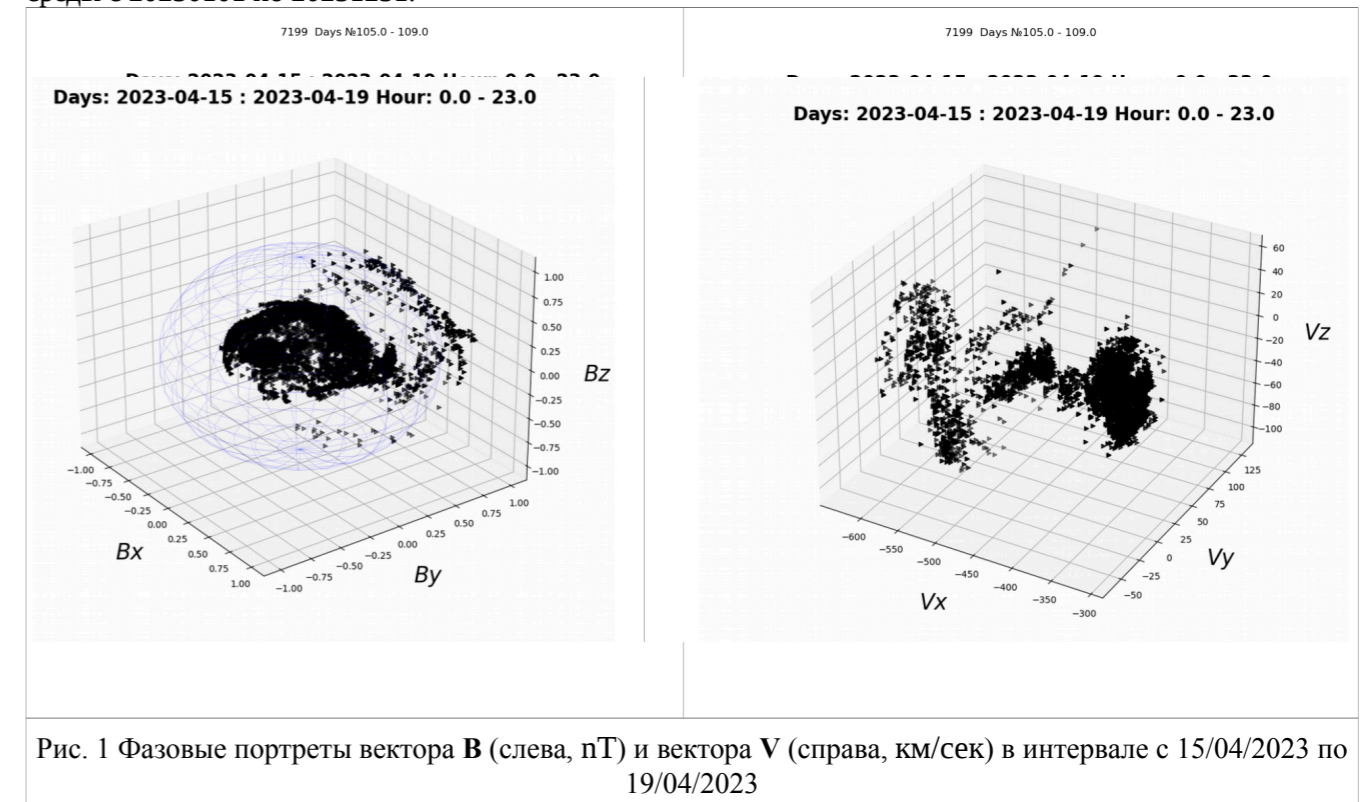
Сухарева Н.А.<sup>1,2</sup>, Антонов Ю.А.<sup>1</sup>, Захаров В.И.<sup>1,3</sup>, Мягкова И.Н.<sup>2</sup>, Шугай Ю.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, [suhareva@physics.msu.ru](mailto:suhareva@physics.msu.ru)

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына

<sup>3</sup>Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Статистические характеристики для проекций векторов межпланетного магнитного поля и скорости потока частиц солнечного ветра не несут информации о порядке реализации доступных состояний исследуемой физической системы. Подобные характеристики могут быть получены из фазовых диаграмм или фазовых портретов, создаваемых на основе экспериментальных выборок на подпространствах фазового пространства. Фазовые портреты отображает как значения векторных величин, так и порядок из следования для конкретного временного ряда. В работе представлен разрабатываемый авторами метод векторных графов [1], обсуждаются результаты контроля и анализа реализуемых графов на основе временных рядов спутникового мониторинга состояния межпланетной среды с 20230101 по 20231231.



Векторные графы создаются на основе экспериментальных выборок для проекций векторов рассматриваемых полей, предоставляемых базой данных аппарата WIND. В узлах графа сходятся и расходятся векторы полей, ребра графа позволяют контролировать анализируемую траекторию системы в фазовом подпространстве и восстанавливать дерево переходов для конкретного векторного поля. Рассмотрены два типа фазовых траекторий, – локальные и накопительные, различающиеся значением интервала анализируемых событий. Поскольку для исследуемой системы характерны нелокальные взаимодействия, их описание информативно при использовании накопительных характеристик. Примеры фазовых траекторий приведены на Рис. 1, интервал накопления составил 5 суток или 7200 одноминутных отсчетов. Особое внимание уделено фазовым свойствам событий апреля и ноября 2023 года.

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

[1] Ю.А. Антонов и др., // Космические исследования 2024, т.62, вып.1 (в печати)

## **АНАЛИЗ ГРАНИЦ ПОВОРОТОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ PARKER SOLAR PROBE**

**Малыхин А.Ю., Васько И.Ю.**

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [anmaurdreg@gmail.com](mailto:anmaurdreg@gmail.com)*

Повороты магнитного поля в солнечном ветре, называемые в англоязычной литературе magnetic switchbacks, были обнаружены в 70-х годах прошлого века аппаратами Helios 1 и 2 и представляют собой быструю смену полярности радиального магнитного поля. Вплоть до наших дней анализ данных магнитоплазменных структур проводился, в основном, на радиальных расстояниях, превосходящих 1 а.е.. Измерения спутниковой миссии Parker Solar Probe (PSP) позволили впервые исследовать данные магнитоплазменные структуры на рекордно близких радиальных расстояниях от Солнца, вплоть до 10 солнечных радиусов.

Несмотря на продолжительную историю наблюдений, недостаток данных не позволял, до недавнего времени, составить окончательные представления о происхождении, динамике и эволюции таких магнитоплазменных структур. В данной работе представлены наблюдения более чем 1400 подобных структур, которые наблюдались в течение 10 дней в окрестности первого перигелия. Выполнен статистический анализ поворотов магнитного поля, произведены оценки характерных масштабов данных структур, а также детальный анализ их границ.

Работа выполнена в рамках НИР по теме «Плазма».

## **КОРОТИРУЮЩИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНАЯ БУРЯ 1-2 ДЕКАБРЯ 2023 Г. ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН**

**Лукманов В.Р.**

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, [lukmanov@prao.ru](mailto:lukmanov@prao.ru)*

Рассмотрены данные наблюдений межпланетных мерцаний, полученных на радиотелескопе Большая Синфазная Антенна (БСА) Физического института им. П.Н. Лебедева (ФИАН) перед началом, в период и после магнитной бури, произошедшей 1 – 2 декабря 2023 г. Проводилось сравнение данных наблюдений с модельными расчетами для распространяющихся коротирующих возмущений. В день перед началом магнитной бури наблюдались признаки распространяющейся коротирующей структуры. Однако затем наблюдаются признаки распространяющегося выброса корональной массы, распространяющегося после вспышки M9.8 28 ноября 2023 г., проводились также соответствующие сравнения наблюдательных данных с модельными расчетами для данного выброса корональной массы. По-видимому, имело место наложение крупномасштабных возмущений солнечного ветра двух видов, которые и привели к магнитной буре.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ МАГНИТНЫЕ ОБЛАКА

Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов А.В., Белов С.М., Абунин А.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [abunina@izmiran.ru](mailto:abunina@izmiran.ru)

Исследованы времена регистрации экстремальных значений основных параметров межпланетной среды, вариаций космических лучей и геомагнитной активности при прохождении корональных выбросов массы, содержащих структуру магнитного облака (МО), мимо Земли. Рассматривались следующие части межпланетных возмущений (МВ): (I) от начала возмущения и до начала МО, (II) внутри магнитного облака, (III) от окончания МО до окончания МВ, которым часто являлось начало следующего межпланетного возмущения. Показано, в каких частях МВ чаще регистрируются экстремумы скорости солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, плотности и анизотропии космических лучей, а также индексов геомагнитной активности. Отдельно рассмотрены случаи близко взаимодействующих событий, когда следующее межпланетное возмущение «догоняет» еще не окончившееся межпланетное возмущение, содержащее МО.

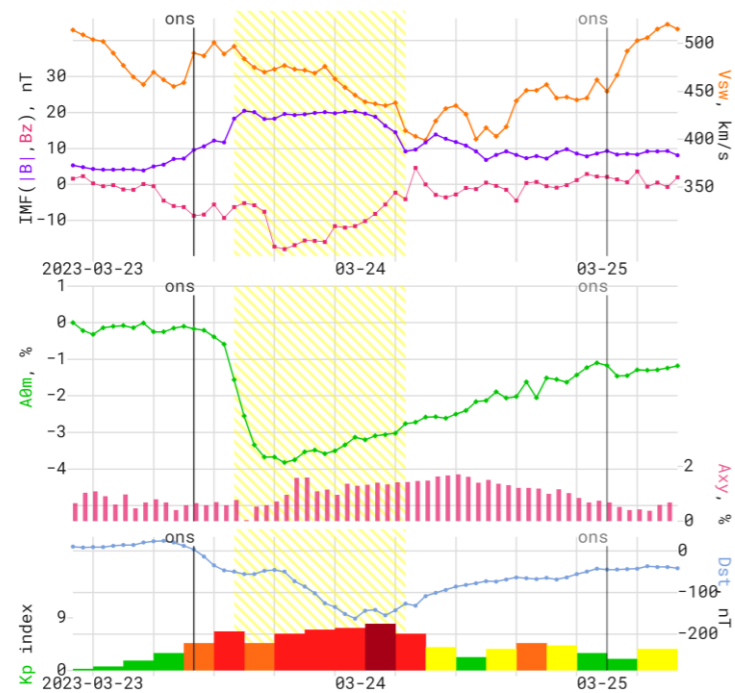


Рисунок. Поведение основных параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, вариаций плотности и анизотропии космических лучей и индексов геомагнитной активности во время межпланетного возмущения 23-25 марта 2023 года.

## ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ И ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

Белова Е.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белов С.М., Абунин А.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [lbelova@izmiran.ru](mailto:lbelova@izmiran.ru)

Выделены и исследованы события Форбуш-эффектов в галактических космических лучах (по данным сети нейтронных мониторов) и сопутствующих геомагнитных возмущений за длительный период с 1957 по 2022 гг. Проанализированы статистические связи между различными параметрами вариаций потока космических лучей и индексами геомагнитной активности. Установлено, что величина Форбуш-эффектов нелинейно зависит от класса геомагнитной бури. Найдена умеренная корреляция между экстремальными значениями различных индексов геомагнитной активности ( $A_p$ ,  $K_p$ ,  $Dst$ ) и характеристиками космических лучей. Показано, что одновременная регистрация экстремальных значений параметров космических лучей и геомагнитной активности происходит далеко не всегда, а зависит от знака  $Bz$ -компоненты межпланетного магнитного поля в конкретном событии.

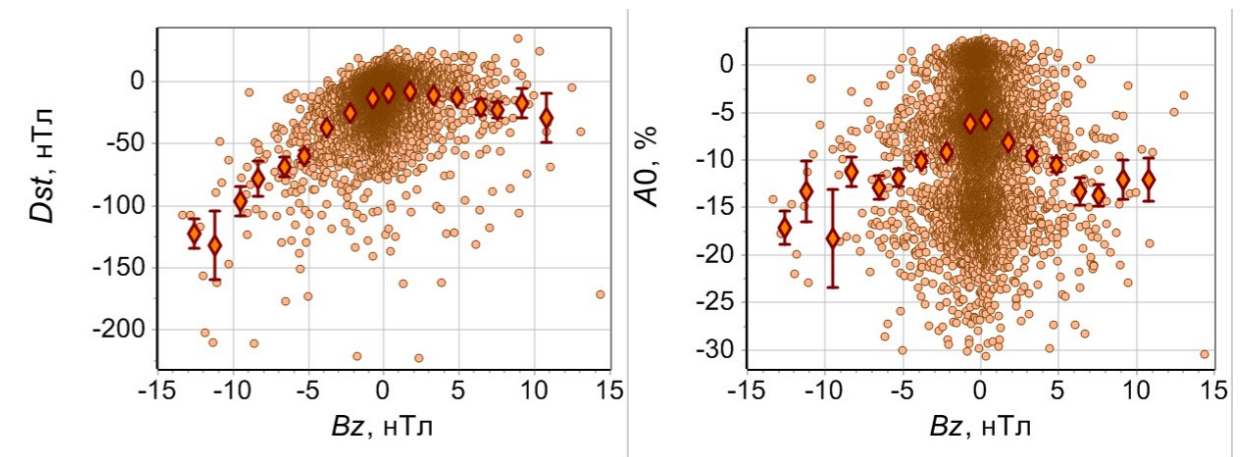


Рис.1. Связь среднесуточных значений  $Dst$ -индекса ГА и плотности потока КЛ ( $A_0$ ) с  $Bz$ -составляющей ММП (ромбами показаны величины, усредненные по равным интервалам изменения значений  $Bz$ ).

## ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЛОКАЛЬНОЙ КОРОТИРУЮЩЕЙ ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ РАЗНОСКОРОСТНЫХ СТРУЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

**Анохин М.В.**<sup>1,2,3</sup>, Галкин В.И.<sup>2</sup>, Шилло А.Г.<sup>3</sup>

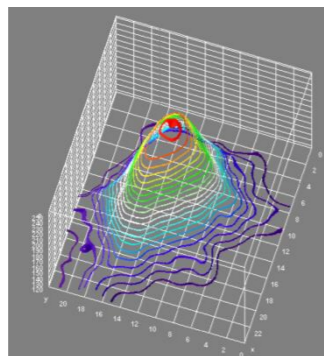
<sup>1</sup> СКБ КП ИКИ РАН, г. Таруса, Россия,

<sup>2</sup> НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия,

<sup>3</sup> Институт тонких экологических технологий (ИТЭТ) г. Таруса, Россия.

[anokhinmikhail@yandex.ru](mailto:anokhinmikhail@yandex.ru)

По ходу разработки пакета обучающей выборки для нейросети, предназначенной для микродозиметрического мониторинга поля ионизирующих частиц в ПЗС LASCO C3 было проведено наблюдение и регистрация с частотой 4 кадра в час процесса образования и эволюции локальной коротирующей области взаимодействия (КОВ) плазменных струй от Солнца, обусловленной двумя разноскоростными потоками СВ. Вначале из Солнца вышла довольно узкая, короткая медленная струя плазмы, затем почти в этом же направлении вышла вторая струя с большей скоростью. Когда вторая струя догнала первую в течении приблизительно 45 минут образовался шар (шаровая молния), существовавший довольно продолжительное время и медленно уходящий от Солнца. На рисунке показан этот шар



Построение эквипотенциалей плотности излучения шара позволяет выделить довольно компактное плотное ядро. Видимо это явление может быть описано в рамках теории двухструйного плазмотрона на основе системы стационарных двумерных уравнений непрерывности Навье–Стокса, баланса энергии и непрерывности электрического тока. Процесс может быть интересен для уточнения представлений о геоэффективности процессов, происходящих в гелиосфере.

## СПЕКТРЫ ВАРИАЦИЙ И АНИЗОТРОПИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОДЫ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В МАРТЕ 2023 Г.

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки *Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН)*, г. Иркутск, Россия

e-mail: [ivankov@iszf.irk.ru](mailto:ivankov@iszf.irk.ru)

По данным наземных наблюдений космических лучей на мировой сети нейтронных мониторов, Якутском комплексе мюонных телескопов и мюонном годоскопе УРАГАН (г. Москва) методом спектрографической глобальной съемки рассчитаны спектры вариаций и анизотропия космических лучей во время Форбуш-эффектов 15 и 23 марта 2023 года. Показано, что спектр вариаций космических лучей в эти периоды не описывается степенной функцией по жесткости в широком диапазоне. Установлено, что 15 марта Земля находилась в петлеобразной структуре межпланетного магнитного поля.

## ВЛИЯНИЕ КВАЗИНЕЙТРАЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СООТНОШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР АЛЬФА ЧАСТИЦ И ПРОТОНОВ

Кислов<sup>1,2</sup> Р.А., Евдокимова<sup>3</sup> М.А., Хабарова<sup>1,4</sup> О.В., Малова<sup>3,5</sup> Х.В.

<sup>1</sup> ИЗМИРАН, Россия, Москва, Троицк, [kr-rk@bk.ru](mailto:kr-rk@bk.ru)

<sup>2</sup> Ariel University, Ariel, Israel

<sup>3</sup> ИКИ РАН, Россия, Москва

<sup>4</sup> Raymond & Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

<sup>5</sup> НИИЯФ МГУ, Россия, Москва

В невозмущённом солнечном ветре соотношение температур альфа-частиц и протонов меняется в пределах от 3 до 6. Считается, что это соотношение определяется источниками частиц на Солнце. В данном исследовании показано, что отношение температур в произвольных одномерных структурах в гелиосфере зависит от отношения дрейфовых скоростей альфа-частиц и протонов и их зарядов вне явной зависимости от условий на Солнце. Этот вывод сделан на основании решения системы уравнений Максвелла-Власова, описывающей произвольный объём плазмы солнечного ветра в одномерном приближении. Показано, что в предположении о квазинейтральности плазмы на функции распределения частиц накладываемое ограничение, из которого следует указанное соотношение между зарядами, температурами и компонентами дрейфовых скоростей, направленными поперёк градиента магнитного поля. Полученное соотношение согласуется с оценками, полученными по данным аппаратов Ulysses и Wind.

## ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В РАЗНЫХ ТИПАХ ТЕЧЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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](mailto:aleks.xaa@yandex.ru)

В потоке солнечного ветра можно выделить ряд крупномасштабных типов течений, которые характеризуются различными физическими свойствами и, в частности, обладают разной долей дважды ионизированных ионов гелия в своём составе. Относительное содержание гелия в квазистационарных потоках составляет в среднем 3–5%, при этом максимальное значение содержания гелия, как правило, наблюдается в межпланетных проявлениях выбросов корональной массы и может достигать 10–15%. Аналогично другим параметрам плазмы, содержание гелия может значительно варьировать локально в структурах, которые наблюдаются внутри крупномасштабных течений.

Данная работа посвящена исследованию вариаций содержания гелия в разных типах течений. На основе данных из базы OMNI и измерений космического аппарата WIND были рассмотрены зависимости относительного содержания гелия от других параметров плазмы и межпланетного магнитного поля. Для изучения влияния спада солнечной активности, существование которого было показано в работе [1], на поведение гелия в разных течениях было проведено сравнение зависимостей между параметрами в двух периодах: эпохе высокой солнечной активности (1976–1996 год) и эпохе низкой активности (1997–2019 год). Кроме того, в рамках подтверждения гипотезы о существовании обогащённого ионами гелия электрического тока [2] в центральной области межпланетных выбросов корональной массы при помощи метода минимума вариаций межпланетного магнитного поля проводилась оценка характера зависимости содержания гелия от расстояния до оси структуры.

Результаты статистического анализа показывают, что значение относительного содержания гелия в среднем уменьшается с ростом плотности протонов и потока частиц почти для всех типов течений. Исключением являются быстрые потоки, в которых наблюдается корреляция между этими параметрами. Характер зависимостей для разных типов течений не меняется при смене эпохи солнечной активности. При этом зависимости в эпоху низкой солнечной активности располагаются ниже, что связано со снижением в среднем содержания гелия по сравнению с эпохой высокой активности. В частности, зависимости между параметрами в разных эпохах схожи для обоих подтипов межпланетных выбросов корональной массы – магнитных облаков МС и событий Ejecta, что согласуется с результатами работы [3].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №22-12-00227.

1. Yermolaev Y.I. et al. Drop of solar wind at the end of the 20th century. // J. Geophys. Res. 2021. V. **126**. e2021JA029618.

2. 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**. e2020JA027878.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СТОЛКНОВЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРНОМ УДАРНОМ СЛОЕ

**Титова А. В., Измоленов В. В., Корольков С. Д.**

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия,*

*НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, [avtitova@hse.ru](mailto:avtitova@hse.ru)*

При взаимодействии протонов и атомов водорода в диапазоне энергий меньше 10 кэВ доминирующими процессами являются перезарядка и упругие столкновения [1]. Если эффекты перезарядки были учтены ранее в глобальных численных моделях гелиосферы, то вопрос о необходимости включения упругих столкновений до сих пор остается открытым. Упругие столкновения случаются чаще, однако рассеяние происходит в основном на малые углы, а следовательно, изменение импульса невелико. Цель данной работы — оценить влияние упругих столкновений на функцию распределения межзвездных атомов водорода в гелиосферном ударном слое, а также на видимые параметры: спектры поглощения и рассеянного излучения в линии Лайман-альфа.

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 [2]. 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 вычислений показали, что отличия в поведении функции распределения при учете упругих столкновений есть, хоть и небольшие. Разница в моментах распределения (концентрация, средняя скорость, температура) составляет максимум 5-7%. Также из рассчитанных на основе полученных распределений спектров видно, что на видимые параметры упругие столкновения влияния почти не оказывают.

## ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА КНУДСЕНА НА СТРУКТУРУ АСТРОСФЕРЫ И СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИИ ЛАЙМАН-АЛЬФА

**Корольков С.Д., Измоленов В.В.**

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [korolkovsd@my.msu.ru](mailto:korolkovsd@my.msu.ru)*

В рамках данной задачи мы проводим параметрическое исследование взаимодействия звёздного ветра с частично ионизированной межзвёздной средой от числа Кнудсена. Число Кнудсена – это отношение длины свободного пробега атомов водорода к характерному размеру задачи. Для гелиосферы это отношение близко к единице. Основным процессом взаимодействия нейтральной и заряженной компонент считается резонансная перезарядка, влиянием магнитных полей пренебрегается. Для описания заряженной компоненты используется газодинамический подход, для нейтральной компоненты – кинетический. Таким образом, проведён анализ структуры астросфер произвольных размеров, подвергающихся резонансной перезарядке на межзвёздных атомах водорода.

Кроме того, для относительно медленно вращающихся звезд единственным (на настоящее время) методом определения параметров звездного ветра является метод, который основан на анализе спектра поглощения в линии Лайман-альфа в области водородных стенок. Это поглощение было обнаружено при спектроскопических наблюдениях линии H I Ly $\alpha$  космическим телескопом Hubble Space Telescope (см., например, Vidal-Madjar et al. 2003; Lecavelier des Etangs et al. 2010, A&A; 14 Bourrier et al. 2016). В последнее время наблюдения спектров поглощения в линии Лайман-альфа используются, главным образом, для изучения структуры и эволюции атмосферы экзопланет (например, Ekenbäck et al. 2010; Kislyakova et al. 2014, Science; Schneider et al. 2016). Однако эти же данные можно использовать и для определения параметров звездных ветров, поскольку величина поглощения частично зависит от плотности и скорости звездного ветра, как продемонстрировано Vidotto & Bourrier (2017) для M-карлика GJ 436. Таким образом, мы исследуем чувствительность спектров поглощения в линии Лайман-альфа к изменению параметров задачи (в частности, числа Кнудсена) и анализируем возможность определения параметров звёздных ветров по наблюдаемым спектрам.

1. D. R. Schultz et al 2016 J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 49 084004
2. V.V.Izmodenov, D.B. Alexashov 2020, A&A, 633, L12.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕЛИОСФЕРНОГО УДАРНОГО СЛОЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ ВО ВНУТРЕННЕЙ ГЕЛИОСФЕРЕ.

**Годенко Е.А., Измоденов В.В.**

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [eg24@yandex.ru](mailto:eg24@yandex.ru)

Частицы межзвездной пыли проникают в гелиосферу из-за относительного движения Солнца в Локальной межзвездной среде. Наличие межзвездных пылинок в гелиосфере было впервые обнаружено по измерениям космического аппарата (КА) Улисс в 1993 году [1]. Всего во время работы миссии КА Улисс было поймано 6719 частиц пыли, из которых около 600 пылинок имеют межзвездное происхождение. Возможность определения того, что пылинка является межзвездной (а не межпланетной), была обусловлена тем, что траектория КА Улисс лежала в плоскости, практически перпендикулярной плоскости эклиптики. Анализ полученных данных [2] показал, что распределение межзвездных пылевых частиц в гелиосфере является существенно неоднородным, а, значит, их траектории не являются прямолинейными, и, в частности, отклоняются от своего первоначального направления, которое в невозмущенной межзвездной среде совпадает с направлением движения плазмы.

Динамика межзвездных пылевых частиц в гелиосфере определяется тремя основными силами: силой гравитационного притяжения к Солнцу, силой радиационного давления со стороны солнечных фотонов и электромагнитной силой, причем на больших гелиоцентрических расстояниях ( $> 10$  а.е.) существенной является лишь электромагнитная сила. В данной работе мы проводим исследование влияния электромагнитной силы в гелиосферном ударном слое (область взаимодействия солнечного ветра и плазмы Локальной межзвездной среды) на распределение пылинок во внутренней гелиосфере. Величина этой силы зависит от локальных свойств плазмы, и, соответственно, для вычисления траекторий пылинок необходимо использовать распределения параметров плазмы, которые мы берем из глобальной модели гелиосферы [3]. Мы впервые показываем, как при учете эффектов, возникающих в гелиосферном ударном слое, меняется распределение пыли во внутренней гелиосфере для частиц разных размеров. В настоящее время в гелиосферном научном сообществе предполагается, что именно учет этого эффекта даст ответы на вопросы, оставленные после анализа данных на КА Улисс. Помимо этого, мы представляем новый способ диагностики свойств межзвездного магнитного поля, который состоит в поиске комбинации параметров, определяющих взаимодействие солнечного ветра с Локальной межзвездной средой, при которой соответствующее распределение межзвездной пыли (т.е. вычисленное для соответствующего распределения параметров окружающей плазмы) будет наилучшим образом соотноситься с экспериментальными данными, полученными на КА Улисс.

[1] Grun E., Zook H. A., Baguhl M. et al., 1993, Nature, V. **362**, 42.

[2] Strub P., Kruger H., Sterken V.J., 2015, ApJ, **812**, 140.

[3] Izmodenov V.V., Alexashov D.B., 2020, A&A, **633**, L12

## ГЕЛИОСФЕРНЫЕ АТОМЫ ВОДОРОДА: ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСООТВЕТСТВИЯ МЕЖДУ МОДЕЛЬНЫМИ И НАБЛЮДАЕМЫМИ НА КА IBEX ПОТОКАМИ НА ЭНЕРГИЯХ МЕНЕЕ 1 КЭВ

**Балиюкин И.И., Измоденов В.В., Galli A., Kornbleuth M., Sokół J.M., Opher M.**

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [igor.baliukin@gmail.com](mailto:igor.baliukin@gmail.com)

Космический аппарат (КА) Interstellar Boundary Explorer (IBEX) с 2008 г. проводит измерения на орбите Земли и получает полные карты неба в потоках атомов. Измеряются как межзвездные атомы (H, He, O, Ne и др.), проникающие в гелиосферу из локальной межзвездной среды, так и энергичные нейтральные атомы (ЭНА) водорода, которые рождаются в области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой в процессе перезарядки межзвездных атомов водорода с протонами солнечного ветра. КА IBEX проводит измерения при помощи двух приборов: IBEX-Lo охватывает диапазон низких энергий от 10 эВ до 2 кэВ, а IBEX-Hi – от 500 эВ до 6 кэВ, включая ЭНА водорода с энергиями порядка энергии солнечного ветра (~1 кэВ).

Анализ данных измерений потоков ЭНА является мощным инструментом удаленной диагностики, который позволяет исследовать распределение протонов на границе гелиосферы в силу того, что регистрируемые энергетические распределения ЭНА несут информацию о свойствах той области плазмы, в которой атомы были рождены. Для восстановления информации о свойствах гелиосферы (в частности, о распределении различных популяций протонов на границе гелиосферы), данные наблюдений необходимо сравнивать с предсказаниями численных моделей.

В исследовании впервые было проведено детальное количественное сравнение модельных и наблюдаемых КА IBEX в течение одного полного солнечного цикла (2009 – 2019) потоков гелиосферных атомов водорода с энергиями менее 1 кэВ для различных направлений гелиосферы. В расчётах использовались распределения параметров плазмы и атомов водорода, вычисленные в рамках двух различных кинетико-МГД моделей взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (Izmodenov & Alexashov 2020 и Opher et al. 2015).

При использовании двух независимых моделей был получен один и тот же основной результат: между экспериментальными данными и предсказаниями моделей в диапазоне энергий 100 – 500 эВ наблюдается большая разница в интенсивности потоков ЭНА (от 1 до 2 порядков величины для частиц с энергиями ~100 эВ). Было замечено, что разница присутствует для всех направлений гелиосферы, и на текущий момент причина этого несоответствия неизвестна. В докладе будут сформулированы гипотезы и проведено обсуждение потенциальных причин такой большой разницы между данными наблюдений и модельными потоками.

Результаты исследования опубликованы в работе Galli et al. (2023, ApJL, 954, 1, L24, doi: [10.3847/2041-8213/acd99b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acd99b)).



## ДИНАМИКА ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НА ПУТИ ОТ СОЛНЦА К ЗЕМЛЕ

Рязанцева М.О.<sup>1</sup>, Рахманова Л.С.<sup>1</sup>, Володин И.Д.<sup>2</sup>, Хохлачев А.А.<sup>1</sup>, Ермолаев Ю.И.<sup>1</sup>, Застенкер Г.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [orearm@gmail.com](mailto:orearm@gmail.com)

<sup>2</sup> Университет г. Инсбрук, Австрия

Динамика, параметров солнечного ветра и их флуктуаций на пути от Солнца к Земле широко обсуждается в литературе в связи с задачами космической погоды. Данная работа посвящена анализу свойств турбулентных флуктуаций солнечного ветра, наблюдаемых космическими аппаратами (КА) Solar Orbiter и WIND. Исследованы два длительных интервала наблюдений (~9 суток каждый), когда КА находились вблизи линии Солнце-Земля, а расстояние между спутниками составляло 0.1 и 0.5 а.е. соответственно. При этом, в течение интервалов наблюдались несколько типов солнечного ветра, включая медленные и быстрые квазистационарные потоки, корональные выбросы массы, области компрессии плазмы перед высокоскоростными потоками и др. Анализируется, как свойства турбулентных флуктуаций в различных типах солнечного ветра трансформируются на пути от Солнца к Земле. Показано, что независимо от изменений абсолютных значений параметров плазмы и магнитного поля, статистические свойства флуктуаций остаются почти постоянными при различных расстояниях между точками наблюдений и связаны преимущественно с типом солнечного ветра. При сравнительно малом расстоянии между КА (~0.1 а.е.) наблюдаемые на них спектры флуктуаций межпланетного магнитного поля близки как по мощности, так и по наклонам спектров на МГД и кинетических масштабах. При наблюдениях на Solar Orbiter ближе к Солнцу (~0.5 а.е.), мощности частотных спектров флуктуаций межпланетного магнитного поля заметно выше, чем на WIND, проводящем измерения в L1. При этом наклоны спектров флуктуаций на МГД масштабах близки к теоретическому предсказанию  $-5/3$  для колмогоровской турбулентности, и как правило не меняются при распространении плазмы к Земле. Наклоны спектров флуктуаций на кинетических масштабах, близкие к модельным, наблюдаются при измерениях вблизи точки L1 для спокойных условий солнечного ветра, тогда как по наблюдениям Solar Orbiter на 0.5 а.е. наблюдаются заметно более крутые спектры. Наклоны спектров на кинетических масштабах отличаются для разных типов солнечного ветра, но для всех случаев более крутые спектры наблюдаются ближе к Солнцу. Следует отметить, что изменения турбулентного каскада, связанные с динамикой солнечного ветра при движении в гелиосфере, гораздо сильнее, чем изменения, обычно наблюдаемые на 1а.е. (например, для разных потоков СВ). Полученные результаты свидетельствуют о том, что, по всей видимости, окончательное развитие каскада турбулентных флуктуаций происходит при приближении плазмы к орбите Земли. Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-12-00227.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЦУГОВ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКА ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА 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](mailto:borodkova_nl@cosmos.ru)

По данным плазменного спектрометра БМСВ, измеряющего параметры плазмы солнечного ветра с временным разрешением порядка 0.03 сек., дополненных измерениями магнитного поля, исследовалась структура нескольких фронтов бесстолкновительных квазиперпендикулярных межпланетных ударных волн с малыми числами Маха и параметром бета. Основное внимание было уделено цугам колебаний, как потока ионов, так и магнитного поля, возникающих перед рампом ударной волны и являющимися низкочастотными (~0,5-4 Гц) магнитозвуковыми свистовыми волнами.

Было показано, что цуги колебаний магнитного поля распространяются под разными углами относительно направления магнитного поля и нормали к фронту ударной волны. Они имеют правостороннюю поляризацию.

Анализ колебаний потока ионов перед рампом ударной волны показал, что они эллиптически поляризованы, имеют как левую, так и правую поляризацию и распространяются под малыми углами по отношению к вектору нормали к ударному фронту.

При приближении к рампу частота колебаний в цугах и магнитного поля, и потока ионов возрастает, также возрастает угол между направлением движения цуга и вектором магнитного поля.

Сделан сравнительный анализ цугов колебаний потока ионов и магнитного поля, сгенерированных разными участками рампа одной и той же ударной волны. На основании анализа трех событий было показано, что углы распространения цугов колебаний магнитного поля от разных участков рампа различаются, что связано с нестационарностью и реформацией фронта ударной волны.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-00227.

## АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ФЛУКТУАЦИЙ ВЕЛИЧИНЫ ПОТОКА ПЛАЗМЫ И МОДУЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ 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 проанализированы спектры колебания значений потока плазмы солнечного ветра, и модуля магнитного поля вблизи фронта быстрой обратной ударной волны по данным прибора БМСВ (Быстрый Монитор Солнечного Ветра). Временное разрешение прибора позволило изучить колебания потока плазмы до частоты 16 Гц. Магнитное поле было взято в основном со спутника WIND с частотой опроса 11 Гц. В ряде случаев использовались данные со спутника DSCOVR.

Было показано, что наклон спектров колебаний потока солнечного ветра на МГД масштабах близок к наклону спектра флуктуаций магнитного поля в возмущенной области. На кинетических масштабах различие может быть значительным. Для области перед фронтом разница наклона спектра может быть достаточно велика как в МГД, так и в кинетической области.

Частота излома спектра потока лежит в диапазоне 0,6 – 1,3 Гц, что 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. Излом спектра мощности флуктуаций магнитного поля также чаще лежит в области 0,7 – 1,2 Гц. При этом наклон МГД части спектра меняется мало, однако в кинетической части несколько возрастает при переходе к возмущенной области.

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРОВ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С КОЛИЧЕСТВОМ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

**Тревес Т.В.<sup>1,2</sup>, Рязанцева М.О.<sup>1</sup>, Хабарова О.В.<sup>3,2</sup>**

<sup>1</sup>*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [timothy.treves@gmail.com](mailto:timothy.treves@gmail.com)*

<sup>2</sup>*ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Raymond & Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel*

В исследованиях солнечного ветра актуальной проблемой является аномальный, неадиабатический нагрев. Одним из наиболее популярных подходов для объяснения этого эффекта является так называемый турбулентный нагрев. В связи с этим важно понимание, какие структуры в солнечном ветре вносят преимущественный вклад в процессы диссипации и нагрева плазмы. Ряд работ указывает на значимую роль двумерных структур, таких как токовые слои в этом процессе. В данной работе исследуется динамика характеристик турбулентного каскада и количества токовых слоев при переходе из одного типа солнечного ветра в другой. Проведенный анализ позволил выявить сложную взаимосвязь между количеством токовых слоев и укрупнением спектров турбулентного каскада на кинетических масштабах в областях компрессии плазмы. В среднем в этих областях спектры флуктуаций вектора межпланетного магнитного поля укрупняются на кинетических масштабах, и при этом наблюдается увеличенное количество токовых слоев. Однако, при детальном рассмотрении видно, что именно в той области, где наблюдается максимальное количество токовых слоев, спектры флуктуаций на кинетических масштабах, становятся даже более плоскими чем в спокойном солнечном ветре, а укрупнение спектров флуктуаций происходит позже. Ранее предполагалось, что укрупнение спектров флуктуаций в областях компрессии плазмы связано с усилением диссипации на мелкомасштабных структурах, в том числе на мелкомасштабных токовых слоях, однако, возможно, эта связь более сложная. Также показано, что в моменты наблюдения максимального количества токовых слоев спектры флуктуаций вектора ММП не только уплощаются на кинетических масштабах, но также существенно укрупняются на МГД масштабах. Т.е., вероятно происходит переформирование турбулентного каскада в результате вклада в него мелкомасштабных токовых слоев, что может приводить к локальным нарушениям передачи энергии по каскаду турбулентных флуктуаций. Выявленные тренды требуют дальнейшей проверки и уточнения на более обширном статистическом материале. Выполненная работа важна для понимания роли токовых слоев, регулярно наблюдаемых в солнечном ветре, в формировании спектра турбулентных флуктуаций, и процессах диссипации в космической плазме.

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

## **ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР НА ИЗМЕНЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА ЗА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ**

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

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [rakhlud@gmail.com](mailto:rakhlud@gmail.com)*

Крупномасштабные межпланетные возмущения являются главным драйвером геомагнитной активности. Однако, магнитосферные возмущения могут наблюдаться и в периоды спокойного солнечного ветра. Источником этих возмущений могут являться турбулентные флуктуации в солнечном ветре. Однако, ряд последних исследований показал, что при пересечении головной ударной волны часть информации о свойствах каскада турбулентных флуктуаций в солнечном ветре не сохраняется, и турбулентный каскад в магнитослое формируется, фактически, заново при приближении плазмы к магнитопаузе. Такие данные не согласуются с предположениями о непосредственной связи турбулентности солнечного ветра и геомагнитной активностью. С другой стороны, точного понимания, как именно и при каких условиях изменяются свойства турбулентного каскада в магнитослое, в настоящий момент нет. В данной работе рассмотрено, как на характеристики турбулентности солнечного ветра и их изменение при пересечении плазмой головной ударной волны влияют структуры среднего масштаба (изменения параметров плазмы и/или магнитного поля, наблюдающиеся по спутниковым данным за времена от минут до десятка минут). Рассмотрен ряд событий, когда доступные данные двух и более космических аппаратов позволяют проследить один и тот же объем плазмы в солнечном ветре и в магнитослое. Отобранные события относятся к различным типам солнечного ветра, включая медленный спокойный ветер, области компрессии плазмы, межпланетные проявления корональных выбросов массы. Внутри крупномасштабных течений были выделены периоды, в которых параметры плазмы и магнитного поля квазистационарны, а также периоды, когда внутри крупномасштабных структур наблюдаются структуры средних масштабов. Для таких событий были проанализированы свойства турбулентности перед и за головной ударной волной на основе Фурье-анализа. Было показано, что в периоды возмущенного течения солнечного ветра на головной ударной волне происходит существенная модификация каскада, и среднемасштабные структуры не оказывают влияния на этот процесс. Присутствие среднемасштабных структур на фоне спокойного течения солнечного ветра может приводить к сохранению свойств каскада в магнитослое, в то время как при их отсутствии характеристики турбулентности в магнитослое определяются локальными волновыми процессами за ударной волной. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-12-00227.

## **ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА НА ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ: СТАТИСТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

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

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [rakhlud@gmail.com](mailto:rakhlud@gmail.com)*

Межпланетная среда является естественной лабораторией для исследований свойств турбулентности в бесстолкновительной плазме, которые широко анализируются в последние годы благодаря большому количеству спутниковых данных. В настоящий момент, характеристики турбулентности солнечного ветра на околоземной орбите в среднем известны. Однако показано, что при пересечении околоземной ударной волны происходит их изменение, в частности, в магнитослое увеличивается мощность флуктуаций, усиливается анизотропия температуры и происходит генерация волновых процессов, а также может наблюдаться отсутствие Колмогоровского скейлинга, характерного для солнечного ветра. Все факторы, влияющие на изменение свойств турбулентности при входе плазмы в магнитослой, до сих пор до конца не ясны. В настоящей работе на основании анализа около 300 часов одновременных измерений параметров магнитного поля в солнечном ветре по данным спутника WIND и в дневном магнитослое по данным спутников Themis проводится статистическое исследование изменений свойств турбулентного каскада при пересечении околоземной ударной волны. Выделяются периоды, когда один и тот же объем плазмы наблюдается одновременно на двух спутниках, проводится Фурье-анализ флуктуаций магнитного поля и аппроксимация полученных частотных спектров степенными функциями в двух диапазонах масштабов – МГД и кинетическом. Определяются показатели степенных функций (наклоны спектров) и проводится их сопоставление в солнечном ветре и магнитослое. Показано, что наклон  $-5/3$ , характерный для плазмы солнечного ветра на МГД масштабах, может сохраняться при пересечении плазмой околоземной ударной волны в 13% случаев, тогда как в остальных случаях наблюдается заметное уплощение спектров. На кинетических масштабах сохранение наклона спектра наблюдается в 30% случаев, а в среднем характерно небольшое укрупнение спектров в магнитослое. Кроме того, показано, что на изменение свойств турбулентности на околоземной ударной волне на кинетических масштабах влияет скорость солнечного ветра и температура окружающей плазмы, в то время как свойства спектров флуктуаций магнитного поля в магнитослое определяются локальным значением плазменного параметра  $\beta$  вне зависимости от характеристик турбулентности плазмы солнечного ветра. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-72-00105.

## ОБ МГД-СИМУЛЯЦИИ КОРОТИРУЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ГКЛ

**Павлов Д. А.<sup>1,2</sup>, Крайнёв М. Б.<sup>3,4</sup>, Кодуков А. В.<sup>2</sup>, Арутюнян С. Н.<sup>2</sup>, Ло Си.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, *d.a.pavlov@spbu.ru*

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ)

<sup>3</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>4</sup> Шаньдунский университет передовых технологий, Цзинань, Китай

В настоящее время в исследовании галактических космических лучей (ГКЛ) возрастает интерес к изучению влияния на них магнитного поля, переносимого солнечным ветром и содержащимися в нём коротирующими областями взаимодействия (см. напр. [1, 2]). При этом моделирование магнитного поля производится в рамках численного решения магнитогидродинамических (МГД) уравнений солнечного ветра. Изучение ГКЛ требует информации о магнитном поле и его флуктуациях на больших (до 20 а. е. и дальше) расстояниях от Солнца. В настоящей работе проведено МГД-моделирование солнечного ветра для Каррингтоновского периода (CR) 2066. Граничные условия на радиусе 0.1 а. е. вычислены на основе синоптических карт радиальной компоненты магнитного поля, предоставленных сетью обсерваторий GONG, с использованием потенциальной модели магнитного поля (PFSS), модели токового слоя Шаттена (SCS) и модели скорости частиц солнечного ветра Вана-Шили-Арге (WSA), а также с использованием известных инвариантов и калибровочных констант. МГД-симуляция производится в пакете PLUTO [3, 4] во вращающейся системе координат с полным диапазоном по широтам и диапазоном 0.1 - 20 а. е. по расстоянию. Граничные условия во время симуляции принимаются постоянными. Длительность симуляции составляет 122.35 суток (5 полных Каррингтоновских оборотов), что позволяет получить стационарное решение в указанном диапазоне. Результаты моделирования сопоставлены с ранее полученными результатами [1], также полученными с помощью МГД-моделирования.

[1] Xi Luo et al. (2020). A Numerical Study of the Effects of Corotating Interaction Regions on Cosmic-Ray Transport. *ApJ* 899, p. 90

[2] Крайнёв М.Б. и др. (2023). О проявлении коротирующих областей взаимодействия солнечного ветра в вариациях интенсивности ГКЛ. *Солнечно-земная физика*. Т. 9, № 1. С.10–21.

[3] A. Mignone et al (2007). PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics 2007 *ApJS* 170, p. 228

[4] С. Арутюнян и др (2023). Прототип службы прогноза спокойного солнечного ветра на основе МГД-моделирования и граничных условий модели WSA. *Космические исследования* Т. 61, № 6, стр. 447-453

## О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ГКЛ ОКОЛО ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ ПОСЛЕДНИХ МИНИМУМОВ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

**Крайнёв М.Б.<sup>1,2</sup>, Калинин М.С.<sup>1</sup>, Михайлов В.В.<sup>2</sup>, Мухин П.<sup>3</sup>,  
Ngobeni M.D.<sup>4</sup>, Павлов Д.А.<sup>5</sup>, Potgieter M.S.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, *mkrainev46@mail.ru*

<sup>2</sup>Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China

<sup>3</sup>Московский инженерно-физический институт, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Centre for Space Research, North-West University, Potchefstroom, South Africa

<sup>5</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Ст.-Петербург, Россия

Интенсивность галактических космических лучей в двух последних минимумах солнечного цикла, соответственно, между циклами 23 и 24 (минимум 23/24) и 24 и 25 (24/25) – достигла наиболее высоких значений за всё время наблюдений. Интересна также динамика перехода к данному периоду пониженной солнечной активности и повышенной интенсивности ГКЛ.

Благодаря экспериментам PAMELA (06.2006-01.2016 гг.) и AMS-02 (05.2011-н/вр.) для пары последовательных минимумов 23/24 и 24/25 впервые существуют надёжные данные о разных типах космических лучей в широком диапазоне энергий, что делает возможным детальное сопоставление характеристик ГКЛ в эти два периода с противоположной общей полярностью ГМП *A*. В частности, интересно поведение т.н. энергии кроссовера  $T_{CO}$ , при которой пересекаются спектры в последовательных минимумах с противоположной *A*, а также зависимость этой энергии от характеристик гелиосферы.

Наличие детальных данных о характеристиках ГКЛ повышает требование к надёжности и обоснованности теоретического описания этих характеристик, а также всего процесса модуляции ГКЛ в периоды минимума солнечного цикла.

Эти и сопутствующие вопросы регулярно исследуются в последнее десятилетие после опубликования данных PAMELA по минимуму 23/24. В данном докладе они также обсуждаются с привлечением данных PAMELA (интенсивность протонов и электронов в минимуме 23/24), AMS-02 (интенсивность электронов и позитронов в минимуме 24/25), а также наземных измерений: нейтронных мониторов и регулярного баллонного мониторинга космических лучей, чувствительных к интенсивности протонов во всех прошедших минимумах солнечного цикла.

Кроме этого, мы также оцениваем с помощью МГД-симуляции для соответствующих кэррингтоновских оборотов Солнца возможное влияние на крупномасштабные характеристики гелиосферы (а значит, и на характеристики ГКЛ) коротирующих областей взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра.

## НАБЛЮДЕНИЯ И ОПИСАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ И ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОДЫ ЕГО ИНВЕРСИИ

**Крайнев М.Б.<sup>1,2</sup>, Базилевская Г.А.<sup>1</sup>, Калинин М.С.<sup>1</sup>, Михайлов В.В.<sup>2</sup>, Свиржевская А.К.<sup>1</sup>, Свиржевский Н.С.<sup>1</sup>, Potgieter<sup>2</sup> M.S.**

<sup>1</sup>ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, [mkrainev46@mail.ru](mailto:mkrainev46@mail.ru)

<sup>2</sup>Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China

Впервые эффекты 22-летней цикличности солнечных магнитных полей в поведение галактических космических лучей (ГКЛ) были замечены С. Форбушем в 1967-1969 гг. по изменению анизотропии (времени максимума суточной волны) в данных ионизационных камер [1]. В интенсивности же ГКЛ влияние переменности общего магнитного поля Солнца (так тогда называли магнитные поля в полярных областях фотосферы) было впервые замечено группой ФИАН в 1973 г. и было интерпретировано как эффект инверсии этого поля в свойствах гелиосферных магнитных полей (ГМП) [2]. С тех пор проявления в интенсивности ГКЛ 22-летней цикличности ГМП непрерывно исследуются в течение уже более 50 лет.

Однако если для периодов средней и низкой пятенной активности ситуация с ГМП понятна – гелиосфера разделена на два униполярных «полушария», разделённых волнистым глобальным гелиосферным токовым слоем (ГТС), и характеризуется общей полярностью  $A$  (единичная величина со знаком  $B_r$  в северном «полушарии») – то в чём заключается инверсия ГМП, единого мнения нет. Часто для моделирования распространения ГКЛ в периоды инверсии ГМП просто постулируют обнуление скорости дрейфа частиц в период длительностью 1-2 года, когда  $A$  переключается с +1 на -1 или наоборот. В последнее десятилетие появились более детальные подходы к описанию ГМП в эти периоды.

В докладе кратко обсуждаются наблюдаемые эффекты в интенсивности ГКЛ, связываемые с инверсией ГМП (в соответствии с [3]) и состояние дел с описанием этих эффектов. Более детально обсуждаются и детализируются существующие модели ГМП для этого периода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Forbush S.E. Variation with a period of two solar cycles in the cosmic-ray diurnal anisotropy and the superposed variations correlated with magnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74, iss. 14. P. 3451. DOI: 10.1029/JA074i014p03451
2. Charakhchyan A.N., Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Charakhchyan T.N. Anomalous effect in the 11-year galactic cosmic ray modulation // *Proc. the 13th International Cosmic Ray Conference*. 1973, vol. 2, pp. 1159–1164.
3. Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С., Михайлов В.В., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С. Пятьдесят лет исследования поведения интенсивности ГКЛ в периоды инверсии гелиосферного магнитного поля. I. Наблюдаемые эффекты. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 5–20. DOI: 10.12737/szf-94202301.

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА АМПЛИТУД 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ГКЛ В 2015–2016 ГОДУ

**Юлбарисов Р.Ф., Сирук С.А., Майоров А.Г.**

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [RFYulbarisov@mephi.ru](mailto:RFYulbarisov@mephi.ru)

Поток галактических космических лучей (ГКЛ) с энергией до нескольких десятков ГэВ/н изменяется в зависимости от солнечной активности или при возникновении локальных возмущений в межпланетной среде. Изменения могут носить как спорадический, так и периодический характер, в зависимости от природы вызывающего их явления [1].

Представленное в докладе исследование посвящено анализу 27-дневных вариаций потока ГКЛ. Они возникают в результате формирования в межпланетном пространстве т.н. коротящих областей взаимодействия — структур, образующихся при столкновении высокоскоростного солнечного ветра, истекающего из корональных дыр на Солнце, с медленным солнечным ветром [2]. В области столкновения образуется скачок в значении магнитного поля – ударная волна, с которой взаимодействуют галактические частицы. При этом коротящая область вращается вместе с вращением поверхности Солнца, т.е. с периодом около 27 дней, что формирует вариации с таким же периодом во временном профиле потока ГКЛ.

В работе представлены результаты анализа измерений 27-дневных вариаций ГКЛ в экспериментах STEREO, SOHO и AMS-02 в 2015–2016 году. Проведено вычисление амплитуд вариаций (A27) различными методами, построена зависимость A27 от жесткости в диапазоне от 0.3 ГВ до 100 ГВ. Зависимость не может быть описана однопараметрическим степенным законом во всём диапазоне энергий (величина вариации и показатель степени), поэтому предложена новая параметризация полученного амплитудно-энергетического спектра. Зависимость A27(R) может быть аппроксимирована двухпараметрическим законом, представляющим собой произведение степенного закона и множителя, ответственного за уменьшение амплитуды вариаций потока частиц при низких энергиях.

Кроме этого, продемонстрировано, что наблюдаемые характеристики спектра A27(R) не соответствуют предсказаниям модели силового поля для описания спектров протонов ГКЛ, широко используемой при описании солнечной модуляции. По этой причине в работе также обсуждается возможная связь спектра A27 с вариациями потенциала солнечной модуляции при условии его зависимости от энергии космических лучей.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FSWU-2023-0068 «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей».

1. Potgieter M.S. // *Living Rev. Sol. Phys.* 2013. V. **10**. P. 3.
2. Richardson I.G. // *Living Rev. Sol. Phys.* 2018. V. **15**. P. 3.

## ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Белов С. М., Белов А. В., Абунина М. А., Шлык Н. С.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

Разработан новый уникальный интерфейс для работы с базой данных о бурях в космических лучах, свободно доступный всем пользователям сети Интернет. Каталог аномальных событий в космических лучах, связанных с солнечной активностью (Форбуш-эффектов) создается коллективом ИЗМИРАН на протяжении многих лет и известен как FEID (Forbush Effects and Interplanetary Disturbances). На данный момент в нем зарегистрировано 8700 событий, начиная с 1954 года, из которых для 2000 событий установлен солнечный источник. Основные параметры космических лучей рассчитываются с помощью метода глобальной съемки (GSM) по данным мировой сети нейтронных мониторов. Новый инструмент предоставляет исследователю множество возможностей: создавать сложные выборки; рисовать графики поведения различных параметров космических лучей, межпланетной среды и геомагнитной активности, как по отдельным событиям так и по группам; получать значения экстремумов различных параметров для всех событий; производить статистический анализ по созданным выборкам (рисовать графики корреляции, гистограммы и не только).

В докладе будет произведен краткий обзор и анализ самой базы данных, а также знакомство потенциального пользователя с новыми возможностями.

## О ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ НА СОЛНЕЧНОЕ ПРОТОННОЕ СОБЫТИЕ 30.03.2022

Власова Н.А.<sup>1</sup>, Базилевская Г.А.<sup>2</sup>, Гинзбург Е.А.<sup>3</sup>, Дайбог Е.И.<sup>1</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,4</sup>, Капорцева К.Б.<sup>1,4</sup>, Логачев Ю.И.<sup>1</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>

1. НИИЯФ МГУ, 2. ФИАН, 3. ИПГ, 4. Физ. фак. МГУ, Москва, Россия, [nav19iv@gmail.com](mailto:nav19iv@gmail.com)

Представлены результаты сравнительного анализа солнечного протонного события (СПС) 30.03.2022, имеющего необычный временной профиль потоков солнечных протонов, с предыдущим и последующим СПС: 28.03 и 02.04 (рис.). Возрастания потоков энергичных протонов в межпланетном и в околоземном пространстве ассоциируются с последовательными солнечными вспышками рентгеновских классов M4.0, X1.3 и M3.9 и тремя корональными выбросами массы (КВМ) типа гало. Работа сделана по экспериментальным данным, полученным с космических аппаратов, расположенных в межпланетном пространстве (ACE, WIND, STEREO-A, DISCOVER), на околоземной полярной орбите на высоте 850 км (Метеор-M2) и на геостационарной орбите (GOES-16, Электро-Л2). Экспериментальные данные и сделанные на их основе расчетные характеристики (скорость, время и расстояние) распространения корональных выбросов масс в короне Солнца для трех исследуемых событий существенно не различаются. Несмотря на то, что взрывные процессы на Солнце 28.03 и 02.04 произошли на разных гелиодолготах (W04 и W68, соответственно), временные профили потоков солнечных энергичных протонов в этих событиях близки, что объясняется достаточно спокойным состоянием межпланетной среды, в которой распространялись частицы от Солнца до околоземного пространства. В событии 30.03 временной профиль потоков солнечных протонов, зарегистрированный в точке Лагранжа L1 и в околоземном пространстве, имеет ряд значительных отличий от профиля, измеренного на КА STEREO-A, а также от соответствующих профилей в событиях 28.03 и 02.04. 28.03 в одной активной области произошло два взрывных процесса, КВМ от которых пришли в околоземное пространство 31.03. Родительская вспышка СПС 30.03 произошла в той же активной области, что и события 28.03. В результате этого поток частиц 30.03 был частично экранирован и частично захвачен межпланетными КВМ от 28.03. Одновременный приход максимальных потоков протонов с энергиями >5, >10, >30, >60 и >100 МэВ в точку Лагранжа L1 и аналогичный на геостационарную орбиту Земли, но с запаздыванием на время, необходимое для распространения на это расстояние МКВМ, объясняется приходом потоков частиц, захваченных внутри межпланетной структуры.

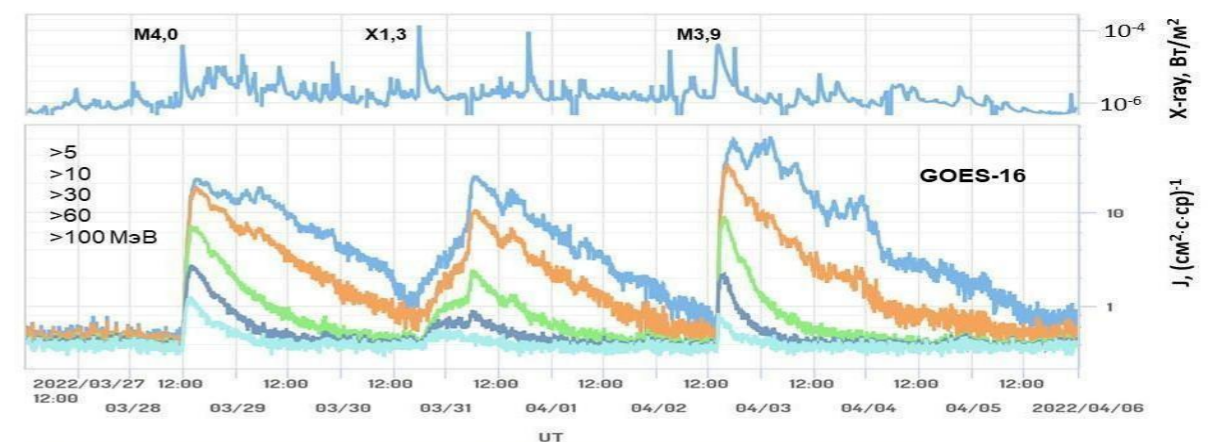


Рис. Временные профили плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0,1-0,8 нм и потоков солнечных протонов 27.03-05.04 2022 г.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

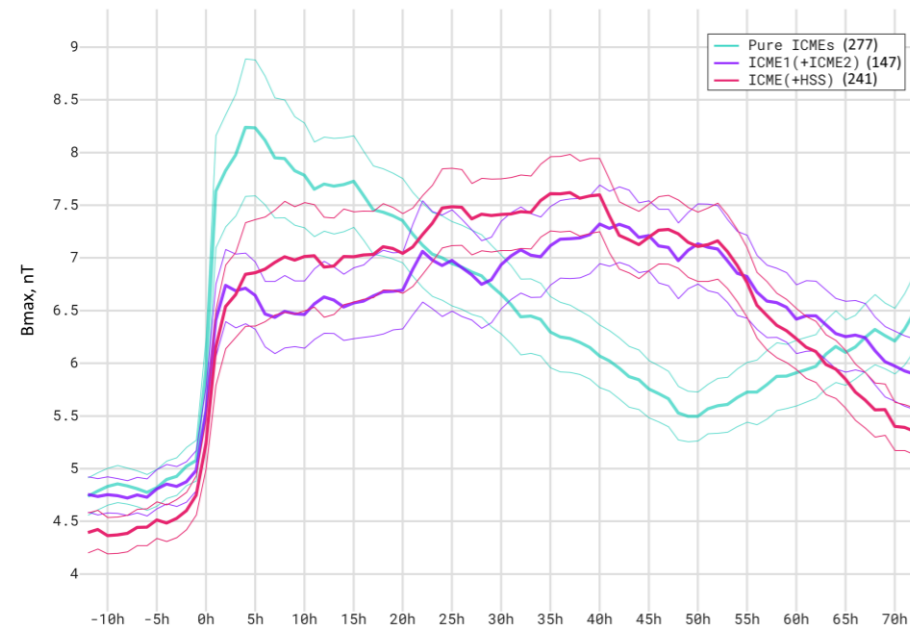
Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Белов С.М., Абунин А.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [nshlyk@izmiran.ru](mailto:nshlyk@izmiran.ru)

По мере распространения от Солнца к Земле потоки плазмы из корональных дыр (КД) и корональные выбросы массы (КВМ) могут взаимодействовать между собой. Взаимодействие последовательных КВМ между собой или с высокоскоростным потоком из КД может привести к изменениям скорости и направления распространения, изменению внутренней структуры магнитного поля в разных частях соответствующих межпланетных возмущений [1]. Ранее уже было показано, что взаимодействующие возмущения солнечного ветра (СВ) могут быть более геоэффективными, чем те, которые регистрируются на Земле по отдельности, они вызывают более мощные магнитные бури или приводят к образованию более сложных условий для возникновения и развития Форбуш-эффектов [2].

Анализ поведения параметров межпланетной среды, тщательная привязка событий к возможным солнечным источникам при использовании обширной усовершенствованной базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (<https://tools.izmiran.ru/w/feid>) позволили выделить различные группы взаимодействующих и изолированных возмущений солнечного ветра для длительного периода с 1995 по 2022 гг. Были рассчитаны средние значения и времена регистрации экстремальных величин скорости СВ, модуля межпланетного магнитного поля (ММП), индексов геомагнитной активности и др., а затем произведено сравнение параметров межпланетных возмущений в разных группах. Показано, что наличие взаимодействия значительно изменяет как временные параметры исследуемых событий, так и величины экстремумов.

В качестве примера на рисунке приведены результаты применения метода наложения эпох для максимальной величины ММП в событии для групп, содержащих КВМ (изолированные – зеленая кривая, взаимодействующие со следующим КВМ – фиолетовая, взаимодействующие с потоком из КД – розовая, тонкие кривые –  $\pm\sigma$ ). Хорошо видна разница между группами: время регистрации максимума ММП для взаимодействующих событий сдвигается на более поздние часы, а величина ММП дольше остается повышенной.



## КОРОТИРУЮЩИЕ ОБЛАСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИНТЕНСИВНОСТЬ ГКЛ В 2D ЗАДАЧАХ МОДУЛЯЦИИ

Калинин М.С.<sup>1</sup>, Крайнев М.Б.<sup>1,2</sup>, Луо С.<sup>2</sup>, Подгитер М.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, [kalininms@lebedev.ru](mailto:kalininms@lebedev.ru)

<sup>2</sup> Шаньдунский институт перспективных технологий, Цзинань, Шаньдун, Китай

Магнитогидродинамическое (МГД) моделирование коротирующих областей взаимодействия (КОВ) разноскоростных потоков солнечного ветра активно проводится уже много лет. Однако в основном целью является прогноз гелиосферных характеристик на орбите Земли, поэтому расчёты проводятся до расстояний 1-1.5 а.е. В последнее десятилетие появились систематические МГД-расчёты КОВ до значительно больших расстояний, необходимые для исследования рекуррентных вариаций интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ). Ранее, на основании одного из таких расчётов [1] нами было показано [2], что по крайней мере для одного оборота Солнца (кэррингтоновский оборот 2066, январь-февраль 2008 г.) влияние КОВ на крупномасштабные характеристики гелиосферы, важные для модуляции ГКЛ, а значит и на усреднённую по долготе интенсивность, значительно. Мы предположили, что основные закономерности этого влияния КОВ на ГКЛ могут быть исследованы не только при 3D моделировании интенсивности ГКЛ, но и в значительно более простых 2D моделях.

Референтная для этой цели 2D модель, т.е. модель гелиосферы, опирающаяся на исходные распределения всех характеристик, но без образования КОВ, была сформулирована в работах [2, 3]. При этом была использована модель гелиосферного магнитного поля (ГМП) Паркера, но при усреднённых по долготе в основании гелиосферы скорости солнечного ветра, модуля радиальной компоненты и полярности ГМП. Что касается кинетических коэффициентов ГКЛ, были рассмотрены варианты сильного (как в [1]) и слабого дрейфа. В данном докладе анализируются оба эти варианта, а эффекты влияния КОВ выделяются как разница между интенсивностью протонов с учётом влияния КОВ и по референтной модели. Рассматриваются возможности и ограничения 2D подхода.

### ЛИТЕРАТУРА:

- Luo X., Zhang M., Feng X., Potgieter M., Shen F., Bazilevskaya G., *ApJ*, 899, 90, 2020
- Крайнев М.Б., Калинин М.С., Базилевская Г.А., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Луо С., Аслам О.П.М., Шен Ф., Нгобени М.Д., Подгитер М.С. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С.10–21. DOI: [10.12737/szf-91202302](https://doi.org/10.12737/szf-91202302)
- Калинин М.С., Крайнев М.Б., Луо С., Подгитер М.С. *Геомагнетизм и аэрономия*, том 63, № 5, с. 570–580, 2023

- Zhang et al. // *Progress in Earth and Planetary Science* 2021. V. 8. Article ID 56.
- Shlyk et al. // *MNRAS* 2022. V. 511. P. 5897.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ИОНОВ $^3\text{He}$ , $^4\text{He}$ , С, О и Fe НАДТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГИЙ В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ ИЗ ДОЛГОЖИВУЩЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ в 2006- 2008 гг

Зельдович М.А., Логачев Ю.И.

НИИЯФ МГУ, г.Москва, Россия, [ms.zeldovich@mail.ru](mailto:ms.zeldovich@mail.ru)

Изучаются энергетические спектры ионов  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , С, О и Fe в диапазоне энергий 0.04-2 МэВ/нуклон в потоках частиц из долгоживущей (38 оборотов Солнца) приэкваториальной корональной дыры (КД) на спаде солнечной активности в 23 цикле (2006 - 2009 г.) по информации приборов ULEIS, SWICS и SWEPAM, установленных на к.а. ACE. Получено, что состав ионов и их интенсивность изменялись на всем временном протяжении существования этой КД. Большинство спектров ионов показывали различные зависимости интенсивности от энергии – степенную и экспоненциальную. По мере развития изучаемой КД на некоторых оборотах скорость солнечного ветра превышала 700 км/с, причем интенсивность ионов  $^4\text{He}$  была выше  $10^3$  част/см<sup>2</sup>срМэВ/нуклон. Энергетические спектры ионов в этих событиях описывались комбинацией степенной и экспоненциальной зависимостями интенсивности от энергии. Также на разных стадиях развития изучаемой КД наблюдались спектры с изломом в области малых энергий, что, по нашему предположению, объясняется приходом частиц, ускоренных за пределами 1 а.е. в замкнутых областях, образованных разноскоростными потоками солнечного ветра, типа магнитных ловушек и CIR. Полученные результаты указывают на изменение условий как в области ускорения ионов на Солнце по мере развития этой корональной дыры, так и в межпланетном пространстве во время распространения ионов в потоках частиц из КД в течение времени ее длительного существования. Предполагаются варианты эволюции параметров КД в процессе ее развития в зависимости от скорости солнечного ветра. Полученные результаты позволяют предположить существование постоянных потоков надтепловых ионов из солнечных корональных дыр.

## НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСА ПЛАЗМЕННЫХ ПРИБОРОВ В ПРОЕКТЕ ВЕНЕРА-Д

Моиссенко Д.А., Вайсберг О.Л., Петух А.И., Журавлев Р.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [modaldi@cosmos.ru](mailto:modaldi@cosmos.ru)

В данном докладе рассматривается перечень научных задач, которые позволят решить плазменный комплекс приборов на борту космического аппарата Венера-Д, а также описывается структура и принцип функционирования трех плазменных приборов: ионного энерго-масс анализатора, электронного энерго-анализатора и детектора энергичных нейтральных атомов.

Измерения плазмы и магнитного поля, выполненные на космических аппаратах Венера-9 и Венера-10 в 70-х годах прошлого века, позволили получить начальные данные о процессах взаимодействия солнечного ветра и формирования индуцированной магнитосферы. Также значимый вклад в изучение взаимодействия солнечного ветра с атмосферой Венеры внесли результаты измерений в рамках космической миссии Pioneer-Venus Orbiter [1]. Полученные экспериментальные данные позволили разработать модель индуцированной магнитосферы Венеры [2; 3]. Исследования плазменного окружения Венеры также проводились в рамках космических миссий Pioneer Venus Orbiter (1978), миссии Venus Express (2005) [4; 5]. На сегодняшний день именно данные плазменного комплекса Venus Express являются наиболее полными и актуальными. В течении этой миссии были выполнены уникальные измерения в полярных регионах и на терминаторных орбитах, а также получены данные о параметрах плазмы в хвосте Венеры.

Несмотря на долголетнюю успешную работу данной космической миссии, плазменное окружение Венеры по-прежнему представляет собой значительный научный интерес. Так, одной из важных научных задач космической миссии Венера-Д является изучение механизмов, влияющих на потери атмосферы Венеры и процессов, приводящих к данному явлению. Среди множества научных задач можно выделить следующие, как наиболее значимые:

- Измерение функции распределения по скоростям уходящих ионов с целью исследования механизмов потерь и ускорения частиц.
- Исследование тонких структур на границах магнитосферы с помощью высокочастотных измерений параметров плазмы и магнитного поля.
- Исследование процессов массовой нагрузки на атмосферу Венеры, определение скорости потерь и влияния сильных возмущений солнечного ветра.
- Исследование процессов ускорения в токовых слоях.
- Изучение процессов взаимодействия магнитосферных и ионосферных ионов низких энергий с нейтральными атомами.

1. Russell C.T., Vaisberg O., The Interaction Of The Solar Wind With Venus, ed. by D.M. Hunton et al. (Univ. of Arizona Press, Tucson, 1983), pp. 873–94.
2. Zelenyi L.M., et al., Thin current sheets in collisionless plasma: equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration. Plasma Phys. Rep. 37, 118–160 (2011). doi:10.1134/S1063780X1102005X
3. Vaisberg O.L., Zeleny L.M., Formation of the plasma mantle in the Venusian magnetosphere. Icarus 58, 412–430 (1984). doi:10.1016/0019-1035(84)90087-3.
4. Barabash S. et al., The loss of ions from Venus through the plasma wake. Nature 450, 650–653 (2007a). doi:10.1038/nature06434
5. Futaana, Y. et al. Solar Wind Interaction and Impact on the Venus Atmosphere. Space Sci Rev 212, 1453–1509 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0362-8>



- 3.3.4 Смолин С.В. Определение времени жизни вследствие взаимодействий волна-частица для питч-угла 90 градусов
- 3.2.5 Зыкина А.А., Калегасев В.В., Власова Н.А. Динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в период низкой геомагнитной активности 7-20 января 2018 г.
- 3.2.6 Яхнина Т.А., Попова Т.А., Демехов А.Г. Влияние напряженности геомагнитного поля на интенсивность высыпаний релятивистских электронов во время усиления геомагнитной активности 10-16 октября 2017 г.
- 3.2.7 Беленькая Е.С., Алексеев И.И. Возможные механизмы ускорения в магнитосферах экзопланет: на базе изучения магнитосфер планет Солнечной системы

## ОБЪЕДИНЕННЫЙ КАТАЛОГ МКВМ НИИЯФ МГУ ЗА 2010-2023 ГОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБРАТНОЙ DRAG-BASED MODEL ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ МКВМ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЯ 5-7 ИЮЛЯ 2022 ГОДА

Ширяев А.О.<sup>1,2</sup>, Капорцева К.Б.<sup>1,3</sup>, Шугай Ю.С.<sup>1</sup>, Калегасев В.В.<sup>1,3</sup>

1. НИИЯФ МГУ, Москва, 2. БГТУ, Брянск 3. Физ. фак. МГУ, Москва

[anton.o.shiryayev@gmail.com](mailto:anton.o.shiryayev@gmail.com)

Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) являются одним из основных источников геомагнитных возмущений. Изучение МКВМ и построение моделей, прогнозирующих их прибытие, является важной задачей космической погоды. Для валидации моделей прогнозирования распространения МКВМ используются каталоги МКВМ, формируемые на основе различных критериев. На сегодняшний день не выработаны стандартные методы определения временных границ МКВМ, и информация в различных каталогах может значительно расходиться.

В настоящей работе представлен анализ объединенного каталога МКВМ, зарегистрированных у орбиты Земли с 2010 по 2023 год. В качестве исходных каталогов использовались каталог МКВМ Richardson & Cane [1], информация из системы CSMC SME Scoreboard [2] и данные каталога крупномасштабных типов солнечного ветра ИКИ РАН [3]. Алгоритм объединения аналогичен описанному в работе [4], за исключением отказа от объединения событий по совпадению времени регистрации солнечного источника. Объединенный каталог дополнен информацией о максимальной и средней скорости солнечного ветра и минимальном значении индекса Dst во время регистрации каждого события из БД OMNI [5]. Каталог опубликован на сайте центра космической погоды НИИЯФ МГУ: [https://swx.sinp.msu.ru/tools/icme\\_list.php](https://swx.sinp.msu.ru/tools/icme_list.php)

Для проверки полноты объединенного каталога и расширения сведений об определении магнитных облаков среди входящих в него событий произведен анализ каталога George Mason University ([http://solar.gmu.edu/heliophysics/index.php/GMU\\_CME/ICME\\_List](http://solar.gmu.edu/heliophysics/index.php/GMU_CME/ICME_List)) (GMU). В каталоге GMU отображено 66 событий с 01 июля 2010 по 07 сентября 2017 года. В объединенном каталоге присутствуют 97% событий (64 события) из каталога GMU за рассматриваемый период времени.

Произведено сравнение результатов определения магнитных облаков согласно каталогам Richardson & Cane, каталогу ИКИ РАН и каталогу GMU. Обнаружены значительные разногласия: определение типа совпадает у 18 событий из 41 (44%), присутствующих в трёх рассматриваемых каталогах.

В объединенном каталоге из 663 событий только для 284 определено время регистрации солнечного источника. Одним из потенциальных способов поиска неизвестных источников МКВМ является вычисление начальных условий распространения МКВМ с помощью drag based model [6,7]. Для проверки этого метода поиска источников в работе представлен анализ событий 7-8 июля 2022 г. Границы событий уточнены вручную по плазменным параметрам DSCOVR, спроецированным из точки L1 на Землю. Приведены определённые вручную предполагаемые солнечные источники событий по данным коронографа LASCO из базы CDAW (NASA). Получено решение обратной drag based model для определения временных параметров предполагаемых солнечных источников и начальной скорости событий. Получены распределения для времени источника и начальной скорости МКВМ в зависимости от различных значений параметров модели.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-62-00048.

## РОЛЬ МАГНИТНЫХ ПРОБОК В РАЗВИТИИ ИОННОЙ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ АРКЕ ТИПА КОРОНАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕТЛИ

Корягин С.А., Викторов М.Е.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [koryagin@ipfran.ru](mailto:koryagin@ipfran.ru)

В ИПФ РАН создана компактная лабораторная установка для моделирования плазменных процессов в магнитной конфигурации типа корональной петли [1, 2]. Дуговые разряды в каждом из оснований арки создают полностью ионизованные плазменные потоки, которые распространяются навстречу друг другу вдоль трубки со сверхзвуковой скоростью. Оптическое излучение системы свидетельствует о расслоении плазменного жгута на две ленты, проходящие по внешнему и внутреннему сводам арки. (Вариант структуры в виде полого цилиндра также не исключён.)

Расстояние между лентами соответствует по порядку величины стационарной токовой системе, которая существует в бесстолкновительной плазме с сильной анизотропией ионной температуры [3]. (Более высокая температура вдоль магнитного поля происходит от сверхзвуковой скорости встречных потоков.) А именно, шаг между лентами порядка половины периода токового возмущения с нулевым инкрементом вейбелевской неустойчивости в отсутствие внешнего магнитного поля [4]. В свою очередь, внешнее магнитное поле (параллельное плоскостям слоёв) не разрушает токовую конфигурацию [5].

Исходя из вышеизложенного, мы рассматриваем вариант, что двухленточная токовая структура сформирована в результате ионной вейбелевской неустойчивости (гидродинамического типа) во внешнем магнитном поле в пространственно ограниченной системе. Магнитная ловушка сокращает длину ускорения электрона в индукционном электрическом поле неустойчивой вейбелевской моды до расстояния между пробками (по сравнению с пространственно неограниченной системой). Поэтому захваченные в ловушку электроны откликаются на медленно меняющееся индукционное электрическое поле не как свободные частицы, а как осцилляторы с периодом, равным удвоенному времени пролёта электрона между пробками. В результате электронный ток не возрастает, а уменьшается с удлинением характерного времени нарастания неустойчивости (в отличие от тока свободных частиц). Вследствие указанного обстоятельства электронная фракция не влияет на интервал волновых чисел неустойчивых возмущений ионного тока.

В свою очередь, цилиндрический жгут селективирует поперечные волновые числа возмущений подобно резонатору. Условно, в плазменном жгуте помещаются лишь возмущения, длина волны которых короче удвоенного диаметра трубки. Тогда наблюдаемую двухленточную структуру следует ожидать при такой концентрации плазмы в вершине арки, при которой длина волны с нулевым инкрементом вейбелевской неустойчивости (без внешнего магнитного поля) примерно равна удвоенному диаметру трубки. Одновременно удвоенное магнитное давление должно быть ниже продольного плазменного давления — условие развития вейбелевской неустойчивости гидродинамического типа в магнитном поле [6]. Указанные требования реализуемы в экспериментальной установке.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-12-00317.

1. Викторов М.Е. и др. // Письма ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 18. С. 74.
2. Viktorov M.E. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2019. V. 61. P. 035001.
3. Веселовский И.С. // Журн. техн. физ. 1975. Т. 45, вып. 4. С. 797.
4. Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975. Гл. 9, §§ 10–12.
5. Кочаровский В.В. и др. // УФН. 2016. Т. 186, № 12. С. 1267.
6. Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. М.: Атомиздат, 1975. § 15.3.

## СТАТИСТИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЯВЛЕНИЙ В 4м ГОДУ 25 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА.

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

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [yermol@iki.rssi.ru](mailto:yermol@iki.rssi.ru)

Продолжается работа по развитию и дополнению каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра, который расположен на сайте <http://www.iki.rssi.ru/omni>. По мере поступления новых данных в базе OMNI2 ([https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low\\_res\\_omni](https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni)), каталог обновляется и дополняется новыми результатами идентификации различных типов солнечного ветра.

В 2023 году идентифицировано:

- 16 магнитных бурь (среднее значение Dst индекса = -84,5 нТл),
- 21 межпланетных проявлений выброса корональной массы (ICME), из которых 6 магнитных облаков и 15 Ejecta,
- 10 областей сжатия Sheath,
- 18 областей сжатия перед быстрыми потоками CIR.

4й год 25 солнечного цикла находится на восходящей фазе. Анализ данных показывает, что динамика солнечного ветра и, как следствие, динамика магнитосферных возмущений в первые 4 года 25-го солнечного цикла развиваются по сценарию, похожему на аналогичные периоды 23 и 24 солнечных циклов эпохи ослабленного солнечного ветра (Yermolaev et al., JGR, 2021).

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

## ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ФАЗЫ ВАРИАЦИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 21-25 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Струминский А.Б.<sup>1</sup>, Белов А.В.<sup>2</sup>, Гущина Р.Т.<sup>2</sup>, Янке В.Г.<sup>2</sup>, Григорьева И.Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия [astrum@cosmos.ru](mailto:astrum@cosmos.ru)

<sup>2</sup>ИЗМИРАН, Троицк, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ГАО РАН, Пулковое, г. Санкт-Петербург, Россия

Традиционно минимум числа солнечных пятен связывают с началом 11-летнего цикла в долговременной модуляции галактических космических лучей (ГКЛ). Однако начало нового цикла солнечных пятен (рост числа солнечных пятен  $R_z$ ) не отражает все физические процессы на Солнце, способные модулировать ГКЛ в гелиосфере. Для уточнения начала цикла можно учитывать величину и знак полярного магнитного поля  $B_{pole}$ , частоту корональных выбросов массы (*Coronal Mass Ejection* - CME), площадь низкоширотных корональных дыр (*Low Coronal Holes* - LCH). В докладе сравниваются амплитуды вариации нулевой гармоники ГКЛ, рассчитанные для жесткостей 5, 10 и 20 ГВ в 21 - 25 циклах активности, при трех вариантах выбора ноля: (1) минимум  $R_z$ ; (2) последнее протонное событие предыдущего цикла (Рис.1, 2) и (3) максимум интенсивности ГКЛ.

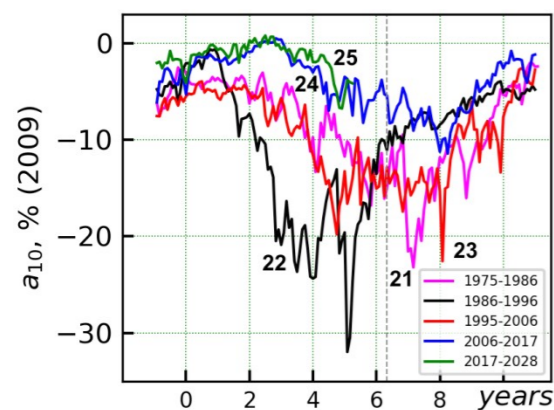


Рис.1. Амплитуды вариации нулевой гармоники для 10ГВ. Ноль - последнее протонное событие предыдущего цикла.

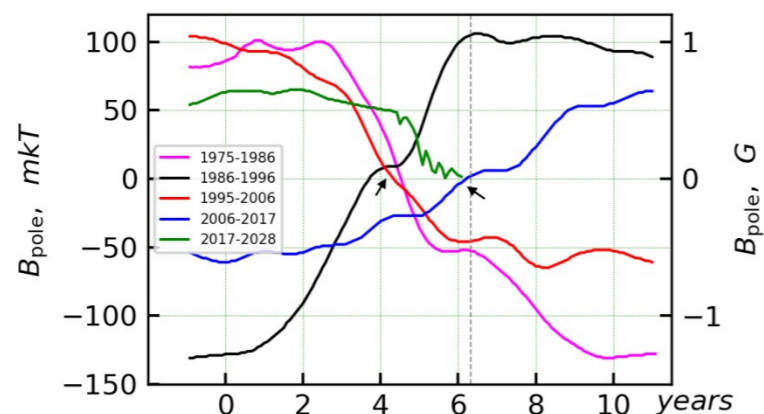


Рис.2. Полярное магнитное поле  $B_{pole}$ . Ноль - последнее протонное событие предыдущего цикла. Отмечена смена знака  $B_{pole}$  (момент реперолюсовки) на 4 и 6 годах двумя стрелками. Пунктир - конец данных для 25 цикла.

При варианте выбора ноля (2) по модуляции ГКЛ четко выделяются пары (21, 23) и (24, 25) циклов, особняком стоит 22 цикл. Особенности модуляции в 22-ом цикле определяются аномально мощными эруптивными вспышками 1989 и 1991 годов. Положения момента реперолюсовки относительно ноля (2) наблюдается на 4 году в паре (21, 23) и 22 циклах, а в паре (24, 25) циклов наблюдается на 6 году (Рис.2). При общем сохранении тренда в паре (21, 23) циклов видны локальные различия на фазе роста ГКЛ, связанные с CME и LCH (Рис.1). В паре (24, 25) затянувшееся высокая интенсивность ГКЛ после ноля определялась малым влиянием CME и LCH (Рис.1).

## РЕАКЦИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ММП НА МАСШТАБЕ МАГНИТНОЙ БУРИ: ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е.

СПбФИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [mdl555@mail.ru](mailto:mdl555@mail.ru)

Геомагнитный порог или жесткость  $R$  геомагнитного обрезания космических лучей (КЛ) — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за геомагнитного экранирования, которое увеличивается во время магнитных бурь. Известно, что динамика многих параметров гелиосферы, а также интенсивности КЛ различна на восходящей и нисходящей ветвях 11-летнего солнечного цикла, т.е. наблюдаются явления гистерезиса.

Недавно получено, что на масштабе сильных магнитных бурь также могут наблюдаться признаки гистерезиса в зависимости геомагнитных порогов  $R$  от параметров гелио- и геомагнитосферы [1]. В настоящей работе проведен анализ зависимости геомагнитного буревого индекса  $Dst$  и вариации порогов  $\Delta R$  от параметров межпланетного магнитного поля ММП и солнечного ветра СВ во время двухступенчатой магнитной бури 7–8 сентября 2017 г. Найдены явления гистерезиса в двух парных рядах: (1) зависимостях между  $Dst$  от параметров СВ и ММП и (2) в зависимостях между  $\Delta R$  от параметров СВ и ММП. Найдено, что кривые на восходящей фазе бури (главная фаза) и нисходящей (фаза восстановления) не совпадают — формируются петли гистерезиса. Специфической чертой исследуемой бури является второе понижение  $Dst$  на восстановительной фазе. Петли гистерезиса отражают эту специфическую динамику бури, формируя две петли гистерезиса, которые формируются как реакция на каждое понижение  $Dst$ .

Геомагнитные пороги  $R$  рассчитаны 2 способами: (1)  $R_{\phi}$ , методом прослеживания траекторий частиц космических лучей в модельном магнитном поле магнитосферы TS01 [2] и (2)  $R_{cc}$  методом [3] спектрографической глобальной съемки на основе наблюдательных данных мировой сети нейтронных мониторов.

$\Delta R$  определялись как разности между значениями жесткостей, рассчитанными для каждого часа в период бури, и жесткостями в спокойный период перед бурей — 5 сентября 2017 г.  $\Delta R$  вычислялись для станций КЛ, которые в спокойное время охватывают большую полосу жесткостей обрезания от 11 до 2 ГВ.

Гистерезис  $\Delta R_{cc}$  лучше отражает специфическую динамику бури. В этом случае образуются две четкие петли гистерезиса, по одной петле на каждое понижение  $Dst$ . В зависимости значений  $\Delta R_{\phi}$  от параметров ММП также просматривается маленькая дополнительная петля как реакция на второе понижение  $Dst$ , но эта петля носит гораздо менее выраженный характер.

Специфический отклик жесткости геомагнитного обрезания  $\Delta R$  на изменения параметров гелиосферы и магнитосферы на разных фазах магнитной бури обусловлен различным относительным вкладом магнитосферных глобальных токовых систем в эти периоды. Возможно, что  $R_{cc}$ , определенные из наблюдений КЛ, более чувствительны к относительному вкладу токов хвоста геомагнитосферы, чем  $R_{\phi}$ , полученные методом прослеживания траекторий в модельном поле магнитосферы.

1. Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. // Геомагнетизм и аэронавигация. 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.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛИТРОПЫ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В КОРОНЕ ПО ЗАРЯДОВОМУ СОСТАВУ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, [goryaev\\_farid@mail.ru](mailto:goryaev_farid@mail.ru)

В процессе формирования потоков солнечного ветра (СВ) в короне динамические параметры плазмы СВ изменяются под влиянием обмена энергией с внешними источниками. Оценка вкладов этих процессов важна как в теоретическом плане, так и для практических применений, прежде всего, для определения параметров СВ и его воздействия на околоземную космическую среду. В моделировании энергетического баланса СВ, формирующегося в солнечной короне, применяется рассмотренная Паркером политропная модель - гидродинамическая одномерная модель стационарного истечения плазмы из короны, основанная на политропном законе расширения плазмы [1]. В рамках этой модели соотношение между давлением  $p$  и массовой плотностью  $\rho$  плазмы СВ описывается соотношением  $p/\rho^\gamma = \text{const}$  или в терминах температуры  $T$  и плотности  $n$ ,  $T \cdot n^{1-\gamma} = \text{const}$ , где  $\gamma$  - показатель политропы.

В первоначальной версии политропной модели Паркера полагалось, что для стационарного потока в короне показатель  $\gamma = 1$ , что соответствует изотермическому процессу, а в гелиосфере при отсутствии обмена энергией с окружающей средой  $\gamma = c_p/c_v = 5/3$ , что соответствует адиабате. Реально энергетический обмен плазмы формирующегося СВ имеет более сложный характер и зависит от типа потока. Определение показателя политропы в короне затруднено из-за недоступности прямых измерений температуры и плотности плазмы, что в настоящее время является одной из важнейших задач космического зонда Паркер [2]. Использование политропной зависимости параметров плазмы в современных МГД моделях СВ вместо приближенного описания конкретных механизмов нагрева позволяет существенно упростить и ускорить расчеты параметров СВ для прогнозирования космической погоды [3].

В настоящей работе рассмотрен метод определения показателя политропы СВ в короне Солнца, используя измеренные *in situ* зарядовые состояния многозарядных ионов кислорода и железа, формирующиеся в нижней короне и “замороженные” на высоте от 1 до 4 солнечных радиусов. При этом применяется ранее разработанный метод моделирования зарядового состояния ионов СВ по радиальным зависимостям параметров плазмы [4]. Используя гистограммы ионного отношения  $O^{7+}/O^{6+}$  и среднего заряда ионов железа  $\langle Q_{Fe} \rangle$  по данным спутника ACE 2010 г. в соответствии с идентификацией типов СВ по каталогу ИКИ (<http://www.iki.rssi.ru/omni/catalog>), а также результаты моделирования ионных параметров по радиальным распределениям температуры и плотности, получены значения показателя политропы в короне для медленного СВ (SWslow)  $\gamma = 1.03 \pm 0.02$ , для быстрого СВ из корональных дыр (SWfast, CIR)  $\gamma = 1.14 \pm 0.05$ , для плазмы корональных выбросов массы MC  $\gamma = 1.17 \pm 0.03$ , EJECTA  $\gamma = 1.20 \pm 0.05$ . Указанные значения показателя  $\gamma$ , рассчитанные по ионным параметрам, согласуются с данными, полученными в отдельных спектроскопических измерениях непосредственно из радиальных зависимостей температуры и плотности.

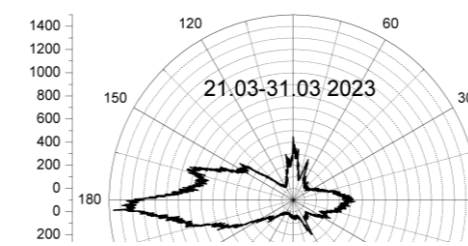
1. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде. М.: Мир. 1965.

# ГЕЛИОСФЕРА И КРАБОВИДНАЯ ТУМАННОСТЬ – ЧТО ОБЩЕГО?

Сарычев В.Т.

ТГУ, г. Томск, Россия, [vsarychev@mail.tsu.ru](mailto:vsarychev@mail.tsu.ru)

Which was first matter or force? Этим вопросом начинается введение, написанное У. Круксом, к сборнику шести рождественских лекций М. Фарадея о силах природы. Исследование структуры магнитных полей и токов в гелиосфере также нуждается в ответе на вопрос – что первично: магнитное поле или токи, сопровождающие это поле? Помочь найти ответ может анализ параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). Основой анализа предлагаемого доклада служат данные взятые с сайтов Caltech.edu/ACE/ASC. Параметры СВ при усреднении 64 s начинались с 23.01.1998 и заканчивались 2.06.2021. Дата параметров ММП при усреднении 1s начиналась с 1.01.1998 и заканчивалась 15.10.2023. При анализе параметров СВ использовалась RTN система координат, а при исследовании ориентации ММП использовалась система RTN с ортами, повернутыми по часовой стрелке на 45 градусов. В работе [1] было показано, что модель Паркера, определяющая связь температуры СВ с его скоростью, не подтверждается, а плазма СВ имеет волоконную структуру определяемую ориентацией ММП. В этой работе была выдвинута гипотеза, что корональные выбросы масс (КВМ) обладают спиралевидными магнитосферами, суперпозиция которых представляет СВ и ММП. Т.о., предлагалось односвязную ГТС заменить многосвязной токовой системой, которая образует границы указанных магнитосфер. Позже многосвязные токовые системы рассматривались в работе [2]. Но здесь в качестве образующих токовую систему объектов считались стримеры, а не КВМ. Ранее автором предлагаемого доклада исследовалась секторная и волоконная



структура ММП по рядам данных длительностью 7 лет с интервалом дискретизации 16 с. Как указано выше, в предлагаемой работе длина рядов параметров ММП составляет 26 лет, а периоды дискретизации 1 с. Такие ряды предоставляют возможность увидеть более тонкие детали и охватить рассмотрением интервал, превышающий длительность цикла активности Хейла. Что и будет представлено в докладе. Показательным примером является рисунок, на котором показана ориентация ММП в плоскости RT (с повернутыми на 45° ортами). Всё тело этого удивительного создания соответствует интервалу 10 суток, тогда как головная часть представлена первыми тремя сутками. Возможно, именно возникновение головной части следует воспринимать как момент отрыва волокна КВМ от поверхности Солнца. Соответственно, можно считать, что гелиосфера образована как волокнами, не утратившими связь с Солнцем, так и оторвавшимися от его фотосферы. Нечто подобное наблюдается с волокнами Крабовидной туманности, в которой наблюдаются волокна, исходящие из области пульсара, так и структуры, не имеющие с ним видимой связи. Вероятно и наше Солнце в далеком прошлом пережило состояние сверхновой, результатом которого стало возникновение планетной системы. Возможность подобного события демонстрирует пульсар PSR B093, открытый в декабре 1968 года на Радиоастрономической станции ФИАН в г. Пущино. В 2014-м у этого пульсара были обнаружены две гигантские планеты.

Автор считает приятным долгом поблагодарить сотрудников Научного центра ACE за возможность пользоваться архивами ACE.

1. Сарычев В. Т.//Геомагнетизм и Аэрономия. т. 42. № 4. 2002. -С. 435-447.
2. Маевский Е. В., Малова Х. В., Кислов Р.А., и др.//КИ т. 58, № 6. 2020. С. 445-460
3. Сарычев В. Т.//Геомагнетизм и Аэрономия. т. 46. № 3. 2006. С. 309-316.

**СЕКЦИЯ «Магнитосфера»**

**Понедельник , 05.02. 2024 г., Комната 200**

Председатель: <u>Григоренко Е.Е.</u>			
Время	Докладчик	Название доклада	
1	Левашов Н.Н.	Исследование ускорения частиц для различных параметров плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли	
2	Горяной Е.Д.	Транспорт ионов кислорода атмосферы Земли на Луну	
3	Руменских М.	Определение магнитных полей экзопланет по отклонениям статвесов уровней тонкой структуры	
4	Шайхисламов И.Ф.	Аэрономия сверхгорячего массивного Юпитера KELT9B	
	17.30 - 18.30	<b>Постерная сессия</b>	

**Доклады постерной сессии секции «Магнитосфера»**

- 3.1.1 Ковражкин Р.А., Ермолаев Ю.И., Глазунов А.Л., Владимирова Г.А. Провалы потоков протонов в плазменном слое и диффузной авроральной зоне
- 3.1.2 Попова Т.А., Яхнина Т.А., Демехов А.Г. Исследование влияния асимметрии геомагнитного поля на потоки релятивистских электронов на высоте низкоорбитальных спутников
- 3.1.3 Любчич А.А., Дэспирак И.В., Вернер Р. Исследование связи между индексами геомагнитной активности и характеристиками солнечного ветра
- 3.1.4 Белаховский В.Б. Рост потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе по данным спутника Арктика-М (№1) во время магнитных бурь в октябре, ноябре 2021 года
- 3.1.5 Смирнова, Н.Ф. Станев Г. Возможности изучения концентрации электронов в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2-3 RE на основе измерения потенциала спутника ИНТЕРБОЛ-2 с учетом параметров орбиты
- 3.1.6 Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Громов С.В., Кананиди К.Х., Петров В.Г., Малышева Л.М. Пространственное распределение суббурь в главную фазу магнитной бури 23-24 марта 2023 г.

**Вторник, 06.02. 2024 г., Комната 202**

Председатель: <u>Григоренко Е.Е.</u>			
Время	Докладчик	Название доклада	
1	Калегаев В.В.	Потоки энергичных электронов внешнего радиационного пояса земли под воздействием межпланетной среды 10-16.10.2017	
2	Дмитриев А.	Динамика энергичных электронов во внешнем РПЗ в 23 - 25 солнечных циклах: сравнение данных КА ИНТЕГРАЛ и POES	
3	Суворова А.В.	О связи возрастных потоков квазизахваченных электронов под радиационным поясом с солнечной активностью и параметрами солнечного ветра	
4	Морозова Д.Н.	Наблюдение минутных вариаций потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли	
5	Прошин С.А.,	Сравнение моделей магнитного поля Земли IGRF и CHAOS в задачах трассировки частиц космических лучей	
6	Кручинин П.А.	Расчёт жёсткости геомагнитного обрезания с помощью трейсинга на основе метода Бунемана-Бориса	
	11.00 - 11.30	<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Калегаев В.В.</u>			
7	Груздов Д.С.	Динамика внешнего радиационного пояса Земли 10-16 октября 2017 г.	
8	Котова Г.А.	Влияние солнечного ветра на характеристики плазмы центрального плазменного слоя хвоста магнитосферы	
9	Сергеев В.А.	Вариации потока энергичных электронов на геостационарной орбите в периоды инжекций и их связь с магнитными диполизациями	
10	Дивин А.В.,	Эффективность нагрева плазмы магнитным пересоединением в магнитосфере Земли	
11	Григоренко Е.Е.	Интенсивные токовые структуры, формируемые на электронных кинетических масштабах в русле высокоскоростных потоков в плазменном слое геомагнитного хвоста	
12	Овчинников И.Л..	Спектры флуктуаций гидродинамической скорости плазмы в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным MMS	
	13.00 - 14.00	<b>Обед</b>	
Председатель: <u>Демехов А.Г.</u>			
13	Иванова А.Р.	Отличительные особенности механизмов высыпаний энергичных электронов внешнего радиационного пояса во время геомагнитных возмущений 9-16.10.2017	
14	Морозова Д.Н.	Влияние космических гамма-всплесков на потоки	

			заряженных частиц в околоземном пространстве
15	14.30 - 14.45	Рубцов А.В.	Наблюдение изолированных силовых трубок в плазмосфере Земли по данным спутника IMAGE на длине волны 304 Å
16	14.45 - 15.00	Парамоник И.П.	Трассирование магнитного поля для анализа моделирования диамагнитной полости с учетом и без учета холловского члена в законе Ома
17	15.00 - 15.15	Дэспирак И.В.	Вечерние суббури в спокойных условиях космической погоды («полярные» суббури)
18	15.15 - 15.30	Губченко В.М.	Импедансный датчик кинетического параметра электромагнитной добротности потока горячей бесстолкновительной плазмы, управляющего структурой магнитосфер
	<b>15.30 - 16.00</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: Алексеев И.И.			
19	16.00 - 16.15	Иевенко И.Б.	Наблюдение возникновения SAR-дуги во время регистрации суббуревой инжекции на зонде Ван Аллена около плазмопаузы
20	16.15 - 16.30	Макаров Г.А.	Крупномасштабные связи геомагнитных индексов SYM-H и ASY-H с северо-южной компонентой ММП и бета-параметром солнечного ветра
21	16.30 - 16.45	Махмутов В.С.	Высыпания магнитосферных электронов, зарегистрированные в атмосфере на средней и полярных широтах в 2022-2023 гг.
22	16.45 - 17.00	Кирпичев И.П.	Плато плазменного давления как индикатор границ при определении глобальной картины распределения продольных токов при магнитоспокойных условиях
23	17.00 - 17.15	Антонова Е.Е.	Динамика магнитосферных процессов в условиях магнитостатического равновесия и развития турбулентности
24	17.15 - 17.30	Найко Д.Ю.	Пространственное распределение коэффициента турбулентной диффузии в поперечном сечении плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли по данным MMS
	17.30 - 18.00	<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии секции «Магнитосфера»

- 3.2.1 Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Довбня Б.В. Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой солнечного ветра при больших значениях северной компоненты ММП в геомагнитных пульсациях типа Pc1
- 3.2.2 Манина А.С., Калегаяев В.В., Николаева В.Д., Сараев Р.Е., Иванова А.Р., Власова Н.А. Динамика высокоширотной магнитосферы Земли во время магнитной бури 26.02.2023
- 3.2.3 Клейменова Н.Г., Никитенко А.С., Федоренко Ю.В., Громова Л.И., Малышева Л.М. «Полярные» суббури в Скандинавии и авроральный хвост в обсерватории Баренцбург

05-09 февраля 2024 г. ИКИ РАН

Исследование ускорения частиц для различных параметров плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли.

Левашов Н. Н., Попов В. Ю., Малова Х.В., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [nn.levashov@physics.msu.ru](mailto:nn.levashov@physics.msu.ru)

Плазменный слой хвоста магнитосферы Земли представляет собой область, занятую горячей плазмой, простирающуюся в направлении от солнца на расстояниях от ~ 5RE до > 100RE. Его ширина составляет 30–40RE, а толщина — около 6RE. В данной работе предлагается исследование ускорения частиц в экваториальной плоскости плазменного слоя хвоста магнитосферы. Для моделирования электромагнитного поля в данной области мы предполагали наличие компоненты электрического поля  $E_y=0.1$  мВ/м в солнечно-магнитосферной системе координат GSM, постоянной компоненты  $B_z$  и фонового турбулентного поля. Фоновое турбулентное поле носит перемежаемый характер, особенно во время быстрых плазменных струй БПС [1]. Для моделирования такого поля мы воспользовались моделью турбулентного поля с контролируемым уровнем перемежаемости [2]. В данной модели компонента магнитного поля  $B_z$  задается при помощи суперпозиции вейвлетов:

$$Q(x, y) = \sum_{i,j} Q(x, y)_{i,j}, \quad \text{где}$$

$Q(x, y)_{i,j} = h_{i,j} \cdot q_i \cdot \exp\left(-\frac{\pi}{2a_{ij}} [(x - x_{i,j})^2 + (y - y_{i,j})^2]\right)$ ,  $x_{i,j}$  и  $y_{i,j}$  — координаты соответствующего вейвлета,  $q_i$  — коэффициенты нормировки для вейвлетов  $i$ -го масштабного класса,  $h_{i,j}$  — случайный коэффициент для каждого вейвлета. Электрическое поле можно рассчитать при помощи уравнений Максвелла.

Перемежаемость и мультифрактальность задается следующим образом: предположим, что нормировочные коэффициенты определенного класса вейвлетов распределены не равномерно по всему пространству: пусть вычислительная область разбита на квадратные ячейки, в каждой из которых свой нормировочный множитель у вейвлет-коэффициентов. Например, для самого крупного класса вейвлетов область будет разбита на 4 ячейки с нормировочными множителями  $q_0p_1, q_0p_2, q_0p_3, q_0p_4$  соответственно, где  $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$ . Для класса вейвлетов, с масштабом вдвое меньше - разобьем каждую клеточку более крупного класса еще на 4 части, для класса вейвлетов с еще вдвое меньшим масштабом - снова разбиваем каждую клеточку на 4 части итд. При таком разбиении, функция мультифрактального спектра,  $f(h)$ , где  $h$  - показатель Гельдера, будет выпуклая, и вблизи своего максимума может быть аппроксимирована параболой.

Показано, что частицы способны набрать в плазменном слое энергии до сотен КэВ, и эффективность ускорения практически не зависит от степени перемежаемости фонового турбулентного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-12-00031.

1. Зеленый Л. М., Зогин Д. В., Структура плазменного слоя магнитного хвоста Земли в экваториальной плоскости. Квазиadiaбатическая модель. // Физика космической плазмы, 1993, с 1-8.
2. Левашов Н.Н., Попов В.Ю., Малова Х.В., Зеленый Л.М. Моделирование мультифрактального турбулентного электромагнитного поля в космической плазме // Космические исследования, 2023, Т. 61, №2, с 116-123.

## ТРАНСПОРТ ИОНОВ КИСЛОРОДА АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ЛУНУ

Горяной Е.Д.<sup>1</sup>, Овчинников В.А.<sup>1</sup>, Царева О.О.<sup>2</sup>, Попов В.Ю.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Факультет Физики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия, [edgoryanoy@edu.hse.ru](mailto:edgoryanoy@edu.hse.ru)

<sup>3</sup>Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Вода на поверхности Луны могла возникнуть в результате: 1) вулканической активности [1,2]; 2) падения ледяных комет или богатых водой метеоритов [3]; 3) взаимодействия солнечного ветра с лунным реголитом. Последний сценарий предполагает, что протоны солнечного ветра в реакции с кислородом в лунных породах образуют гидроксильные группы OH/H<sub>2</sub>O.

Наше исследование посвящено проверке гипотезы образования воды за счет переноса ионов кислорода (O<sup>+</sup>) из верхних слоев земной атмосферы на Луну [4]. Мы рассмотрели несколько факторов, влияющих на скорость накопления O<sup>+</sup> в лунном реголите: 1) расстояние между Землей и Луной; 2) кратковременные изменения солнечной активности; 3) долговременные изменения геомагнитного поля (инверсии). Для численного моделирования движения ионов кислорода, вылетающих из высотных областей атмосферы, в магнитосфере Земли была использована цилиндрическая теоретико-потенциальная модель магнитосферы [5], включающая мультиполи нескольких порядков. Магнитные моменты диполя и квадруполь, вытянутость магнитосферного хвоста и межпланетное магнитное поле являются свободными параметрами модели, что позволило нам исследовать влияние солнечной активности и геомагнитной инверсии на динамику ионосферных частиц.

Работа направлена на оценку количества ионов, вытекающих из Земли на Луну за всю историю взаимодействия Земли и Луны. По результатам получившаяся оценка количества воды на Луне на порядок меньше, чем оценка в работе [4]. Если предполагать, что Луна подвергалась ионной бомбардировке в течение 3,5 миллиардов лет, то согласно нашим расчетам в лунном реголите могло накопиться до 350 км<sup>3</sup> воды.

1. Saal A., Hauri E., Lo Cascio M., et. al. // *Nature* 2008. V. **454**. P. 192-5.
2. Hauri E., Weinreich T., Saal A. et. al. // *Science* 2011. V. **333**. P. 213-5.
3. Arnold J.R. // *J. Geophys. Res.* 1979. V. **84**. P. 5659-68.
4. Kletetschka G., Klokocnik J., Hasson N, et. al. // *Scientific reports* 2022.
5. Voigt G.H. // *Planetary and Space Science* 1980. V. **29**. P. 1-20.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭКЗОПЛАНЕТ ПО ОТКЛОНЕНИЯМ СТАТВЕСОВ УРОВНЕЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ

Руменских М.<sup>1,2,3</sup>, Тайченачев А.В.<sup>1</sup>, Шайхисламов И.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН), Москва, Россия

Определение физико-химических параметров атмосфер экзопланет возможно только путем анализа транзитных поглощений в атомных спектральных линиях, получаемых телескопами при прохождении планеты перед диском звезды. Для получения характеристик атмосфер далеких планет решается обратная задача нахождения параметров по интерпретации спектров поглощения сопоставлением наблюдаемых и численно смоделированных спектров поглощения. Однако без знания о наличии у планеты магнитного поля корректная «расшифровка» численными моделями атмосфер горячих экзопланет данных крайне затруднительна: собственные магнитные поля планет существенно влияют на формирование атмосферы, и это отражается на наблюдательных проявлениях.

В ансамбле атомов верхних атмосфер экзопланет основным зависящим от магнитного поля эффектом, проявляющимся в анизотропном поле излучения, является атомное выстраивание – селекция атомов с определенным значением проекции углового момента за счет выборочного поглощения фотонов, соответствующих определенным магнитным подуровням при накачке излучением звезды. Этот эффект может давать вклад в оптическую толщину среды в мультиплетных линиях тяжелых элементов и гелия при оптимальных свойствах поглощающего вещества и значении угла между вектором магнитной индукции и осью наблюдения.

Данное исследование посвящено анализу эффекта атомного выстраивания на наблюдательные проявления транзитных поглощений горячих экзопланет в мультиплетных линиях и определению магнитных полей экзопланет в конкретных планетарных системах. Показано, что применение теоретического аппарата нелинейной спектроскопии, в частности расчета заселенности уровней тонкой структуры с учетом взаимодействия с магнитным полем и направленным излучением, позволяет объяснить отклонение значений статвесов некоторых наблюдаемых транзитных мультиплетов от равновесных. Развитие этого метода в перспективе принесет существенный вклад в теорию планетарного магнетизма и физику атмосфер экзопланет.

*Благодарности* Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-12-00134

## АЭРОНОМИЯ СВЕРХГОРЯЧЕГО МАССИВНОГО ЮПИТЕРА KELT9B

Шайхисламов И. Ф., Мирошниченко И.Б., Шепелин А.В., Голубовский М.П.,  
Руменских М.С., Березуцкий А.Г.

*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия, shaikhislamovildar@yandex.ru*

Численное моделирование процесса газодинамического истечения близко-орбитальных экзопланет за счет поглощения излучения звезды прошло значительный путь развития начиная с 2003 г. В современных моделях учитывается большое количество процессов – ионизация атомов фотонами и электронами, рекомбинация, охлаждение через излучение, газодинамическое ускорение, приливные и неинерциальные силы, взаимодействие со звездным ветром. Однако остаются процессы, которые до сих пор рассматривались лишь в единичных примерах в одномерных моделях, и совсем не учитывались при интерпретации важнейших спектральных наблюдений в этой области. Kelt9b является уникальной планетой, которая требует модернизации применяемых подходов. Для нее обнаружено транзитное поглощение в линиях возбужденного водорода  $H\alpha$  (656.3 нм) и возбужденного кислорода (777.4 нм), а также линии более тяжелых элементов Na, Fe. Линии водорода и кислорода показывают большую ширину профиля поглощения, соответствующую Доплеровским скоростям не менее 20 км/с, которые не удавалось получить в моделях самосогласованным образом. Родительская звезда спектрального класса A имеет чрезвычайно высокую интенсивность в УФ и оптической области и очень слабое ионизирующее излучение. Это приводит к совершенно иному механизму нагрева атмосферы за счет фото-ионизации возбужденных состояний, а не атомов из основного состояния [1].

Мы применили трехмерный многожидкостный аэрономный код [2], дополнив его расчетом кинетики населенности возбужденного атома водорода  $HI(n=2)$  с учетом рассеяния  $L\alpha$  фотонов. Для анализа процессов нагрева и охлаждения мы также рассчитываем населенности нижних уровней таких элементов как OI, CI, CII, MgI, MgII. Для расчета заселенности уровней мы включили все процессы, связанные с фото-возбуждением, фото-ионизацией и электронным ударом, за исключением переходов между различными возбужденными состояниями. Также учтем эффект поглощения излучения в оптически толстых слоях атмосферы. С этой целью в модель введены отрицательные ионы водорода. Рассчитано поглощение в линиях  $H\alpha$  и OI и получено хорошее согласие с наблюдениями. Это позволило выяснить детали нагрева верхних слоев атмосферы Kelt9b.

[1] Munoz A. G., & Schneider P. C. // *AJL* 2019. 884(2), L43.

[2] Shaikhislamov I.F., et al. // *Astronomy & Astrophysics* 2020, 639, A109.

## ПРОВАЛЫ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ И ДИФFUЗНОЙ АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Ковражкин Р.А., Ермолаев Ю.И., Глазунов А.Л., Владимирова Г.А.

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rkovrazh@iki.rssi.ru*

Проведен сравнительный анализ уменьшения интенсивности протонов («провала» потоков протонов 1-7 кэВ до фоновых значений) по данным спутников ИНТЕРБОЛ-1 в дневном плазменном слое и ИНТЕРБОЛ-2 в диффузной авроральной магнитосфере. Найдено несколько случаев одновременной регистрации провала потоков протонов на высоких и низких высотах, что дает возможность сравнения измерений с двух космических аппаратов. Исследование позволяет заключить, что появление провала связано со временем жизни протонов, стартующих с границы инжекции в ночном секторе магнитосферы. Время движения протонов от сотен эВ до нескольких кэВ в магнитосфере к востоку составляет 20-50 часов. Это именно те протоны, которые идут вокруг Земли при превашировании дрейфов из-за градиента и кривизны над движением из-за конвекции. За длительное время пролета до провала такие протоны успевают высыпаться в авроральную зону в результате процесса диффузии в конус потерь, т.е. время их жизни оказывается меньше времени пролета до области провала. Расчет времени пролета показывает, что эти частицы должны иметь максимальные значения времени по сравнению с низкоэнергичными и высокоэнергичными протонами.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АСИММЕТРИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПОТОКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ВЫСОТЕ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

**Попова Т.А., Яхнина Т.А., Демехов А.Г.**

ПГИ, г. Анапиты, Россия, [tarkada@yandex.ru](mailto:tarkada@yandex.ru)

По данным каталога высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) с энергиями  $> 800$  кэВ проведено статистическое исследование особенностей потоков захваченных и высыпающихся электронов. В каталог вошли случаи ВРЭ, зарегистрированные в течение 2017 года спутниками NOAA/POES в окрестности обсерватории Ловозеро ( $68^\circ$ с.ш.  $35^\circ$ в.д.) и сопряженной с ней области в Южном полушарии. Классификация событий по четырем группам на основе работ [1] и [2] позволила связать эти высыпания с разными процессами в магнитосфере - рассеянием частиц в области вытянутых силовых линий магнитного поля в ночной магнитосфере (первая группа), взаимодействием релятивистских электронов с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами, которые и наблюдаются на Земле в виде пульсаций диапазона Pc1 (третья группа). Для второй группы характерно одновременное наблюдение высыпаний релятивистских и энергичных ( $> 30$  кэВ) электронов, также имеющих четкий широтный максимум в потоках высыпающихся частиц, а также геомагнитных пульсаций PiB/PiC наземной станцией Ловозеро. Проанализированы свойства потоков захваченных и высыпающихся электронов каждой из групп отдельно в северном и южном полушариях для исследования влияния асимметрии геомагнитного поля на эти потоки. Выделены сопряженные (по времени и пространству) пролеты спутников и описаны характеристики ВРЭ в зависимости от геомагнитной 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>

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-62-00048).

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ИНДЕКСАМИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

**Любич А.А.<sup>1</sup>, Дэспирак И.В.<sup>1</sup>, Вернер Р.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, Анапиты, Россия, [lubchich@pgia.ru](mailto:lubchich@pgia.ru)

<sup>2</sup>Институт космических исследований и технологий Болгарской академии наук, Стара Загора, Болгария

Для анализа проявлений суббулевой активности на средних широтах относительно недавно был введен геомагнитный индекс МРВ (Mid-latitude Positive Bays). На сегодняшний день есть, по крайней мере, два набора значений МРВ-индекса, рассчитанных по слегка различающейся методике. Один набор, охватывающий период с февраля 1980 по конец 2012 года, приведен в дополнительной информации к интернет-версии статьи *McPherron and Chu* [2018]. Мы будем использовать второй набор, любезно предоставленный *Chu*. Он содержит одноминутные значения вариаций мощности X и Y компонент геомагнитного поля, а также их суммы, за период с начала 1991 года по конец 2019 года.

Исследована статистическая связь МРВ-индекса с геомагнитной активностью на разных широтах и с характеристиками солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП). Показано, что все экстремально большие значения МРВ-индекса наблюдаются во время сильных геомагнитных бурь (Dst-индекс ниже  $-100$  нТл), все экстремально сильные геомагнитные бури (Dst-индекс ниже  $-250$  нТл) сопровождаются экстремально высокими значениями МРВ-индекса. Статистически МРВ-индекс растет с увеличением геомагнитной активности на любой широте. МРВ-индекс, в среднем, растет с увеличением модуля ММП и любой из его компонент. Но для  $V_z$ -компоненты большие значения МРВ-индекса наблюдаются при ее южной ориентации. Для плазменных параметров МРВ-индекс сильнее всего растет с ростом скорости СВ. Также сильна зависимость от динамического давления и от величины Y-компоненты электрического поля СВ. Однако, МРВ-индекс слабо зависит от плотности и температуры солнечного ветра.

McPherron L.R., Chu X. The midlatitude positive bay index and the statistics of substorm occurrence, *J. Geophys. Res.: Space Physics*, V. 123, No. 4, P. 2831–2850, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024766>

## РОСТ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНЕШНЕМ РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА АРКТИКА-М (№1) ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ В ОКТЯБРЕ, НОЯБРЕ 2021 ГОДА

Белаховский В.Б.

Полярный геофизический институт, г. Анатиты

belakhov@mail.ru

В работе проанализированы вариации потоков электронов с энергиями 0.15-0.35 МэВ, 0.35-1 МэВ, 1-2 МэВ по данным нового российского спутника “Арктика-М” (№1), имеющего высокоэллиптическую орбиту типа “Молния”. Детально проанализированы магнитные бури 11-13 октября 2021 года ( $SUM-H \approx -72$  нТл,  $AE \approx 2600$  нТл,  $V_{sw} \approx 750$  км/с) и 3-5 ноября 2021 года ( $SUM-H \approx -120$  нТл,  $AE \approx 3000$  нТл,  $V_{sw} \approx 520$  км/с). Магнитная буря 11-13 октября 2021 года относится к классу CIR (corotating interaction region), поскольку вызвана высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры на Солнце, столкнувшимся с более медленным солнечным ветром. Магнитная буря 3-5 ноября 2021 года относится к классу (CME – coronal mass ejection), поскольку вызвана приходом к земной магнитосфере межпланетного магнитного облака, вызванного корональным выбросом массы.

Анализ показывает, что во время (и после) более слабой CIR магнитной бури уровень релятивистских электронов (1-2 МэВ) был сопоставим (а где-то и немного превышал) уровень релятивистских электронов во время более сильной CME магнитной бури. Во время CIR бури наблюдались более интенсивные скачки плотности солнечного ветра. По-видимому, скачки плотности и привели к генерации интенсивных электромагнитных волн (МГД волны Pc5 диапазона, ОНЧ волны) в магнитосфере, ответственных за ускорение электронов до релятивистских энергий. Таким образом, менее интенсивные CIR магнитные бури также необходимо учитывать при оценке радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

Данные спутника “Арктика-М” (№1) были предоставлены Институтом прикладной геофизики имени академика Е. К. Фёдорова (г. Москва).

## ВОЗМОЖНОСТИ ИЗУЧЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ МАГНИТОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ 2-3 $R_E$ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СПУТНИКА ИНТЕРБОЛ-2 С УЧЕТОМ ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ

Н.Ф. Смирнова<sup>1</sup>, Г. Станев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [nsmirnova@romance.iki.rssi.ru](mailto:nsmirnova@romance.iki.rssi.ru)

<sup>2</sup>ИКИТ БАН, г. София, Болгария, [gstanev@space.bas.bg](mailto:gstanev@space.bas.bg)

А.Педерсон предложил метод для определения концентрации окружающей плазмы в магнитосфере на основе измерений потенциала космического аппарата датчиками электрических полей [1]. Этот метод работает только при положительном потенциале, так как в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании плотности электронов. Эта идеология используется для определения плотности электронов на основе измерений потенциала спутника ИНТЕРБОЛ-2 с октября 1996 г. по март 1998 г. в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2–3  $R_E$ .

Для определения плотности электронов применяется модель:  $J_{ph}(V) = J_{ph0} \exp(-Vs/2.1)$ , где  $J_{ph0}$  - плотность фототока насыщения, которая вычисляется на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [2];  $Vs$  – потенциал спутника. Потенциал измеряется прибором ИЭСП-2 с частотой опроса 400 мс, цикл работы КМ-7 составляет 5.12 с, поэтому плотность фототока и концентрация электронов определяется с интервалом 5.12 с. Этот метод определения концентрации электронов подробно излагается в [3].

Так как концентрация электронов определяется на основе измерений потенциала спутника, то в настоящей работе обсуждаются результаты статистического исследования измерений потенциала спутника ИНТЕРБОЛ-2 с учетом орбитальных и геофизических параметров. В большинстве случаев (~80%) корректные измерения потенциала прибором ИЭСП-2 проводились на высотах от 16000 км до высоты апогея (19211 км). Инвариантная широта находилась в пределах 65-80 град. В течение всей миссии наиболее частые измерения были зарегистрированы для значений MLT в интервалах времени 0-8 и 20-24, зимой 0-5 и 17-24, а летом 0-12 и 21-24 час. Следовательно, изучение сезонных эффектов ограничено этими интервалами времени. В этой работе также приводятся гистограммы измерений потенциала для других орбитальных параметров. Потенциал спутника ИНТЕРБОЛ-2, как правило, 2-5 В. Концентрация электронов 1-40 см<sup>-3</sup>. Обсуждаются различия в плотности электронов в зависимости от измерений в разных областях орбиты, а также в спокойные и возмущенные периоды.

Качественное определение плотности электронов, основанное на измерении потенциала одновременно двумя зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [2,3], и результаты сопоставления с данными других спутников S3-3 [4], POLAR [5] делают возможным применения результатов спутника ИНТЕРБОЛ-2 в будущем для построения моделей.

1. Pedersen A., Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements // *Ann. Geophys.*, V.13, pp.118–121, 1995.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Laakso H., Opgenoorth H., Wyganth J., et al. Electron Density Distribution in the Magnetosphere // *ESA SP-415*. 1997. P.53-58.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СУББУРЬ В ГЛАВНУЮ ФАЗУ МАГНИТНОЙ БУРИ 23-24 МАРТА 2023 Г.

Громова Л.И.<sup>1</sup>, Клейменова Н.Г.<sup>2</sup>, Громов С.В.<sup>1</sup>, Кананиди К.Х.<sup>1</sup>, Петров В.Г.<sup>1</sup>, Малышева Л.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия; [gromova@izmiran.ru](mailto:gromova@izmiran.ru)

<sup>2</sup>ИФЗ РАН, г. Москва

Рассмотрены особенности планетарной динамики трех интенсивных ( $AL \sim -1200 - -1500$  нТл) магнитосферных суббурь в главную фазу сильной магнитной бури 23-24 марта 2023 года ( $SymH \sim -170$  нТл). Главная фаза развивалась при мало меняющихся больших отрицательных значениях  $Bz$  ММП и низкой скорости (450-470 км/с), а также при незначительных динамического давления ( $\sim 2-3$  нПа) солнечного ветра. Рассматриваемые суббури сопровождалась возрастаниями  $PC$ -индекса, которые являются индикатором поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу. При анализе суббурь использовались карты планетарного распределения высокоширотных ионосферных и продольных токов, построенные на основе данных магнитных наблюдений на 66-ти одновременных ионосферных спутниках проекта AMPERE, а также наземные магнитограммы скандинавского профиля IMAGE и среднеширотных станций ИЗМИРАН, расположенных в том же долготном секторе, что и меридиональный профиль IMAGE. Показано, что центры суббурь находились в утреннем секторе магнитосферы во время всех трех случаев. Было установлено, что в конце первой суббури в полуночном секторе в ионосфере неожиданно появляется вихрь в магнитном поле, вызванный резкой локальной интенсификацией продольных токов, направленных вверх. Это привело к развитию «полярной» суббури, наблюдаемой в вечернем секторе на меридиане IMAGE. При аналогичных условиях в межпланетном пространстве вторая суббуря характеризовалась несколько иной динамикой планетарного развития, вероятно, за счет иного распределения продольных токов и связанного с ними появления магнитных вихрей во время бури. Третья, наиболее интенсивная, суббуря была результатом резкой смены знака  $Bz$  ММП и скачка давления солнечного ветра, и характеризовалась сложной интенсификацией продольных токов и магнитными вихрями в утреннем секторе магнитосферы. Это позволило сделать вывод, что пространственные особенности рассмотренных суббурь контролировались структурой высокоширотных продольных токов.

## ПОТОКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ 10-16.10.2017

Калегаев В.В.<sup>1,4</sup>, Базилевская Г.А.<sup>2,1</sup>, Власова Н.А.<sup>1</sup>, Гранкин Д.В.<sup>5</sup>, Груздов Д.С.<sup>1,4</sup>, Демехов А.Г.<sup>3</sup>, Иванова А.Р.<sup>1,4</sup>, Капорцева К.Б.<sup>1,4</sup>, Миронова И.А.<sup>5</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>, Попова Т.А.<sup>3</sup>, Розанов Е.В.<sup>5</sup>, Шугай Ю.С.<sup>1</sup>, Яхнина Т.А.<sup>3</sup>

1. НИИЯФ МГУ, 2. ФИАН, 3. ПГИ, 4. Физ. фак. МГУ, Москва, 5. СПбГУ, Россия, [klg@decl.sinp.msu.ru](mailto:klg@decl.sinp.msu.ru)

На основе данных спутниковых и наземных измерений выполнены комплексные исследования физических процессов, обеспечивающих передачу энергии в цепи: солнечный ветер – хвост магнитосферы – внешний радиационный пояс – ионосфера/атмосфера в период 10-16.10.2017. Корональная дыра на Солнце стала источником высокоскоростного солнечного ветра, вызвавшего умеренное геомагнитное возмущение. Наблюдались продолжительные суббуревые активации в авроральной магнитосфере, а на геостационарной орбите происходили резкие изменения потоков релятивистских электронов. 11.02.2017 в ходе аэростатного эксперимента ФИАН в Мурманской области было зарегистрировано высыпание энергичных электронов.

Для детального анализа события использовались данные о потоках электронов высоких энергий ( $>100$  кэВ), захваченных и высыпающихся из радиационного пояса. Данные многоточечных измерений были получены в экспериментах на КА, расположенных в межпланетной среде и внутри магнитосферы, на полярных и приэкваториальных орбитах. Показано, что спектры захваченных (на орбите КА Van Allen Probes A) и квазизахваченных (на низкой орбите ИСЗ Метеор М2) электронов демонстрируют сходную динамику: на главной фазе бури происходит падение потоков высокоэнергичных частиц, которое сменяется возрастанием на фазе восстановления, потоки частиц более низких энергий возрастают на главной фазе бури, после чего остаются примерно постоянными.

Волновая активность в ОНЧ диапазоне, зарегистрированная в исследуемый период времени на борту КА Van Allen Probes A, стала источником интенсивных высыпаний энергичных электронов ( $<300$  кэВ) в утреннем секторе магнитосферы. На станции Ловозеро регистрировались пульсации  $Pc1$ , которые сопровождалась высыпаниями протонов кольцевого тока и релятивистских электронов в вечернем секторе магнитосферы.

По данным измерений потоков электронов на полярных спутниках Метеор М2 и POES показано, что высыпания имеют глобальный характер и захватывают большую область околоземного пространства: по L-параметру и по MLT. Определены спектральные характеристики потоков высыпающихся электронов в течение рассматриваемого периода. На главной фазе бури высыпания энергичных электронов приводят к уменьшению их потоков во внешнем радиационном поясе. Суббуревые активации позволяют быстро восполнить потери захваченных частиц с  $E > 100$  кэВ. Пониженные потоки частиц с энергиями 700 кэВ и выше не восстанавливаются сразу. Продолжающиеся суббури постепенно доускоряют энергичные электроны до более высоких энергий, приводя к увеличению потоков частиц релятивистских и субрелятивистских энергий.

С использованием восстановленных спектров определены скорости ионизации атмосферы во время высыпаний энергичных электронов. Для спектров высыпаний, полученных на основе измерений на аэростатах и на спутниках, рассчитаны профили скоростей ионизации в атмосфере.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-62-00048.

## ДИНАМИКА ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВНЕШНЕМ РПЗ В 23 - 25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ: СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ КА ИНТЕГРАЛ И РОЕС

А. Дмитриев<sup>1</sup>, А. Позаненко<sup>2</sup>, И. Человеков<sup>2</sup>, П. Минаев<sup>2</sup>, С. Гребенев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Проведен анализ потоков энергичных электронов, измеренных в экваториальной области внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) на высокоапогейном КА ИНТЕГРАЛ в течение 23, 24 и фазы роста 25 солнечного цикла. Потоки электронов анализировались на различных меридианах, соответствующих регионам Европы, Сибири, Тихого океана и Северной Америки. Показано, что в 24 цикле потоки в максимуме внешнего РПЗ более интенсивны и расположены на меньших геоцентрических расстояниях по сравнению с 23 циклом. Аналогичная динамика наблюдается для высыпаний из внешнего РПЗ, наблюдаемых на низкоорбитальных КА РОЕС. Полученные результаты позволяют сформулировать проблему усиления внешнего РПЗ во время более слабого солнечного цикла.

## О СВЯЗИ ВОЗРАСТАНИЙ ПОТОКОВ КВАЗИЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПОД РАДИАЦИОННЫМ ПОЯСОМ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Суворова А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, [suvorova@decl.sinp.msu.ru](mailto:suvorova@decl.sinp.msu.ru)

Интенсивные потоки электронов радиационного пояса Земли (РПЗ) с энергиями в десятки и сотни кэВ иногда могут проникать в экваториальную ионосферу, вне области Южно-Атлантической аномалии (ЮАА) [1]. Эта низкоширотная область также известна как запрещенная зона для энергичных частиц РПЗ, соответственно данное явление было названо возрастанием потоков квазизахваченных энергичных электронов в запрещенной зоне (англ. *forbidden energetic electrons*, FEE) [2].

Значительные и длительные возрастания потоков FEE оказывают ионизационное воздействие на верхнюю атмосферу в низких широтах, что было обнаружено при анализе ионосферных данных. Открытая база данных измерений энергичных частиц с помощью низкоорбитальных спутников серий NOAA/POES и MetOp была использована для создания каталога дней с событиями FEE с энергией >30 кэВ за период 25 лет.

Статистический анализ событий FEE, выполненный на основе каталога, выявил солнечно-циклическую, а также сезонную и суточную вариации в появлении возрастаний FEE. Обнаружены значимые корреляционные связи событий FEE с некоторыми параметрами солнечной активности и солнечного ветра. Наиболее высокие корреляции количества событий FEE в году наблюдаются со среднегодовым индексом солнечной активности F10.7 (-0,87) и среднегодовым числом альфвеновского Маха солнечного ветра (0,76). С помощью многопараметрического регрессионного анализа получено степенное выражение с четырьмя параметрами солнечной активности и солнечного ветра с полным коэффициентом корреляции 0,94 [3]. Обсуждается роль проводимости высокоширотной ионосферы в механизме проникновения электронов РПЗ в запрещенную зону.

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. Suvorova A.V. // Universe 2023. V. **9**. P. 374.

## НАБЛЮДЕНИЕ МИНУТНЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

**Морозова Д.Н., Майоров А.Г., Кузнецов А.В., Челидзе К.С., Сирук С.А.**

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [dashia110999@mail.ru](mailto:dashia110999@mail.ru)

Работа посвящена анализу вариаций потоков заряженных частиц в магнитосфере Земли с использованием данных спектрометра PAMELA [1], который в период с 2006 по 2016 год проводил прецизионные измерения потоков электронов, позитронов, лёгких ядер и изотопов высоких энергий в околоземном пространстве на высоте ~350 км до 2010 года и ~600 км в оставшееся время.

Подобные вариации наблюдались ранее на аэростатных установках при регистрации вторичных космических лучей [2]. По итогам наблюдений сделано предположение, что эффект может происходить из-за периодических изменений локальной критической жесткости и последующей модуляцией интенсивности первичных и вторичных космических лучей. Данные космического эксперимента PAMELA позволяют расширить результаты баллонных экспериментов, добавив измерения в недоступной для аэростатных установок части радиационного пояса Земли и под ним, а значит, дают возможности для более детального анализа эффекта.

По данным эксперимента проведен вейвлет-анализ периодических вариаций потоков заряженных частиц в моменты времени, когда прибор находился в области под внутренним радиационным поясом Земли ( $L$ -оболочка меньше 2, магнитная индукция выше 0.23 Гс). Выявлены короткопериодические изменения потоков заряженных частиц в различные моменты времени, пример скалограммы приведен на рис. 1. Черными линиями выделены статистически значимые вариации с уровнем достоверности 0.95.

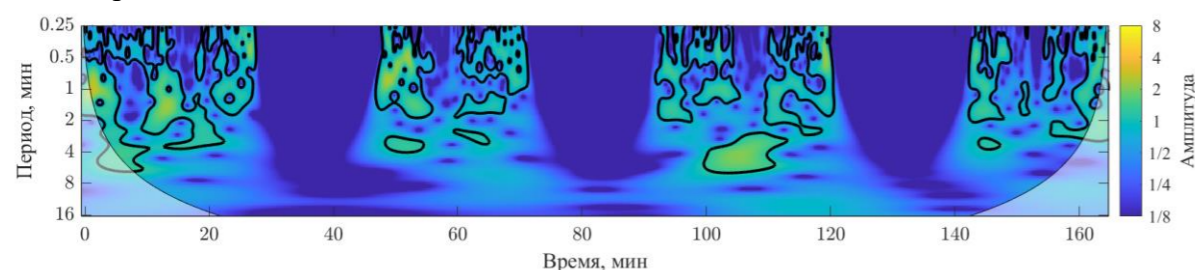


Рис. 1. Частотно-временной спектр амплитуды вариаций потоков заряженных частиц по данным эксперимента PAMELA для трехчасового интервала 23.03.2009.

Планируется продолжить поиск подобных вариаций, определение их характеристик, и анализ причины возникновения, сопоставление с результатами баллонных экспериментов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>.

1. Picozza P et al. // *Astroparticle Physics* 2007. V. 27. PP. 296-315.
2. I. M. Martin, A. A. Gusev, K. Kudela et. al. // *Ann. Geophysicae* 1997. V. 15. P. 1009.

## СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ IGRF И CHAOS В ЗАДАЧАХ ТРАССИРОВКИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

**Прошин С.А., Майоров А.Г.**

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Москва, Россия, [sergey.proshin.97@mail.ru](mailto:sergey.proshin.97@mail.ru)

Исследование свойств потоков космических лучей (КЛ) разного происхождения позволяет изучать свойства астрофизических объектов во Вселенной, являющихся источниками космического излучения, а также свойства межпланетной, межзвёздной и межгалактической среды. В то же время большинство экспериментов по регистрации КЛ проводятся внутри магнитосферы Земли, где частицы КЛ, особенно низкоэнергетические, испытывают значительное отклонение в магнитном поле Земли.

Существующие эксперименты позволяют с высокой точностью определить характеристики зарегистрированных частиц, такие как их энергия, импульс и направление прилёта. Используя эти данные и информацию о расположении приборов, то есть точке регистрации частицы, появляется возможность подробного изучения её природы благодаря процедуре восстановления траектории в магнитном поле Земли.

В качестве стандарта модели магнитного поля Земли в таких задачах восстановления траекторий КЛ является IGRF (Internal Geomagnetic Reference Field). В работе приводится анализ различий трассировки КЛ, полученных для моделей IGRF и CHAOS, как альтернативы и демонстрируется, что модель магнитного поля IGRF в некоторых случаях дает неудовлетворительное описание движения частиц КЛ в магнитном поле Земли.

В работе проведены численные расчеты траектории движения космических лучей в магнитосфере Земли, заданной моделями IGRF и CHAOS. Расчет реализован методом частица-в-ячейке по схеме Бунемана-Бориса [1].

Данное исследование позволяет уточнить методику определения природы частиц (является частицей КЛ или нет), попадающих в детектор для лучшего понимания фундаментальных основ физики космических лучей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>.

1. Golubkov V.S., Mayorov A.G. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics* 2021. V. 85. P. 383.

## Расчёт жёсткости геомагнитного обрезания с помощью восстановления траекторий частиц в магнитосфере Земли

**Кручинин П.А., Малахов В.В., Голубков В.С.**

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [kruchinin\\_01@inbox.ru](mailto:kruchinin_01@inbox.ru)

В докладе будет представлен метод определения жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО), который основан на трассировке заряженных частиц в магнитном поле Земли путём решения уравнения движения методом частица-в-ячейке по схеме Бунемана-Бориса [1-3]. Применяемый алгоритм, в отличие от широко используемого метода Рунге-Кутты, позволяет решать уравнения движения в магнитном поле с сохранением кинетической энергии, благодаря чему, метод оказывается более точным и часто используется при решении задач в области физики плазмы.

С использованием разработанного метода построены карты ЖГО и их вариации для положительных частиц с разными магнитными жёсткостями. Тестирование разработанного метода расчёта ЖГО и оценка его точности основаны на сравнении с известными значениями ЖГО и геомагнитными эффектами. Так, расчёт геомагнитного обрезания проводился в поле идеального диполя, где известны аналитические решения, а также была восстановлена картина полутени в моделях главного и внешнего магнитного поля Земли, которая сравнивалась с данными измерений спектрометра PAMELA [4].

В модели дипольного поля построены угловые распределения относительных ошибок ЖГО и показано, что ошибка метода, т.е. отклонение расчётных и аналитических значений, для низких широт составляет не более 1%. В модели поля IGRF построены картины полутени геомагнитного обрезания, выделены основные особенности, по которым проводилась проверка метода. Получено совпадение с результатами работы Смарта и Ши [5] с точностью 0.1 – 0.2 ГВ. Исследована стабильность полутени и показано, что основные особенности изменяются плавно, либо остаются постоянными. Изучено влияние внешнего поля на структуру полутени в условиях спокойной магнитосферы и определено, что полутень занимает больший диапазон жесткостей, чем полутень в модели главного поля. Показано, что полутень, полученная с помощью разработанного алгоритма, по сравнению с пенумброй в работе Смарта и Ши, лучше согласуется с экспериментальными данными спектрометра PAMELA.

Результаты вычисления жесткости геомагнитного обрезания могут быть использованы: для разработки моделей радиационной обстановки; для улучшения отбора частиц галактических космических лучей в прецизионных экспериментах, таких как PAMELA и AMS-02; для проверки и улучшения моделей магнитного поля Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161.

1. Голубков В. С., Майоров А. Г. // Известия РАН. Серия физическая. Т. 85. – №4. – 2021. – С. 512-514.
2. Boris, J.P. Technical report MATT-152 // Princeton: Princeton Univ. – 1970.
3. Boris, J.P., Proc. 4th Conf. on Numerical Simulation of Plasmas, Washington, 1971, –P. 3.
4. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya et. al.// 3 March 2011 Science Express
5. D.F. Smart, M.A. Shea // Advances in Space Research. 36(10). – 2005. – P. 2012 – 2020.

## ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ 10-16 ОКТЯБРЯ 2017 Г.

**Груздов Д.С.<sup>1,4</sup>, Базилевская Г.А.<sup>1,2</sup>, Власова Н.А.<sup>1</sup>, Гранкин Д.В.<sup>5</sup>, Иванова А.Р.<sup>1,4</sup>, Демехов А.Г.<sup>3</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,4</sup>, Капорцева К.Б.<sup>1,4</sup>, Миронова И.А.<sup>5</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>, Попова Т.А.<sup>3</sup>, Розанов Е.В.<sup>5</sup>, Шугай Ю.С.<sup>1</sup>, Яхнина Т.А.<sup>3</sup>**

1. НИИЯФ МГУ, 2. ФИАН, 3. ПГИ, 4. Физ. фак. МГУ, Москва, 5. СПбГУ, [gruzdov.ds20@physics.msu.ru](mailto:gruzdov.ds20@physics.msu.ru)

Внешний электронный радиационный пояс является одним из наиболее динамичных образований магнитосферы Земли. Во время геомагнитной активности изменения внешнего электронного радиационного пояса наиболее значительны, поэтому естественно предположить, что вариации магнитосферного магнитного поля должны быть одним из главных факторов, управляющих динамикой потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (см., например, [1, 2, 3]). Вариации внешнего электронного РП могут происходить при сохранении адиабатических инвариантов при условии относительно медленных изменений геомагнитного поля по сравнению с характерными временами движения электронов. Наряду с адиабатическими изменениями могут наблюдаться процессы реальных потерь и ускорения частиц, связанные с суббуравой и волновой активностью в магнитосфере.

В работе исследовалась динамика внешнего радиационного пояса Земли во время слабой геомагнитной бури ( $|Dst|_{\max}=52$  нТл). Использовались экспериментальные данные о потоках электронов с энергиями  $>0,1$ ,  $>0,7$  и  $>2$  МэВ, полученных с полярного спутника Метеор-М2 и экваториальных спутников Van Allen Probes (VAP). Проведен сравнительный анализ динамики максимальных потоков захваченных электронов, измеренных на высоких широтах и вблизи геомагнитного экватора, в сердцевине внешнего радиационного пояса Земли.

Получены временные профили потоков электронов и зависимости потоков от L-координаты во время нескольких пролетов через радиационный пояс для обоих спутников за исследуемое время. Наблюдается сходство динамики потоков частиц соответствующих энергий для двух спутников: потоки с  $E>0,1$  МэВ возрастают на протяжении всего исследуемого периода, потоки с  $E>0,7$  МэВ и  $E>2$  МэВ уменьшаются в период с 10 по 12 октября, что соответствует главной фазе бури, а затем увеличиваются. В конце фазы восстановления, по данным VAP, потоки всех энергий увеличились примерно на порядок, а по данным Метеор-М2 потоки частиц с  $E>0,7$  МэВ и  $E>2$  МэВ остался неизменным. В результате бури формируется новый радиационный пояс с максимумом на  $L\sim 4,8$ , причем для разных энергий наблюдается временная задержка в его формировании.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

1. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. Москва: Наука, 1968.
2. Тверская Л.В. // Геомагнетизм и аэрномия. 1986. Т. 26. С. 864.
3. Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С. // Геомагнетизм и аэрномия. 2021. Т. 61. № 3. С. 316-326.

## ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ

**Котова Г.А., Безруких В.В.**

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [kotova@iki.rssi.ru](mailto:kotova@iki.rssi.ru)*

По измерениям тяжелых ( $M/q > 4$ ) ионов на спутнике Фобос-2 было обнаружено, что плотность этих ионов в центральном плазменном слое ареомагнитного хвоста пропорциональна плотности протонов солнечного ветра, обтекающего планету (Kotova et al., Adv.Sp.Res.,1997). При сравнении данных спутника ISEE-2, измерявшего ионы в околоземном плазменном слое вблизи нейтрального слоя, с данными по солнечному ветру, полученными на спутнике ISEE-3, было установлено, что плотность протонов околоземного плазменного слоя также пропорциональна плотности протонов солнечного ветра (Borovsky et al, JGR, 1997, 1998). Анализ баланса магнитного и плазменного давлений в солнечном ветре и внутри хвостов магнитосфер Марса и Земли показал, что выявленные ранее корреляции являются следствием необходимого равенства давлений на границе магнитосферы и внутри магнитных хвостов планет.

## ВАРИАЦИИ ПОТОКА ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ В ПЕРИОДЫ ИНЖЕКЦИЙ И ИХ СВЯЗЬ С МАГНИТНЫМИ ДИПОЛИЗАЦИЯМИ

*Сергеев В.А.<sup>1</sup>, М.А. Шухтина<sup>1</sup>, А.В. Николаев<sup>1</sup>, Н.А. Степанов<sup>1,2</sup>*

*1-Санкт-Петербургский госуниверситет, г.С-Петербург, Россия, [victor40sergeev@gmail.com](mailto:victor40sergeev@gmail.com)*

*2- ААНИИ, г. С-Петербург, Россия*

Одно из значительных магнитосферных проявлений суббури – резкие возрастания потоков энергичных частиц – было впервые выделено из данных магнитосферных спутников на геостационарной орбите (ГЕО) в начале космической эры. Бездисперсные инжекции и следующие за ними дрейфующие (с дисперсией по энергиям) облака частиц привлекали внимание в связи с проблемой пополнения радиационных поясов, а также как источник высыпаний энергичных электронов (ЭЭ) в ионосферу и, в более широком контексте, как одно из ключевых явлений формирующих космическую погоду. Хотя связь инжекций с возрастаниями магнитного поля была показана еще в упомянутых первых исследованиях, измерения на ГЕО многочисленны, а бетатронный механизм часто привлекается для объяснения ускорения частиц при инжекциях, - имеющиеся количественные данные о соотношении амплитуд инжекций и диполизации на ГЕО крайне скудны.

Мы исследуем этот аспект по данным десятков инжекций воспользовавшись наблюдениями долготно-разнесенных спутников GOES-13,14,15 в конфигурации, когда характеристики диполизации и инжекции ЭЭ одновременно наблюдаются как внутри области инжекции, так и в примыкающей области дрейфа ЭЭ при регистрации магнитных возмущений токового клина суббури по наземным магнитным данным. Важной особенностью суббуревых вариаций является (со)существование разных источников диполизаций (BZ вариаций связанных как с внедрением локализованных быстрых струй из хвоста магнитосферы, так и с иными изменениями магнитосферной токовой системы), и соответствующих им мод вариаций потоков ЭЭ (собственно инжекции, а также вариации связанные с пересечениями дрейфовых оболочек (ПДО)). Мы обсудим способ количественного разделения инжекций и вариаций ПДО с помощью J-V годограмм и покажем некоторые результаты, касающиеся соотношений амплитуд диполизаций и инжекций, изменений жесткости спектра инжекций, а также кратко обсудим возможную роль фоновой популяции в инжекциях и ее вариации.

Работа выполнена в лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы при поддержке СПбГУ.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ МАГНИТНЫМ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕМ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Дивин А.В., Парамоник И. П., Чжун Д. (钟 达华), Семенов В. С.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, [a.divin@spbu.ru](mailto:a.divin@spbu.ru)

В ходе магнитного пересоединения происходит генерация частиц со скоростями порядка характерной Альвеновской скорости  $V_A$ . В бесстолкновительной плазме наложение траекторий различных популяций частиц создает функции распределения сложной формы, содержащие пучки и “полумесяцы”, в результате чего формируется плазма, далекая от термодинамического равновесия.

В данной работе приведены результаты численного моделирования магнитного пересоединения методом частица-в-ячейке (“Particle-in-Cell”, PIC) кодом iPIC3D [1]. Рассматривается двумерная модель с начальным слоем типа Харриса, в котором задается начальное возмущение типа X-точки в центре вычислительной области. Проведенные ранее вычисления [2], [3] показали, что нагрев ионов на сепаратрисах зависит от температуры втекающей плазмы. Данная работа посвящена более общему исследованию эффективности нагрева частиц магнитным пересоединением с параметрами, характерными для хвоста магнитосферы Земли. Изучена зависимость от плотности и плазменной  $\beta$  в области втекания и показано, что нагрев в области выхлопа пропорционален квадрату Альвеновской скорости  $V_A$ . Используются два выражения для оценки температуры в результатах PIC моделирования:

1) “Классическое” определение температуры как второго момента функции распределения. Для такой температуры выполняется соотношение для нагрева  $\sim 0.13 m_i V_A^2$ , что также находится в хорошем согласии с работами других авторов [4]. Плазменная  $\beta$  вносит коррекцию в величину нагрева вследствие уменьшения скорости вытекания в горячей плазме [5].

2) Оценка температуры с использованием модели Gaussian Mixture Model (GMM), которая относится к методу машинного обучения без учителя (unsupervised learning). В данном подходе функция распределения раскладывается в сумму пучков; оценкой температуры  $T^{GMM}$  является суммарная тепловая энергия отдельных пучков. Разница между “классической” температурой и  $T^{GMM}$  выступает в качестве меры термализации функции распределения. В данной модели нагрев оказывается меньше  $\sim 0.13 m_i V_A^2$ , что говорит об отсутствии перемешивания пучков и существенных отличиях функций распределения в области вытекания от Максвелловских.

Работа выполнена при поддержке гранта 23-47-00084 российского научного фонда.

1. Markidis, S., G. Lapenta, and Rizwan-uddin // Math. Comput. Simul. 2010, 80(7), 1509–1519
2. I. Zaitsev, A. Divin, V. Semenov, I. Kubyshkin, D. Korovinskiy, J. Deca, Yu. Khotyaintsev, and S. Markidis // Phys. Plasmas 2021, 28, 032104
3. A. Divin; I. Zaitsev; I. Paramonik; V. Semenov; D. Korovinskiy; A. Mao; J. P. Dargent; S. Toledo-Redondo; J. Deca // Phys. Plasmas 2023, 06, doi:10.1063/5.0155958
4. Phan, T., J. Drake, M. Shay, J. Gosling, G. Paschmann, J. Eastwood, M. Oieroset, M. Fujimoto, and V. Angelopoulos // Geophys. Res. Lett. 2014. 41, 7002–7010.
5. C. C. Haggerty, M. A. Shay, A. Chasapis, T. D. Phan, J. F. Drake, K. Malakit, P. 697 A. Cassak, and R. Kieokaew // Phys. Plasmas 2018. 25, 102120.

## ИНТЕНСИВНЫЕ ТОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ НА ЭЛЕКТРОННЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МАСШТАБАХ В РУСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА

Григоренко Е.Е., Леоненко М.В., Малыхин А.Ю., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [elenagrigorenko2003@yandex.ru](mailto:elenagrigorenko2003@yandex.ru)

Наблюдения четырехспутниковой миссии MMS с высоким временным и пространственным разрешением позволили исследовать характеристики интенсивных Сверхтонких Токowych Структур (СТС) с плотностью тока  $J > 30$  нА/м<sup>2</sup>, формируемых в русле высокоскоростных плазменных потоков, распространяющихся в Плазменном Слое (ПС) геомагнитного хвоста из области магнитного пересоединения. Установлено, что характерная толщина СТС составляет не более нескольких гирорадиусов тепловых электронов, и, в  $\sim 70\%$  случаев, электрический ток в них переносит популяция размагниченных электронов. На краях и внутри СТС часто наблюдаются всплески сильных неидеальных электрических полей  $E' > 10$  мВ/м ( $E' = E_{obs} + V_e \times B$ , где  $E_{obs}$  – наблюдаемое электрическое поле,  $V_e$  – потоковая скорость электронов,  $B$  – магнитное поле). Генерация таких полей обуславливает плотность мощности энергии, выделяемой в СТС, по порядку величины сравнимую с плотностью мощности энергии выделяемой в электронной диффузионной области пересоединения (сотни пВт/м<sup>3</sup> и более). Наличие размагниченной популяции электронов и интенсивное энерговыделение в СТС указывает на возможность развития в них быстрой электронной тиринг-моды и вторичного пересоединения [1]. Статистический анализ более 1000 наблюдений СТС в ПС геомагнитного хвоста показал, что при наличии значительной доли размагниченной популяции электронов (при уменьшении толщины СТС до 1 - 2 гирорадиусов тепловых электронов), СТС могут переходить в нестабильное состояние и разрушаться с выделением значительной энергии. Численное PIC – моделирование одного случая наблюдения СТС [2] показало, что в присутствии сильного внешнего драйвера, так называемая «электронная фаза» пересоединения, связанная с формированием и разрушением СТС, может переходить в «ионную фазу» традиционного пересоединения. Мы статистически исследовали наличие внешних драйверов, в частности, возрастания магнитного потока в лобах во время наблюдения СТС. Установлено, что наиболее сильное энерговыделение в СТС имеет место во время распространения наиболее быстрых плазменных потоков (усиление электрического поля конвекции) и во время усиления магнитного потока в лобах, что согласуется с результатами численного моделирования.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-12-00031

1. Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E., Malova H.V., Popov V.Yu., Zelenyi L.M. // Geophys. Res. Lett. 2024. accepted.
2. Lu S., Wang R., Lu Q., Angelopoulos V. et al. // Nature. Communications. 2020. doi:10.1038/s41467-020-18787-w.



## СПЕКТРЫ ФЛУКТУАЦИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ MMS

**Овчинников И.Л.<sup>1\*</sup>, Найко Д.Ю.<sup>1,2</sup>, Антонова Е.Е.<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова

<sup>2</sup> Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

<sup>3</sup> Институт Космических Исследований РАН

\* [ilya@psn.ru](mailto:ilya@psn.ru)

Проведен предварительный анализ спектров флуктуаций гидродинамических скоростей в плазменном слое магнитосферы Земли в частотном диапазоне от 0.2 до 100 мГц. Были использованы находящиеся в открытом доступе данные Magnetospheric Multiscale Mission (MMS): гидродинамическая скорость с временным разрешением  $1/4.5 \text{ с}^{-1}$  по данным измерений приборами FPI/DIS; локализация спутников внутри плазменного слоя фиксировалась по значениям плазменного параметра  $\beta$  с использованием данных измерений магнитного поля приборами FGM.

Показано, что в диапазоне от 3 до 100 мГц спектры имеют степенной характер, с показателями наклона от 0.9 до 2.2 для различных событий. На более низких частотах спектральная плотность мощности практически не зависит от частоты. Показатели спектров флуктуаций гидродинамических скоростей не совпадают с ранее полученными показателями спектров флуктуаций электрических и магнитных полей, их взаимосвязь требует дальнейшего исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-22-00076. Д.Ю. Найко является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

## ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМОВ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ 9-16.10.2017

**Иванова А.Р.<sup>1,4</sup>, Базилевская Г.А.<sup>1,2</sup>, Власова Н.А.<sup>1</sup>, Гранкин Д.В.<sup>5</sup>, Груздов Д.С.<sup>1,4</sup>, Демехов А.Г.<sup>3</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,4</sup>, Капорцева К.Б.<sup>1,4</sup>, Миронова И.А.<sup>5</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>, Попова Т.А.<sup>3</sup>, Розанов Е.В.<sup>5</sup>, Шугай Ю.С.<sup>1</sup>, Яхнина Т.А.<sup>3</sup>**

1. НИИЯФ МГУ, 2. ФИАН, 3. ПГИ, 4. Физ. фак. МГУ, Москва, 5. СПбГУ, [ivanova.ar20@physics.msu.ru](mailto:ivanova.ar20@physics.msu.ru)

Механизмы высыпаний энергичных электронов из внешнего радиационного пояса Земли - одна из важных проблем современной космофизики. С помощью данных низкоорбитального полярного спутника Meteor-M2 был исследован на предмет высыпаний период 9 - 16.10.2017, когда наблюдалась достаточная геомагнитная активность – небольшая магнитная буря и мощные суббуревые активации, что способствует эффективному пич-угловому рассеянию и высыпанию частиц в атмосферу. Большую часть высыпаний электронов, произошедших за этот период, удалось классифицировать и соотнести с определенным механизмом возникновения. Для этого использовались многоспутниковые наблюдения, данные о волновой активности и априорные знания об отличительных особенностях механизмов высыпаний. Был проведен сравнительный анализ высыпаний разных механизмов – динамика интенсивности этих высыпаний, энергетический спектр. Результаты этого сравнения показали, что высыпания разных механизмов действительно имеют свои спектральные особенности, обусловленные природой механизма. В то время как от уровня геомагнитной активности спектр зависит мало – меняется только интенсивность высыпания, а форма спектра меняется совсем незначительно. Динамика интенсивности высыпаний сохраняется примерно одинаковой для всех видов высыпаний и подтверждает результаты, полученные ранее – динамика интенсивности высыпаний четко коррелирует с суббуревыми активациями, а не с фазами магнитной бури.

## ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ НА ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Морозова Д.Н., Майоров А.Г., Кузнецов А.В., Лозина Е.В.

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [dashia110999@mail.ru](mailto:dashia110999@mail.ru)

В работе обсуждается влияние электромагнитного излучения внегалактической природы, а именно, от космических гамма-всплесков, на потоки заряженных частиц, захваченных в радиационных поясах Земли. Используются и анализируются данные прецизионных измерений потоков заряженных космических лучей космическим аппаратом PAMELA [1] в моменты прихода излучения от гамма-всплесков, известные благодаря каталогам обсерватории Fermi [2]. Оба прибора одновременно работали на околоземной орбите в период с 2008 по 2016 годы.

Исследовались зависимости темпов счета детекторов спектрометра PAMELA от времени в диапазоне времени  $\pm 10$  мин от прихода гамма-всплеска. Найдено несколько событий, когда достоверно в области под внутренним радиационным поясом возникает значимое отклонение темпа счета от фоновых значений [3]. Для объяснения эффекта предложена гипотеза, заключающаяся в высыпаниях частиц из радиационного пояса на другие дрейфовые оболочки под воздействием гамма-квантов гамма-всплеска. Проводится анализ возникновения ложноположительных событий, для чего необходимо знание механизмов, приводящих к высыпаниям.

В работе рассмотрен Комптон-эффект космического гамма-кванта на электроны, захваченном в магнитосфере Земли, предполагая, что каждый гамма-квант «выбивает» из радиационного пояса строго один электрон, передавая ему всю свою энергию и импульс. Тогда темп счёта электронов в детекторе, обусловленный данным процессом, можно представить в виде:

$$\frac{dN}{dt} = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} d\omega \frac{dI_{\gamma}}{d\omega} \cdot \Delta S, \quad (1)$$

где  $\Delta S$  – рабочая площадь детектора, а в качестве  $\omega_{min}$  следует взять максимальную из двух величин: либо нижнюю границу спектра гамма-квантов в гамма-всплеске, либо величину порога регистрации электронов детектором.

Рассмотренный процесс в таком приближении не позволяет полностью объяснить экспериментальный результат, поскольку интенсивности гамма-излучения с энергиями выше десятков МэВ оказывается недостаточно для объяснения наблюдаемой в эксперименте PAMELA величины превышения сигнала над фоном (энергетический порог прибора). При понижении минимальной энергии гамма-кванта до  $\sim 1$  МэВ согласие с измерениями может быть достигнуто, однако при этом следует рассматривать электрон с начальной энергией  $\sim 100$  МэВ.

Т.о. обнаруженные события могут указывать на существование некоторых механизмов взаимодействия электромагнитного излучения высокой энергии от гамма-всплесков с заряженными частицами в магнитосфере Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>.

1. Picozza P et al. // *Astroparticle Physics* 2007. V. 27. PP. 296-315.
2. A. von Kienlin, Meegan C.A., Paciesas W.S., et al. // *The Astrophysical Journal* 2020, V. 893.
3. Морозова Д.Н., Майоров А.Г. // Труды XVII Конференции молодых ученых. Иркутск, 2022. СС. 240-242.

## НАБЛЮДЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ СИЛОВЫХ ТРУБОК В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА IMAGE НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 304 Å

Рубцов А.В., Анфиногентов С.А.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, [avrubtsov@iszf.irk.ru](mailto:avrubtsov@iszf.irk.ru)

Большинство космических аппаратов, используемых для изучения магнитосферы Земли, проводят измерения *in situ*, которые имеют существенные ограничения на пространственное разрешение отдельных структурных элементов в плазменной среде. Из тех редких спутников, которые были оборудованы камерами для наблюдения за околоземным пространством со стороны, особенно выделяется Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration (IMAGE), который работ с 2000 по 2005 года и был снабжён несколькими камерами в разных диапазонах длин волн. В настоящей работе мы использовали данные с инструмента EUV, которые представляют собой изображения околоземного пространства и самой планеты на длине волны 304 Å, т.е. показывают излучение He<sup>+</sup>. Эти ионы в достаточном количестве присутствуют в плазмосфере Земли, позволяя по измерениям EUV различать полную пространственную структуру, как целиком плазмосферы, так и различных образований внутри неё.

Интересно, что на той же длине волны проводятся наблюдения за короной Солнца, в которой отчётливо видны различные структуры, включая плазменные петли и их колебания. Поскольку ключевые характеристики в короне над активными областями на Солнце и в магнитосфере Земли схожи (параметр  $\beta$ , пространственные размеры, конфигурация магнитного поля, альфвеновская скорость), то естественно предположить, что на изображениях инструмента EUV можно будет увидеть множество сходств с изображениями короны Солнца.

Мы сосредоточились на анализе плазменных петель — основного структурного элемента плазмы солнечной короны. По данным IMAGE плазмосфера оказалась гораздо более однородной и менее структурированной, и отдельные плазменные петли наблюдаются в ней крайне редко. Тем больший интерес привлекается к случаям, когда отдельные петли всё же наблюдаются, причём и в виде одиночных петель, и в виде пучков из нескольких петель. Мы постарались выбрать наиболее качественные данные по наблюдению плазменных петель спутником IMAGE с помощью инструмента EUV и провели предварительный анализ факторов, которые могут влиять на формирование петель в плазмосфере Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10139.

## ТРАССИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ АНАЛИЗА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИАМАГНИТНОЙ ПОЛОСТИ С УЧЕТОМ И БЕЗ УЧЕТА ХОЛЛОВСКОГО ЧЛЕНА В ЗАКОНЕ ОМА

Парамоник И.П.<sup>1</sup>, Дивин А.В.<sup>1</sup>, Чибранов А.А.<sup>2</sup>, Руменских М.С.<sup>2</sup>, Шайхисламов И.Ф.<sup>2</sup>, Семенов В.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, [igorparamonik@gmail.com](mailto:igorparamonik@gmail.com)

<sup>2</sup>ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Исследования диамагнитной полости, полученной в результате расширения плазменного облака во внешнем магнитном поле, вдохновлены рядом активных экспериментов в магнитосфере Земли (AMPTE, CRRES) и в установках с лазерной плазмой (стенд КИ-1, ИЛФ СО РАН) [1]. Несмотря на то, что такие объекты уже изучаются несколько десятилетий, остается открытым вопрос о влиянии эффекта Холла на динамику плазмы, аномально быстрый коллапс каверны и формировании желобков, наблюдаемых при разлете облака [2].

Проведенное кинетическое моделирование диамагнитной каверны, близкой по параметрам плазмы с экспериментами на установке КИ-1, с помощью параллельного кинетического кода iPIC3D показало качественное соответствие, но из-за особенности метода макрочастиц, используемого в коде, не позволило нам сделать оценку влияния холловского члена в законе Ома на динамику магнитного поля. Для изучения поведения магнитного поля в процессе расширения и сжатия диамагнитной каверны с учётом и без учёта холловского члена мы разработали программный пакет, рассчитывающий эволюцию магнитного поля из уравнения индукции Фарадея на основе результатов 2D PIC-моделирования. При этом из данных PIC-моделирования используются только массовые скорости ионов и электронов, а магнитные поля получены независимо, что позволяет учитывать отдельно вклад конвективного и холловского члена в законе Ома.

Мы представляем алгоритм трассировки магнитного поля и результаты его работы на примере двумерного кинетического моделирования диамагнитной каверны. Метод наглядно показывает влияние холловского члена на более быстрый внос поля внутрь полости: область вытесненного поля на стадии сжатия оказывается гораздо больше при использовании только конвективного члена, чем при добавлении холловского или в сравнении с оригинальным самосогласованным PIC-моделированием.

Работа выполнена при поддержке гранта российского научного фонда №23-22-00386 "Исследование трехмерных кинетических структур при выбросах энергичной плазмы посредством лабораторного эксперимента и численного моделирования".

1. Winske, D., Huba, J. D., Niemann, C., & Le, A. 2019 *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 51(5) 1-14
2. Zakharov Y. P. et al. // *Quantum Electronics*. – 2022. – Т. 52. – №. 2. – С. 155.

## ВЕЧЕРНИЕ СУББУРИ В СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ («ПОЛЯРНЫЕ» СУББУРИ)

Дэспирак И.В.<sup>1</sup>, Клейменова Н.Г.<sup>2</sup>, Любич А.А.<sup>1</sup>, Громова Л.И.<sup>3</sup>, Малышева Л.М.<sup>2</sup>, Ролдугин А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПГИ, г. Анапты, Россия, [despirak@gmail.com](mailto:despirak@gmail.com)

<sup>2</sup>ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

«Полярные» суббури были определены как суббури, которые наблюдались на магнитометрах сети IMAGE на широтах выше 70° MLAT (станции VJN-NAL) при отсутствии отрицательных магнитных бухт на более низких широтах на данном меридиане. Цель данной работы – продолжить исследование морфологических характеристик «полярных» суббурь и их связи с глобальными магнитными возмущениями, положительными среднеширотными магнитными бухтами, получить их зависимости от интенсивности магнитных бурь, разных потоков солнечного ветра и от солнечного цикла. Для этой цели мы проанализировали данные станций IMAGE за периоды 1995-2000 и 2010-2020 годов, используя также данные камеры всего неба в обсерватории Баренцбург, магнитные регистрации системы спутников проекта AMPERE и базу данных OMNI по солнечному ветру и межпланетному магнитному полю (ММП). Показано, что подобно «классическим» суббурям, «полярные» суббури сопровождаются экспансией сияний, всплесками геомагнитных пульсаций Pi2, формированием суббуревых токового клина. Начало «полярных» суббурь обычно происходит на ~ 70° MLAT в вечернем секторе (~19–23 MLT) после появления магнитного вихря, соответствующего локальной интенсификации высокоширотных продольных токов вблизи полночи. В этой области, что и «полярные» суббури, и в том же интервале MLT часто наблюдается другое важное явление — разрыв Харанга (вечерняя узкая широтная зона между западными и восточными электроджетами). Показано, что экваториальная граница «полярной» суббури определяет полярную границу разрыва Харанга, а полярная граница восточного электроджета – его экваториальную границу. Кроме того, подробно рассмотрены некоторые отдельные события «полярных» суббурь, их различие и сходство с «обычными» суббурями.

## ИМПЕДАНСНЫЙ ДАТЧИК КИНЕТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ДОБРОТНОСТИ ПОТОКА ГОРЯЧЕЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ, УПРАВЛЯЮЩЕГО СТРУКТУРОЙ МАГНИТОСФЕР

В.М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия ([ua3thw@appl.sci-nnov.ru](mailto:ua3thw@appl.sci-nnov.ru))

Структура магнитосферы - 3D топология ее, как стационарного «волнового пакета», регулируется внешними безразмерными параметрами разлета плазмы волновой и неволновой природы. «Волновые» параметры - это числа Маха  $M$ , они связаны с возбуждениями МГД волновых мод: звуковые, магнитозвуковые и альвеновские, с этими модами в пакете связаны «конусы» Маха. Эти числа широко обсуждаются и измеряются в микро-лазерных и Макро-космических плазмах. Однако, основная компонента 3D токовых систем (ТС) пакета связана с «неволновой» модой индукционного поля, т.е. «энтропийной» модой в плазме. Установившееся состояние ТС регулируется от состояния «с магнитным хвостом» до состояния «с диполизацией» значением введенного «неволнового» безразмерного э.м. параметра добротности плазмы  $G_V$ - «гервь». Само существование этого параметра разлета и возможность его измерения не обсуждается в литературе. Этот параметр и сами индукционные ТС в потоках горячей плазмы оказываются кинетической природы, т.е. зависят от формы внешней электронной функции распределения частиц (ФРЧ) разлета, ограниченной здесь факторами асимметрии по импульсу и анизотропии по энергии. Параметр определяется отношением этих двух факторов при  $G_V \ll 1$ . Определение  $G_V$  через прямые измерения этих факторов у электронной ФРЧ не эффективно из-за сложностей непосредственной диагностики. Предлагается опосредованное измерение  $G_V$ , основанное на измерении импеданса  $Z$  с компонентами  $R, L, C$  у элемента датчика, выполненного в виде идеально проводящей прямоугольной плоской сетки, бесстолкновительно проницаемой в разлете плазмы. Макро разлет - поток солнечного ветра при нахождении датчика в космосе, например, в точках Лагранжа, микро разлет - плазма в окрестности лазерной мишени. В этих условиях трансформаторная связь постоянного тока измерения  $Z$  датчика с распределенными токами возбуждения индукционной моды в окружающем потоке разлета обуславливает э.м. омическое сопротивление  $R(G_V)$  элемента и изменение его индуктивности  $L$ . Нами в 1D приближении вычислены функции  $G_V(R)$  и  $L(G_V)$  у элемента датчика для «квазигауссовой» формы ФРЧ разлета, в которой  $G_V \ll 1$  - состояние с «магнитным хвостом». Для иных форм ФРЧ «диполизация» при  $G_V \gg 1$ .

**Работа выполнена** в рамках Государственного задания № FFUF-2023-0002 и Проекта № 10 Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика».

### Литература:

1. Губченко В.М. [http://www.gaoran.ru/russian/solphys/2023/book/conf2023\\_75.pdf](http://www.gaoran.ru/russian/solphys/2023/book/conf2023_75.pdf)
2. Кингсеп А.С., Чукбар К.В., Яньков В.В. Электронная магнитная гидродинамика // Вопросы теории плазмы: Сб. Вып.16. – М. Энергоатомиздат, 1987. – С. 209.

## НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ SAR-ДУГИ ВО ВРЕМЯ РЕГИСТРАЦИИ СУББУРЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ЗОНДЕ ВАН АЛЛЕНА ОКОЛО ПЛАЗМОПАУЗЫ

Иевенко И.Б., Парников С.Г.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, [ievenko@ikfia.ysn.ru](mailto:ievenko@ikfia.ysn.ru)

Стабильные авроральные красные (SAR) дуги являются следствием взаимодействия внешней плазмосферы (плазмопаузы) с энергичными ионами кольцевого тока во время магнитных бурь. Это взаимодействие приводит к образованию субаврорального пика электронной температуры ( $T_e$  пика) на высотах области  $F2$  ионосферы и, как результат, происходит усиление эмиссии 630.0 нм в красной дуге. Диффузное сияние (ДС) вызывается высыпанием низкоэнергичных электронов из плазменного слоя. Наши исследования показывают, что SAR-дуги могут возникать в окрестности границы ДС во время усиления магнитосферной конвекции. Во время фазы развития суббури красные дуги активизируются с увеличением интенсивности [1-4]. В данной работе выполнен комплексный анализ наблюдений динамики ДС и SAR-дуги в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм цифровой камерой всего неба на субавроральной ст. Маймага (GMLat 58°, GMLon 202°) во время изолированной суббури 13 февраля 2013 г. после длительного спокойного периода.

Фаза расширения суббури началась в 1849 UT через ~25 минут после начала усиления конвекции при южном  $B_z$  ММП. Магнитные индексы AL и SYM-H в этом событии были ~ -600 и -15 нТл, соответственно. Среднширотные магнитограммы указывают на положение центра начала расширения суббури на меридиане ~ 0140 MLT. В этом секторе MLT спутник VAP-A зарегистрировал начало бездисперсионной инжекции суббури после прохода границы плазмосферы. Произошло резкое изменение энергетических спектров с увеличением потоков частиц в интервале 5-50, 20-50, 1-50 кэВ для электронов, протонов и ионов  $O^+$ , соответственно. В это время VAP-A также измерил резкий рост  $B_z$ -компоненты вследствие диполизации магнитного поля на геомагнитной широте ~65° (L~5.5).

Проявления суббуревой инжекции в субавроральном свечении наблюдались камерой всего неба в секторе 0200-0425 MLT до 2115 UT. Сначала произошло расширение ДС к экватору и на восток. Далее началось формирование широкой SAR-дуги на геомагнитной широте ~60° и ее смещение до зенита станции. Спутник DMSP F16 зарегистрировал рост электронной температуры до ~5000° K ( $T_e$  пик) в 2049 UT при проходе области красной дуги на ~15° восточнее меридиана станции наблюдений. На основе оптических данных сделана оценка радиальной и азимутальной скорости дрейфа энергичных частиц на магнитном экваторе. Полагается, что динамичная SAR-дуга с интенсивностью до ~1.5 кРл отображала перекрытие горячей плазмы с внешней плазмосферой в результате электрического дрейфа из области инжекции суббури.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации 122011700172-2) при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 21-55-50013.

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.

## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СВЯЗИ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ *SYM-H* И *ASY-H* С СЕВЕРО-ЮЖНОЙ КОМПОНЕНТОЙ ММП И БЕТА-ПАРАМЕТРОМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Макаров Г.А.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, [gmakarov@ikfia.ysn.ru](mailto:gmakarov@ikfia.ysn.ru)

По среднегодовым значениям рассмотрены связи геомагнитных индексов *SYM-H*, *ASY-H*, а также *Dst* с параметрами солнечного ветра в период с 1981 по 2015 гг. Используемые данные были разделены по знаку северо-южной компоненты *Bn* межпланетного магнитного поля (ММП) на две выборки. Получено, что вариации среднегодовых значений каждого из индексов *Dst*, *SYM-H* и *ASY-H* при южном и северном направлениях ММП подобны и коэффициенты их линейной корреляции *r* высоки: для *Dst*  $r = 0.87$ , для *SYM-H*  $r = 0.86$ , для *ASY-H*  $r = 0.94$ . Подобие вариаций индексов при разных знаках *Bn* обусловлено, вероятно, тем, что среднегодовые значения величины *B* ММП и *Bn* ММП изменяются со временем одинаково, независимо от ориентации *Bn*: коэффициент корреляции при сравнении *B* для разных знаков *Bn*  $r = 0.97$ , при сравнении *Bn* для разных знаков *Bn*  $r = -0.86$ .

Установлено, что индексы *Dst*, *SYM-H* и *ASY-H* зависят от параметра  $\beta$  солнечного ветра: их абсолютные величины уменьшаются с ростом  $\beta$  независимо от знака *Bn*. Уменьшение индексов с ростом  $\beta$  происходит, вероятно, из-за перехода магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастающего преобладания в солнечном ветре теплового давления над магнитным давлением и уменьшения уровня турбулентности солнечного ветра [1].

Обнаружено, что наиболее тесные связи с параметром  $\beta$  проявляют *SYM-H* и *ASY-H* индексы, при этом *SYM-H* сильнее зависит от  $\beta$  при направленном к югу ММП ( $r = 0.744$ ), чем при ММП, направленном к северу ( $r = 0.677$ ), а *ASY-H*, наоборот, более выражено связан с  $\beta$  при северном ММП ( $r = -0.741$ ), чем при южном ММП ( $r = -0.719$ ). Индекс *Dst*, аналогично *SYM-H*, но в меньшей степени, заметно коррелирует с  $\beta$  при южном ММП ( $r = 0.629$ ) и слабее при северном ММП ( $r = 0.456$ ).

Полученная в настоящей работе зависимость *Dst* от  $\beta$  в общем виде согласуется с результатом [1], учитывая то обстоятельство, что мы оперировали среднегодовыми значениями данных, когда при суммировании нивелируются эффекты фаз бури и межпланетных потоков разных типов [2]. В работе [1] по среднечасовым данным установлено подобие динамики *Dst* и  $\beta$  в процессе развития геомагнитных бурь с постепенными и внезапными началами и показано, что между *Dst* и  $\beta$  связь имеет нелинейный характер.

Сведения об индексах взяты из Мирового центра данных по геомагнетизму (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), о солнечном ветре из Центра данных космической физики НАСА (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122011700182-1.

1. Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром  $\beta$  солнечного ветра // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7, № 4. С. 25–34. DOI: 10.12737/szf-74202104.

2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космические исследования. 2009. Т. 47, № 2. С. 99–113.

## ВЫСЫПАНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В АТМОСФЕРЕ НА СРЕДНЕЙ И ПОЛЯРНОЙ ШИРОТАХ В 2022-2023 ГГ.

Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Квашнин А.Н., Крайнев М.Б., Свиржевский Н.С., Свиржевская А.К.

ФИАН, г. Москва, Россия, [makhmutv@sci.lebedev.ru](mailto:makhmutv@sci.lebedev.ru)

Исследование высыпаний высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из магнитосферы в земную атмосферу является важным для изучения физических механизмов ускорения электронов во время межпланетных возмущений в околоземном пространстве, процессов формирования захваченных потоков электронов в магнитосфере и их последующего высыпания в атмосферу. Кроме этого, потоки высыпающихся электронов влияют на функционирование космических аппаратов и нередко приводят к значительному разрушению мезосферного озона и др. [1-3].

Долгопрудненская научная станция (ДНС) ФИАН в течение многих лет изучает ВВЭ из внешнего радиационного пояса Земли вблизи его полярной границы на основе измерений в Мурманской обл. Между внешним и внутренним радиационными поясами существует зазор, который, по современным представлениям, связан с ВВЭ на внутренней границе внешнего пояса в области с параметром Мак-Иллвайна  $L \sim 2-3$ . В этом районе ДНС ФИАН постоянно проводятся измерения космических лучей в атмосфере (Московская обл.,  $L = 2.7$ ). К настоящему времени выполнен анализ исключительно мощного случая ВВЭ, зарегистрированного в Московской обл. в декабре 2009 г.

В работе основное внимание уделено анализу межпланетной и геомагнитной обстановки во время высыпаний магнитосферных электронов, зарегистрированных в атмосфере в декабре 2022 г. и декабре 2023 г. на ст. Апатиты (Мурманская обл.) и на ст. Долгопрудный (Московской обл.).

Анализ данных измерений в стратосфере в этих событиях позволил установить спектры поглощения вторичных тормозных фотонов и на их основе, с использованием разработанного метода [4], определить первичные энергетические спектры высыпающихся магнитосферных электронов. Полученные результаты представлены в данной работе.

1. Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev, M. B., et al. // J. Geophys. Res. 2020. V.125. e28033.
2. Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Mironova I.A., et al. // BRAS 2021. N. 11. P. 1310.
3. Mironova I.A., Sinnhuber V., Bazilevskaya G.A., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. 6703.
4. Makhmutov V.S., Maurice E.A., Bazilevskaya G. A., et al. // J. Geophys. Res. 2023. V. 128. e2023JA031370.

## ПЛАТО ПЛАЗМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ КАК ИНДИКАТОР ГРАНИЦ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЛОБАЛЬНОЙ КАРТИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ ПРИ МАГНИТОСПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ

**Кирпичев И.П.**<sup>1</sup>, Антонова Е.Е.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва, [ikir@cosmos.ru](mailto:ikir@cosmos.ru)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва

По данным миссии THEMIS было идентифицировано ~600 событий, когда радиальный ход плазменного давления фактически оставался без изменений (плато). Получено распределение плато плазменного давления в экваториальной плоскости магнитосферы Земли при спокойных условиях.

Показано, что проекция этой области плато вдоль модельного магнитного поля TA16 на ионосферные высоты достаточно хорошо совпадает с положением зазора между токами зоны I и II Ииджимы-Потемры по экспериментальным данным проектов TRIAD и AMPERE.

Анализ взаиморасположения зоны плато с соседними характерными граничными областями (магнитопаузой и авроральной границей высыпания электронов) показал, что токи, как зоны II так и зоны I, при спокойных условиях локализуются на расстояниях ~8-10 R<sub>E</sub>.

## ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ МАГНИТОСТАТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ И РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Антонова Е.Е.<sup>1,2</sup>, Овчинников И.Л.<sup>1</sup>, Найко Д.Ю.<sup>3</sup>, Кирпичев И.П.<sup>2</sup>, Степанова М.В.<sup>4</sup>, Воробьев В.Г.<sup>5</sup>, Ягодкина О.И.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, [elizaveta.antonova@gmail.com](mailto:elizaveta.antonova@gmail.com)

<sup>2</sup> Институт Космических Исследований РАН

<sup>3</sup> Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

<sup>4</sup> University of Santiago de Chile

<sup>5</sup> Полярный Геофизический институт

Динамика магнитосферных процессов включает медленную фазу, происходящую в условиях магнитостатического равновесия, и быстрые процессы перестройки магнитной конфигурации. Процессы в магнитосферной плазме имеют бесстолкновительный характер и, в значительной степени, контролируются магнитосферно-ионосферными взаимодействиями. Составной частью магнитосферной динамики является распространение волновых возмущений и развитие магнитосферной турбулентности. Результаты экспериментальных наблюдений показывают, что магнитостатически равновесная конфигурация сравнительно быстро устанавливается во внутренних областях магнитосферы и области кольцевого тока при изменениях динамического давления солнечного ветра не сопровождаемых изменениями межпланетного магнитного поля (ММП). Изменение ММП приводят к изменениям магнитной конфигурации, приводящим к развитию магнитосферных суббурь и взрывному выделению энергии в магнитосфере. Стандартное описание таких процессов основано на модели Dungey начала 60-х годов, основанной на предположении о возможности использования условия вмороженности магнитного поля в плазму нарушаемом только в локальных областях (точках и линиях «пересоединения» магнитных силовых линий). Альтернативный подход, основанный на анализе распределения скоростей течения плазмы в магнитосфере, параметров ионной диффузионной длины и наблюдаемых характеристик турбулентности, позволяет построить модель магнитосферных процессов, основанную на предположении о проникновении ММП внутрь магнитосферы, модуляции магнитосферных токов и магнитосферного магнитного поля. Возникновению взрывных процессов внутри магнитосферы рассматривается как результат нарушения условия магнитостатического равновесия.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 23-22-00076.

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ MMS

Найко Д.Ю.<sup>1,2</sup>, Овчинников И.Л.<sup>1</sup>, Антонова Е.Е.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова

<sup>2</sup> Физический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова

<sup>3</sup> Институт Космических Исследований РАН

\* [daniilnaiko@mail.ru](mailto:daniilnaiko@mail.ru)

Представлены результаты анализа распределения коэффициента турбулентной диффузии в зависимости от плазменного параметра  $\beta$  и знака компоненты  $B_x$  магнитного поля в плазменном слое магнитосферы Земли с использованием находящихся в открытом доступе данных Magnetospheric Multiscale Mission (MMS). Для расчета коэффициента диффузии использованы данные измерений гидродинамической скорости ионов плазмы приборами FPI/DIS с временным разрешением  $1/4.5$  с<sup>-1</sup>. Локализация спутников внутри плазменного слоя фиксировалась по концентрации и температуре ионов плазмы по данным тех же приборов и значению плазменного параметра  $\beta$ , для расчета которого использовалось магнитное поле по данным приборов FGM.

Проведен статистический анализ компонент гидродинамической скорости  $V$  путем построения двумерных облаков точек в пространстве скоростей. В зависимости от направления  $X$ -компоненты магнитного поля для каждого облака точек выявлена вытянутая форма: для компонент  $V_x—V_z$  форма облака вытянута вдоль оси  $X$ , для двух других случаев облако вытянуто под углом, изменяющимся при смене направления  $X$ -компоненты магнитного поля. При выделении части точек в зависимости от величины плазменного параметра  $\beta$  для компонент  $V_x—V_z$  картина аналогична, для  $V_z—V_y$  облако вытянуто вдоль оси  $Y$ , для  $V_y—V_x$  вдоль оси  $X$  наблюдается более плотное скопление точек при значениях, меньших среднего, а по оси  $Y$  картина симметрична. Зависимость от разных значений  $\beta$  менее очевидная и требует более тщательного анализа. Также для всех облаков точек характерно заметное отличие от нуля средних и медианных значений: на четверть-треть от стандартного отклонения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-22-00076. Д. Ю. Найко является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

## Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой солнечного ветра в геомагнитных пульсациях типа Pc1s

Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Довбня Б.В.

БГУ, г.Иркутск, Россия, [pekines\\_41@mail.ru](mailto:pekines_41@mail.ru)

Представлены результаты исследования магнитосферного отклика на контакт с диамагнитной структурой ДС солнечного ветра (СВ), сопровождаемой возрастанием потока  $\alpha$  частиц, и определяемой по большому отрицательному значению коэффициента корреляции между модулем  $B$  ММП и плотностью  $N$  СВ при северной ориентации вертикальной компоненты  $B_z$  ММП и большом значении модуля  $B$  ММП. Установлено, что в околополуденные часы с максимумом появления и амплитуды на авроральных обсерваториях ( $\varphi \sim 60^\circ \div 75^\circ$ ) генерируется особый тип геомагнитных пульсаций Pc1s (spot) [1]. Обнаружено совпадение интервалов наблюдения пульсаций и резкого возрастания потока ионов и  $\alpha$  частиц на спутнике Polar.

В доклад вошли результаты обработки записей индукционных магнитометров на российских обсерваториях Борок, Монды и канадской сети CARISMA. Данные о состоянии космической среды получены из данных OMNI [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>].

На основе наблюдений формулируется вывод о возможном источнике наблюдаемых геомагнитных пульсаций. Таким источником может быть импульсное прохождение через магнитопаузу, генерирующихся в магнитослое плазменных джетов, энергетическим источником которых являются диамагнитные структуры СВ. Одним из универсальных тестов определения диамагнитных структур в СВ и внутри магнитосферы является высокое отрицательное значение коэффициентов корреляции между модулем магнитного поля и плотностью в СВ, модулем геомагнитного поля и концентрацией ионов внутри магнитосферы.

1. Довбня Б.В, Зотов О.А. О новой разновидности геомагнитных пульсаций Pc1, Геомагнетизм и Аэрoномия, 1985, Т. 25, с. 440-444.

## ДИНАМИКА ВЫСОКОШИРОТНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 26.02.2023

Манина А.С.<sup>1</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,2</sup>, Николаева В.Д.<sup>2</sup>, Сараев Р.Е.<sup>1,2</sup>, Иванова А.Р.<sup>1,2</sup>, Власова Н.А.<sup>2</sup>

1. Физ. фак. МГУ, 2. НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, [alinmanina73@yandex.ru](mailto:alinmanina73@yandex.ru)

Магнитосфера Земли находится под постоянным воздействием межпланетной среды. Вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля вызывают в магнитосфере геомагнитные возмущения, которые приводят к изменениям структуры магнитного поля и проявляются в динамике популяций заряженных частиц. Наиболее значительные изменения структуры магнитосферы происходят в высокоширотных ее областях. Потоки заряженных частиц могут быть инструментом для изучения топологии магнитосферного магнитного поля.

24.02 и 25.02 2023 г. в одной активной области на Солнце произошли солнечные вспышки, сопровождавшиеся мощными корональными выбросами массы. В околоземном пространстве были зарегистрированы два солнечных протонных события. Ударная волна коронального выброса массы 24.02 пришла в околоземное пространство в ~18 UT 26.02, вызвав сильную магнитную бурю с  $|Dst|_{max} \sim 140$  нТл.

Одновременное присутствие разных популяций заряженных частиц (солнечных энергичных частиц, энергичных электронов внешнего радиационного пояса и авроральных частиц, высыпавшихся в области аврорального овала) создают уникальную возможность для исследования структуры и динамики высокоширотной магнитосферы во время магнитной бури. Представлены результаты исследования во время магнитной бури 27.02.2023 г. динамики высокоширотных границ основных магнитосферных структур: области проникновения солнечных протонов с энергиями  $1 \div 100$  МэВ и  $3 \div 10$  МэВ; области высыпаний авроральных электронов и ионов с энергиями  $\sim 30$  эВ  $\div$   $30$  кэВ; положений границ захвата и максимальных потоков электронов с энергиями  $>100$  кэВ и  $>2$  МэВ внешнего радиационного пояса Земли. Работа выполнена на основе экспериментальных данных по потокам заряженных частиц, полученных на низкоорбитальных полярных спутниках Метеор-М2 и DMSP в вечернем и утреннем секторах по местному времени.

Получено, что во время главной фазы магнитной бури границы всех исследуемых магнитосферных структур смещаются на более низкие широты и наблюдается сильная утрете-вечерняя асимметрия всей области высокоширотной магнитосферы. В вечернем секторе магнитосферы наблюдается более сильное смещение границ по сравнению с утренними часами, что связано с развитием асимметричного кольцевого тока на главной фазе бури. На фазе восстановления магнитной бури положение максимумов потоков электронов внешнего радиационного пояса смещается на более низкие широты, а граница захвата электронов внешнего радиационных поясов – на более высокие широты.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

## «ПОЛЯРНЫЕ» СУББУРИ В СКАНДИНАВИИ И АВРОРАЛЬНЫЙ ХИСС В ОБСЕРВАТОРИИ БАРЕНЦБУРГ

Клейменова Н.Г.<sup>1</sup>, Никитенко А.С.<sup>2</sup>, Федоренко Ю.В.<sup>2</sup>, Громова Л.И.<sup>3</sup>, Малышева Л.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИФЗ РАН, г. Москва, Россия; [kleimen@ifz.ru](mailto:kleimen@ifz.ru)

<sup>2</sup>Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Анатиты, Россия

<sup>3</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

К «полярным» суббурям относятся суббури, наблюдаемые на геомагнитных широтах выше  $70^\circ$  MLAT при отсутствии в данном долготном секторе одновременных отрицательных магнитных бухт на более низких широтах [1-3], т. е. в условиях сжатого аврорального овала. Как и классические суббури, «полярные» суббури сопровождаются всплесками геомагнитных пульсаций  $Pi2$  и  $Pi1$ . Однако до настоящего времени оставался вопрос, сопровождаются ли «полярные» суббури всплесками аврорального хисса в полярных широтах, как это характерно для классических суббурь, в подготовительную фазу которых отмечается генерация всплесков аврорального хисса в авроральных широтах [4]. Для решения этого вопроса были проанализированы 41 случай «полярных» суббурь в 2017 году на скандинавском профиле магнитометров IMAGE ( $68-76^\circ$  MLAT), во время которых имелась одновременная регистрация ОНЧ аврорального хисса в обс. Баренцбург (BAV,  $75.6^\circ$  MLAT). Было установлено, что все эти случаи «полярных» суббурь (кроме двух) сопровождались появлением всплесков аврорального хисса в BAV, причем авроральный хисс наблюдался не только в подготовительную фазу «полярной» суббури, но и в течение всего её развития. Кроме того, было найдено, что появление аврорального хисса в BAV сопровождается интенсификацией продольных токов в этой же области пространства, наблюдаемых с помощью 66 одновременных ионосферных спутников проекта AMPERE. Представлено детальное рассмотрение двух таких событий (25 ноября и 20 декабря 2017 г.), во время которых метеоусловия позволили также зарегистрировать развитие полярных сияний на Шпицбергене.

1. Safargaleev V.V., Kozlovsky A.E., Mitrofanov V.M. Polar substorm on 7 December 2015// Ann. Geophys. 38 (4), 901–918. 2020. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-901-2020>

2. Клейменова Н.Г., Громова Л.И. и др. Особенности полярных суббурь. Геомагнетизм и Аэрномия, 63(3), 327-339, 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600023>

3. Kleimenova N.G., Despirak I.V. et al. Substorms on a contracted auroral oval// J. Atmos. Solar-Terr. Phys, 245,106049-106062. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106049> 2023

4. Manninen J., Kleimenova N., et al. Ground-based auroral hiss recorded in Northern Finland with reference to magnetic substorms. Geophys. Res. Lett. 47. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL086285>



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ВСЛЕДСТВИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВОЛНА-ЧАСТИЦА ДЛЯ ПИТЧ-УГЛА 90 ГРАДУСОВ

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, [smolinsv@inbox.ru](mailto:smolinsv@inbox.ru)

Одной из очень важных, но еще не достаточно исследованных задач в теоретической физике магнитосферы Земли является определение времени жизни заряженных частиц вследствие взаимодействий волна-частица. Поэтому для питч-угла 90 градусов как математическая модель предлагается [1] обыкновенное дифференциальное уравнение для аналитического описания перпендикулярного дифференциального потока заряженных частиц в магнитосфере Земли, которое зависит от времени и нескольких параметров (параметра МакИлвейна  $L$ , магнитного местного времени LT или геомагнитной восточной долготы,  $Kp$ -индекса геомагнитной активности, показателя питч-углового распределения заряженных частиц или индекса анизотропии питч-углового распределения, взятого для питч-угла 90 градусов при  $t = 0$ , среднего показателя питч-углового распределения заряженных частиц на временном интервале вычисления, времени жизни вследствие взаимодействий волна-частица для питч-угла 90 градусов). При определенных геофизических условиях и на временном интервале приблизительно не более чем три часа (когда индекс геомагнитной активности  $Kp = \text{const}$ ) или на большем временном интервале, когда  $Kp$  приблизительно  $\text{const}$ , уравнение решается аналитически. Используя аналитическое решение, получена новая простая формула для определения времени жизни вследствие взаимодействий волна-частица для питч-угла 90 градусов для разных геофизических условий. Для расчета по этой формуле (для примера) используется коррелированное наблюдение усиленных электромагнитных ионно-циклотронных волн и динамической эволюции потока энергичных (5-30 кэВ) протонов кольцевого тока, собранное спутником Cluster около положения  $L = 4.5$  в течение 26-27 марта 2003 г. в магнитоспокойный период ( $Dst > -10$  нТл). В дополнение можно найти перпендикулярный коэффициент функции потерь частиц, перпендикулярный коэффициент функции источника частиц и перпендикулярный коэффициент питч-угловой диффузии. Впервые получены модельные зависимости времени жизни вследствие взаимодействий волна-частица для питч-угла 90 градусов от LT и  $Kp$ -индекса.

Предложена математическая постановка задачи в общем виде (система двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с двумя граничными условиями), когда параметры зависят от времени, которая позволяет определять время жизни вследствие взаимодействий волна-частица для питч-угла 90 градусов численно.

1. S.V. Smolin, Definition of Lifetime due to Wave-Particle Interactions for the Pitch Angle of 90 Degrees, Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 2023, 16(3), 340-347. EDN: TSFYCI. <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/150090>

## ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ УСИЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ 10-16 ОКТЯБРЯ 2017 Г.

Яхнина Т.А., Попова Т.А., Демехов А.Г.

ПГИ, г. Анапты, Россия, [tyahnina@gmail.com](mailto:tyahnina@gmail.com)

Во время умеренной (индекс  $Dst = -67$  нТл) геомагнитной бури в период 10-16 октября 2017 г. наблюдалась довольно сильная (индекс  $AE > 1000$  нТл) суббуревая активность. Анализировались потоки наблюдаемых в это время высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ). Напряженность магнитного поля в северном полушарии варьировалась в пределах 35000-43000 нТл, в то время как в южном – в пределах 25000-45000 нТл. Все ВРЭ были разбиты на три группы согласно критерию, представленному в работах [1, 2]. Высыпания 1-ой группы связаны с нарушением 1-го адиабатического инварианта вследствие малого радиуса кривизны силовых линий в ночном секторе. Эти высыпания наблюдаются в ночном секторе вблизи границы изотропии потоков энергичных (~100 кэВ) электронов. ВРЭ 2-ой группы наблюдаются во всех MLT секторах одновременно с интенсивными высыпаниями энергичных электронов. По-видимому, они связаны с возбуждением ОНЧ-волн. ВРЭ 3-ей группы, сопровождаемые высыпаниями энергичных протонов (>39 кэВ), связаны с ЭМИЦ волнами [2]. Высыпания релятивистских электронов, связанные с рассеянием на ЭМИЦ волнах, наблюдались в основном в вечернем MLT секторе. Показано, что интенсивность ВРЭ в южном полушарии превышает интенсивность ВРЭ в северном полушарии для всех трёх вышеупомянутых групп. Увеличение интенсивности ВРЭ происходит, главным образом, в районе Южно-Атлантической (Бразильской) аномалии, где напряженность магнитного поля заметно меньше, чем в сопряженной области северного полушария. Средние значения потоков для ВРЭ 1 и 2 групп в зоне аномалии выше в 2 раза, для ВРЭ 3 группы – потоки выше в 3 раза по сравнению с северным полушарием.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-62-00048.).

Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B., Pashin A.B. // J. Geophys. Res. Space Physics 2016. V. **121**, doi:10.1002/2016JA022765

Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. // 2017. J. Geophys. Res. Space Physics V. **122**, doi:10.1002/2017JA024249

## **ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ УСИЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ 10-16 ОКТЯБРЯ 2017 Г.**

**Яхнина Т.А., Попова Т.А., Демехов А.Г.**

*ПГИ, г. Апатиты, Россия, [tyahnina@gmail.com](mailto:tyahnina@gmail.com)*

Во время умеренной (индекс Dst = -67 нТл) геомагнитной бури в период 10-16 октября 2017 г. наблюдалась довольно сильная (индекс AE > 1000 нТл) суббуревая активность. Анализировались потоки наблюдаемых в это время высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ). Напряженность магнитного поля в северном полушарии варьировалась в пределах 35000-43000 нТл, в то время как в южном – в пределах 25000-45000 нТл. Все ВРЭ были разбиты на три группы согласно критерию, представленному в работах [1, 2]. Высыпания 1-ой группы связаны с нарушением 1-го адиабатического инварианта вследствие малого радиуса кривизны силовых линий в ночном секторе. Эти высыпания наблюдаются в ночном секторе вблизи границы изотропии потоков энергичных (~100 кэВ) электронов. ВРЭ 2-ой группы наблюдаются во всех MLT секторах одновременно с интенсивными высыпаниями энергичных электронов. По-видимому, они связаны с возбуждением ОНЧ-волн. ВРЭ 3-ей группы, сопровождаемые высыпаниями энергичных протонов (> 39 кэВ), связаны с ЭМИЦ волнами [2]. Высыпания релятивистских электронов, связанные с рассеянием на ЭМИЦ волнах, наблюдались в основном в вечернем MLT секторе. Показано, что интенсивность ВРЭ в южном полушарии превышает интенсивность ВРЭ в северном полушарии для всех трёх вышеупомянутых групп. Увеличение интенсивности ВРЭ происходит, главным образом, в районе Южно-Атлантической (Бразильской) аномалии, где напряженность магнитного поля заметно меньше, чем в сопряженной области северного полушария. Средние значения потоков для ВРЭ 1 и 2 групп в зоне аномалии выше в 2 раза, для ВРЭ 3 группы – потоки выше в 3 раза по сравнению с северным полушарием.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-62-00048.).

Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B., Pashin A.B. // J. Geophys. Res. Space Physics 2016. V. **121**, doi:10.1002/2016JA022765

Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. // 2017. J. Geophys. Res. Space Physics V. **122**, doi:10.1002/2017JA024249

## **ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ УСКОРЕНИЯ В МАГНИТОСФЕРАХ ЭКЗОПЛАНЕТ: НА БАЗЕ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТОСФЕР ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ**

**Беленькая Е.С., Алексеев И.И.**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия, [elena.belenkaya.msu@gmail.com](mailto:elena.belenkaya.msu@gmail.com)*

Дается краткий анализ процессов ускорения заряженных частиц в космическом пространстве. На базе изучения магнитосфер планет Солнечной системы прогнозируются возможные механизмы ускорения частиц в магнитосферах экзопланет [1]. Главное внимание уделяется Земле и Юпитеру как наиболее характерным примерам различных условий в магнитосферах, определяющих разные механизмы ускорения частиц.

1. Elena Belenkaya and Igor Alexeev // Symmetry 2023. V. **15**(2). 317.

**СЕКЦИЯ «Ионосфера»**

**Понедельник, 05.02. 2024 г., Комната 202**

Председатель: <u>Лукьянова Р.Ю./Чугунин Д.В.</u>			
Время	Докладчик	Название доклада	
1	Антоненко О.В.	Методы исследования интенсивностей свечения различных полос ночной атмосферы Земли и Марса в спокойных геомагнитных условиях	
2	Кириллов А.С.	Исследование роли метастабильного молекулярного азота в кинетических процессах в средних атмосферах Титана и Земли	
3	Насыров И.А.	Результаты фотометрических измерений искусственного оптического свечения ионосферы в линиях 557,7 нм и 391.4 нм на стенде Сура	
4	Грушин В.А.	Корреляция между геомагнитным Kp(Ap) индексом и вариациями электрического и магнитного поля и тока плазмы по измерениям эксперимента ОБСТАНОВКА 1 эта на российском сегменте МКС	
5	Гущин М.Е.	Лабораторное моделирование физических явлений в околоземной плазме на крупномасштабном плазменном стенде "Крот": новые результаты и перспективы	
6	Николенко А.С.	Лабораторное исследование разлета плазменных потоков во внешнем магнитном поле на крупномасштабной установке «Крот»	
<b>11.00 - 11.30</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>11.30 - 11.45</b>		<b>ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	
Председатель: <u>Клименко В.В./Могилевский М.М.</u>			
7	Грач С.М.	Исследования пространственно-временной эволюции высокочастотной искусственной турбулентности	
8	Благовещенская Н.Ф.	Сравнение характеристик нелинейных явлений в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных кв радиоволн X-поляризации на частотах ниже и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2	
9	Калишин А.С.	Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы, возбуждаемое стендами EISCAT/HEATING и Сура: сравнение характеристик	
10	Борисова Т.Д.	Особенности возбуждения плазменных волн мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации на высотах вблизи максимума слоя F2	
11	Фролов В.Л.	Зависимость характеристик ИИТ, возбуждаемой на среднеширотном нагревном стенде СУРА, от поляризации мощной радиоволны	
12	Когогин Д.А.	Исследование области ионосферы, возмущенной УНУ стенд Сура, по данным совместного	

			анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания в экспериментах 2021-2023 гг.
<b>13.15 - 14.00</b>		<b>Обед</b>	
Председатель: <u>Падохин А.М./Чернышов А.А.</u>			
13	14.00 - 14.15	Черняков С.М.	Широтные профили вертикального полного электронного содержания в высоких широтах в различных геомагнитных условиях
14	14.15 - 14.30	Падохин А.М.	MOSGIM2: свободное ПО для построения глобальных ионосферных карт TEC и оценки GEC
15	14.30 - 14.45	Губенко В.Н.	Исследование возмущений в нижней ионосфере земли во время магнитных бурь в марте и июне 2015 года по данным анализа радиозатменных измерений миссии FORMOSAT-3/COSMIC
16	14.45 - 15.00	Мингалев И.В.	Временные масштабы существования ионосферных неоднородностей над Кольским полуостровом по данным наблюдений
17	15.00 - 15.15	Куприянов А.О.	Применение высокоточных многочастотных приёмников гнсс для оперативного гелиогеофизического мониторинга в арктической зоне
18	15.15 - 15.30	Захаров В. И.	Статистические характеристики ионосферных неоднородностей по данным спутников SWARM экваториальных и средних широт
<b>15.30 - 16.00</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Чугунин Д.В./Чернышов А.А.</u>			
19	16.00 - 16.15	Стуков Д.А.	УНЧ и КНЧ излучения, вызванные вулканическими молниями при извержении тонга
20	16.15 - 16.30	Клименко М.В	Влияние момента начала геомагнитной бури на ее ионосферные эффекты
21	16.30 - 16.45	Яценко А.К.	Модель формирования аномалий ОНЧ/НЧ радиосигналов связанных с подготовкой землетрясений
22	16.45 - 17.00	Ряховский И.А.	Ионизация нижней ионосферы во время солнечных вспышек различного класса
23	17.00 - 17.15	Савельева Н.В.	Обнаружение СНЧ сигнала передатчика ZEBC на низкоорбитальном спутнике CSES
24	17.15 - 17.30	Вершинин И.М.	Субнаносекундный импульс, возбуждаемый длинным искровым разрядом: новый эффект в физике молнии
25	17.30 - 17.45	Лукьянова Р.Ю.	Проявление эффектов геомагнитных бурь в вариациях нейтральной плотности термосферы по наблюдениям SWARM
17.45 - 18.00		<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии 05.02.2024 «Ионосфера»

- 4.1.1 Бахметьева Н.В. и др., Особенности нижней ионосферы земли во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы по измерениям методом ипн вблизи Нижнего Новгорода
- 4.1.2 Губенко В.Н. и др., Характеристики мелкомасштабной структуры в нижней ионосфере Земли во время магнитной бури в марте 2015 года по результатам радиозатменных измерений на трассах спутник-спутник
- 4.1.3 Дашкевич Ж.В. и Иванов В.Е. Нестационарная физико-химическая модель полярной атмосферы, возмущенной электронными высыпаниями
- 4.1.4 Илюшин Я.А. и Чжао Х. Сингулярности диффузных полей излучения в рассеивающих средах с градиентами коэффициента преломления
- 4.1.5 Когогин Д.А. и др., Исследование возмущенности ионосферы по данным гнсс радиозондирования в период работы уну стенд сура в 2021-2023 гг. и её влияния на полное электронное содержание и мощность навигационных сигналов
- 4.1.6 Кочедыков В.В. и др., Радиочастотная диагностика плазмы в «ГИГАНТСКОЙ» коаксиальной линии на большой плазменной установке
- 4.1.7 Куликов Ю.Н. и Кириллов А.С. Исследование кинетики синглетных состояний молекулярного кислорода на высотах мезосферы и нижней термосферы Земли
- 4.1.8 Мальцева О.А. и др., О зависимости полного электронного содержания ионосферы и его оставных частей от индексов космической погоды
- 4.1.9 Моисеев И.А. и др., Применение фар для возвратно-наклонного зондирования ионосферы радиоволнами в КВ диапазоне
- 4.1.10 Мирмович Э.Г. Особенности зависимости ионизации ионосферы от солнечной активности и её аппроксимация логистической функцией
- 4.1.11 Морозова Т.И. и Попель С.И. Волны и неустойчивости в хвостах метеороидов в атмосфере Земли
- 4.1.12 Морозова Т.И. и Попель С.И. Неустойчивости, связанные с ионным звуком в хвостах метеороидов

**Среда, 07.02. 2024 г., Комната 202**

Председатель: <u>Могилевский М.М./Лукьянова Р.Ю.</u>			
Время	Докладчик	Название доклада	
1	Кузнецов А.А.	Ускорение электронов в плазмосфере экзопланет типа "горячий юпитер"	
2	Чибранов А.А.	Холловские эффекты и коллапс диамагнитной каверны при разлете облака лазерной плазмы в замагниченный фон	
3	Дашкевич Ж.В.	Влияние окиси азота на возбуждение атомарного кислорода	
4	Костров А.В.	Диагностика нижней ионосферы с помощью низкочастотных волн, излучаемых линиями электропередач	
5	Резниченко Ю.С.	Об образовании плазменно-пылевых облаков в ионосферах земли и марса	
6	Крашенинников И.В.	Влияние крупномасштабных авроральных неоднородностей на прохождение радиоволн в условиях геомагнитной бури низкой интенсивности	
<b>11.00 - 11.30</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	

Председатель: Чернышов А.А./Чугунин Д.В.

7	11.30 - 11.45	Филатов Г.С.	Результаты использования нейросетей для оперативного прогноза состояния высокоширотной ионосферы в интересах радиолокации
8	11.45 - 12.00	Козелов Б.В.	Триангуляция полярных сияний по наземным данным, спектры высыпавшихся электронов и магнитосферные процессы, наблюдаемые спутником VAN ALLEN PROBE ВБЛИЗИ 6 R <sub>E</sub>
9	12.00 - 12.15	Сидорова Л.Н.	Экваториальные плазменные пузыри: зависимость вероятности наблюдения от месяца года
10	12.15 - 12.30	Степанов А.Е.	Длительность наблюдения поляризационного джета по спутниковым и наземным данным
11	12.30 - 12.45	Синевиц А.А.	исследование влияния поляризационного джета на прохождение трансionoсферного радиосигнала спутников ГНСС
12	12.45 - 13.00	Чернышов А.А.	Использование неэкстенсивной q-статистики к оптическим явлениям в авроральной области
<b>13.00 - 14.00</b>		<b>Обед</b>	
14.00 - 17.30		<i>Заседания секции «Волновые явления»</i>	
17.30 - 18.00		<b>Постерная сессия</b>	
18.00 - 19.00			
<b>19.00 - 21.00</b>		<b>Банкет</b>	

Доклады постерной сессии 07.02.2024 «Ионосфера»

- 4.2.1 Никитенко А.С. и др., Риометрические наблюдения в ПГИ
- 4.2.2 Павлов А.В. и Павлова Н.М. Влияние вариаций солнечной активности на изменчивость nmF2 низких широт в геомагнито-спокойных условиях по данным ионозондов HUANCAYO И JCAMARCA
- 4.2.3 Павлов А.В. и Павлова Н.М. Влияние вариаций солнечной активности на межсуточную изменчивость NmE в геомагнито-спокойных условиях по данным наземного ионозонда DOORBES
- 4.2.4 Павлов А.В. и Павлова Н.М. Зависимости от месяца года статистических характеристик NmE средних и низких широт в дневных геомагнито-спокойных условиях при низкой солнечной активности
- 4.2.5 Петрова И.А. и др., Анализ волноводного распространения волн свистового диапазона вдоль пары неоднородностей концентрации, вытянутых вдоль магнитного поля
- 4.2.6 Потапов А.С. ИАР на средних и высоких широтах: синхронные наблюдения
- 4.2.7 Синевиц А.А. и др., Изучение субавроральных явлений наземными и спутниковыми средствами во время геомагнитного события 18.03.2018
- 4.2.8 Сысоев В.С. и др., Исследование возникновения радиоизлучения при электроразрядных процессах, возникающих на летательном аппарате в поле грозового облака с помощью масштабных моделей в лаборатории
- 4.2.9 Черняков С.М. Геомагнитные и ионосферные эффекты взрыва метеора в высоких широтах
- 4.2.10 Ягова Н.В. и др., Геомагнитные пульсации Pc1 и квазистатические авроральные структуры по наблюдениям на спутниках SWARM в верхней ионосфере и на Земле

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОС НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И МАРСА В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Антоненко О.В., Кириллов А.С.

ПГИ, г. Анапиты, Россия, [antonenko@pgia.ru](mailto:antonenko@pgia.ru)

В настоящей работе используются экспериментальные данные о характерных концентрациях O на основании характеристик свечения атомарного кислорода на Земле и на Марсе. Рассчитаны значения интегральной светимости полос Герцберга I, Чемберлена и Атмосферных полос на средних широтах и в экваториальной зоне Земли. Обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения возбужденного молекулярного кислорода на Земле с экспериментальными данными по ночному свечению O<sub>2</sub>, полученными с космических шаттлов, с данными, полученными с наземной обсерватории Китт-Пик, США для полос Герцберга I, Чемберлена. Для Атмосферных полос обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов с аналогичными расчетами по данным измерений с наземной обсерватории Кека, США. Рассчитаны значения интегральной светимости полос Герцберга I и Атмосферных полос для условий северных широт и экваториальной зоны Марса. Наблюдается некоторое соответствие с экспериментальными данными по Земле, полученными с космических шаттла с результатами теоретических расчетов интенсивностей свечения возбужденного молекулярного кислорода на Марсе – полос Герцберга I и Атмосферных полос. Объясняется это особенностями гашения на молекулах углекислого газа.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ В СРЕДНИХ АТМОСФЕРАХ ТИТАНА И ЗЕМЛИ

Кириллов А.С.

Полярный геофизический институт, Анапиты, Россия, [kirillov@pgia.ru](mailto:kirillov@pgia.ru)

Молекулярный азот N<sub>2</sub> является главной составляющей в атмосфере Земли (смесь N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>) и Титана (спутник Сатурна), Тритона (спутник Нептуна) и Плутона (смесь N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>). Во время высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных протонов образуются потоки вторичных электронов на высотах средней атмосферы. При столкновении вторичных электронов с молекулярным азотом происходит электронное возбуждение молекул N<sub>2</sub>. В дальнейшем метастабильный молекулярный азот N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) активно участвует в процессах образования колебательно-возбужденных молекул на данных высотах [1]. В атмосфере Титана на высотах ниже 400 км основным источником вносимой энергии являются космические лучи. Взаимодействие высокоэнергичных космических лучей с газами атмосферы Титана (главным образом N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>) аналогично приводит к образованию потоков вторичных электронов на высотах средней атмосферы во время процессов ионизации молекул. Вторичные электроны, сталкиваясь с молекулами углеводородов, вызывают процессы диссоциации как указанных молекул, так и других углеводородов, способствуя тем самым образованию химически активных радикалов на данных высотах. Показано, что на высотах средней атмосферы Титана реакции метастабильного молекулярного азота N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) с молекулами углеводородов доминируют в процессах образования радикалов [2].

1. Kirillov A.S., Belakhovsky V.B., Mauricev E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. Vibrational kinetics of NO and N<sub>2</sub> in the Earth's middle atmosphere during GLE69 on January 20, 2005 // J. Geophys. Res. – Atmosphere, 2023, v.128, No17, 2023JD038600.
2. Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. Исследование электронной кинетики молекулярного азота в средней атмосфере Титана во время высыпания космических лучей. // Известия РАН. Серия физическая, 2023, т.87, №7, с.1056-1064.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЛИНИЯХ 557.7 НМ И 391.4 НМ НА СТЕНДЕ СУРА

Грач С.М., Белецкий А.Б., Ткачев И.Д., Насыров И.А., Шиндин А.В.

ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия, [sgrach@rf.unn.ru](mailto:sgrach@rf.unn.ru)

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

КПФУ, г. Казань, Россия

11-12 августа и 10-20 сентября 2023 г. на стенде СУРА были проведены две серии экспериментов по исследованию искусственного оптического свечения (ИОС) ионосферы возникающего под воздействием мощной КВ радиоволны. Эксперименты проводились при ясном небе, начинались через ~ 30 мин. после захода Солнца и заканчивались после падения критической частоты ионосферы. В зависимости от ионосферных условий частота мощной волны варьировалась от 5828 кГц до 4300 кГц (минимальная рабочая частота стенда). Стенд работал в режиме чередования квазинепрерывного (длительность посылки 2,5 мин.) и импульсного (длительность посылки 3,5 мин., длительность импульса – 20 мс, период повторения 2 с) излучения. Следует отметить, что в процессе эксперимента имели место достаточно хорошая погода и стабильные ионосферные условия: ИОС регистрировалось в течение 7 вечеров, что позволило накопить достаточно большой объем данных. Для регистрации ИОС использовались 4 ПЗС камеры, расположенные в различных регистрирующих пунктах (в том числе 2 – в непосредственной близости от стенда), и трехканальный фотометр, расположенный вблизи стенда. Измерения ИОС проводились в красной (с длиной волны  $\lambda = 630$  нм) и зелёной ( $\lambda = 557,7$  нм) линиях атомарного кислорода, связанных с переходом электронов с уровня O(1D) в основное состояние O(3P) и с уровня O(1S) на уровень O(1D), а также в синей линии иона молекулярного азота N<sub>2</sub><sup>+</sup> ( $\lambda = 391.4$  нм) с энергиями возбуждения 1,96 эВ и 4,17 эВ и ~18 эВ соответственно, а их радиационные времена жизни составляют 107 с, 0,7 с и 10<sup>-6</sup> с соответственно. В предыдущих экспериментах на стенде СУРА ИОС в линии 630 нм наблюдалось достаточно регулярно, тогда как ИОС в зелёной линии наблюдалось в единичных случаях, а в синей линии не наблюдалось вовсе.

В настоящем докладе мы демонстрируем результаты эксперимента 2023 г., полученные с помощью трехканального фотометра. Установлено следующее:

1. В большинстве сеансов квазинепрерывного вертикального воздействия, в которых наблюдалось ИОС в линии 630 нм, имела место генерация ИОС в линиях 557,7 нм и 391.4 нм. ИОС в зелёной и синей линиях при воздействии в магнитных зенит практически не наблюдалось. Слабое свечение в красной и зелёной линиях наблюдалось также в случае, когда излучаемая мощность стенда была вдвое меньше максимальной по техническим причинам, а воздействие осуществлялось в магнитный зенит.
2. В силу достаточно стабильных ионосферных условий в первые часы после захода Солнца удалось накопить большой объем данных по одновременным измерениям ИОС в красной (630,0 нм) и зелёной (557,7 нм) линиях атомарного кислорода и синей (391,4 нм) линии иона молекулярного азота при вариациях частоты мощной волны в окрестности четвертой электронной гирогармоники (5260 – 5455 кГц).
3. В экспериментах 2023 г. подтвержден эффект заметной генерации ИОС в зелёной линии атомарного кислорода во время существования экранирующего спорадического слоя E<sub>s</sub>, обнаруженный в экспериментах 2021 г. Обнаружен эффект генерации ИОС в синей линии во время существования E<sub>s</sub>, причем интенсивность ИОС при существовании E<sub>s</sub> оказывается заметно выше, чем при его отсутствии.
4. В ряде сеансов удалось выделить сигнал ИОС в зелёной линии во время импульсного излучения ВН.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ №20-12-00197п.

## КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ГЕОМАГНИТНЫМ КР(АР) ИНДЕКСОМ И ВАРИАЦИЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ТОКА ПЛАЗМЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ЭКСПЕРИМЕНТА ОБСТАНОВКА 1 ЭТАП НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС.

Грушин В.А.<sup>1</sup>, Климов С.И.<sup>1</sup>, Белова И.Э.<sup>1</sup>, Новиков Д.И.<sup>1</sup>, Салаи Ш.<sup>2</sup>, Надь Я.<sup>2</sup>, Балайти К.<sup>2</sup>, Сегеди П.<sup>3</sup>

1- ИКИ РАН, Москва, 2-Вигнеровский научный центр Венгерской академии наук, 3- университет Ётвёша, Будапешт, Венгрия

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [vgrushin@cosmos.ru](mailto:vgrushin@cosmos.ru)

Комплексный эксперимент Обстановка 1 этап на Российском сегменте Международной космической станции, по измерениям электромагнитных и плазменных параметров ионосферы в ближайшей окрестности станции - проходил с 19 апреля 2013 по 9 мая 2015 года[1].

Наряду с другими результатами, был получен большой массив данных по возмущениям электрического(E) и магнитного(B) поля и тока плазмы(I) до 400 Hz. Измерения выполнялись двумя комбинированными волновыми зондами[2], установленными на расстоянии 1,6 м от поверхности Станции.

В докладах на конференциях [3],[4] мы показали, что этот вид данных несёт как информацию о станции, так и обобщённую информацию о подстилающей поверхности.

В настоящем докладе исследуется вопрос о связи измеренных возмущений электрического поля, индукции магнитного поля и тока плазмы с глобальным Кр (Ар) индексом возмущённости геомагнитного поля. Отдельно суммируются, по соответствующим 3-х часовым интервалам, измерения по южному, среднему и северному магнитным широтным поясам в области, покрываемой орбитой МКС. Высокая степень корреляции, не прослеживается на всём объёме данных, однако, есть фрагменты, демонстрирующие сильную связь Кр(Ар) индекса и каналов волновых зондов. Каналы(B,E,I) демонстрируют разные значения корреляции с индексом, причём, вариации измеренные в пределах северного кольцевого пояса преимущественно показывают более сильную корреляцию с Кр(Ар) индексом.

1. С.И.Климов, В.А.Грушин, //плюс 26 авторов// «Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперименте Обстановка 1 этап» на Российском сегменте МКС. Космическая техника и технология, №1, 2021, Изд. РКК Энергия.

2. В.А. Грушин, С.И. Климов, Д.И. Новиков, В.Е. Корепанов, И.Э. Белова, Ш. Салаи, К. Балайти, Я. Надь.// Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015г., ИКИ РАН Сборник тезисов.

3. В.А.Грушин, С.И.Климов, Б.Киров, В.Е.Корепанов, Ш.Салаи, П.Сегеди, И.Э.Белова, Л.Д.Белякова, Т.В. Гречко, О.В.Лапшинова, Д.И.Новиков.// Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 12-16 февраля 2018г., ИКИ РАН Сборник тезисов.

4. В.А. Грушин, С.И. Климов, В.Е. Корепанов, Ш. Салаи, П. Сегеди, И.Э. Белова, Л.Д. Белякова, Т.В. Гречко, Д.И. Новиков, Л.А. Осадчая.//Восемнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 5-9 февраля 2022г., ИКИ РАН, Сборник тезисов.

## ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ "КРОТ": НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Гущин М.Е., Айдакина Н.А., Вершинин И.М., Гойхман М.Б., Громов А.В., Зудин И.Ю., Истомин А.А., Катков А.Н., Коробков С.В., Кочедыков В.В., Лоскутов К.Н., Николенко А.С., Палицин А.В., Петрова И.А., Стриковский А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [mguschin@ipfran.ru](mailto:mguschin@ipfran.ru)

В состав стенда «Крот» входят одна из крупнейших плазменных камер России с источником плазмы и магнитного поля, позволяющая моделировать физические явления в ионосфере и космосе в приближении «безграничной» среды, а также несколько импульсных высоковольтных установок, включая генератор импульсных напряжений «Синуки» из состава ускорителя «Крот-Ф». Комплекс установок позволяет моделировать распространение радиоволн по длинным – до 10 м – плазменным трассам, магнитогидродинамические явления, развивать диагностику космической и лабораторной плазмы. В 2023 году на стенде «Крот» выполнен цикл работ, связанных, главным образом, с моделированием различных ионосферных экспериментов, включая инъекцию плазменных облаков в околоземное космическое пространство, генерацию и распространение радиоизлучения различных частотных диапазонов.

В плазменной камере стенда «Крот» проведены модельные эксперименты по инъекции плазменных струй в вакуум в магнитном поле с источниками на основе коаксиальных эрозионных генераторов улучшенной конструкции. В результате увеличения энергетики и скорости плазменной струи удастся исследовать новые режимы развития желобковой неустойчивости и формирования струйных течений плазмы поперек магнитного поля. Для дальнейших экспериментов с плазменными струями будет использован размещенный на стенде «Крот» в 2023 году импульсный Nd:YAG лазер с энергией и длительностью импульса, соответственно, 1.7 Дж и 10 нс.

В экспериментах, нацеленных на моделирование механизмов генерации искусственной турбулентности при радиочастотном нагреве ионосферы, получены новые данные по эволюции мелкомасштабной неоднородности концентрации замагниченной плазмы, создаваемой локальным («точечным») высокочастотным источником. Получена детальная картина динамики концентрации плазмы, температуры электронов, магнитных полей и токов с высоким временным и пространственным разрешением.

В экспериментах по моделированию взаимодействия наносекундных электромагнитных импульсов в плазме изучены эффекты пробоя разреженного газа (воздуха), окружающего модель сверхширокополосной антенны в плазменной камере. Продемонстрировано укорочение излучаемых импульсов в режиме нестационарной ионизации, а также искажения формы и спектра импульсов из-за явлений отсечки.

С использованием новой установки, созданной на стенде «Крот» – крупномасштабной вакуумной коаксиальной линии, проведены эксперименты по прохождению через разреженные газы наносекундных импульсов сверхвысокой напряженности, до 5 МВ/м. Изучены эффекты трансформации формы таких импульсов из-за ионизационных явлений, получена зависимость параметров импульса оптического излучения газа от давления.

## ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛЁТА ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА КРУПНОМАСШТАБНОЙ УСТАНОВКЕ "КРОТ"

Николенко А.С.<sup>1</sup>, Гущин М.Е.<sup>1</sup>, Коробков С.В.<sup>1</sup>, Зудин И.Ю.<sup>1</sup>, Стриковский А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [nikolenko@ipfran.ru](mailto:nikolenko@ipfran.ru)

Представлены результаты новых модельных экспериментов по инъекции плотных плазменных потоков (струй) в большой вакуумной камере при наличии внешнего магнитного поля. Исследования являются продолжением цикла экспериментальных работ, где в качестве источника плазмы используются малогабаритные коаксиальные генераторы [1-4]. Эксперименты проводились на одной из крупнейших вакуумных установок в России – плазменном стенде «Крот», где в данной постановке эксперимента реализован режим «безграничной» фоновой среды, позволяющий изучать динамику плазменного облака на масштабе порядка одного метра поперек и вдоль квазиоднородного магнитного поля. Это позволило приблизиться по параметрам подобия к моделированию условий активных околоземных экспериментов в ионосфере или магнитосфере Земли различных сценариев, а также астрофизических плазменных явлений вне Солнечной системы – аккреции вещества в протозвездах и коллимации плазменных джетов.

Развитие источников питания плазмы и варьирование параметров ускоряющей зоны генератора плазмы привели к увеличению начальной энергии создаваемого облака плазмы на один порядок (до ~1 Дж) и начальной скорости основной части плазменного потока с 20 км/с вплоть до 50-70 км/с. Совершенствование методов диагностики, позволило уточнить физическую картину инъекции плазмы в магнитном поле. Наблюдается качественное изменение динамики плазменных струй и развивающихся при их разлете структурных неустойчивостях. Выделены различные фракции плазмы, которые, вероятнее всего, представляли собой ускоряемые до различных энергий ионы разных масс, включая фракцию со скоростями более 100 км/с.

Работа выполнена в рамках 10 проекта Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» с использованием уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН» (УНУ ККГС).

1. М.Е. Гущин, 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.
2. С.В. Коробков, М.Е. Гущин, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.В. Стриковский, А.С. Николенко // Письма в ЖТФ 2019. Т.45. №5. С. 45.
3. Коробков С. В., Николенко А. С., Гущин 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.
4. Николенко А.С., Гущин М.Е., Коробков С.В., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Стриковский А.В, Лоскутов К.Н. // Физика Плазмы. Т. 49. № 11. С. 1101.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СТЕНДЕ АРЕСИБО 2018 Г.

Грач С.М., Хашев В.Р., Шиндин А.В., Сергеев Е.Н.  
ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия, [sgrach@rf.unn.ru](mailto:sgrach@rf.unn.ru)

В ноябре 2018 г. на стенде Аресибо нами был проведен эксперимент по исследованию динамики развития искусственной ионосферной турбулентности с помощью радара некогерентного рассеяния и одновременных измерений искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Предварительные результаты экспериментов докладывались нами на 14-й и 15-й конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» в 2019 и 2020 г. В настоящем докладе представлены результаты детального анализа полученных данных.

Воздействие на ионосферу осуществлялось волной накачки (ВН) О-поляризации вертикально вверх на частоте  $f_{ВН}=5095$  кГц при различных режимах излучения: 1) короткие импульсы с большой скважностью (длительность импульсов  $\tau_{и} = 5-100$  мс, период повторения  $T_{и} = 2-20$  с) для исследования ленгмюровской турбулентности и 2) квазинепрерывный нагрев ( $\tau_{и} = 165$  мс,  $T_{и} = 200$  мс) с длительностью посылок 1-150 с для исследования верхнегибридной турбулентности и перехода от ленгмюровской турбулентности к верхнегибридной. Радар некогерентного рассеяния излучал импульсы длительностью 440 мкс с периодом повторения 10 мс на частоте  $f_{р} = 430$  МГц. Задержки этих импульсов относительно включения ВН варьировались от 2,2 мс до 7,8 мс.

В результате анализа рассеянных сигналов с последующим усреднением данных были получены профили электронной концентрации, а также спектры искусственной плазменной линии (ПЛ, сигналов, рассеянных на плазменных волнах) с пространственным (высотным) разрешением 300 м в зависимости от времени с момента включения ВН. Спектры ПЛ построены относительно центральных частот  $f_{\pm} = f_{р} \pm f_{ВН}$  сдвинутых вниз (-) и вверх (+) по отношению к  $f_{р}$ . Для этих же моментов времени регистрировались спектры ИРИ. Целью эксперимента было установление корреляции между спектрами плазменных волн (по условиям эксперимента могли регистрироваться только плазменные волны, распространяющиеся вдоль вертикали) и спектрами ИРИ, за генерацию которого отвечают плазменные волны, возбуждаемые в результате воздействия ВН на различных высотах и распространяющиеся в различных направлениях. Установлено следующее.

1. Максимальная интенсивность в спектре ПЛ и ИРИ наблюдается на нулевых отстройках от  $f_0$  уже ко 2-8-й мс воздействия, спектры имеют форму типа «continuum» с максимумом вблизи нулевых отстроек, ПЛ наблюдается вблизи (несколько ниже точки отражения ВН).
2. С увеличением времени воздействия область генерации расширяется вниз от области отражения ВН на 2-3 км (до 5) км при длительности воздействия до 1-1,5 с. Интенсивность ПЛ при этом уменьшается до квазистационарного состояния, и наблюдаются спектры распадного (каскадного) типа с максимумами области отрицательных отстроек, сдвинутыми относительно  $f_{ВН}$  на несколько кГц. Интенсивность ИРИ ведет себя аналогично, но в спектре на фоне «continuum» наблюдается только один максимум.
3. Через 1,5-5 с генерация ПЛ каскадного типа заметно ослабляется, а в спектре ИРИ развиваются т.н. «верхнегибридные компоненты: Downshifted Maximum (DM), 2nd DM, Upshifted Maximum (UM) и несколько позднее Intermediate Downshifted Maximum (IDM). Через 10-30 с высота области генерации ПЛ становится близкой к высоте верхнего гибридного резонанса, а генерация ПЛ в области отражения практически исчезает.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №20-12-00197п.

## СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН X-ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ И ВЫШЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ НЕОБЫКНОВЕННОЙ КОМПОНЕНТЫ СЛОЯ F2

Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Борисова Т.Д., Егоров И.М., Загорский Г.А.

ААНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, [nataly@aari.nw.ru](mailto:nataly@aari.nw.ru)

По данным многочисленных экспериментов на КВ нагревом стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6°N, 19.2°E) исследованы характеристики искусственных ионосферных возмущений при воздействии мощных КВ радиоволн X-поляризации при различных отношениях частоты нагрева к критической частоте слоя F2. В период экспериментов мощная X-волна излучалась на фиксированных частотах в диапазоне от 4 до 8 МГц в направлении магнитного зенита с максимальной эффективной мощностью излучения 200 - 800 МВт. В качестве диагностических средств использовались следующие: EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (931 МГц), пространственно совмещенный с КВ нагревом стендом в Тромсе; когерентный КВ радар CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия); аппаратура для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы, установленная вблизи г. С.- Петербург на удалении ~ 1200 км от нагревного стенда.

Показано, что возбуждение разнообразных искусственных возмущений в высокоширотной F-области ионосферы при X-нагреве происходит на частотах как ниже критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2 ( $f_H \leq f_{xF2}$ ), так и выше ( $f_H > f_{xF2}$ ,  $f_{xF2} = f_0F2 + f_{ce}/2$ , где  $f_{ce}$  - гирочастота электронов). Из результатов экспериментов следует, что омический нагрев, образование дактов повышенной электронной плотности  $N_e$ , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного (в полосе  $\pm 1$  кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) наблюдается при X-нагреве на частотах как ниже, так и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2. Таким образом перечисленные явления наблюдались в условиях как при  $f_H \leq f_{xF2}$ , когда мощная X-волна отражалась от ионосферы, так и при  $f_H > f_{xF2}$ , когда волна накачки от ионосферы не отражалась. Вместе с этим следует подчеркнуть, что возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн происходило только при отражении мощной X-волны от ионосферы.

Выполнено сравнение характеристик дактов  $N_e$ , МИИН и спектральной структуры УИРИ при X-нагреве в магнитный зенит на частотах ниже и выше критической частоты необыкновенной компоненты слоя F2. Обсуждаются возможные механизмы генерации явлений при X-нагреве на частотах  $f_H \leq f_{xF2}$  и  $f_H > f_{xF2}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>



## УЗКОПОЛОСНОЕ ИСКУССТВЕННОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЕ СТЕНДАМИ EISCAT/HEATING И СУРА: СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК.

Калишин А.С.<sup>1</sup>, Благовещенская Н.Ф.<sup>1</sup>, Фролов В.Л.<sup>2</sup>, Борисова Т.Д.<sup>1</sup>, Егоров И.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ААНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, [askalishin@aari.ru](mailto:askalishin@aari.ru)

<sup>2</sup>ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

Узкополосное искусственное радиоизлучение ионосферы (УИРИ) представляет собой вторичное радиоизлучение, возбуждаемое мощной радиоволной нагревного стенда, из искусственно-возмущенной области ионосферы. Спектральные компоненты УИРИ наблюдаются в диапазоне частот  $\pm 1$  кГц относительно частоты волны накачки. Исследования, выполненные на нагревном стенде EISCAT/Heating, впервые показали возможность генерации различных спектральных компонент в спектре УИРИ при воздействии мощных КВ радиоволн необыкновенной поляризации (X-мода) на высокоширотную F-область ионосферы, которые регистрировались на значительном ( $\sim 1200$  км) удалении от нагревного стенда [1].

В работе представлены результаты дистанционной диагностики УИРИ при X-нагреве среднеширотной ионосферы в экспериментах на нагревном стенде Сура (рис. 1). Регистрация УИРИ выполнялась на научно-исследовательской станции «Горьковская» в Ленинградской области на расстоянии 1075 км от стенда Сура. При излучении волны накачки X-поляризации в циклах нагрева регистрировался дополнительный спектральный максимум с частотой отстройки -58 Гц, относительно частоты волны накачки. Выполнено сравнение спектральных характеристик УИРИ, регистрируемых в экспериментах на стендах Сура и EISCAT/Heating. Возможным механизмом генерации УИРИ может быть рассеяние Бриллюэна при распаде мощной волны X-поляризации на рассеянную электромагнитную и электростатическую ионно-циклотронную волны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

1. Kalishin A. S., Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D. and Yeoman T. K. Ion Gyro-Harmonic Structures in Stimulated Emission Excited by X-Mode High Power HF Radio Waves at EISCAT. – Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2021, 126, e2020JA028989; DOI: 10.1029/2020JA028989.

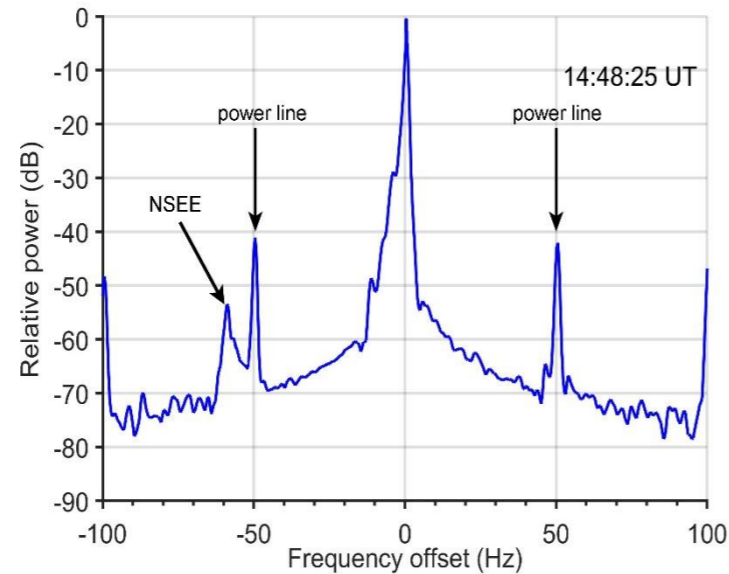


Рис. 1. Спектр УИРИ 11 октября 2023г при излучении комплекса Сура на частоте 8060 кГц.

## ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ВЫСОТАХ ВБЛИЗИ МАКСИМУМА СЛОЯ F2

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С.

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, [borisova@aari.ru](mailto:borisova@aari.ru)

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей генерации инициированных нагревом плазменных ленгмюровских (HFPL) и ионно- звуковых (HFIL) волн на высотах F-области высокоширотной ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн нагревного стенда EISCAT/Heating необыкновенной (X-мода) поляризации в условиях расположения частоты волны накачки  $f_H$  выше критической частоты слоя F2,  $f_H > f_oF2$ . Эксперимент по модификации ионосферы выполнялся 18 февраля 2012 г. на частоте накачки  $f_H = 6200$  кГц, ( $f_H/f_oF2 \sim 1.02 - 1.07$ ). Диагностика эффектов модификации ионосферы проводилась EISCAT радаром некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц, расположенного рядом с нагревным стендом. Луч радара был совмещен с направлением излучения мощной КВ радиоволны и ориентирован вдоль силовой линии магнитного поля Земли. В периодах рассмотренных нагревных циклов по данным измерений радара НР не наблюдалось возбуждений параметрических распадных неустойчивостей вблизи частот накачки, т.е. отсутствовали мощные спектральные максимумы HFIL в низкочастотном и – HFPL в высокочастотном спектральных диапазонах измерений. Состояние ионосферы и критические частоты слоя F2 контролировались с помощью ионозонда вертикального зондирования (ВЗ), расположенного в Тромсё.

Сопоставление значений критических частот  $f_oF2$ , определенных по данным ионозонда ВЗ и измерениям радара НР в низкочастотном и высокочастотном диапазонах продемонстрировало близкие величины  $f_oF2$ .

В исследованиях показано, что в экспериментах с использованием волны накачки необыкновенной поляризации на частоте  $f_H > f_oF2$  на высотах выше максимума слоя F2 на 50 – 70 км за период нагревного цикла наблюдается изменение профиля естественной плазменной линии  $f_{PLF2}(h)$ . Положения ленгмюровских максимумов  $f_{PLF2}$  профиля смещаются на 0.2 – 0.3 МГц в сторону увеличения по сравнению с невозмущенными значениями  $f_{PLF2}$  перед циклом нагрева. Нижняя граница слоя F2 поднимается на 10 – 15 км.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

## ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИИТ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ НА СРЕДНЕШИРОТНОМ НАГРЕВНОМ СТЕНДЕ СУРА, ОТ ПОЛЯРИЗАЦИИ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ

Фролов В.Л.<sup>1,2</sup>, Акчурин А.Д.<sup>2</sup>, Когогин Д.А.<sup>2</sup>, Першин А.В.<sup>1</sup>, Рябов А.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет (г. Н. Новгород, 603950, Россия, [frolov@nirfi.unn.ru](mailto:frolov@nirfi.unn.ru))

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, 420008, Россия)

Представлены результаты измерений характеристик искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), возбуждаемой при модификации F2 слоя ионосферы Земли мощными радиоволнами как О-, так и Х-поляризации. Эксперименты проводились в августе – октябре 2023 г. на среднеширотном нагревном стенде СУРА (НИРФИ, Н. Новгород) в вечернее и ночное время суток в различных геомагнитных условиях; эффективная мощность излучения мощной радиоволны (волны накачки, ВН) составляла 50 – 180 МВт. Диагностика ИИТ осуществлялась с помощью регистрации F<sub>spread</sub> и обратного рассеяния сигналов от расположенного вблизи г. Казань ионозонда, по данным зондирования возмущённой области ионосферы сигналами навигационных спутников GPS/GLONASS. Важно отметить, что эти методы позволяют контролировать генерацию искусственных неоднородностей концентрации плазмы в широком диапазоне масштабов  $l_{\perp}$  от 50 м до 100 км в поперечном к геомагнитному полю направлении. Кроме того, проводились спутниковые измерения искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты. Выполненные исследования позволили установить следующее.

Генерация искусственного F<sub>spread</sub>, подавление интенсивности О и Х ветвей ионограмм, и их кратных отражений, развитие полости с уменьшенной плотностью плазмы вблизи высоты отражения ВН имели место при обеих её поляризациях, но более эффективно — при О-поляризации и сильнее — в поздние вечерние и ночные часы при повышенном уровне геомагнитных возмущений. В дневных условиях развитие искусственного F<sub>spread</sub>, если и наблюдалось, то только при О-поляризации ВН. Генерация неоднородностей с  $l_{\perp} \approx 50$  м – 200 м наблюдалась при обеих поляризациях ВН, но только при высоком уровне геомагнитных возмущений. GPS-измерения выполнялись в спокойных геомагнитных условиях в ранние вечерние, поздние вечерние и ночные часы. При этом использовались режимы излучения ВН с длительностью импульсов её излучения 3 – 7 мин при периоде их повторения 10 – 15 мин. В таких условиях при любой поляризации ВН не наблюдалось появления хорошо выраженных крупномасштабных вариаций ПЭС с периодом, равным периоду её излучения; это относится ко всем временам проведения измерения. Более того, часто при развитии F<sub>spread</sub> наблюдалось подавление крупномасштабных вариаций ПЭС, что может быть связано с особенностями модификации ионосферы при прохождении мощной радиоволны через ионосферу с сильными возмущениями концентрации плазмы.

Искусственная инжекция энергичных электронов в рассматриваемом цикле исследований регистрировалась даже с несколько большей интенсивностью при модификации ионосферы мощными радиоволнами Х-поляризации, что можно отнести к более высокой возмущённости ионосферы во время их проведения по сравнению с сеансами О-нагрева.

Работа Фролова В.Л., Першина А.В. и Рябова А.О. выполнялась по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ. Исследования Когогина Д.А. выполнялись при финансовой поддержке РНФ (№ 23-77-10029). Работа Фролова В.Л. и Акчурина А.Д. в части использования казанского ионозонда «Циклон» выполнялась за счёт средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕННОЙ УНУ СТЕНД СУРА ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ НОЧНОГО НЕБА В ЛИНИИ 630 НМ И КАРТ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ 2021-2023 ГГ.

Когогин Д. А.<sup>1</sup>, Емельянов В. В.<sup>1</sup>, Максимов Д. С.<sup>1</sup>, Насыров И. А.<sup>1</sup>, Белецкий А. Б.<sup>2</sup>, Шиндин А. В.<sup>3</sup>, Грач С. М.<sup>3</sup>, Загреддинов Р. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КФУ, г. Казань, Россия, [denis.kogogin@gmail.com](mailto:denis.kogogin@gmail.com)

<sup>2</sup>ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup>ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

После проведенных в 2020-2021 гг. работ по ремонту и модернизации УНУ Стенд СУРА начали проводиться регулярные измерения полного электронного содержания (ПЭС) на сети ГНСС-станций, расположенных на территории Российской Федерации, и в частности, в окрестности стенда в периоды воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. Таким образом к настоящему моменту накоплен большой объем данных ГНСС радиозондирования, полученных в период работы УНУ Стенд СУРА в 2021-2023 гг. Используя данные ГНСС радиозондирования получены карты вариаций полного электронного содержания (ПЭС) и других индексов, основанных на ПЭС, карты мощности навигационных сигналов и т.д. В это же время на УНУ стенд Сура проводились эксперименты по изучению оптических эффектов, происходящих в ионосфере в результате воздействия на нее мощной радиоволны. В настоящей работе выполнен анализ накопленного банка данных синхронных пар снимков ночного неба и карт вариаций ПЭС одной и той же области пространства в проекции на географические координаты за 2021-2023 гг. Интенсивность свечения в красной линии (630 нм) рассчитывалась как медианное значение интенсивности пикселей, попавших в прямоугольную область размером 0,15×0,15 градуса вокруг пикселя, соответствующего центру области. Для расчета соответствующего значения ПЭС выбиралась точно такая же область на ПЭС-картах. Более подробно о методике обработки данных и всех этапах получения карт, а также методики проведения совместного анализа снимков ночного неба и карт вариаций полного электронного содержания можно ознакомиться в статьях [1,2].

В экспериментах 2021-2023 гг. явление увеличения интенсивности свечения в красной линии удалось выделить на около ста циклах излучения волны накачки, где один цикл представляет собой шестиминутный интервал, включающий период излучения и паузы. Высоты области свечения при вертикальной ДН УНУ Стенд СУРА варьировались в пределах ~ 270-330 км, а при излучении мощной радиоволны в направлении «магнитного зенита» были выше на ~ 30 км. Наблюдаются периодические изменения вариаций ПЭС, коррелирующие с режимом накачки и соответственно с интенсивностью свечения. Ситуации с уменьшением вариаций ПЭС в периоды изучения мощной радиоволны существенно преобладают над ситуациями, когда вариации ПЭС растут. Увеличение интенсивности свечения в большинстве случаев соответствует уменьшению вариаций ПЭС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029. Эксперименты на УНУ стенд СУРА проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

1. Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В. и др. // Известия вузов. Радиофизика. - 2020. - Т. 63. - № 2. - С. 89-104.
2. Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., и др. // Солнечно-земная физика. - 2023. - Т. 9, № 2. - С. 52-59

## ШИРОТНЫЕ ПРОФИЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Черняков С.М.

ПГИ, г. Мурманск, Россия, [smcherniakov@gmail.com](mailto:smcherniakov@gmail.com)

Рассмотрено поведение широтных профилей вертикального полного электронного содержания (ВПЭС), полученных при разнесенном приеме сигналов низкоорбитальных спутников во время спокойных геомагнитных условий, суббури и сильной геомагнитной бури. Для анализа поведения широтных профилей ВПЭС проводилось сравнение их с данными вертикального зондирования ионосферы и магнитовариационной станции. Комплексный анализ данных показал, что получаемые профили ВПЭС перекрывают три географические зоны: а) средние широты; б) авроральную зону; в) полярную шапку. Область между а) и б) можно рассматривать как субавроральную зону.

В спокойных условиях дневные профили ведут себя похоже: монотонное уменьшение значений ВПЭС к северу. На рассматриваемых профилях спокойных суток уровень ночной ионизации практически одинаков во всем диапазоне широт. Необходимо отметить, что среднеширотные участки спокойных профилей ВПЭС испытывают более существенные изменения в течение суток, чем авроральные.

Во время развития суббури отмечено возникновение возмущений, проявившихся в виде восточной, а затем и западной токовых струй, что привело к существенному возрастанию ионизации в авроральной зоне с образованием четкого максимума аномальной ионизации в F-области. Граница между авроральной и среднеширотной областями обозначилась явно выраженным провалом, со временем смещающимся к экватору. Вечером и ночью ионосфера чаще всего возмущена. Между авроральным максимумом и среднеширотной ионосферой (в субавроральной области) образуется провал электронной плотности, иногда – глубокий и резкий. Наиболее существенное различие профилей возникает на участке авроральных широт, для которых характерно частое возникновение возмущений, т. е. процессов, связанных с вторжениями частиц, вызывающих дополнительную ионизацию и сильные электрические поля, влияющие на дрейфы и токи в ионосфере.

Показано, что в момент развития геомагнитной бури типичные для авроральной зоны суббуревые структуры достигли среднеширотной части ионосферы. Рассмотрение бури показало, что провал достиг Москвы, структуры профилей над Москвой имеют вид профилей, типичных для авроральной зоны. Расчет положения главного ионосферного провала по формуле Конляйна-Райта показал хорошее совпадение рассчитанных значений с величинами, полученными по данным разнесенного приема.

Использование разнесенного приема дает возможность определять величину ВПЭС, структуру ионосферы не только в спокойных, но и возмущенных условиях в большом диапазоне широт: от средних до полярных. По профилю ВПЭС можно определять типичные структуры ВПЭС и границы геофизических зон. Рассмотренное поведение ионосферы с точки зрения ВПЭС показывает, что использование метода разнесенного приема согласуется с данными наземных наблюдений, оказывается в хорошем соответствии с существующими представлениями о развитии геомагнитных и ионосферных возмущений.

## MOSGIM2: СВОБОДНОЕ ПО ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ ТЕС И ОЦЕНКИ ГЕС

Падохин А.М., Илюшин Я.А., Павлов И.А., Ясюкевич Ю.В., Веснин А.М., Киселев А.В.

МГУ, г. Москва, Россия, [padokhin@physics.msu.ru](mailto:padokhin@physics.msu.ru)

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [yasukevich@iszf.irk.ru](mailto:yasukevich@iszf.irk.ru)

ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия, [padokhin@izmiran.ru](mailto:padokhin@izmiran.ru)

В докладе представлен оригинальный метод картирования полного электронного содержания (ТЕС) и оценки глобального электронного содержания (ГЕС) ионосферы, основанный на фазо-разностном подходе к анализу измерений GNSS на паре когерентных частот на распределенной сети наземных станций. В предлагаемом подходе используется представление ионосферы в виде двух тонких слоев, распределение ТЕС в каждом слое задается усеченным разложением в ряд сферических гармоник в солнечно-синхронной системе координат. Коэффициенты разложения определяются методом наименьших квадратов с ограничением на положительность ТЕС для обоих слоев модели, что реализуется путем решения соответствующей задачи линейной дополненности. Оценка ГЕС производится на основе нулевых коэффициентов разложения ТЕС в каждом из слоев. Предложенный метод не требует оценки дифференциальных кодовых задержек спутников и приемников, что позволяет совместно использовать данные различных GNSS. Более того, двухслойный подход позволяет в перспективе объединить различные типы данных ТЕС, например, GNSS и ионозондов сети GIRO, в рамках одного алгоритма.

Мы представляем реализацию предложенного алгоритма с открытым исходным кодом на языке Python и обсуждаем различные типы возможных конфигураций и выбора параметров, включая, предварительный выбор станций, однослойной или двухслойной модели с произвольным заданием высоты слоев, а также количества коэффициентов сферических гармоник для каждого слоя, выбор системы координат (доступны географическая, геомагнитная и MODIP), ограничений на изменчивость ионосферы, шага по времени для восстановленной модели и т. д.

Алгоритм и соответствующее программное обеспечение активно совершенствуются, последняя версия доступна на GitHub (<https://github.com/PadArt/mosgim2/>). Авторы приглашают коллег - исследователей протестировать представленный алгоритм и использовать его в своих исследованиях. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-17-00157).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ В МАРТЕ И ИЮНЕ 2015 ГОДА ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МИССИИ FORMOSAT-3/COSMIC

**Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А.**

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, [vngubenko@gmail.com](mailto:vngubenko@gmail.com)

Спутниковые методы дистанционного зондирования являются универсальным и мощным инструментом для системных исследований в атмосфере и ионосфере Земли, выполняемых в реальном времени. Региональные и наземные сети глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и многочисленные приемники навигационных сигналов, расположенные на низкоорбитальных аппаратах в космосе, обеспечивают уникальные данные о нейтральной атмосфере и ионосфере планеты. Основой дистанционного ГНСС-зондирования нейтральной атмосферы и ионосферы служат радиозатменные методы исследования, которые были разработаны при решении разнообразных прикладных задач. Базовый принцип здесь состоит в определении характеристик нейтральной атмосферы и ионосферы с помощью обработки и анализа принимаемых спутниковых сигналов, распространяющихся в атмосфере и ионосфере Земли. Высокая точность и экономичность радиозатменных измерений, а также их всепогодность и долговременная стабильность являются преимуществами указанных методов исследования.

Весной и летом 2015 года на Солнце имели место мощные корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли. Эти события были зафиксированы многими космическими аппаратами и ионосферными станциями. Корональные выбросы плазмы, достигшие магнитосферы Земли в периоды с 17 по 18 марта и с 22 по 23 июня 2015 года, спровоцировали две сильные магнитные бури класса G4, в которых максимальные значения Кр-индекса равнялись 8. Мы провели обработку и анализ ~100 сеансов радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, выполненных во время геомагнитной бури 22–23 июня 2015 года в ионосфере Земли. Результаты анализа показали, что магнитная буря в июне 2015 года вызвала значительные флуктуации параметров радиоволн на трассах ионосферного зондирования навигационные (GPS) спутники – низкоорбитальные (FORMOSAT-3/COSMIC) спутники в высокоширотной ионосфере планеты. Было найдено, что ионосферные возмущения характеристик радиоволн обусловлены как геомагнитными условиями во время шторма, так и активностью мощных рентгеновских вспышек, наблюдавшихся в период измерений. Был проведен поиск поглощения дециметровых (ДМ) радиоволн (длина волны ~19 см) на несущей GPS-частоте 1545.42 МГц. Впервые обнаружено интегральное поглощение радиоволн дециметрового диапазона в D- и E-областях высокоширотной ионосферы Земли. Найдено, что абсолютная величина интегрального поглощения на трассах радиозатменного зондирования составляет ~3 дБ в интервале высот ~60–90 км, а в некоторых случаях достигает ~10 дБ на уровнях от ~90 до ~95 км. По результатам решения обратной задачи о поглощении радиоволн восстановлены профили коэффициента поглощения ДМ-радиоволн в нижней ионосфере планеты во время магнитной бури 22-23 июня 2015 года. Было найдено, что на ионосферных высотах от ~90 до ~100 км максимальная величина коэффициента поглощения ДМ-радиоволн достигала значений  $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$  дБ/км.

Целью настоящей работы является анализ радиозатменных измерений, проведенных во время сильной магнитной бури в период с 17 по 18 марта 2015 года в D- и E-областях высокоширотной ионосферы Земли. Полученные результаты сравниваются с аналогичными о магнитной буре 22-23 июня 2015 года. Обнаружены периодические осцилляции амплитуды ДМ-сигнала в D-области (высоты ~60–90 км) низкоширотной (20.19°N) ионосферы Земли, которые могут быть связаны с джоулевским нагреванием на высоких широтах вследствие геомагнитного шторма в марте 2015 года. Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

## ВРЕМЕННЫЕ МАСШТАБЫ СУЩЕСТВОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НАД КОЛЬСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

**Мингалев И.В., Гомонов А.Д., Мингалев О.В., Загурский В.В.**

Полярный геофизический институт, г. Мурманск, г. Апатиты, Россия, [mingalev\\_i@pgia.ru](mailto:mingalev_i@pgia.ru)

В данной работе представлен анализ данных с 2012 по 2021 годы радара частичных отражений в обл. Туманный, радара некогерентного рассеяния EISCAT в Тромсё и данных ионозодов о периодах времени, во время которых выполнялось хотя бы одно из двух условий: либо критическая частота плазмы на высоте максимума E-слоя над антенной радара возрастала более чем на 1 МГц по сравнению со средним значением за предыдущие 4 часа, либо эта частота за минуту увеличивалась на 2 МГц или более по сравнению с предыдущим значением. Такое увеличение указанной частоты свидетельствует о наличии высыпаний энергичных частиц, которые создают в D и E-слоях ионосферы неоднородности с повышенной концентрацией электронов. Одной из целей анализа было определить долю времени по отношению к общему времени наблюдений, когда присутствовали резкие увеличения концентрации электронов на высоте максимума E-слоя. В качестве временных интервалов брались часовые отрезки. Были отдельно рассчитаны доли времени для возмущений, длящихся в пределах 2–4 мин, 4–8 мин, 8–12 мин, 12–16 мин, 16–20 мин и длящихся более 20 мин. На основании анализа делаются выводы.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ МНОГОЧАСТОТНЫХ ПРИЁМНИКОВ ГНСС ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

*Куприянов А.О.<sup>1</sup>, Петрукович А.А.<sup>2</sup>, Мёрзлый А.М.<sup>2,3</sup>, Никифоров О.В.<sup>2, 2</sup>, Сахаров Я.А.<sup>4</sup>, Чернышов А.А.<sup>2</sup>, Янаков А.Т.<sup>2</sup> Замогильный Д.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> МИИГАИК, г. Москва, Россия, [aoku28@gmail.com](mailto:aoku28@gmail.com);

<sup>2</sup> ФГБУН Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Совет РАН по космосу, г. Москва, Россия;

<sup>4</sup> ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия.

Решение проблемы координатно-навигационного обеспечения задач радиолокации, навигации, создания и развертывания опорных референцных координатных сетей вдоль трассы Северного морского пути зависит от изучения влияния и учета ионосферных и магнитосферных возмущений в Арктической зоне. Проблема приводит к значительному снижению точности навигации, дальней радиолокации и координатно-временного обеспечения широкого спектра потребителей, работающих в Арктической зоне. Одним из решений является организация постоянно действующей сети станций ионосферного мониторинга в реальном времени на основе мультиспектральных наблюдений Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС).

Основной характеристикой, определяющей изменение параметров радионавигационного сигнала при распространении сквозь слои ионосферы, является Total Electron Content (ТЕС) или полное электронное содержание (ПЭС) — полное число электронов в столбе единичного сечения, проходящего через ионосферу. Изменения ПЭС вызывают пропорциональные изменения фазы и искажения амплитуды радиосигнала. Следовательно, чем точнее будет определено ПЭС, тем точнее можно будет определить задержки радиосигнала, вызванные влиянием ионосферы.

Спецификой процессов в высокоширотной ионосфере является высокая скорость изменений, происходящих на небольших локальных областях и зависящих от целого ряда факторов, связанных с солнечной активностью и вращением Земли. Для их обнаружения, фиксации и анализа необходима система оперативного пространственного мониторинга и система визуализации ионосферного состояния, формы и границ аврорального овала в реальном времени. Учет состояния ионосферы в полярной зоне, в отличие от среднеширотной, является актуальной, специфической задачей для дальней радиолокации, точной навигации, связи, картографирования. Имеющийся опыт мониторинга ионосферы с использованием аппаратуры ГНСС показал необходимость экспериментальной проверки работы ионосферного комплекса в высоких широтах. Основные функциональные блоки комплекса специализированная мультисистемная, многочастотная спутниковая аппаратура, программный комплекс оперативной фиксации и формирования данных (локальный и удаленный), система передачи данных по каналам спутниковой связи, программный комплекс обработки потоков поступающей информации, фильтрации и визуализации.

В докладе представлены первые результаты исследований по организации сети постоянного ионосферного мониторинга в Арктической зоне в части отработки методики измерений и визуализации данных ионосферных наблюдений с использованием многосистемной многочастотной спутниковой аппаратуры.

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ SWARM ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ И СРЕДНИХ ШИРОТ

**Захаров В. И.<sup>1,2,3</sup>, Сухарева Н. А.<sup>1,4</sup>, Королев В. Ю.<sup>5</sup>, Шестаков О. В.<sup>5</sup>**

*1 МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия, [zvi\\_555@list.ru](mailto:zvi_555@list.ru)*

*2 Институт Физики Атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия*

*3 Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

*4 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына, Москва, Россия*

*5 МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, Москва, Россия*

Нахождение навигационных, зондирующих и связных сигналов в околоземной среде оказывают влияние неоднородности ионосферной и космической плазмы, которые приводят к дополнительной амплитудно-фазовой модуляции информационного сигнала. Указанное обстоятельство является причиной появления искажений в различных гео- и гелиофизических условиях. Можно без преувеличения утверждать, что развитие современных средств диагностики и связи вышли на такой уровень, что в ряде случаев основными источниками ошибок является именно сама среда распространения информационного сигнала.

В данной работе рассматриваются вопросы выделения и исследований флуктуаций электронной концентрации в ионосфере Земли разными методами в различных гео-гелиофизических условиях по данным спутниковых измерений.

В качестве источника экспериментальных данных в нашей работе взят массив высокочастотных наблюдений с ИСЗ Swarm, спутниковой миссии ESA. Созвездие спутников состоит из трёх аппаратов, выведенных на приполярные орбиты. Движение двух спутников синхронизовано, для них выбраны практически одинаковая высота орбиты и поддерживается расхождение по долготе в  $1.4^{\circ}$  и по времени от 4 до 10 сек. На каждом спутнике, помимо магнитометрического оборудования, установлены также зонды Ленгмюра, ведущие измерения электронной концентрации с частотой опроса 2 Гц.

Полученные экспериментальные данные являются источником информации о вариациях электронной концентрации над неким средним уровнем, задаваемым выбранным пространственно-временным окном усреднения. Для этого окна (размером 30сек - 5 мин) оцениваются спектральные Фурье и вейвлет-компоненты ионосферных сцинтилляций и определяются интенсивности вариаций электронной концентрации и, с учетом скорости носителя зонда Ленгмюра, пространственные размеры неоднородностей. Для практических задач такие вариации рассмотрены в диапазонах магнитных пульсаций Pc1-Pc5. Начиная с размеров окна 1 мин получены достаточно устойчивые оценки параметра степенного спада спектра размеров, т.е. аналогом параметра турбулентности Колмогорова в атмосфере.

Анализ информационной составляющей шумов включает в себя построение индексов мерцаний RODI10сек и энергетического индекса S4, а также определение фрактальной размерности как признака развитой турбулентности для изучаемого семпла данных.

В ходе работы создано высокоэффективное ПО для полуавтоматической обработки данных. В качестве примеров приведены результаты описанного комплексного метода мониторинга ионосферы в период 01.11 - 07.11 самой сильной магнитной бури 2021г, когда индекс Kp достиг значения свыше 8, а излучение Солнца F10.7 варьировалось от 85 до 100sfu. Рассмотрена динамика развития изучаемых параметров и проведено их сравнение.

Работа выполнена при частичной поддержке НОШ МГУ «Фундаментальные и прикладные проблемы физики космоса». Использованное в работе ПО для анализа данных SWARM создано в рамках ГосЗадания МГУ им. М.В. Ломоносова по теме 01200408544.

## УНЧ И КНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ВУЛКАНИЧЕСКИМИ МОЛНИЯМИ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ТОНГА

Стуков Д.А., Пилипенко В.А.

*ИФЗ РАН, Лаборатория физики околоземного пространства, [dstkov922@gmail.com](mailto:dstkov922@gmail.com)*

Помимо акустического воздействия на атмосферу и ионосферу, во время извержений вулканов происходит также и электромагнитное воздействие за счет вулканических молний. Носителями электростатического заряда в эруптивном облаке являются вулканический пепел, аэрозоли и газы. Извержение вулкана Тонга 13 и 15 января 2022 г., и сопровождавшая его интенсивная молниевая активность, привели к возбуждению ряда электромагнитных колебаний разных частотных диапазонов. Свойства УНЧ и КНЧ колебаний анализируются по данным магнитометров в тихоокеанском регионе. Информация о молниевых разрядах получена от глобальной системы WWLLN. Было отмечено усиление интенсивности Шумановского резонанса (частота  $\sim 7.8$  Гц) на станциях на Дальнем Востоке. Там же было обнаружено появление широкополосных излучений диапазона Pc1 (2–5 Гц), стимулированных интенсивными вулканическими молниями. Эти излучения предположительно являются результатом возбуждения магнитозвукового волновода в верхней ионосфере молниевой активностью. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-17-00125.

## ВЛИЯНИЕ МОМЕНТА НАЧАЛА ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ НА ЕЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Клименко М.В.1,2, Клименко В.В.1, Ратовский К.Г.2, Белюченко К.В.2, Веснин А.М.2

*1 КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, [maksim.klimenko@mail.ru](mailto:maksim.klimenko@mail.ru)*

*2 ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, 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. Одним из интересных явлений выявленных нами с использованием такого подхода было формирование послебуревых положительных возмущений электронной концентрации в F области ионосферы и полном электронном содержании на средних и низких широтах, которые формируются за счет увеличения значений отношения  $n(O)/n(N_2)$  после бури [2]. Дальнейший анализ результатов численного моделирования показал, что эти положительные эффекты последствия по разному проявляются в различных долготных секторах. Возникает вопрос, связан ли этот долготный эффект с временем начала и развитием рассматриваемой геомагнитной бури или такой эффект будет проявляться и для других бурь с другими временами начала. Также имеется вопрос относительно UT зависимости отклика ионосферы во время главной фазы бури. Для ответа на эти вопросы мы провели расчеты на глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) эффектов идентичных геомагнитных бурь с временем начала в 0, 6, 12 и 18 UT. Были рассмотрены основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании ионосферных эффектов на разных фазах развития геомагнитной бури.

Также ранее авторским коллективом был разработан метод статистического анализа ионосферного отклика на геомагнитные бури [2,3]. Метод включал в себя идентификацию геомагнитных бурь на основе Dst-индекса геомагнитной активности и расчет эталонного ионосферного отклика на магнитную бурю, представляющего собой результат усреднения возмущений ионосферных параметров для бурь одного типа методом наложения эпох. Проведенный анализ индекса Dst за 1999-2018 гг. выявил 554 геомагнитные бури, из которых 144 были изолированными и 100 сильными геомагнитными бурями. Было показано, что в суточном распределении количества геомагнитных бурь наблюдаются 2 максимума: (22 UT, 37 событий и 7-9 UT, 34-35 события). На основе метода наложения эпох получено поведение AE и AL индексов в период средней геомагнитной бури. Поведение этих индексов использовано в модели ГСМ ТИП для получения отклика верхней атмосферы на "эталонную" геомагнитную бурю. Проведено сравнение результатов моделирования со среднестатистическим откликом регионального электронного содержания в низких средних и высоких широтах по данным наблюдений мировой сети приемников глобальных навигационных спутниковых систем. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-27-00213.

1. Данилов А.Д. // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5. С. 1–33.
2. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В., Чирик Н.В., Коренькова Н.А., Котова Д.С. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 32-42.
3. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V., Klimenko V.V., Vesnin A.M. // Atmosphere. 2020. V. 11. No. 12. P. 1308.

Докладчик: Стуков Данила Алексеевич, Ведущий инженер ИФЗ РАН, [dstkov922@gmail.com](mailto:dstkov922@gmail.com)

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛИЙ ОНЧ/НЧ РАДИОСИГНАЛОВ СВЯЗАННЫХ С ПОДГОТОВКОЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ященко А.К., Сорокин В.М.

*ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [alex@izmiran.ru](mailto:alex@izmiran.ru)*

Для изучения динамики ионосферы в течение длительного времени используются хорошо проверенные радиофизические методы ее зондирования. Наблюдались специфические вариации амплитуды и фазы ОНЧ/НЧ (ОНЧ, 3-30 кГц, НЧ, 30-300 кГц) радиоволн, трасса распространения которых проходила вблизи эпицентра за 3-10 суток до землетрясения. В течение нескольких дней до землетрясений наблюдаются аномалии сигнала в виде уменьшения его амплитуды и фазы. Были рассчитаны спектры этих аномалий. Как в спектрах спокойных, так и в спектрах аномальных дней основной максимум приходится на период 30-35 минут. Кроме того, во время сейсмической активности появляются максимумы спектра с периодами 20-25 минут и 10-12 минут. Существование характерных периодов (10-12 и 20-25 минут) для максимумов спектра возмущения амплитуды и фазы сигнала передатчика, возникающие в процессе подготовки землетрясения невозможно объяснить на основе модели распространения ВГВ в ионосферу. Спутниковые данные показали, что рост сейсмической активности сопровождается усилением квазистатического электрического поля в ионосфере до величины порядка 10 мВ/м. Этот рост связан с возмущением электрического тока в участке глобальной цепи в окрестности сейсмической зоны. Причиной такого возмущения является ЭДС в приземной атмосфере, которая возникает в результате инжекции в нее заряженных аэрозоль и их конвективный перенос вверх. Электрический ток проводимости, протекающий из атмосферы в ионосферу, переносит в нее положительные ионы. Возникающий положительный заряд компенсируется электронами продольного тока и отрицательными ионами нижней ионосферы. В результате, на нижней границе ионосферы формируется горизонтально вытянутая неоднородность плотности плазмы. Наличие такой неоднородности приводит к возмущению амплитуды и фазы при волноводном распространении ОНЧ-НЧ сигналов в эпицентральной зоне, наблюдающемуся в период подготовки землетрясения. Взаимодействие ветра в ионосфере с геомагнитным полем приводит к появлению силы Ампера, вертикальный градиент которой модифицирует свойства фоновых гравитационных волн. Появляется дискретный спектр возмущений с основным периодом порядка 30 мин. Появление в ионосфере квазистатического электрического поля амплитудой до 10 мВ/м в эпицентральной зоне в период подготовки землетрясения увеличивает силу Ампера, формируемую ветром. Согласно проведенным расчетам, давление газа в волне и его нормальная производная непрерывны для выделенных периодов при распространении волны через проводящий слой, в котором действует сила Ампера. Это означает, что на распространение волн с этими периодами сила Ампера не оказывает влияния. Действие силы Ампера в проводящем слое не накладывает запрета на распространение волн с другими периодами. Однако, влияние этого слоя на такие волны приводит к их рассеянию. Поэтому волны, период которых не удовлетворяет условию распространения через проводящий слой, затухают сильнее. Это ведет к преобладающему росту амплитуд возмущений с дискретным спектром, периоды которых удовлетворяют такому условию. Увеличение силы Ампера за счет электрического поля сейсмического происхождения приводит к появлению в спектре колебаний ионосферы максимумов с короткими периодами порядка 10 и 22 минут, которые наблюдаются на эксперименте.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201356396.

## ИОНИЗАЦИЯ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК РАЗЛИЧНОГО КЛАССА

Ряховский И.А., Поклад Ю.В.

*ИДГ РАН, г. Москва, Россия, [ryakhovskiy@yandex.ru](mailto:ryakhovskiy@yandex.ru)*

В данной работе изучаются ионизационно-рекомбинационные процессы в нижней ионосфере во время солнечных вспышек различных классов произошедших в июне 2014 г. и сентябре 2017 г. Впервые оценки ионизации и рекомбинации D-области ионосферы были выполнены с использованием экспериментальных данных вариации амплитудных и фазовых характеристик сигналов ОНЧ (3-30 кГц) диапазона и двухканальных данных спутника GOES (0,05–0,4 нм и 0,1–0,8 нм). С помощью эмпирической двухпараметрической модели Уэйта-Фергюсона рассчитаны временные изменения концентрации электронов Ne во время солнечных вспышек разных классов. Для оценки потоков рентгеновского излучения в спектральном диапазоне длин волн  $\lambda \leq 0.3$  нм использовались данные спутника GOES и модель черного тела.

Совместный анализ временных вариаций вертикального профиля Ne в нижней ионосфере и потоков рентгеновского излучения в различных диапазонах длин волн позволил получить значения коэффициентов скорости ионизации и рекомбинации, а также определить спектральные диапазоны излучения, оказывающие наибольшее влияние на Ne на заданных высотах. Рассчитанные коэффициенты и диапазоны скоростей ионизации и рекомбинации были успешно верифицированы с использованием ОНЧ данных во время других солнечных вспышек. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы в будущих исследованиях для более точной оценки реакции нижней ионосферы на солнечные вспышки различных классов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 22-77-00051

## ОБНАРУЖЕНИЕ СНЧ СИГНАЛА ПЕРЕДАТЧИКА ЗЕВС НА НИЗКООРБИТАЛЬНОМ СПУТНИКЕ CSES

**Савельева Н.В.,** Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Zhao S.

*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, [nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)  
Национальный Космический Центр, г. Пекин, Китай*

Показана возможность обнаружения на низкоорбитальном спутнике электромагнитного отклика верхней ионосферы на сверх-низкочастотный (СНЧ) сигнал, сгенерированный наземным протяженным источником ЗЕВС. ЗЕВС состоит из двух горизонтальных антенн по типу линий электропередач, которые запитываются током с амплитудой 200-300 А на частоте 82 Гц. Длина каждого из проводников составляет ~60 км, а расстояние между ними - ~10 км. ЛЭП заземлены через контактные скважины, идущие под землю на глубину 2-3 км. Проведен анализ данных, полученных с помощью датчика электрического поля EFD, входящего в состав оборудования итало-китайского спутника CSES (China Seismo-Electromagnetic Satellite). Спутник обращается вокруг Земли по солнечно-синхронной круговой орбите на высоте 507 км. Когда спутник находился в районе передатчика ЗЕВС (минимальное удаление ~400 км) над Белым морем, электрический датчик зарегистрировал узкополосное излучение на частоте 82 Гц с амплитудой  $E \sim 1$  мкВ/м. Мы смоделировали пространственную структуру поля СНЧ волн в верхней ионосфере, возбуждаемого линейным горизонтальным током с частотой 82 Гц и длиной 60 км, подвешенным над высокоомным грунтом. С использованием ионосферной модели IRI восстановлены реалистичные высотные профили параметров плазмы во время исследуемых событий. Смоделированные амплитуды электромагнитного отклика верхней ионосферы находятся в разумном согласии со спутниковыми наблюдениями.

## СУБНАНОСЕКУНДНЫЙ ИМПУЛЬС, ВОЗБУЖДАЕМЫЙ ДЛИННЫМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ: НОВЫЙ ЭФФЕКТ В ФИЗИКЕ МОЛНИИ

**И.М. Вершинин,** М.Е. Гуцин, И.Ю. Зудин, П.А. Микрюков

*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [i.vershinin@ipfran.ru](mailto:i.vershinin@ipfran.ru)*

Импульсные электромагнитные излучения молниевых разрядов используются для решения задач грозопеленгации, оценки физических параметров молнии, рассматриваются как ее важнейшие поражающие факторы.

При этом прямая регистрация волновых форм излучения грозовых явлений, как правило, ограничена возможностями оцифровки и сбора данных и соответствует, в лучшем случае, микросекундным временным масштабам. Улучшить временное разрешение натуральных измерений достаточно сложно из-за невозможности предсказать, когда и где именно произойдет очередной грозовой разряд, и связанных проблем с синхронизацией регистрирующей аппаратуры. Другим подходом является моделирование физических процессов на лабораторных установках, позволяющих создать высоковольтный разряд в форме длинной искры. Протяженный разряд длиной более нескольких метров, наиболее близкий по свойствам к грозовому разряду, может быть получен на установке ГИН-6МВ (ВНИЦ900, г. Истра).

В данной работе представлены первые измерения импульсного излучения, возбуждаемого на стадии развития лидера в форме одиночного сверхширокополосного электромагнитного импульса (ЭМИ) длительностью менее 1 нс при искровом пробое промежутка длиной более 4 м в конфигурации «остриё – остриё». В экспериментах, моделирующих молниевый разряд, было обнаружено излучение длинной искры в форме одиночного ЭМИ длительностью около 200 пс. При положительном разряде ГИН-6МВ ЭМИ с формой, близкой к «однополярной», наблюдаются более чем в половине всех реализаций; при отрицательном разряде ЭМИ также наблюдаются, но реже и с меньшей амплитудой. Предварительный анализ показывает, что в случае положительного разряда момент излучения импульса оказывается на 7 – 10 мкс раньше обратного удара, и приблизительно соответствует старту восходящего лидера с заземленного электрода. Такой импульс, с учетом значительной амплитуды – более 100 В/м на расстоянии около 100 м от искры – и ширины спектра (до 10 ГГц при длительности фронта около 100 пс), можно рассматривать как новый поражающий фактор молнии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 19-19-00501.



## ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОВ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В ВАРИАЦИЯХ НЕЙТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕРМОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ SWARM

Лукьянова Р.Ю.

ИКИ РАН, Москва, [renata@ari.ru](mailto:renata@ari.ru)

Основными факторами, влияющими на вариации плотности нейтрального газа, являются солнечное УФ-излучение и геомагнитная активность. Во время магнитных бурь плотность и состав термосферы претерпевают резкие изменения вследствие джоулева нагрева из-за диссипации ионосферных электрических токов, передачи импульса при усилении конвекции ионосферной плазмы, высыпания энергичных частиц, изменения состава ионов и нейтралов.

Три идентичных космических аппарата (КА) SWARM находятся на низкой околополярной орбите. В число бортовых измерительных приборов входят векторный и скалярный магнитометры, ленгмюровский зонд и GPS-приемники. Сигналы GPS используются для высокоточного определения орбиты (POD, Precise Orbit Determination). Через определение негравитационных ускорений на основе данных POD рассчитывается плотность массы нейтральной компоненты термосферы. 30-секундные значения плотности (пространственное разрешение около 200 км) являются продуктом уровня 2 и представлены на официальном веб-сайте ESA. Период работы SWARM приходится на вторую половину 24-го солнечного цикла, минимум и начало текущего цикла. За это время произошло несколько крупных магнитных бурь, когда среднесуточные значения Dst достигали  $-100$  нТл: в марте и июне 2015 г., сентябре 2017 г., августе 2018 г., марте, апреле и ноябре 2023 г. Для каждой бури построены диаграммы в координатах географическая широта – мировое время, центрированные на минимум Dst, которые показывают эволюцию нейтральной плотности, на двух высотах орбит. Наблюдается увеличение плотности на 100-300% относительно предбуревого фоновое уровня. Разность плотностей, измеряемых выше- и нижелетающим КА, меняется в солнечном цикле от  $0.4 \cdot 10^{-12}$  до  $1 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>. Шкала высот (параметр, связанный с типом молекул) несколько увеличивается с ростом солнечной активности. Структуры, обнаруживаемые на высотах 450 км, не обязательно могут простираются вверх до 500 км. Размывание подобия более характерно для бурь при высокой солнечной активности. Во время геомагнитного возмущения между полюсами и низкими широтами образуются чередующиеся области повышения плотности и депрессии, которые имеют вид стоячей волны. Аномалии проявляются в виде квазигоризонтальных полосчатых структур, простирающихся от полюса к низким широтам. Анализ наблюдений SWARM позволяет оценить возможную величину деградации низкоорбитальных КА при сильных магнитных бурях из-за роста атмосферного сопротивления.

## ОСОБЕННОСТИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ЗАТМЕНИЙ СОЛНЦА И В ЗАХОДНО-ВОСХОДНЫЕ ЧАСЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МЕТОДОМ ИПН ВБЛИЗИ НИЖНЕГО НОВГОРОДА

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](mailto:nv_bakhm@nirfi.unn.ru)

В работе приведены результаты исследований реакции нижней ионосферы Земли на частные солнечные затмения 11 августа 1999 г., 1 августа 2008 г., 20 марта 2015 г. и 25 октября 2022 г. по наблюдениям в лаборатории «Васильсурск» (56.13°N; 46.10°E) НИРФИ ННГУ. Включены также результаты измерений параметров ионосферы и нейтральной атмосферы во время захода и восхода Солнца, выполненных в июне 2000 г., августе 2001 г., августе 2015 г., июне и октябре 2023 г. Исследования уникальных природных явлений в период затмения Солнца и в контрольные дни проводились методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы (ИПН), создаваемых мощным КВ радиоизлучением и методом частичных отражений, основанным на рассеянии радиоволн естественными неоднородностями области D. Искусственные неоднородности создавались излучением передатчиками стенда СУРА в зенит мощной радиоволны необыкновенной либо обыкновенной поляризации на частотах 4.3, 4.7 или 5.6 МГц. Передатчик установки частичных отражений работал на частоте 2.95 МГц, принимались обе магнитоионные компоненты. Измерялись амплитуды и фазы сигналов, рассеянных естественными и искусственными неоднородностями. На основе измерений характеристик рассеянных сигналов проведено сравнение особенностей изменения нижней ионосферы во время затмений и в период сумерек. Сделаны следующие выводы.

Состояние нижней ионосферы во время частных затмений Солнца подобно ее состоянию в заходно-восходные часы и обусловлено тем, что фактическое уменьшение солнечной радиации во время затмения аналогично переходу ионосферы к периоду сумерек. Во время развития затмений и на заходе Солнца наблюдался характерный для перехода к ночному режиму ионосферы рост высот рассеянных сигналов в области D и их расслоения, что объясняется двухслойным профилем электронной концентрации области D.

По измерениям методом частичных отражений во время затмения наблюдалось уменьшение электронной концентрации в области D в 3–5 раз. На высотах выше 88 км отклик ионосферы запаздывал на 20–25 минут по отношению к моменту максимальной фазы затмения, в то время как в нижней части области D запаздывание отклика составляло всего несколько минут. Возрастала турбулизация нижней ионосферы (по данным ЧО и ИПН).

Во время затмения 20 марта 2015 г. в области E зарегистрировано увеличение амплитуд сигналов, рассеянных ИПН, на 30–40 дБ, что обусловлено уменьшением поглощения, и расширение диапазона высот приема рассеянных сигналов. Во время затмения наблюдались более интенсивные рассеянные сигналы в D-области, чем в области E с ростом времени их релаксации в полтора раза и более.

Во время затмений наблюдались рассеянные сигналы с большой амплитудой и сравнительно длительной релаксацией после окончания воздействия на ионосферу с высот мезопаузы (86–88 км). Рассеянные сигналы на этих высотах обычно отсутствуют из-за роста концентрации атомарного кислорода, препятствующего образованию ИПН за счет прилипания электронов к молекулам кислорода при тройных соударениях.

В вариациях скорости вертикального движения плазмы наблюдались интенсивные волновые движения с периодами, характерными для внутренних гравитационных волн. Основные особенности высотно-временных вариаций вертикальной скорости в нижней ионосфере в период наблюдений солнечного затмения и в заходно-восходные часы подобны.

Работа выполнена в рамках проекта № FSWR-2023-0038 по базовой части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2015 ГОДА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ТРАССАХ СПУТНИК-СПУТНИК

**Губенко В.Н., Кириллович И.А., Андреев В.Е.**

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, [vngubenko@gmail.com](mailto:vngubenko@gmail.com)

В марте 2015 года на Солнце имели место мощные корональные выбросы массы (КВМ) в направлении Земли. Корональные выбросы плазмы, достигшие магнитосферы Земли в этот период, спровоцировали сильную магнитную бурю класса G4, в которой максимальное значение Кр-индекса было равно 8. В работе представлены результаты радиозатменных исследований *FORMOSAT-3/COSMIC* в нижней ионосфере Земли во время сильной магнитной бури с 17 по 18 марта 2015 года. В отличие от геомагнитного шторма в июне 2015 года [1–6], здесь не обнаружено значительных флуктуаций параметров дециметровых (ДМ) радиоволн на трассах ионосферного зондирования навигационные (GPS) спутники – низкоорбитальные (*FORMOSAT-3/COSMIC*) спутники в ионосфере планеты.

Целью этой работы является обработка и анализ радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, проведенных во время сильной магнитной бури в период с 17 по 18 марта 2015 года в D- и E-областях высокоширотной ионосферы Земли. Обнаружены мощные периодические осцилляции амплитуды ДМ-сигнала в D-области (высоты ~60–90 км) низкоширотной (20.19°N) ионосферы Земли, которые могут быть связаны с джоулевским нагреванием плазмы на высоких широтах вследствие сильного геомагнитного шторма в марте 2015 года. Данные исследования в ионосфере Земли представляют большой практический интерес для радиосвязи и навигации, а также важны для анализа динамики космической погоды. Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОННЫМИ ВЫСЫПАНИЯМИ

**Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.**

ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [zhanna@pgia.ru](mailto:zhanna@pgia.ru)

Представлена численная нестационарная физико-химическая модель возбужденной полярной ионосферы, которая описывает процессы взаимодействия основных возбужденных и ионизированных компонент атмосферы во время авроральных электронных высыпаний. Модель составлена на основе имеющихся в научной литературе данных и 56 физико-химических реакции. Модель позволяет рассчитать: высотные профили концентрации:  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+(^4S)$ ,  $O^+(^2D)$ ,  $O^+(^2P)$ ,  $O(^1D)$ ,  $O(^1S)$ ,  $N(^4S)$ ,  $N(^2D)$ ,  $N(^2P)$ ,  $NO$ ,  $NO^+$ ,  $N^+$ ,  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ ,  $N_2(B^3\Pi_g)$ ,  $N_2(W^3\Delta_u)$ ,  $N_2(B'^3\Sigma_u^-)$ ,  $N_2(a^1\Pi_g)$ ,  $N_2(w^1\Delta_u)$ ,  $N_2(a'\Sigma_u^-)$  и концентрацию вторичных электронов во время электронных высыпаний, временную динамику концентраций ионосферных компонент, высотные профили интенсивности основных авроральных эмиссий. Отличительными особенностями данной модели являются следующие: а) детальный учет физико-химических процессов, включающий в себя 56 реакций, описывающих процессы перераспределения выделившейся в ионосфере энергии вследствие высыпания потока авроральных электронов, б) корректный учет электронно-колебательной кинетики в процессах перераспределения энергии, что является существенным фактором для расчета заселенности колебательных уровней триплетных и синглетных термов молекулярного азота, в) эффективный алгоритм для расчета вертикальных профилей скоростей образования возбужденных состояний атмосферных газов для произвольно заданного потока высыпающихся в ионосферу авроральных электронов.

Входными параметрами модели являются энергетический спектр электронов на верхней границе ионосферы и концентрации нейтральных составляющих.

Модель ионосферы апробирована на результатах координированного ракетно-спутникового эксперимента. Достигнуто наилучшее в настоящее время согласие результатов моделирования с экспериментальными данными.

1. Andreev V.E., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Kirillovich I.A., Gubenko T.V. Absorption of decimetre radio waves in the Earth's high-latitude ionosphere during a geomagnetic storm in June 2015 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. **1632**. No. 1, 012008, doi: 10.1088/1742-6596/1632/1/012008.
2. Andreev, V.E., Gubenko, V.N., Kirillovich, I.A. GPS L1 signals absorption in high-latitude lower ionosphere during severe geomagnetic storm in June 2015 // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. **1991**. No. 1. 012006, doi: 10.1088/1742-6596/1991/1/012006.
3. Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Kirillovich, I.A., Gubenko, T.V., Pavelyev, A.A. Variations in the Parameters of Radio Waves in the Earth's High-Latitude Ionosphere on the Satellite-Satellite Paths during the Geomagnetic Storm of June 22–23, 2015 // *Cosmic Research*. 2021. V. **59**. No. 3. P. 157–161, doi: 10.1134/S0010952521030047.
4. Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Radio Occultation Studies of Disturbances in the Earth's Ionosphere During a Magnetic Storm on June 22–23, 2015 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. V. **61**. No. 6. P. 713–722, doi: 10.1134/S0016793221060050.
5. Gubenko, V.N., Andreev, V.E., Kirillovich, I.A., Gubenko, T.V., Pavelyev, A.A., Gubenko, D.V. The Absorption Coefficient of Decimeter Radio Waves (~19 cm) in the Earth's Ionosphere Based on the Inverse Problem Solution in Radio Occultation Satellite Studies during the June 2015 Magnetic Storm // *Cosmic Research*. 2022. V. **60**. No. 6. P. 437–444, doi: 10.1134/S001095252206003X.
6. Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Determination of the Effective Collision Frequency of Electrons in the E and D Regions of the High-Latitude Ionosphere from Analysis of Radio-Occultation Measurements // *Cosmic Research*. 2023. V. **61**. No. 6. P. 454–460, doi: 10.1134/S0010952523700491.

## СИНГУЛЯРНОСТИ ДИФФУЗНЫХ ПОЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В РАССЕИВАЮЩИХ СРЕДАХ С ГРАДИЕНТАМИ КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕЛОМЛЕНИЯ

**Илюшин Я.А., Чжао Х.**

*МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [ilyushin@phys.msu.ru](mailto:ilyushin@phys.msu.ru)*

В докладе обсуждается возникновение особенностей интенсивности угловых распределений диффузного излучения в рассеивающих средах с пространственно изменяющимися показателями преломления. Примеры таких сред включают космическую и звездную плазму, где показатель преломления может изменяться вблизи плазменной частоты. Исследование переноса излучения в этих средах имеет практическое применение в различных областях, в том числе в оптических исследованиях и радиолокационном зондировании.

Показано [1], что эти особенности могут появиться, если градиент показателя преломления достаточно силен. Скалярное уравнение переноса излучения решено приближенно и решение проанализировано качественно. Приведены аналитические сингулярные решения скалярного уравнения переноса излучения в плоскостных и сферически-симметричных средах, а также условия образования этих особенностей. Результаты моделирования методом Монте-Карло сравниваются с полученными аналитическими решениями.

В докладе также обсуждается, что эти особенности могут вызывать ошибки и численную нестабильность в вычислительных схемах, особенно в средах с сильно анизотропным рассеянием. Обсуждается регуляризация особенностей, а также классификация особенностей на основе функций источников излучения.

Кроме того, в докладе проводится исследование особенностей яркости в полях рассеянного излучения, генерируемого источниками разных типов. В нем сравнивается структура поля, генерируемая точечными мононаправленными, точечными изотропными и плоскими мононаправленными источниками.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским научным фондом, проект № 22-27-00396, с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [2].

1. Ilyushin Y. A. // J. Opt. Soc. Am. A: 2022. V. 39 P. 160–166.
2. Vl. Voevodin, et al. // Supercomputing Frontiers and Innovations, 2019 V.6. PP.4–11.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕННОЙ УНУ СТЕНД СУРА ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ НОЧНОГО НЕБА В ЛИНИИ 630 НМ И КАРТ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ 2021-2023 ГГ.

**Когогин Д. А.<sup>1</sup>, Емельянов В. В.<sup>1</sup>, Максимов Д. С.<sup>1</sup>, Насыров И. А.<sup>1</sup>, Белецкий А. Б.<sup>2</sup>, Шиндин А. В.<sup>3</sup>, Грач С. М.<sup>3</sup>, Загреддинов Р. В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> КФУ, г. Казань, Россия, [denis.kogogin@gmail.com](mailto:denis.kogogin@gmail.com)

<sup>2</sup> ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup> ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

После проведенных в 2020-2021 гг. работ по ремонту и модернизации УНУ Стенд СУРА начали проводиться регулярные измерения полного электронного содержания (ПЭС) на сети ГНСС-станций, расположенных на территории Российской Федерации, и в частности, в окрестности стенда в периоды воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением. Таким образом к настоящему моменту накоплен большой объем данных ГНСС радиозондирования, полученных в период работы УНУ Стенд СУРА в 2021-2023 гг. Используя данные ГНСС радиозондирования получены карты вариаций полного электронного содержания (ПЭС) и других индексов, основанных на ПЭС, карты мощности навигационных сигналов и т.д. В это же время на УНУ стенд Сура проводились эксперименты по изучению оптических эффектов, происходящих в ионосфере в результате воздействия на нее мощной радиоволны. В настоящей работе выполнен анализ накопленного банка данных синхронных пар снимков ночного неба и карт вариаций ПЭС одной и той же области пространства в проекции на географические координаты за 2021-2023 гг. Интенсивность свечения в красной линии (630 нм) рассчитывалась как медианное значение интенсивности пикселей, попавших в прямоугольную область размером 0,15×0,15 градуса вокруг пикселя, соответствующего центру области. Для расчета соответствующего значения ПЭС выбиралась точно такая же область на ПЭС-картах. Более подробно о методике обработки данных и всех этапах получения карт, а также методике проведения совместного анализа снимков ночного неба и карт вариаций полного электронного содержания можно ознакомиться в статьях [1,2].

В экспериментах 2021-2023 гг. явление увеличения интенсивности свечения в красной линии удалось выделить на около ста циклах излучения волны накачки, где один цикл представляет собой шестиминутный интервал, включающий период излучения и паузы. Высоты области свечения при вертикальной ДН УНУ Стенд СУРА варьировались в пределах ~ 270-330 км, а при излучении мощной радиоволны в направлении «магнитного зенита» были выше на ~ 30 км. Наблюдаются периодические изменения вариаций ПЭС, коррелирующие с режимом накачки и соответственно с интенсивностью свечения. Ситуации с уменьшением вариаций ПЭС в периоды изучения мощной радиоволны существенно преобладают над ситуациями, когда вариации ПЭС растут. Увеличение интенсивности свечения в большинстве случаев соответствует уменьшению вариаций ПЭС.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029. Эксперименты на УНУ стенд СУРА проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

1. Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В. и др. // Известия вузов. Радиофизика. - 2020. - Т. 63. - № 2. - С. 89-104.
2. Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., и др. // Солнечно-земная физика. - 2023. - Т. 9, № 2. - С. 52-59

## Радиочастотная диагностика плазмы в «гигантской» коаксиальной линии на большой плазменной установке

**В. В. Кочедыков, И. Ю. Зудин, М. Е. Гуцин, А. В. Стриковский, С. В. Коробков, А. Н. Катков, И. А. Петрова, И. М. Вершинин**

*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [v.kochedykov@ipfran.ru](mailto:v.kochedykov@ipfran.ru)*

Для исследования распространения электромагнитных импульсов (ЭМИ) в ионосфере и верхних слоях атмосферы, включая нелинейные эффекты, создана гигантская коаксиальная линия (ГКЛ) [1] с плазменным заполнением, установленная внутри вакуумной камеры плазменного стенда «Крот» [2]. ГКЛ обеспечивает распространение ЭМИ в плазменном столбе в форме TEM-волны, свойства которой аналогичны свойствам плоских волн, распространяющихся в свободном пространстве. Такая постановка эксперимента позволяет избежать нежелательных отражений сигнала от стенок камеры, в которой создаётся плазма, и дифракционных потерь. Модельные эксперименты проводятся с достаточно разреженной распадающейся плазмой, измерение концентрации которой обычными контактными диагностиками было затруднительно. Альтернативным решением являются бесконтактные волновые методы диагностики. В докладе представлены результаты использования на ГКЛ двух реализаций схемы радиопросвечивания плазмы, а именно методов отсечки и фазового интерферометра. Интерферометрический метод реализован с учетом неоднородного распределения концентрации плазмы как вдоль, так и поперек передающей линии, которая в рабочем диапазоне частот импульсных и непрерывных диагностических сигналов представляет собой сверхразмерный коаксиальный волновод. Эти методы, оказавшиеся достаточно удобными, применены совместно с более традиционным для установки «Крот» методом зонда с СВЧ-резонатором на отрезке двухпроводной линии [3].

1. М. Б. Гойхман, А. В. Громов, В. И. Гундорин, М. Е. Гуцин, И. Ю. Зудин, С. Ю. Коршинин, С. В. Коробков, А. В. Котов, А. В. Кузин, К. Н. Лоскутов, А. В. Палицин, А. В. Стриковский, Е. А. Мареев // ДАН. Физика, технические науки. – 2022. – Т. 503, № 1. – Стр. 3
2. Н. А. Айдакина, А. Г. Галка, В. И. Гундорин, М. Е. Гуцин, 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 аэрномия. – 2018. – Т. 58, № 3. – С. 331-342.
3. R. L. Stenzel // Review of Scientific Instruments – 1976. – Vol.47 – P. 603

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ СИНГЛЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА НА ВЫСОТАХ МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

**Куликов Ю.Н., Кириллов А.С.**

*Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия, [kulikov@pgi.ru](mailto:kulikov@pgi.ru)*

Целью работы является исследование физико-химических процессов формирования высотных распределений возбуждённых состояний  $a^1\Delta_g$  и  $b^1\Sigma_g^+$  молекулярного кислорода (синглетного кислорода) в ночной и сумеречной мезосфере и нижней термосфере Земли, а также разработка аэрномической модели этих процессов. При исследовании особое внимание уделяется расчету констант скоростей взаимодействия колебательно-возбужденного синглетного кислорода с атмосферными составляющими. Рассчитанные теоретически коэффициенты гашения  $O_2^*$  используются при моделировании колебательных населенностей электронно-возбужденных состояний молекулярного кислорода в ночной и сумеречной атмосфере. Для расчёта теоретических высотных профилей концентрации атомарного и возбуждённого молекулярного кислорода, а также химически тесно связанного с ними озона и других важных составляющих «нечётного» водорода в области мезосферы и нижней термосферы, построена аэрномическая модель суточных вариаций химического состава верхней атмосферы Земли. Модель включает в себя детальные расчёты скоростей фотодиссоциации компонентов атмосферы солнечным УФ-излучением с учётом их суточных вариаций, зависимости от солнечной активности, зенитного угла и географической широты, а также уточнённые константы скоростей химических реакций. Для проверки построенной модели использованы опубликованные экспериментальные данные о высотном распределении оптических и ИК-эмиссий верхней атмосферы и других измерений. Проведен расчет относительных населенностей  $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$  на высотах 80-110 км. Сравнение рассчитанных населенностей с результатами имеющихся в научной литературе экспериментальных оценок для ночной атмосферной эмиссии  $O_2$  также дает хорошее согласие.

## О ЗАВИСИМОСТИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕГО СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ОТ ИНДЕКСОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

**Мальцева О.А., Ивлева Н.С., Никитенко Т.В., Подлипаева Д.А.**

НИИФ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, [oomaltseva@sfedu.ru](mailto:oomaltseva@sfedu.ru)

Известно, что при исследовании и использовании ионосферы важную роль играют ее параметры критическая частота и полное электронное содержание ТЕС. В силу различного числа ионозондов и GPS приемников на земном шаре можно использовать такое свойство этих параметров, как взаимозаменяемость, в результате большой корреляции между ними, однако наличие плазмосферной части ТЕС приводит к тому, что коэффициент корреляции может быть меньше 1, особенно в периоды возмущений.

Целью данной работы является исследование того, какие факторы космической погоды больше всего влияют на поведение ТЕС и его составных частей EC<sub>bot</sub>, EC<sub>top</sub>, ECP<sub>1</sub>. Можно ли выделить один или два существенных фактора и будут ли они отличаться для различных составных частей ТЕС? Для этого использовалась модель IRI-Plas [1], которая допускает адаптацию модели к экспериментальным значениям ТЕС и позволяет отдельно вычислять его составные части. Исследование проведено по данным 9 станций вблизи меридиана 20° E в период наиболее сильного возмущения 13-17 апреля 2022. Первым шагом была оценка точности определения ТЕС после адаптации. Для всех станций диапазоны метрик и их средние значения составили: MAE - диапазон 0.4-1.0 TECU, среднее значение 0.69 TECU, RMSE - 0.6-1.25 TECU и 0.91 TECU, MAPE - 4-6.3% и 4.86%. Доля плазмосферной части ТЕС составила от 7-10% днем до 15-30% ночью в зависимости от широты станции. Вторым шагом была оценка коэффициентов линейной и нелинейной корреляции индексов IMF, Vz, Np, V, Kp, Dst, ap между собой и с отклонениями EC<sub>bot</sub>, EC<sub>top</sub>, ECP<sub>1</sub> от своих медиан. Результаты представляются в виде диаграмм широтных зависимостей этих коэффициентов. В соответствии с линейными коэффициентами корреляции основной вклад в вариации частей ТЕС вносят Vz и Dst, хотя коэффициент нелинейной корреляции Dst от Vz равен 0.8. Соотношение коэффициентов нелинейной корреляции для высокоширотной и низкоширотной станций имеет вид  $\rho(PI) > \rho(top) > \rho(bot)$ , для среднеширотной станции  $\rho(bot) > \rho(PI) > \rho(top)$ , для южноафриканской станции  $\rho(top) > \rho(PI) > \rho(bot)$ . Наиболее высокими нелинейными коэффициентами для высокоширотной станции Sodankula обладают индексы Np и V, для низкоширотной станции Nicosia IMF и Dst, южноафриканской станции Grahamstown Kp и V. Пока не совсем понятно, с какими механизмами связано различие преобладающих индексов в различных высотных диапазонах ТЕС.

Значения ТЕС брались из глобальных карт JPL (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>). Различные опции модели IRI-Plas использовались на сайте (<http://www.ionolab.org/index.php?language=en>).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание ГЗ110/23-10-ИФ).

1 Gulyaeva, T.L., Bilitza, D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model. In: New Developments in the Standard Model, NOVA Publisher, 2011.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФАР ДЛЯ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ РАДИОВОЛНАМИ В КВ ДИАПАЗОНЕ

**Моисеев И.А., Мингалев И.В., Мерзлый А.М., Никишов В.В.**

Обоснование способов построения фазированной антенной решетки для радиоволн КВ диапазона, предназначенной для определения параметров ионосферы и их краткосрочного прогноза. В том числе, оценка критической частоты  $f_0$  и высоты отражения  $h'$  слоев ионосферы, географических и геомагнитных координат. Определение угловых параметров направления приема-передачи радиосигналов, координат точек отражения радиоволн от ионосферы. Анализ способов управления фазовыми параметрами излученных и принимаемых радиосигналов с применением фазированной антенной решетки.

Обоснование требований к точности определения пространственных параметров области ионосферы, в которой происходит отражение лучевых траекторий, а также оценка пространственного распределения параметров ионосферной плазмы в этой области.

Обоснование вида сигнала для зондирования (непрерывный или импульсный ЛЧМ сигнал) с целью получения ионограмм наклонного зондирования, углов прихода радиоволны, оценки поляризации и доплеровской скорости смещения точки отражения волны, параметров отражения в условиях частичного поглощения.

Накопление, формирование и передача результатов измерений. Методы оценки результатов измерений, прогнозирование краткосрочное и долговременное с применением математических моделей высокоширотной ионосферы и распространения радиоволн КВ диапазона, имеющихся баз данных.

## ОСОБЕННОСТИ ЗАВИСИМОСТИ ИОНИЗАЦИИ ИОНОСФЕРЫ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ЕЁ АППРОКСИМАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИЕЙ

**Мирмович Э.Г.**

ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье» г. Химки, Россия, [mirmovich1940@mail.ru](mailto:mirmovich1940@mail.ru)

Впервые нелинейность зависимости состояния ионизации верхней атмосферы от солнечной активности (СА) была отмечена по данным за период чуть больше 18-го солнечного цикла А.И. Лихачёвым (Томск) (цит. по [1], в которой зависимость реакции ионосферы на динамику СА за несколько циклов была представлена полиномиальной квадратичной регрессией), а также в работе [2]. При этом эффект ограничения или «насыщения» в критических частотах области F-ионосферы в летние месяцы, которому посвящена настоящая работа, 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, самого сильного из наблюдавшихся циклов СА с  $W_m=285$ . 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

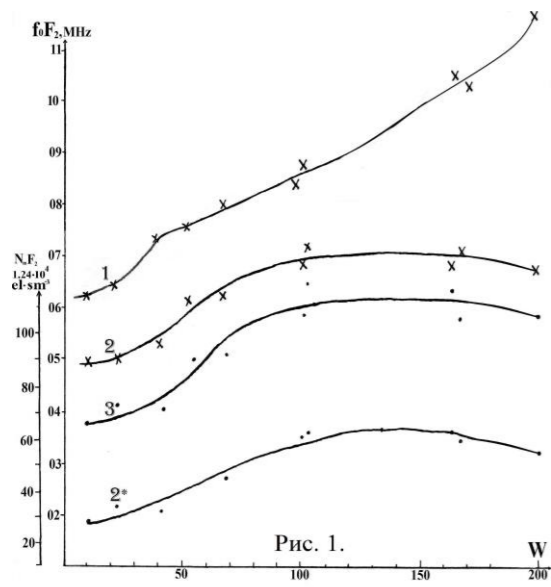


Рис. 1.

ограничения, образуя эффект «насыщения». Аппроксимации такого типа лучше представляет простая и двойная сигмоидальная логистическая кривая (иллюстративный рис. 2, слева – характерные точки кривой, соотносимые с точками перегибов на рис. 1) как функция решения дифференциального уравнения вида  $dP/dx = P(1-P)$  (например, [3, 4, 5]).

Несмотря на уменьшение запроса со стороны задач распространения декаметровых радиоволн на прогнозы ионосферы, её исследования останутся 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, 6], 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. Васильева Т.И., Керблей Т.С. Геомагн. и аэрономия, Т. 4, № 5. 1964. С. 86.
3. Данилов А.М. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем / И.А. Гарькина, Э.Р. Домке. Пенза: ПГУАС, 2011. 296 с.
4. Некрасов О.Н., Мирмович Э.Г. Интерполирование и аппроксимация полиномами степенного, экспоненциального и тригонометрического вида // НиОПГЗ. 2010. № 4. С. 23-32.
5. 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>.
6. 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.

## НЕУСТОЙЧИВОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ИОННЫМ ЗВУКОМ В ХВОСТАХ МЕТЕОРОИДОВ

**Морозова Т.И., Попель С.И.**

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [timoroz@yandex.ru](mailto:timoroz@yandex.ru)

Изучаются неустойчивости в хвостах метеороидов, связанные с ионным звуком. В частности, рассматриваются модуляционная неустойчивость электромагнитной волны, связанная с ионно-звуковой модой, а также ионно-звуковая неустойчивость, возбуждаемая в результате относительного движения плазмы метеороидных хвостов и ионосферной плазмы — неустойчивости без магнитного поля. Показано, что данные неустойчивости могут развиваться при определенных параметрах метеорных тел и пылевой плазмы хвостов метеороидов.

Показаны условия для возможности возникновения ионно-звуковых волн в хвостах метеороидов.

Обсуждается ионно-звуковая неустойчивость, возбуждаемая в результате относительного движения плазмы метеороидных хвостов и ионосферной плазмы. Будут рассмотрены условия развития ионно-звуковой неустойчивости в хвостах метеороидов и будут показаны условия для возможности возникновения ионно-звуковых волн. В том числе будет обсуждаться учёт амбиполярной диффузии и взаимодействие пыли с нейтралами. Рассмотрены параметры метеорных тел и пылевой плазмы хвостов метеороидов, при которых оказывается возможным развитие данной неустойчивости.

Рассмотрена модуляционная неустойчивость электромагнитных волн в хвостах метеороидов, связанная с ионным звуком. Показано, что ее развитие возможно для широкого диапазона параметров метеорных тел. Определены инкременты и характерные времена развития данной неустойчивости

Показано, что модуляционная неустойчивость электромагнитных волн в хвостах метеороидов, связанная с ионным звуком может объяснять возникновение электрофонных шумов одновременно с пролетом метеорных тел и охватывает более широкий диапазон частот электрофонных звуков, чем рассмотренная ранее авторами модуляционная неустойчивость электромагнитных волн в хвостах метеороидов, связанная с пылевым звуком [1].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-72-01066.

1. Морозова Т.И., Попель С.И. Проявления модуляционной неустойчивости в ионосфере Земли включая хвосты метеороидов // Физика плазмы. 2023. Т. 49, № 1, С. 42-47.

## ВОЛНЫ И НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ХВОСТАХ МЕТЕОРОИДОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Морозова Т.И., Попель С.И.

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru*

В пылевой плазме хвостов метеороидов может возбуждаться целый ряд различных волновых мод и неустойчивостей. Исследованы пылевые звуковые, ленгмюровские, нижнегибридные, ионно-звуковые и циклотронные волны. Распространение данных волн может приводить к развитию ряда неустойчивостей и, как следствие, возникновению интересных наблюдательных явлений.

Электрофонные шумы от пролета метеороидов — очень интересные и загадочные явления, однозначное объяснение которых до сих пор не было дано. В данной работе это связывается с развитием модуляционного взаимодействия различных волновых мод, что также может объяснить возникновение флуктуаций магнитного поля во время пролета метеороида [1-2]. В частности, это может быть модуляционная неустойчивость электромагнитных волн от ударной волны метеороида, связанная с пылевой звуковой модой, а также модуляционная неустойчивость нижнегибридных, ленгмюровских волн и ионно-звуковых волн.

При модуляционной неустойчивости электромагнитных волн от ударной волны метеороида, связанной с пылевой звуковой модой могут рождаться волны, которые потом преобразуются в звуковые, когда дойдут до поверхности Земли. В двух последних случаях могут возникать магнитные поля, величины которых сравнимы с наблюдаемыми магнитными полями во время экспериментов с магнитометрами, а также распространяться поперечные электромагнитные колебания, которые, достигая поверхности Земли, могут восприниматься как электрофонные шумы, слышимые одновременно с пролетом метеороидов. Рассматривается влияние вспышек метеоров на параметры пылевой плазмы хвостов метеороидов в зависимости от высоты пролета метеорных тел. Оценены характерные концентрации пылевых частиц в хвостах метеороидов во время вспышек от высоты. Показано на примере модуляционной неустойчивости электромагнитных волн, связанной с пылевой звуковой модой, как концентрация пылевых частиц, увеличенная во время вспышек, будет влиять на величину инкрементов неустойчивости и условия ее развития.

Также объяснением электрофонных звуков от метеороидов для более широкого диапазона наблюдаемых частот может служить развитие ионно-звуковой неустойчивости и модуляционной неустойчивости, связанной с ионно-звуковой модой.

Электронно-циклотронные волны, которые также могут возбуждаться в метеороидных хвостах вследствие циклотронного излучения могут давать радиоизлучение в диапазоне частот, который объясняет наблюдаемое возникновение радиоизлучения метеоров в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сот мегагерц во время пролета метеорных тел [6], природа и механизмы генерации которого до настоящего времени не были объяснены.

Данная работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

1. Kalashnikov A.G. On observations of magnetic effect of meteors by the induction method // *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya Geofizicheskaya*. 1952 No. 6 P. 7–20 (in Russian).
2. Chernogor L.F. Effekty Lipetskogo meteoroida v geomagnitnom pole (Effects of the Lipetsk

## УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЭКЗОПЛАНЕТ ТИПА «ГОРЯЧИЙ ЮПИТЕР»

Кузнецов А.А., Зайцев В.В., Шапошников В.Е., Симонова Т.В.

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

Эффективным способом изучения плазмосфер экзопланет может стать анализ их радиоизлучения. По аналогии с радиоизлучением радиопланет Солнечной системы можно ожидать, что на это радиоизлучение существенное влияние оказывают процессы, обусловленные взаимодействием звездного ветра центральной звезды с плазмосферой экзопланет. В частности, это взаимодействие может являться источником энергии для частиц, генерирующих радиоизлучение. В докладе рассматривается механизм ускорения электронов в плазмосфере экзопланет типа «горячий юпитер» со слабым магнитным полем. Планеты типа «горячий юпитер» обладают массой  $\geq M_J$  ( $M_J$  – масса Юпитера) и их орбиты располагаются в достаточной близости ( $\approx 0,1$  а.е.) к центральной звезде. Следствием близости орбит «горячих юпитеров» к центральной звезде является сильное влияние звездного ветра на плазмосферу экзопланет [1]. Примером «горячих юпитеров» со слабым магнитным полем могут служить экзопланеты HD 189733 b, WASP 12 b и HD 209468 b. Как показано в работе [2], благодаря плазменному механизму в плазмосфере экзопланет со слабым магнитным полем возможна генерация интенсивного радиоизлучения. В докладе предлагается механизм ускорения электронов, обусловленный взаимодействием магнитного поля звездного ветра с плазмосферой экзопланеты. Слабость собственного магнитного поля экзопланеты крайне важна для предлагаемого механизма ускорения. Благодаря этому, магнитопауза может находиться внутри экзопланетной плазмосферы [3]. Это приводит к тому, что поток набегающего звездного ветра достигает области плазмосферы с достаточным количеством нейтральных частиц, столкновения с которыми электронов и ионов звездного ветра при определенных условиях существенно различаются. Последнее проявляется, в конечном счете, в появлении электрического поля разделения зарядов, имеющего компоненту вдоль магнитного поля звездного ветра. Важную роль в возникновении электрического поля разделения зарядов играет анизотропия проводимости плазмы, находящейся в магнитном поле. Вследствие анизотропии проводимости электрическое поле  $\vec{E}_i$ , индуцированное благодаря относительному движению звездного ветра и плазмосферы экзопланеты, генерирует не только педерсеновские токи, направленные по  $\vec{E}_i$ , но стремится возбудить также холловский ток, ортогональный поверхности экзопланеты. Поскольку холловский ток не может замыкаться на поверхность экзопланеты в силу наличия вблизи поверхности слоя с большим количеством нейтралов (концентрация нейтралов здесь на 6-7 порядков превышает концентрацию электронов), то в плазмосфере возникает электрическое поле разделения зарядов, имеющее проекцию на направление магнитного поля. В докладе обсуждаются критерии реализации описанного выше механизма ускорения электронов и показано, что выполнение этих критериев возможно только для HD 189733b. Для этой планеты сделаны оценки величины ускоряющего электрического поля, энергии и концентрации ускоренных электронов. Сделан вывод об энергетической достаточности предлагаемого механизма ускорения для наблюдения радиоизлучения этой экзопланеты.

Работа поддержана грантом РФФ № 23-22-00014.

1. M. S. Rumenskikh, I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko et al. // *Astrophys. J.* 2022, V. **927**, P. 238.
2. Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E. // *MNRAS* 2022, V. **513**, P. 4082.
3. Zhilkin A. G., Bisikalo D. V. // *Astronomy Reports* 2019, V. **63**, P. 550.

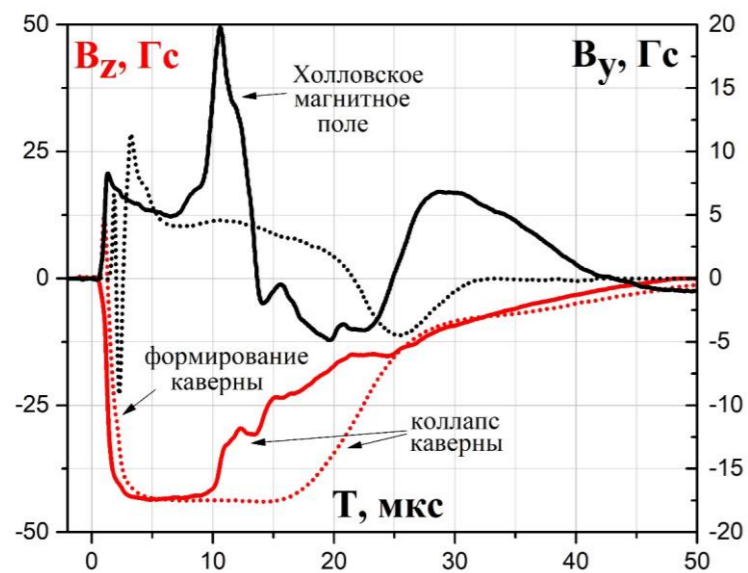
## ХОЛЛОВСКИЕ ЭФФЕКТЫ И КОЛЛАПС ДИАМАГНИТНОЙ КАВЕРНЫ ПРИ РАЗЛЕТЕ ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННЫЙ ФОН

Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Трушин П.А., Шайхисламов И.Ф., Долгов А.Е., Иванов А.Е., Логинов М.В.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, [chibrnov2013@yandex.ru](mailto:chibrnov2013@yandex.ru)

На установке КИ-1 [1, 2] был проведен цикл экспериментов по разлету сферически-симметричного ОЛП в вакуумное магнитное поле, которые продемонстрировали, что расширение облака плазмы приводит к генерации азимутальных магнитных полей за счет эффекта Холла, а также соответствующих Холловских токов, приводящих к переносу основного магнитного поля и определяющих характер протекания коллапса диамагнитной каверны [3].

В последнем эксперименте было показано, что присутствие даже очень разреженной фоновой плазмы полностью подавляет азимутальные поля и влияет на характер протекания коллапса диамагнитной каверны, который происходит теперь значительно позже, медленнее и без заметных фаз вноса магнитного поля.



Магнитные возмущения, демонстрирующие фазу формирования и коллапса диамагнитной каверны (красным –  $B_z$ ), а также соответствующие Холловские магнитные поля (черным –  $B_y$ ), при разлете сферического плазменного облака в вакуумное магнитное поле (сплошные кривые) и разреженную замагниченную фоновую плазму (точками).

Таким образом, проведенные эксперименты впервые в мире позволили обнаружить взаимосвязь эффекта Холла с фазой коллапса диамагнитной каверны, а также с присутствием фоновой плазмы.

Работа выполнена при поддержке программы 10 «Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика» Национального Центра Физики и Математики.

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).

3. А. А. Чибранов и др. Холловские эффекты и коллапс диамагнитной каверны при разлете облака лазерной плазмы в вакуумное магнитное поле (подана в Специальный выпуск *Астрономического журнала*).

## ВЛИЯНИЕ ОКИСИ АЗОТА НА ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.

ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [zhanna@pgia.ru](mailto:zhanna@pgia.ru)

Рассмотрена роль всех известных потенциальных источников возбуждения  $^1D$  и  $^1S$  термов атомарного кислорода в интервале высот 100–300 км. Показано, что окись азота изменяет величину относительных вкладов физико-химических реакций в объемную интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм и 557.7 нм. Это происходит вследствие того, что высотное распределение величины относительного вклада реакции диссоциативной рекомбинации имеет характерный ярко выраженный минимум в области высот  $\sim 110$ –150 км, который формируется благодаря процессу дезактивации иона молекулярного кислорода окисью азота  $O_2^+ + NO$ .

Показано, что влияние процесса дезактивации  $O_2^+ + NO$  приводит к тому, что в области высот 110–150 км совокупность реакций столкновительных взаимодействий компонент ионосферной плазмы  $N(^2D)+O$ ,  $N(^2D)+O_2$ ,  $N(^2P)+O_2$  и  $N^++O_2$  становится вторым по эффективности источником, вносящим вклад в интенсивность излучения эмиссии 630.0 нм.

Показано, что реакция диссоциативной рекомбинации  $O_2^+$  играет существенную роль в возбуждении  $^1S$  уровня атомарного кислорода. Вклад диссоциативной рекомбинации  $O_2^+$  в интегральную интенсивность эмиссии 557.7 нм увеличивается с уменьшением концентрации окиси азота. Вклад диссоциативной рекомбинации  $O_2^+$  увеличивается и составляет  $>10\%$ , когда концентрация окиси азота в максимуме высотного профиля  $[NO]_{\max} < 10^8 \text{ см}^{-3}$ . При  $[NO]_{\max} = 10^7 \text{ см}^{-3}$  относительный вклад реакции  $O_2^+ + e_{\text{th}}$  достигает 40%. Поэтому реакция диссоциативной рекомбинации  $O_2^+$  играет существенную роль в возбуждении  $^1S$  уровня атомарного кислорода.



## ДИАГНОСТИКА НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН, ИЗЛУЧАЕМЫХ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

**Костров А.В., Галка А.Г.**

*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [kstr@ipfran.ru](mailto:kstr@ipfran.ru)*

В докладе рассматривается новый вид диагностики нижней ионосферы с помощью электромагнитных волн, излучаемых линиями электропередач, находящимися вблизи мощных потребителей энергии: нефтехимические, металлургические заводы и т.д. На этих предприятиях для управления мощностью используются тиристоры [1], которые создают броски тока с фронтом 10 мкс на полупериоде основной частоты переменного тока 50/60 Гц. Для сверхдлинного диапазона частот такая линия электропередач представляет собой антенну бегущей волны – антенна Бевереджа. Рассмотрены особенности работы такой антенны, которая связана с тем, что СДВ распространяются между проводами ЛЭП и подстилающей поверхностью (земля) и из-за дисперсионных свойств поглощающего слоя земли угол излучения электромагнитных волн зависит от частоты. Цуги волн в различных частотных интервалах СДВ излучаются и распространяются в виде импульсов с частотой повторения 100/120 Гц. Экспериментальные наблюдения показывают, что в Фурье-спектре сигнала отраженного от нижней ионосферы при фиксированном расстоянии между ЛЭП и приемным пунктом наблюдается медленный дрейф гармоник сети от времени, который связан с изменением состояния ионосферы в течение суток.

Частотная зависимость угла излучения волн определяет ограниченный спектр гармоник сети и дрейф этих частот во времени, которые принимаются как на Земле, так на спутниках. Обсуждаются особенности трансформации СДВ в свистовые волны при наклонном падении на ионосферу. На высотах более 70 км в замагниченной плазме возможно возбуждение косых свистовых волн – волн конической рефракции с групповой скоростью вдоль магнитного поля. Эти волны отчетливо регистрируются на спутниках. Таким образом, дрейф частот сверхдлинных волн, излучаемых ЛЭП связан с вертикальным перемещением границы ионосферы. Это явление при соответствующем выборе приемного пункта, может стать основой для создания новой диагностики состояния ионосферы.

1. Костров А.В., Гуцин М.Е., Стриковский А.В. // Геомагнетизм и аэрномия 2017. Т. 57. № 4. С. 522.

## ОБ ОБРАЗОВАНИИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ОБЛАКОВ В ИОНОСФЕРАХ ЗЕМЛИ И МАРСА

**Резниченко Ю.С. (1,2), Дубинский А.Ю. (1), Попель С.И. (1)**

*(1) ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [dvju@yandex.ru](mailto:dvju@yandex.ru)*

*(2) МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*

Представлена самосогласованная модель формирования и эволюции плазменно-пылевых облаков в ионосферах Земли и Марса [1-6]. Модель описывает, в частности, седиментацию пылевых частиц облака, рост пылевых зародышей за счет нуклеации пересыщенных паров атмосферных газов, процессы зарядки пылевых частиц, а также динамику электронной и ионной компонент ионосферной плазмы. Показано, что в рамках данной модели оказывается возможным проиллюстрировать образование слоистой структуры и резких границ пылевого облака, характерное время формирования и существования которого определяется временем седиментации составляющих его пылевых частиц. Получены теоретические значения характерных размеров пылевых частиц и их зарядов, предсказываемые моделью.

Перечислены особенности запыленной ионосферы Марса по сравнению с запыленной ионосферой Земли [5, 6]. В случае описания пылевых облаков на Марсе уравнения модели учитывают особенности, важные для марсианской ионосферы, но не включаемые в рассмотрение при описании плазменно-пылевой системы в ионосфере Земли. Так, например, в случае Марса модель учитывает эффекты торможения пылевых частиц за счет налипания на них молекул конденсата [5, 6].

Показано, что важным фактором, влияющим на формирование плазменно-пылевых облаков, является неустойчивость Рэлея–Тейлора, которая приводит к тому, что плазменно-пылевые облака могут существовать лишь при наличии ограничения (сверху) размеров составляющих их пылевых частиц [6]. Обсуждается вопрос распространения пылевых звуковых волновых возмущений, в т.ч. нелинейных, например, солитонов [3].

Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

1. Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. // Физика плазмы 2019. V. 45. С. 913.
2. Reznichenko Yu.S., Dubinskii A.Yu., and Popel S.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020 V. 1556. P. 012072.
3. Извекова Ю.Н., Резниченко Ю.С., Попель С.И. // Физика плазмы 2020. V. 46. С. 1119.
4. Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. // Физика плазмы 2023. V. 49. С. 57.
5. Дубинский А.Ю., Резниченко Ю.С., Попель С.И. // Астрономический вестник 2023. V. 57. С. 225.
6. Резниченко Ю.С., Дубинский А.Ю., Попель С.И. // Письма в ЖЭТФ 2023. V. 117. С. 420.

## ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ПРОХОЖДЕНИЕ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Крашенинников И.В., Шубин В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [krash@izmiran.ru](mailto:krash@izmiran.ru)

Ионосфера высоких широт имеет более сложное строение, чем в средних широтах и, в частности, характеризуется наличием крупномасштабных неоднородностей, связанных с дополнительной ионизацией атмосферы потоком захваченных геомагнитным полем частиц солнечного ветра. Наиболее значительное увеличение электронной плотности происходит на высотах слоя E ионосферы – авроральный E-слой, интенсивность которого увеличивается с ростом геомагнитной возмущенности, а его локализация – авроральный овал смещается к экватору.

Меридиональная исследовательская радиотрасса ИСЗФ Норильск – Иркутск (2050 км) в спокойных условиях находится в субавроральной зоне, но во время геомагнитного возмущения авроральный овал может смещаться к югу, и радиотрасса становится трансавроральной, т.е. пересекать зону формирования аврорального E-слоя, что должно проявиться в изменении характера прохождения зондирующих радиоволн. В [1] представлены результаты наклонного радиозондирования на данной радиотрассе 20-24.09.2018 с ионосферной бурей невысокой интенсивности (22.09.2018, Ap ~ 27). Можно выделить два характерных эффекта: блокирование прохождения радиоволн через F2-слой ионосферы в ночных и диссипация кратных мод в дневных условиях.

В данной работе представлены результаты анализа данных радиозондирования на радиотрассе Норильск – Иркутск, пересекающей главный ионосферный провал (ГИП) и авроральный овал во время ионосферного возмущения в локальную ночь 21-22.09.2018. В частности, рис. 1 иллюстрирует блокирующее действие индуцированного частицами солнечного ветра слоя E ионосферы (авроральный E) для моды 1F2 – однокачкового прохождения через слой F2 (лучевые траектории представлены пунктирными кривыми для спокойных условий 20.09.2018 18:00 UT). Анализ выполнен в модели ионосферы GDMI (Global Dynamic Model of the Ionosphere) с включением авроральной области [2].

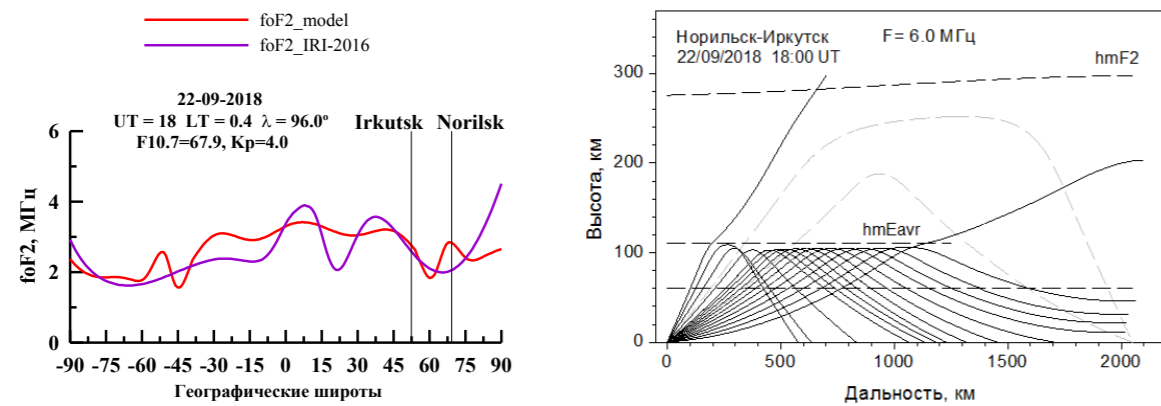


Рис. 1 Положение ГИП и аврорального овала на радиотрассе Норильск - Иркутск во время ионосферной бури небольшой интенсивности 22.09.2018 18:00 UT (левая панель) и блокировка прохождения моды 1F2 авроральным E-слоем (правая панель).

1. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 62. № 2. С. 245-256. 2022.
2. Деминов М.Г., Шубин В.Н., Бадин В.И. Модель критической частоты E-слоя для авроральной области // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 5. С.610–617. 2021.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ИНТЕРЕСАХ РАДИОЛОКАЦИИ

Филатов Г.С.<sup>1</sup>, Мерзлый А.М.<sup>1</sup>, Янаков А.Т.<sup>1</sup>, Моисеев И.А.<sup>1</sup>, Никифоров О.В.<sup>1</sup>, Шубин В.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова, г. Москва, Россия

В докладе рассмотрены некоторые результаты применения нейросети для решения задач оперативного прогноза состояния высокоширотной ионосферы в интересах радиолокации.

Целью использования нейросети для прогнозирования состояния высокоширотной ионосферы является упрощение получения необходимых данных для обеспечения радиолокации на высоких широтах.

В рамках создания нейросети «Предсказатель» были проанализированы три модели нейросетей: сверточная, генеративно-состязательная и рекуррентная. Выбрана оптимальная для текущих задач модель нейросети – рекуррентная нейросеть с долгой краткосрочной памятью LSTM. Проведен анализ данных ионосферы –  $F_{кр}$ , индекс солнечной активности и показатель состояния магнитосферы для обучения нейросети. Сеть была обучена на ежечасных данных 11-ти летнего цикла параметров ионосферы и протестирована при решении задач оперативного прогноза (1 час).

## ТРИАНГУЛЯЦИЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ, СПЕКТРЫ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОНОВ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ СПУТНИКОМ VAN ALLEN PROBE ВБЛИЗИ 6 RE

**Козелов Б.В.<sup>1</sup>, Титова Е.Е.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Полярный геофизический институт, Apatity, Russia

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Представлены данные одновременных наземных и спутниковых наблюдений в магнитосопреженных областях ионосферы и магнитосферы, свидетельствующие о связи потоков электронов, генерирующих авроральные лучи, с процессами взаимодействия волн с электронами в магнитосфере при 6 Re. Известно, что за авроральные высыпания ответственны различные типы волновых мод. В последние годы особое внимание уделяется высокоинтенсивным нелинейным широкополосным электростатическим волнам, которые, как и в рассматриваемом случае, были обнаружены во внутренней магнитосфере вблизи экватора на спутниках Van Allen Probe A (VAP-A).

С помощью триангуляционных наблюдений полярных сияний мы определили энергии высыпающих электронов для слабых лучевых структур во время события 17 марта 2015 г. в интервале времени 19:22–19:25 UT. Обнаружено, что основной вклад в энергетический спектр электронов вносит пик с энергией 50–400 эВ, а дополнительный вклад при энергиях в несколько десятков эВ расширяет профиль на большие высоты. Наибольшее увеличение потока электронов было зафиксировано на сопряженном спутнике VAP-A в то же время, когда лучи наблюдались в полярном сиянии. Сравнение спектров высыпающих электронов, измеренных в экваториальной области на спутнике VAP-A, в сочетании с наблюдениями в полярном сиянии показало качественное согласие. Во-первых, при регистрации полярного сияния потоки электронов на спутнике внутри и вблизи конуса потерь увеличились в диапазоне  $E \sim (10\text{--}400)$  эВ, что соответствует диапазону энергий электронов, определенному в лучах полярного сияния. Во-вторых, спектр высыпающих электронов на спутнике содержит две популяции: электроны с  $E < 50$  эВ, потоки которых уменьшаются с ростом энергии, и более энергичные электроны с локальными максимумами при  $E \sim 50\text{--}400$  эВ.

Показано, что усиление полярных сияний сопровождалось широкополосными электростатическими волнами с максимальной амплитудой на частотах  $< 100$  Гц, зарегистрированными спутником VAP-A в сопряженной области вблизи экватора. Поскольку во время совпадения полярного сияния и волн на спутнике наблюдались только широкополосные электростатические колебания, мы предполагаем, что именно широкополосные электростатические волны вызывают высыпания электронов, создающие лучевые структуры в полярном сиянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-20017).

### Литература:

1. Kozelov, B.V.; Titova, E.E. Conjunction Ground Triangulation of Auroras and Magnetospheric Processes Observed by the Van Allen Probe Satellite near 6 Re. // Universe, 2023, 9, 353. <https://doi.org/10.3390/universe9080353>

## ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ОТ МЕСЯЦА ГОДА

**Л.Н. Сидорова**

Исследованы вариации вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей (equatorial plasma bubbles, EPB) в зависимости от месяца года. Для этого использованы данные наблюдений спутника ISS-b (~972–1220 км) в районе средних широт  $\pm(25^\circ\text{--}55^\circ)$  DIPLAT разных полушарий за период с августа 1978 по декабрь 1979 гг. Проведен сравнительный анализ этой характеристики с месячными модельными вариациями скорости меридионального ветра (модель горизонтальных ветров HWM14). 1. Выявлено, что максимальные значения вероятности наблюдения EPB каждый раз достигаются в период местной зимы: в декабре–феврале в северном полушарии (~19%), в июне–августе в южном полушарии (~29%). Минимальные значения достигаются местным летом: в июне–августе в северном полушарии (~3%), в декабре–феврале в южном полушарии (~4%). Как результат, в периоды солнцестояний имеет место асимметричное развитие пузырей относительно геомагнитного экватора. 2. Выявлено относительное равенство значений вероятности наблюдения EPB разных полушарий в периоды равноденствий. Иными словами, в периоды равноденствий имеет место почти симметричное "расплывание" пузырей относительно экватора. 3. Обнаружено, что максимальные значения вероятности наблюдения EPB достигаются в сезон местной зимы данного полушария, когда там развиваются меридиональные ветры, способствующие опусканию плазмы пузыря и, соответственно, "расплыванию" пузыря вдоль силовой трубки. С другой стороны, минимальные значения вероятности EPB имеют место в сезон местного лета данного полушария, когда там развивается меридиональный ветер, благоприятствующий подъему плазмы пузыря и тормозящий его "расплывание".

## ДЛИТЕЛЬНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ПО СПУТНИКОВЫМ И НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ

**А.Е. Степанов<sup>1</sup>, С.И. Данилов<sup>1</sup>, Д.Г. Баишев<sup>1</sup>, В.Л. Халипов<sup>2</sup>, Г.А. Котова<sup>2</sup>, С.Е. Кобякова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера ЯИЦ СО РАН, г. Якутск, Россия, [a\\_e\\_stepanov@ikfia.ysn.ru](mailto:a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru)*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,*

В работе рассматриваются измерения ионосферных параметров со спутников серии DMSP ( $h \sim 830$  км) и данные наземной ионосферной станции Якутск (YA462) при развитии поляризационного джета во время больших геомагнитных бурь. Поляризационный джет на ионосферной станции Якутск регистрировался в вечернем секторе на фоне суббури возмущений, когда геомагнитный индекс SME достигал значений в пределах от 1000 до  $\sim 3000$  нТл, в то время как по данным магнитной обсерватории Якутск (YAK) наблюдалась положительная бухта величиной  $\sim 50-100$  нТл в Н-компоненте и  $\sim 100-200$  нТл в Z-компоненте магнитного поля Земли. Длительность наблюдения поляризационного джета или время существования в субавроральной ионосфере узких провалов ионосферной плазмы, вызванных электрическим полем северного направления, во время больших магнитных бурь составляет по спутниковым измерениям до 12 часов.

Ключевые слова: ионосфера, магнитосфера, поляризационный джет, SME-индекс, дрейф плазмы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА НА ПРОХОЖДЕНИЕ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОСИГНАЛА СПУТНИКОВ ГНСС

**Синевиц А.А.<sup>1</sup>, Чернышов А.А.<sup>1</sup>, Чугунин Д.В.<sup>1</sup>, Котова Д.С.<sup>2</sup>, Могилевский М.М.<sup>1</sup>, Дорофеев Д.А.<sup>1</sup>, Милох В.Я.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [sinevich.aa@gmail.com](mailto:sinevich.aa@gmail.com)*

<sup>2</sup> *Университет Осло, г. Осло, Норвегия*

Физические явления, происходящие в субавроральной ионосферной плазме, влияют на распространение радиоволн, что, в свою очередь, влияет на точность позиционирования спутников ГНСС. Одно из таких явлений – поляризационный джет (ПД) или субавроральный ионный дрейф (в англоязычной литературе Subauroral Ion Drift, SAID), представляющее собой быстрый дрейф ионов на запад на высотах F-слоя на границе проекции плазмопаузы. Скорость дрейфа ионов в ПД/SAID может достигать нескольких километров в секунду, а плазменные неоднородности внутри могут иметь масштабы вплоть до десятков-сотен метров. Такие высокие скорости и такая высокая структурированность плазмы могут привести к сцинтилляциям трансionoсферных радиосигналов. В данной работе было проведено исследование влияния ПД/SAID на сцинтилляции и потери захвата сигнала спутников ГНСС. Показано, что в момент усиления авроральной активности в районе ПД/SAID наблюдалось увеличение величины индекса фазовых мерцаний ( $\sigma_f$ ), а также потеря захвата спутниковых сигналов. Мы обнаружили, что, скорее всего, флуктуации параметров плазмы внутри ПД/SAID могут привести к ухудшению качества радиосвязи или навигационного обслуживания. Необходимо отметить сложность разделения влияния наличия ПД/SAID и границы диффузной авроры на сцинтилляции трансionoсферного радиосигнала. Наши результаты демонстрируют важность учета субавроральной зоны, где возникают очень динамичные плазменные образования с высокими скоростями дрейфа и неоднородностями различного масштаба внутри, которые могут приводить к помехам в спутниковой связи.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 23-22-00133).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЭКСТЕНСИВНОЙ Q-СТАТИСТИКИ К ОПТИЧЕСКИМ ЯВЛЕНИЯМ В АВРОРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

**Чернышов А.А.<sup>1</sup>, Козелов Б.В.<sup>2</sup>, Могилевский М.М.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [achernyshov@iki.rssi.ru](mailto:achernyshov@iki.rssi.ru)

<sup>2</sup>ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия

Хорошо известно, что авроральная область взаимодействия магнитосферы и ионосферы является открытой нелинейной диссипативной системой вдали от состояния равновесия. В этой области регулярно наблюдаются полярные сияния, демонстрируя не только большое разнообразие динамических форм, но и широкий диапазон временных и пространственных масштабов. Из-за эффектов памяти, фрактальных свойств авроральной плазмы, а также из-за наличия сильных корреляций между ее отдельными частями, динамика высокоширотной системы определяется, прежде всего, дальнедействующими электромагнитными силами. Таким образом, можно предполагать, что неаддитивные и неэкстенсивные термодинамические принципы могут характеризовать их макроскопическое поведение. В представленном исследовании показано, что пульсирующие полярные сияния проявляют неэкстенсивные свойства и могут быть описаны с помощью q-статистики. Рассчитаны корреляции Спирмана параметра q с традиционными показателями нелинейной динамики, такими как коэффициент пологости, стандартное отклонение, индекс масштабирования. Кроме того, показано, что мелкомасштабные вариации накладываются на крупномасштабные процессы, характеризующиеся низкой корреляционной размерностью, и это приводит к увеличению корреляционной размерности при геомагнитной активности, что совпадает с повышенными значениями параметра q. Также демонстрируется, что распределение q-Гаусса дает наилучшие результаты во время усиления авроральных сияний по сравнению с другими типичными распределениями. Делается вывод, что q-статистика (распределение Тцаллиса) можно использовать для анализа оптических явлений в авроральной области. Работа ААЧ поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

## Риометрические наблюдения в ПГИ

**Никитенко А.С., Федоренко Ю.В., Ролдугин А.В., Ларченко А.В., Филатов М.В., Пильгаев С.В., Швецов Д.С., Кузнецова М.В., Лебедь О.М.**

Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия, [alex.nikitenko91@gmail.com](mailto:alex.nikitenko91@gmail.com)

Высыпания заряженных частиц с энергиями более 10-20 кэВ во время геомагнитных возмущений приводят к образованию неоднородностей электронной концентрации разных масштабов в нижней ионосфере. При возникновении таких неоднородностей возрастает поглощение КВ радиоволн и падает надежность и точность загоризонтной локации. Их появление в нижней ионосфере ведет к возрастанию поглощения космического шума, изменения которого фиксируются высокостабильными приемниками радиосигналов диапазона частот 30 — 50 МГц - риометрами. Широко распространенные риометры используют, как правило, приемные антенны типа «волновой канал» с апертурами  $\pm 45^\circ$  и более. Столь широкая диаграмма направленности антенн этого типа не позволяет адекватно оценивать изменения электронной концентрации в неоднородностях с характерными размерами менее 200 км и их горизонтальные размеры, что снижает эффективность применения риометров в исследованиях влияния авроральных высыпаний на нижнюю ионосферу.

В обсерваториях Полярного геофизического института Ловозеро ( $67.97^\circ$  N,  $35.02^\circ$  E) и Туманный ( $69.07^\circ$  N,  $35.73^\circ$  E) с лета 2023 г. ведутся измерения поглощения космического радишума. В этих обсерваториях одновременно работают по два риометра с апертурами приемных антенн  $\pm 22^\circ$  и  $\pm 60^\circ$ . Узконаправленная антенна представляет собой фазированную антенную решетку 2x2, элементами которой являются трехэлементные антенны типа «волновой канал». В обс. Баренцбург (арх. Шпицберген,  $78.08^\circ$  N  $14.20^\circ$  E) в настоящее время эксплуатируется риометр с апертурой антенны  $\pm 60^\circ$ . В качестве приемника используется SDR -приемник (Software Defined Radio), работающий в режиме сканирования по частоте диапазона 37.5 — 39.5 МГц. В докладе приведены примеры наблюдений риометрического поглощения в неоднородностях различных размеров и показано, что регистрация спектра космического радишума и узконаправленной антенны значительно улучшает помехоустойчивость риометра по сравнению с широкоапертурными риометрами.

Работа НАС, ФЮВ, ЛАВ, ЛОМ поддержана грантом РНФ № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

## ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА МЕЖСУТОЧНУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ $NmE$ В ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ИОНОЗОНДА DOURBES

**Павлов А.В., Павлова Н.М.**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, [pavlov@izmiran.ru](mailto:pavlov@izmiran.ru)*

Выполнено исследование межсуточных вариаций статистических характеристик электронной концентрации  $NmE$  максимума слоя  $E$  ионосферы для каждого месяца года в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности по данным часовых измерений критической частоты слоя  $E$  ионосферы наземным ионозондом Dourbes с 1957 по 2023 г. В работе вычислялись математическое ожидание  $NmE_E$ , наиболее вероятное  $NmE_{MP}$ , арифметически средняя месячная медиана  $NmE_{MED}$ , стандартные отклонения  $\sigma_E$ ,  $\sigma_{MP}$  и  $\sigma_{MED}$  величины  $NmE$  от  $NmE_E$ ,  $NmE_{MP}$  и  $NmE_{MED}$  и коэффициенты вариаций  $CV_E$ ,  $CV_{MP}$  и  $CV_{MED}$  значения  $NmE$  относительно  $NmE_E$ ,  $NmE_{MP}$  и  $NmE_{MED}$ , соответственно. Показано, что  $NmE_E$  обеспечивает наилучшее описание множества измерений  $NmE$  единственным статистическим параметром в сравнении с  $NmE_{MP}$  или  $NmE_{MED}$ . Впервые доказано, что переход от низкой к средней солнечной активности приводит к существенным изменениям межсуточной изменчивости  $NmE$  с наибольшей продолжительностью периодов увеличения и уменьшения исследуемой изменчивости в марте и декабре, соответственно.

## ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ $NmF2$ НИЗКИХ ШИРОТ В ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДОВ HUANCAYO И JICAMARCA

**Павлов А.В., Павлова Н.М.**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, [pavlov@izmiran.ru](mailto:pavlov@izmiran.ru)*

Выполнено исследование вариаций статистических характеристик межсуточной изменчивости электронной концентрации  $NmF2$  максимума слоя  $F2$  ионосферы для каждого месяца  $M$  года в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности по данным ионозондов Huancayo и Jicamarca с 1957 г. по 2022 г. В работе вычислялись математическое ожидание  $NmF2_E$ , арифметически среднее  $NmF2_A$ , наиболее вероятное  $NmF2_{MP}$ , арифметически средняя месячная медиана  $NmF2_{MED}$ , стандартные отклонения  $\sigma_E$ ,  $\sigma_{MP}$  и  $\sigma_{MED}$  величины  $NmF2$  от  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  и коэффициенты вариаций  $CV_E$ ,  $CV_{MP}$  и  $CV_{MED}$  значения  $NmF2$  относительно  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$ , соответственно. Показано, что  $NmF2_E$  или  $NmF2_A$  обеспечивает наилучшее описание множества измерений  $NmF2$  одним единственным статистическим параметром  $NmF2$ . Найденный коэффициент  $CV_E(UT, M)$ , определяющий межсуточную изменчивость  $NmF2$ , изменяется в интервалах 18-82% и 13-68% при низкой и средней солнечной активности, соответственно, где UT – мировое время. Коэффициент  $CV_E(UT, M)$  увеличивается на 17% или уменьшается на 30% при переходе от низкой к средней солнечной активности, определяя влияние солнечной активности на межсуточную изменчивость  $NmF2$ . Найдено, что в большинстве случаев возрастание солнечной активности приводит к уменьшению межсуточной изменчивости  $NmF2$ , а наибольшая продолжительность увеличения межсуточной изменчивости  $NmF2$  реализуется в январе.

## ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕСЯЦА ГОДА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК $NmE$ СРЕДНИХ И НИЗКИХ ШИРОТ В ДНЕВНЫХ ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**Павлов А.В., Павлова Н.М.**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, [pavlov@izmiran.ru](mailto:pavlov@izmiran.ru)*

Выполнено исследование изменений от месяца к месяцу статистических характеристик электронной концентрации  $NmE$  максимума слоя  $E$  ионосферы средних и низких геомагнитных широт в дневных геомагнито-спокойных условиях. В проведенном статистическом анализе были использованы критические частоты слоя  $E$  ионосферы, измеренные среднеширотным ионозондом Boulder и низкоширотными ионозондами Huancayo и Jicamarca при низкой солнечной активности с 1957 по 2015 гг. Для каждого месяца года были вычислены математическое ожидание  $NmE$ , среднеквадратичное отклонение  $NmE$  от математического ожидания  $NmE$  и коэффициент вариаций  $NmE$ . Найдены месяцы формирования экстремумов этих статистических параметров  $NmE$ .

## АНАЛИЗ ВОЛНОВОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ВДОЛЬ ПАРЫ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ВЫТЯНУТЫХ ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Петрова И.А., Заборонкова Т.М., Зудин И.Ю., Гушчин М.Е.**

*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [asdrghju1@mail.com](mailto:asdrghju1@mail.com)*

Описание распространения низкочастотных электромагнитных волн в околоземной плазме осложнено присутствием систем как мелкомасштабных, так и крупномасштабных неоднородностей, возникающих, например, при высокочастотном нагреве ионосферной плазмы с использованием наземных станций. Волноводный характер отдельных неоднородностей малого масштаба был установлен С. Адачи еще в 1964 году [1], однако увеличение количества каналов или изменение их структуры усложняет как саму задачу, так и ее решение. Особенности обозначенной задачи с системами мелкомасштабных неоднородностей с повышенной [2] и пониженной концентрациями плазмы [3] исследованы методами численного моделирования. Качественная интерпретация результатов моделирования сделана исходя из свойств аналитических решений, описывающих распространение вдоль отдельных неоднородностей. Строгая интерпретация требует анализа аналитических решений задачи о распространении вдоль нескольких неоднородностей.

В докладе обсуждается распространение волн свистового диапазона вдоль пары неоднородностей концентрации, вытянутых вдоль магнитного поля. Эти неоднородности выступают в роли волноводных структур для свистовых волн, поэтому поля вне системы записываются в виде суперпозиции затухающих вдали от дактов волн. Граничные условия на непрерывность полей задают однородную систему уравнений на комплексные амплитуды плоских либо неоднородных волн внутри каждой области однородности плазмы. Анализ полученного дисперсионного уравнения выполнен численно, выбор параметров обусловлен условиями проведения активных экспериментов, а размеры дактов плотности варьируются в согласии с предыдущими работами [2-3].

Показано, что достаточно близко расположенные дакты имеют «общие» моды – энергия переносится вдоль каждой из неоднородностей. При увеличении расстояния между дактами «общие» моды переходят в моды отдельных дактов. Полученные результаты соответствуют результатам ранее проведенных численных экспериментов.

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. – V. 124. – Issue 6
3. Zudin I.Yu., Zaboronkova T.M., Gushchin M.E., Korobkov S.V., Krafft C. Properties of Whistler Waves' Ducting in Plasmas With Systems of Small-Scale Density Depletions // J. Geophys. Res.: Space Physics. – 2023. – V. 128. – Issue 10

## ИАР НА СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ШИРОТАХ: СИНХРОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Потапов А.С.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, [potapov@iszf.irk.ru](mailto:potapov@iszf.irk.ru)

Экспериментальное сравнение структуры излучений ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) на средней (MND – Монды и UZR – Узур) широте и в авроральной зоне IST – Исток показало коренное различие отношения частот гармоник (стоячих волн) в двух этих зонах. На средних широтах отношение частот пропорционально ряду нечетных чисел 1:3:5... (рис. 1в), что с учетом постоянного наличия на верхней границе резонатора узла магнитного поля означает формирование на нижней границе устойчивой пучности магнитного поля. В авроральной же зоне распределение отношения частот хаотично (рис. 1а). То же касается фазового фактора, легко вычисляемого из отношения частот гармоник (рис. 1б и 1г). Мы пытаемся объяснить полученные результаты с помощью ранее выдвинутой [1, 2] гипотезы, согласно которой захваченные в ИАР волны достигают земли, проникая через горизонтально однородную среднеширотную ионосферу, так что для них нижней границей резонатора является высокопроводящая земная кора, там формируется пучность магнитного поля волны. В отличие от этого, высокоширотная ионосфера имеет вид совокупности доменов с размерами 10–300 км, что меньше поперечных размеров резонатора. При этом частично волны образуют узел магнитного поля на ионосфере и отражаются от нее, а частично все же проникают до земли. В результате формируется хаотичное распределение отношения частот, содержащее как отношения нечетных чисел, так и произвольные значения, включая последовательность натуральных чисел (1:2:3...).

## ИЗУЧЕНИЕ СУБАВРОРАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ НАЗЕМНЫМИ И СПУТНИКОВЫМИ СРЕДСТВАМИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОГО СОБЫТИЯ 18.03.2018

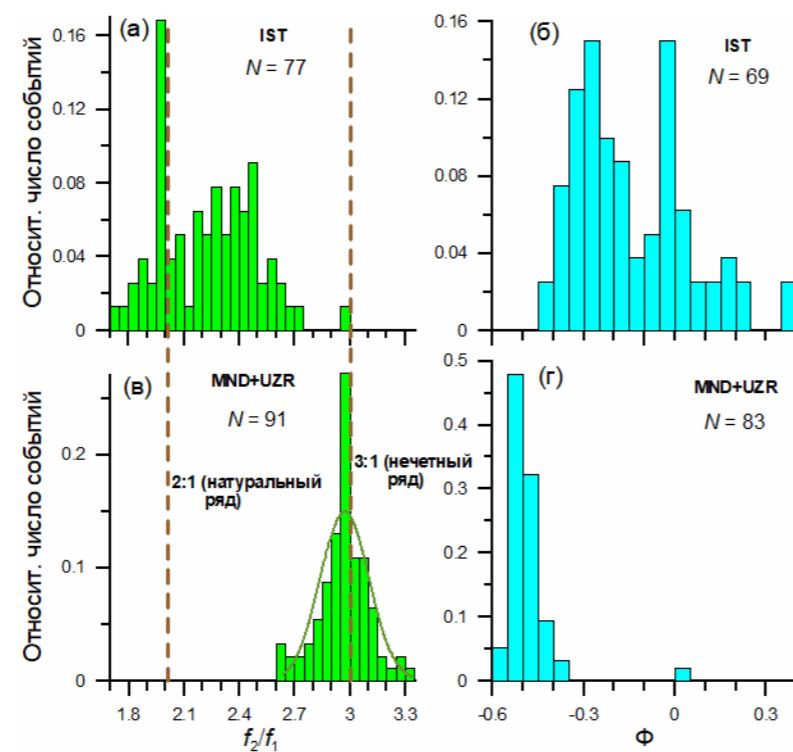
Синевич А.А.<sup>1</sup>, Чернышов А.А.<sup>1</sup>, Чугунин Д.В.<sup>1</sup>, Клименко М.В.<sup>2</sup>, Якимова Г.А.<sup>2</sup>, Дорофеев Д.А.<sup>1</sup>, Могилевский М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [sinevich.aa@gmail.com](mailto:sinevich.aa@gmail.com)

<sup>2</sup>КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

Субавроральная ионосфера — область ионосферы Земли в интервале геомагнитных (инвариантных) широт от 50°–55° до 65°–70°, которая располагается между проекцией по силовым линиям геомагнитного поля положением плазмопаузы и экваториальной границей аврорального овала. Её положение быстро меняется во время изменения геомагнитной активности. Физические явления, происходящие в этой области ионосферы, являются предметом интереса различных исследований. Здесь наблюдаются процессы и явления, отсутствующие или менее выраженные на других широтах, например, поляризационный джет и STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement). Поляризационный джет (ПД) (в англоязычной литературе "субавроральный ионный дрейф" - Subauroral Ion Drift, SAID) - это быстрый дрейф ионов на запад на высотах F-слоя ионосферы на границе проекции плазмопаузы. STEVE – оптическое явление, представляющее собой сине-фиолетовую полосу свечения в ночном небе, обычно пространственно совпадающая с расположением ПД. Внутренняя пространственная структура и механизмы возникновения ПД и STEVE, а также их связь друг с другом на сегодняшний день являются открытыми вопросами. Наиболее полное и глубокое понимание этих явлений даст исследование с применением комбинации одновременных наземных и спутниковых наблюдений субавроральной ионосферы. В данной работе впервые используются данные, полученные с помощью различных наземных (приемники глобальных навигационных спутниковых систем, магнитометры, ионозонды) и спутниковых средств с высокой пространственной частотой для одновременного исследования ПД и STEVE во время усиления геомагнитной активности 18.03.2018 г. в северном полушарии и проводится их детальное сопоставление. Работа поддержана грантом РФФИ (№ 23-22-00133).

Рис. 1. Слева: Распределение значений отношения частоты второй гармоники к частоте первой на высоких (а) и средних (в) широтах. Справа: Распределение фазового фактора  $\Phi$  на высоких (б) и средних (г) широтах. Фактор  $\Phi$  вычислялся по отношению частот первых двух гармоник [3].



1. Guglielmi A.V., Klain B.I., Potapov A.S. 2021. arXiv:2105.01871 [physics.geo-ph]
2. Potapov A.S., Guglielmi A.V., Klain B.I. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, vol. 60, Art no. 2004605.
3. Potapov A.S., IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, vol. 62 (in print).



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПРОЦЕССАХ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ В ПОЛЕ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА С ПОМОЩЬЮ МАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ В ЛАБОРАТОРИИ

**Сысоев В.С.,** Гущин М.Е., Зудин И.Ю., Микрюков П.А., Вершинин И.М., Орлов А.И., Сухаревский Д.И., Наумова М.Ю., Кузнецов Ю.А., Швец Н.Н., Басов Е.В.

ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ, ВНИЦ 900, г. Истра, Россия, [v.s.sysoev@vniitf.ru](mailto:v.s.sysoev@vniitf.ru)

Во время полета, при возникновении высокой электрической активности атмосферы (грозовые облака) на летательном аппарате (л.а.) возникают разрядные процессы. При этом электрические разряды, возникающие, как правило, на частях планера с малым радиусом кривизны, могут иметь различную форму (лавинной короны, стримерной короны высокой интенсивности, лидерные разряды длиной до десятков метров). Все эти высоковольтные разряды являются источниками радиоизлучения, в том числе и мега и гигагерцовых диапазонах (до 5 ГГц) [1]. Такое радиоизлучение является источником серьезных помех в радиодиапазонах, характерных для средств сотовой, космической связи, радиолокаторов.

Для экспериментального изучения возникающего при таких высоковольтных разрядах на планере л.а. радиоизлучения была создана установка, позволяющая проводить такие исследования в лабораторных условиях на масштабных моделях. Разряд молнии моделировался с помощью длинной искры (до 15 м) с использованием генератора Маркса (выходное напряжение до 3 МВ в импульсе). Искра формировалась в промежутке стержень – плоскость длиной 9 м при подаче напряжения положительной полярности. В разрядный промежуток помещалась масштабная модель л.а. длиной 1 м, изолированная от земли. С помощью специальной аппаратуры (скоростная оптическая камера, цифровой осциллограф с полосой до 12 ГГц, СВЧ приемных антенн, системой синхронизации измерительных приборов с генератором высоковольтных импульсов) регистрировалась синхронная картина оптического развития разряда, возникающего на частях планера, и его радиоизлучения в мега и гигагерцовых диапазонах. Расстояние от модели л.а. до места регистрации радиоизлучения составляло 90 м. Исследования проводились на Уникальной научной установке «Комплексный высоковольтный стенд» <https://ckp-rf.ru/usu/73578> Полученные результаты подтвердили наличие в таких высоковольтных разрядах радиоизлучения до 10 ГГц. Таким образом, была подтверждена экспериментальная возможность изучения параметров радиоизлучения от разрядных процессов на л.а. в сильном электрическом поле атмосферы (грозовое облако) в лабораторных условиях (на моделях).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00501, <https://rscf.ru/project/19-19-00501>

1. M.E.Gushchin, S.V.Korobkov, I.Yu.Zudin, A.S.Nikolenko, P.A.Mikryukov, V.S.Sysoev and all. Geophysical Research Letters, 2021, том 48, вып.7. doi.org/10.1029/2020GL092108

## ГЕОМАГНИТНЫЕ И ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЗРЫВА МЕТЕОРА В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

**Черняков С.М.**

ПГИ, г. Мурманск, Россия, [smcherniakov@gmail.com](mailto:smcherniakov@gmail.com)

19 декабря 2014 г. камерой всего неба в пос. Верхнетуломский (68.59 с.ш., 31.75 в.д.) над Верхнетуломским водохранилищем был зафиксирован след падения метеора, разрушение которого в 19:03:07 UT сопровождалось яркой вспышкой (68.25° с.ш., 31.1° в.д.).

Рассмотрена реакция на взрыв метеора геомагнитного поля по данным обсерватории «Лопарская» (68.25° с.ш., 33.08° в.д.), поведение нижней ионосферы по данным установки частичных отражений на радиофизическом полигоне (р.ф.п.) «Туманный» (69.0° с.ш., 35.7° в.д.), а также вариации полного электронного содержания ионосферы по данным навигационных спутников ГЛОНАСС (г. Мурманск, 68.97° с. ш., 33.09° в. д.).

В месте взрыва метеора создается повышенное давление газа на порядок и более превосходящее давление в окружающей среде. За счет этого появляется нелинейная волна со значительной начальной амплитудой, которая распространяется со скоростью, превышающей скорость звука на ионосферных высотах. Как правило, ударная волна в процессе распространения ослабевает, генерируя при этом акустико-гравитационные и медленные магнитогидродинамические волны.

В рассмотренном случае в геомагнитном поле и ионосфере было зафиксированы резкие изменения измеренных параметров, которые можно объяснить воздействием ударной и акустико-гравитационных волн.

**ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc1 И КВАЗИСТАТИЧЕСКИЕ АВРОРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СПУТНИКАХ SWARM В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ**

**Ягова Н. В.<sup>1,2</sup>, Кудин Д. В.<sup>2</sup>, Федоров Е. Н.<sup>1</sup>, Пилипенко В. А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, [nyagova@ifz.ru](mailto:nyagova@ifz.ru)

<sup>2</sup>ГЦ РАН, г. Москва, Россия

Низкоорбитальные спутники являются перспективным средством анализа токовых структур с пространственным масштабом от нескольких километров. На спутниках серии SWARM [1] реализованы магнитометрические наблюдения с частотой оцифровки 50 Гц, а одновременные измерения на нескольких спутниках позволяют достаточно надежно дискриминировать пространственные структуры от временных колебаний [2], если их пространственный масштаб больше характерного расстояния между спутниками. Анализ пространственных колебаний, наблюдающихся на Земле и в ионосфере с одинаковыми частотами был выполнен в [2]. Для решения задачи о разделении квазистатических неоднородностей и возмущений с частотами от долей до нескольких герц и пространственным масштабом от единиц до нескольких десятков километров необходим анализ наземных и спутниковых данных в нескольких точках на Земле и в ионосфере.

В настоящей работе решается задача определения пространственного масштаба пульсаций Pc1 по одновременным изменениям на двух станциях на Земле и на ионосферных спутниках SWARM. Для отбора событий используются станции сети CARISMA [3]. Для анализа выбираются интервалы, когда пульсации наблюдались одновременно на двух станциях, а расположенные близко друг к другу спутники SWARM A и C пролетали над областью, где регистрируются пульсации.

Для пульсаций пространственного масштаба порядка 10 км, в спектрах измеренных на спутнике вариаций магнитного поля спектральный максимум наблюдается на частоте, сдвинутой относительно наземных измерений, что позволяет устранить неопределенность в оценке фазы пульсаций, возникающую в наземных измерениях из-за отсутствия промежуточных станций.

Для решения задачи о разделении пульсаций Pc1 промежуточного пространственного масштаба и квазистатических структур используется сравнение кросс-спектров вариаций магнитного поля на спутнике и наземной станции и на двух спутниках при разных временах сдвига.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-77-30010.

1. Olsen N., Friis-Christensen E., Floberghagen R., et al. // Earth Planets Space. 2013. Vol. 64. P. 1189–1200. DOI: 10.5047/eps.2013.07.001

2. Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9, № 3. С. 128-137. DOI: 10.12737/szf-93202314

3. Mann I.R., Milling D.K., Rae I.J., et al. // Space Sci Rev. 2008. Vol. 141. P. 413–451. DOI: 10.1007/s11214-008-9457-6

**СЕКЦИЯ «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли»**

**Вторник, 06.02. 2024 г., Комната 200**

Председатель: <u>Рагульская М.В.</u>			
	Время	Докладчик	Название доклада
1	09.30 - 09.45	Криволицкий А.А.	Трёхмерное моделирование сезонного состояния озоносферы, D и E областей ионосферы (модель CHARM-DE)
2	09.45 - 10.00	Лобода И.П.	Зондирование верхней атмосферы Земли по данным Обсерватории солнечной динамики
3	10.00 - 10.15	Зотов О.Д.	Влияние турбулентности солнечного ветра на динамику магнитосферы Земли и сейсмическую активность
4	10.15 - 10.30	Кузнецова Т.В.	Вековые тренды и циклы в спектрах солнечной активности и геомагнитного поля, их связь и планетное происхождение
5	10.30 - 10.45	Веретененко С.В.	Эффекты солнечной активности в колебаниях траекторий североатлантических циклонов: новые данные
6	10.45 - 11.00	Подгорный А.И.	Сравнение результатов МГД моделирования над активной областью с наблюдениями: появление в области яркого предвспышечного излучения протяженных токовых слоев
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Веретененко С.В.</u>			
7	11.30 - 11.45	Старченко С.В.	Простейшая модель эволюции магнитной и кинетической энергии геодинамо
8	11.45 - 12.00	Храмова Е. Г.	Два парадокса: как связаны особенности спектров поглощения хлорофиллов с парадоксом слабого молодого Солнца
9	12.00 - 12.15	Осипова А.А.	Частотность экстремальных значений солнечной пятнообразовательной деятельности на длительной временной шкале
10	12.15 - 12.30	Рагульская М.В.	Разномасштабные солнечные циклы: комбинаторика и возможные предикторы
11	12.30 - 12.45	Ожередов В.А.	Создание корреляционной лингвистической модели для выявления обусловленных солнечной активностью коллективных поведенческих эффектов
12	12.15 - 12.30	Шибяев И.Г.	Длительный мониторинг пульса с артериальным давлением и взаимоотношения между показаниями
	<b>13.00 - 14.00</b>	<b>Обед</b>	

Председатель: <u>Криволицкий А.А.</u>			
13	14.00 - 14.15	Мальнева И.В.	Влияние космической погоды на активность атмосферных и современных геологических процессов в Кабардино-Балкарии в последние годы
14	14.15 - 14.30	Куликов Ю.Ю.	Вариации полярного мезосферного озона во время сильной геомагнитной бури 23-24 марта 2023
15	14.30 - 14.45	Диденко К.А.	Моделирование влияния вариаций солнечной активности на глобальную атмосферную циркуляцию
16	14.45 - 15.00	Новиков В.А.	Воздействие солнечных вспышек на афтершоковую зону сильных землетрясений
17	15.00 - 15.15	Воробьев А.В.	Подход к интерпретации естественных индикаторов состояния космической погоды для оценки эффектов ее воздействия на высокоширотные энергосистемы
18	15.15 - 15.30	Миронова И.А.	Отклик высокоширотной атмосферы на высыпания энергичных частиц
<b>15.30 - 16.00</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Рагульская М.В., Веретененко С.В.</u>			
16.00 - 18.00		<b>Постерная сессия</b>	
<i>Криволицкий А.А., Трошичев О.А. Заключительные замечания</i>			

Доклады постерной сессии 06.02.2024

«Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли»

1. Кузнецова Т.В. Влияние приливных сил планет на геомагнитное поле
2. Габис И.П. Влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) на интенсивность озоновой дыры в Антарктике
3. Кузнецова Т.В. Особенности солнечных циклов вблизи бури Кэррингтона 1-2 сентября 1859 года
4. Шлык Н.С., Маурчев Е.А., Абунина М.А., Диденко К.А., Абунин А.А., Белов А.В. Сравнение скоростей ионизации атмосферы во время различных протонных событий
5. Лаптухов В.А. Исследование корреляционной связи числа ураганов с теплосодержанием океана в Северной Атлантике
6. Птицына Н.Г., Демина И.М. Мультидекадные вариации в солнечной активности и климате Земли

**ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОГО СОСТОЯНИЯ ОЗОНОСФЕРЫ, D И E ОБЛАСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ (МОДЕЛЬ CHARM-DE)**

**А.А. Криволицкий, М. В. Банин**

*Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета, г. Долгопрудный М.О., Россия*  
[krivolutsky@mail.ru](mailto:krivolutsky@mail.ru)

Приводятся результаты численного трехмерного моделирования глобального состояния химического нейтрального и заряженного состава атмосферы Земли на высотах 0-130 км. Для расчетов была использована глобальная фотохимическая численная модель CHARM-DE (Chemical Atmospheric Research Model with D and E Regions [1]), а также модель общей циркуляции ARM (Atmospheric Research Model [2]), которая позволяет описать перенос химически активных компонент, созданные в Лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО. Модель CHARM-DE является развитием модели нейтральных составляющих CHARM, созданной в ЦАО [3]. Для расчета нейтральных составляющих в модели использовался метод «химических семейств», позволяющий реализовать устойчивый длительный счет, для получения глобальных распределений. Заряженные компоненты (электроны и ионы) рассчитывались при условии электронейтральности суммы ионов. В модели учтено, участвующих в 200 фотохимических реакциях. Приведено сравнение с ракетными измерениями электронной концентрации, приведенными в литературе.

[1] Alexei A. Krivolutsky, Lidiya A. Cherepanova, Tatyana Yu. Vyushkova, Maxim V. Banin, and Alexander I. Repnev, GLOBAL STRUCTURE OF ELECTRON DENSITY IN D AND E REGIONS SIMULATED WITH 3D PHOTOCHEMICAL MODEL CHARM-DE. Proceeding of AIS meeting 2020.

[2] Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Репнев А.И., Ключникова А.В. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах 0-135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, №6, 2015.

[3] Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 1, с. 64-93, 2015.

## ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ СОЛНЕЧНОЙ ДИНАМИКИ

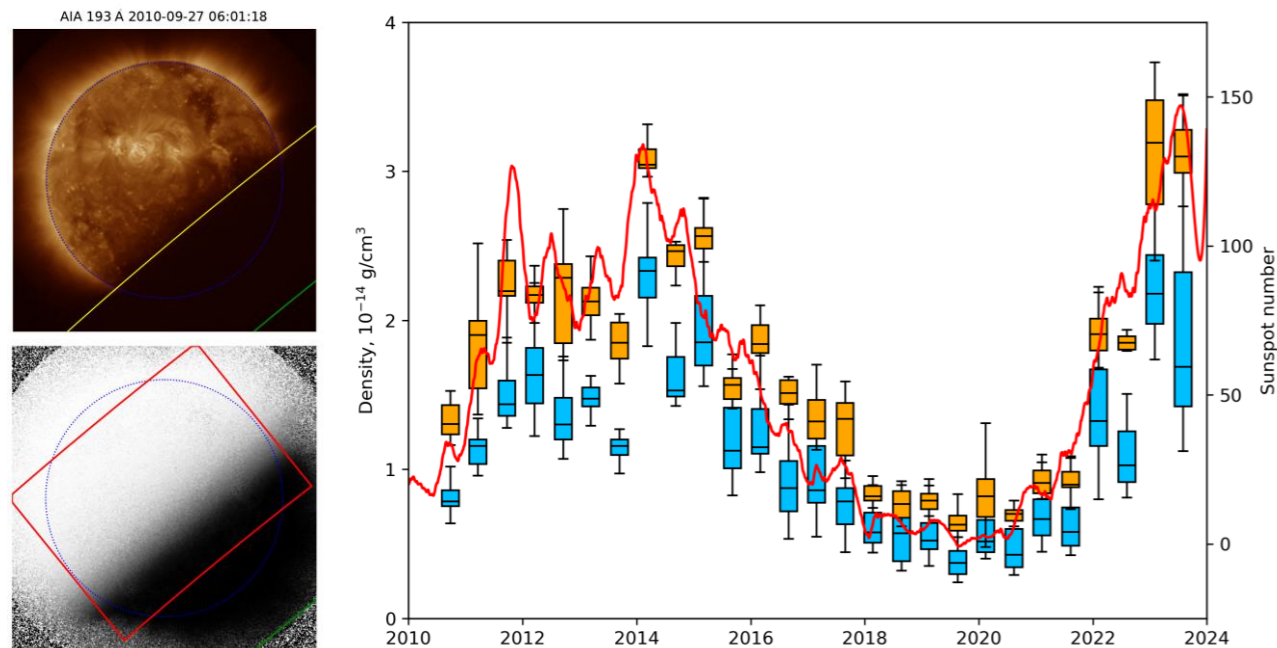
Лобода И.П., Кириченко А.С., Ульянов А.С., Рева А.А., Богачев С.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ivan.loboda@cosmos.ru](mailto:ivan.loboda@cosmos.ru)

Знание и прогнозирование состояния верхней атмосферы Земли (термосферы), имеет решающее значение для работы спутников на низких околоземных орбитах, а также важно в качестве граничного условия для климатических моделей. При этом состояние термосферы в значительной мере определяется поглощением коротковолнового излучения Солнца, что необходимо учитывать при построении моделей, точность которых, в свою очередь, ограничена недостатком соответствующих экспериментальных данных.

В данной работе мы использовали наблюдения Обсерватории солнечной динамики (SDO) в четырех каналах вакуумного ультрафиолета (ВУФ) на длинах волн 17.1, 19.3, 22.1 и 30.4 нм во время сезонов затмений спутника на геосинхронной орбите для получения температуры и профилей плотности основных компонент O и N<sub>2</sub> в диапазоне высот 200 – 400 км.

На основании полученных данных были исследованы широтные и временные вариации параметров термосферы, а также их корреляция с потоками радио-, УФ, ВУФ и МР излучения Солнца и индексами геомагнитной активности. Помимо этого, полученные результаты были сопоставлены с основными атмосферными моделями (NRLMSISE-00, DTM-2013 и JB2008). Показано, что несмотря на хорошую точность существующих моделей, имеется возможность их дальнейшего улучшения, в том числе с помощью полученных экспериментальных данных.



Слева: Затенённое изображение Солнца в канале 19.3 нм (сверху) и отношение затенённого и незатенённого изображений (снизу). Обозначены лимб (синий пунктир), поверхность Земли (зелёная линия), изогипса 200 км (жёлтая линия) и область исследования (красная линия). Справа: Изменение полной плотности атмосферы на высоте 300 км в течение солнечного цикла на утреннем (голубой) и вечернем (оранжевый) терминаторах. Для сравнения приведено сглаженное число Вольфа (красная линия).

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-10157, <https://rscf.ru/project/21-72-10157>.

## ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ДИНАМИКУ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И СЕЙСМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ

Зотов О.Д., Клайн Б.И.

ИФЗ РАН, ГО "БОРОК" ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, [ozotov@inbox.ru](mailto:ozotov@inbox.ru)

Проведен сравнительный анализ динамики параметра  $b$ , компонент межпланетного (ММП) и земного (МПЗ) магнитных полей, энергетических параметров солнечного ветра (параметры Акасофу и Кана-Ли) и сейсмической активности. Параметр  $b$ , равный отношению теплового (плазменного) давления к магнитному, отражает уровень турбулентности плазмы солнечного ветра (СВ). Когда плазменное давление сравнимо с магнитным, уровень турбулентности достигает максимума. Соответственно при увеличении параметра  $b$  турбулентность плазмы СВ понижается. Параметр Акасофу характеризует поток электромагнитной энергии, проникающей в магнитосферу, параметр Кана-Ли связан с электрическим полем пересоединения.

Использованы часовые/суточные значения вышеуказанных параметров ММП и СВ (база данных OMNI, <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/omniweb>, 1964-2018 г.г), каталог геомагнитных бурь за период 1964-2010 г.г, представленный на сайте Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике, Москва ([http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic\\_storms.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_storms.ru.html)) и часовые суммы числа землетрясений (каталог Национального информационного центра геологической службы США USGS/NEIC, 1973–2019 г.г., [http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic\\_global.html](http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html)).

Рассмотрена связь турбулентности и энергетических параметров СВ с секторной структурой ММП, с так называемыми интервалами "порядка" и "хаоса" в магнитосфере Земли и с геомагнитными бурями. Показано, что в дни, когда Земля не пересекает границы секторов ММП, или когда в магнитосфере Земли наблюдаются интервалы "хаоса", или магнитные бури уровень турбулентности СВ повышается. При этом увеличивается поток электромагнитной энергии, проникающей в магнитосферу. Обнаружена связь сейсмической активности Земли с уровнем турбулентности СВ. Усиление турбулентности (уменьшение параметра  $b$ ) приводит к уменьшению сейсмической активности, а ее ослабление (увеличение параметра  $b$ ) приводит к увеличению сейсмической активности. По-видимому, турбулентность СВ, вызывающая комплекс процессов в магнитосфере Земли, косвенным образом оказывает влияние и на динамику сейсмической активности.

## ВЕКОВЫЕ ТРЕНДЫ И ЦИКЛЫ В СПЕКТРАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ИХ СВЯЗЬ И ПЛАНЕТНОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ

**Кузнецова Т.В.**

*ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [tvkuz3@gmail.com](mailto:tvkuz3@gmail.com)*

Используется МГМ метод спектрального анализа (Метод Глобального Минимума), позволяющий выделять из данных тренды и нестационарные колебания самосогласованно. Спектр геомагнитного склонения (D) получен на основе измерений в обсерваториях с 1600 года, расположенных  $\pm 5$  градусов широты и долготы от Хартленда. Для расчета спектров солнечной активности был использован ряд чисел Вольфа (W) с 1700 г. Обсуждаются только периоды колебаний (T), имеющие уровень статистической значимости выше 95%.

К вековым трендам в спектре D относятся колебания с средними периодами T и амплитудами (A): T=715 лет с A=23.6°, T=240 л. с A=3.0°, T=132 г. с A=0.5°. Цель исследования – установить связь вековых трендов с основным 11-летним циклом в спектрах W и компонентами спектра D. Используются результаты Jose [1] и других авторов о связи изменений W с движением Солнца относительно центра масс солнечной системы SM с T=178,7-178,8 л, содержащий 9 соединений Юпитер-Сатурн JS (T=178,7=9JS, JS=19.855).

Самый мощный вековой тренд с периодом 715 л содержит 4 периода движения Солнца SM (715=178,75x4=4SM), 36 периодов соединения JS и 65 11-летних циклов (715=36JS=65x11). В спектре D есть T=(39.7 $\pm$ 0.2) л, который является периодом 18й гармоники тренда с T=715 лет (715/18=39,72), включающим 2 периода JS (2JS=39,72), связанных с движением Солнца SM (2x178,75)/9=39,72). Тренд с близким T=715,7 лет содержит также 56 периодов соединения Юпитер-Нептун JN (715,7=56x12,78)

Вековой тренд с второй по величине амплитудой и T=(240 $\pm$ 2) лет в спектре D включает 12 периодов соединения JS (12x19,86=12JS=238,3). T=238,3 г представляет также период 3й гармоники основного тренда с T=715 лет (715/3=238,3). В спектре W нестационарная компонента с T=240 $\pm$ 3 л была получена нами ранее. В спектрах D и W есть общий период T=242 г, включающий 22 11-летних циклов и 11 22-летних (242=22x11). В спектре W есть 10я гармоника 240-летних колебаний с T=24 г, присутствующая также в нашем спектре горизонтальной составляющей геомагнитного поля H в Хартленде.

Вековой тренд в спектре D с T=132.0 $\pm$ 1 г, включает 12 11-летних циклов (12x11) и 6 22-летних (6x22). Сложная нестационарная компонента спектра D с T=4.24 $\pm$ 0.02 лет имеет наибольшую амплитуду в диапазоне периодов менее 64 лет. Верхний предел допустимых периодов равен периоду 31й гармоники этого векового цикла (132/31=4.258=JN/3). Нижний предел периодов равен 39й гармонике орбитального движения Нептуна N и 42й гармонике движения Солнца SM (T<sub>1b</sub>=4.225=N/39=SM/42, где N=164.79, SM=178.7).

Проведенное исследование на основе спектров D и W, которые включают самосогласованно периодические колебания с большими периодами (тренды) и нестационарные колебания с периодами 11-летних солнечных циклов W позволяет сделать вывод, что динамические силы, воздействующие на Солнце движением планет, являются одной из важных причин солнечной активности и изменений геомагнитного поля. Изменения в длинно-периодной части спектра определяют изменения и в его коротко-периодной. Космический климат определяет космическую погоду как на Солнце, так и на Земле.

1. Jose, P.D. // *Astronomical Journal* 1965. V. 70. P. 193.

## ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В КОЛЕБАНИЯХ ТРАЕКТОРИЙ СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ: НОВЫЕ ДАННЫЕ

**Веретененко С.В., Дмитриев П.Б.**

*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [s.veretenenko@mail.ioffe.ru](mailto:s.veretenenko@mail.ioffe.ru)*

Продолжено исследование возможного влияния солнечной активности на основные траектории внетропических циклонов в холодное полугодие (период интенсивного циклогенеза) в различных частях Северной Атлантики. Проведено сравнение долговременных колебаний широты шторм-треков (преимущественных направлений движения циклонов) в областях, расположенных к западу и востоку от Гринвичского меридиана. Обнаружено, что вековые колебания широты шторм-треков (с периодами ~80-100 лет) наиболее четко выражены в западной части Северной Атлантики (область долгот 60-40°W) и полностью пропадают в ее восточной части (0-20°E), где доминируют мультидекадные колебания с периодами ~50-60 лет. Бидекадные колебания широты шторм-треков (отклонения траекторий циклонов к северу в четных солнечных циклах) имеют наибольшую амплитуду в районе Исландского минимума и заметно ослабевают к востоку от Гринвича. Показано, что колебания траекторий циклонов, наблюдаемые на вековой и бидекадной временных шкалах, могут быть связаны с солнечными циклами Глайсберга и Хейла, соответственно.

Исследовано возможное влияние квазидвухлетних осцилляций атмосферы (КДО) на бидекадные колебания траекторий циклонов. Обнаружено, что смещения траекторий циклонов в четных и нечетных солнечных циклах не зависят от фазы КДО. Показано, что на положение траекторий североатлантических циклонов оказывает влияние интенсивность стратосферного полярного вихря. Предположено, что возможными причинами колебаний интенсивности вихря, вызывающих изменения широты основных траекторий циклонов, являются изменения химического состава и температурного режима средней полярной стратосферы, обусловленные вариациями потока галактических космических лучей и геомагнитной активностью.

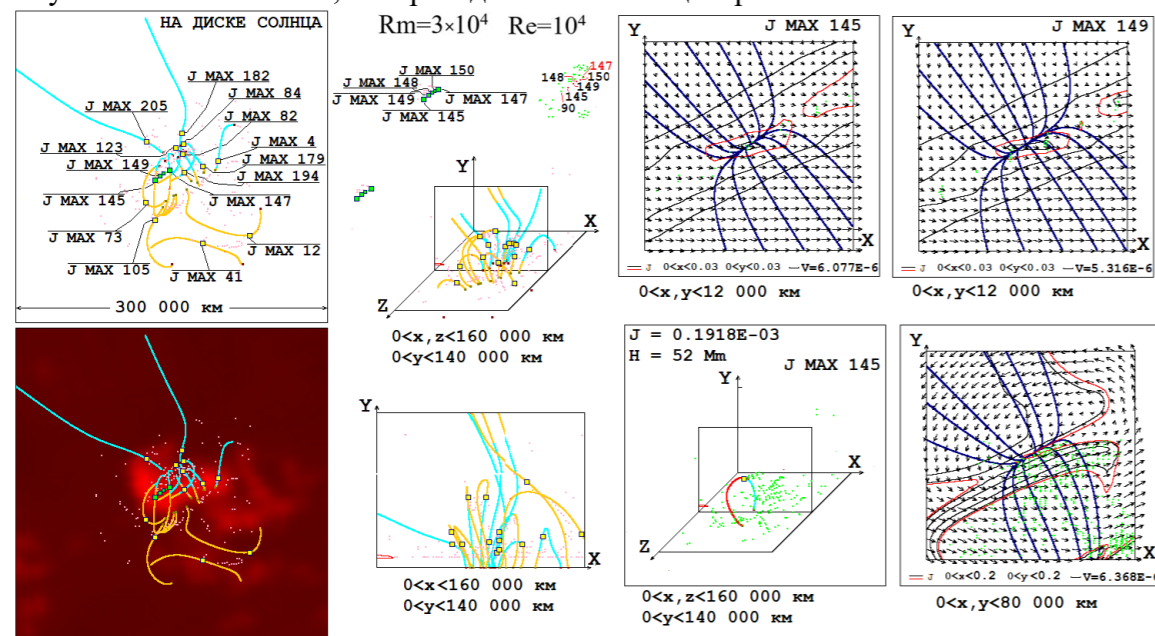
# СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ С НАБЛЮДЕНИЯМИ: ПОЯВЛЕНИЕ В ОБЛАСТИ ЯРКОГО ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

Подгорный А.И.<sup>1</sup>, Подгорный И.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru

<sup>2</sup>ИНАСАН, г. Москва, Россия

Медленное накопление магнитной энергии для солнечной вспышки в короне, а затем её быстрое освобождение, объясняет физический механизм С.И. Сыроватского, основанный на накоплении энергии в магнитном поле токового слоя, образующегося в окрестности особой линии магнитного поля. Быстрое освобождение магнитной энергии токового слоя приводит к наблюдаемым проявлениям вспышки, которые объясняются электродинамической моделью солнечной вспышки, предложенной И. М. Подгорным. Поскольку из наблюдений невозможно получить конфигурацию магнитного поля в короне, для изучения механизма солнечной вспышки необходимо проводить магнитогидродинамическое (МГД) моделирование в солнечной короне. При постановке задачи никаких предположений о механизме солнечной вспышки не делалось. Для определения положений токовых слоев разработана система графического поиска, основанная на определении положений максимумов плотности тока, которые достигаются в центрах токовых слоев.



Проведено детальное сравнение результатов МГД моделирования момент 02:32:05 26 мая 2003 года за три часа до вспышки M 1.9 с наблюдениями радиоизлучения на частоте 17 ГГц в активной области АО 10365, полученными на радиогелиографе Нобеяма. В этот момент происходит предвспышечный нагрев плазмы токами. Значительная часть максимумов плотности тока располагается в яркой области излучения, что подтверждает механизм токового слоя для солнечной вспышки. При этом достаточно много максимумов располагается на значительном расстоянии от яркой области излучения. Решить проблему совпадения полученных положений вспышек с наблюдаемыми яркими областями излучения должно помочь начавшееся исследование, использующее представление о накоплении энергии вспышки в магнитном поле протяженного токового слоя. Этот протяженный токовый слой содержит магнитные линии, которые проходят через близко расположенные максимумы плотности тока, образующие общую цепочку, показанную на рисунке.

# ПРОСТЕЙШАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНОЙ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ГЕОДИНАМО

Старченко С.В.

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

Цель этой работы – на базе интегральных уравнений геодинамо, создать простейшую, но при этом достоверную динамическую систему для удельной магнитной и кинетической энергий. Рассматриваемые энергии практически эквивалентны среднеквадратичной скорости и среднеквадратичному магнитному полю в жидком ядре Земли при его известной плотности.

В данной работе исследованы стационарные точки полученной оригинальной системы. Множеству других проявлений полученной системы предполагается посвятить последующие работы.

Для получения уравнения эволюции среднеквадратичной скорости  $u(t)$ , проинтегрируем по всему объему жидкого ядра Земли скалярное произведение вектора скорости на уравнение импульса и поделим результат на массу ядра. Получим, что  $udu/dt$  равно удельной интегральной мощности силы плавучести Архимеда  $A$  за вычетом удельных мощностей сил диффузии  $u^2/T_u$  и Лоренца  $ub^2/(L\rho\mu_0)$ . Здесь интегралы представлены через их составляющие, которым они прямо пропорциональны. Время  $T_u$  – диффузионное,  $b$  – среднеквадратичное магнитное поле,  $L$  – характерный внешний масштаб, деленный на типичный синус угла между векторами скорости и магнитного поля, а  $\rho$  – средняя плотность. Аналогичным образом проинтегрируем по объему скалярное произведение вектора магнитного поля на уравнение индукции. Окончательно получим систему

$$db/dt = ub/L - b/T_b, \quad udu/dt = A - ub^2/(L\rho\mu_0) - u^2/T_u. \quad (1, 2)$$

Устойчивые стационарные точки этой системы:

$$u_s = L/T_b, \quad b_s = \pm \{\rho\mu_0 [T_b A - L^2/(T_u T_b)]\}^{1/2}. \quad (3, 4)$$

При естественных для геодинамо  $u_s = 1$  мм/с и  $T_b = 30$  Гс получаем  $L = 30$  Мм, что на порядок превышает радиус ядра, свидетельствуя о соответствующем превышении критического уровня геодинамо. При общепринятой геодинамо мощности  $A = 0.3$  пВт/кг получим, что для генерации магнитного поля необходимо, следующее из (4) и приведенных выше оценок, выполнение порогового условия

$$T_u > 3 \text{ Мс}. \quad (5)$$

Если это условие выполняется с хорошим запасом – то устойчивое поле  $b_s$  (4) около 10 мТл (100 Гс) в недрах жидкого ядра. Напротив – возможно существенное уменьшение величины магнитного поля и приход в окрестность неустойчивых стационарных точек системы (1-2):

$$b_c = 0, \quad u_c = \pm (T_u A)^{1/2}. \quad (6)$$

Это может соответствовать как инверсиям/экскурсам, так и более значимым, но менее вероятным, катастрофам с практически обнулением магнитного поля.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Система уравнений геодинамо корректно упрощена до динамической системы для среднеквадратичной скорости и магнитного поля в жидком ядре Земли.
2. Устойчивые стационарные точки этой системы дают существенное превышение критического уровня геодинамо и большие значения среднеквадратичного магнитного поля порядка 10 мТл. При этом удельная магнитная энергия ( $\sim 10^{-2}$  Дж/кг) почти на четыре порядка превосходит удельную кинетическую энергию.
3. Неустойчивые стационарные точки могут быть увязаны с инверсиями и экскурсами, а возможно и с катастрофическим обнулением магнитного поля.

## ДВА ПАРАДОКСА: КАК СВЯЗАНЫ ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛОВ С ПАРАДОКСОМ СЛАБОГО МОЛОДОГО СОЛНЦА.

Храмова Е. Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [sinop@yandex.ru](mailto:sinop@yandex.ru)

Парадокс слабого молодого Солнца заключается в противоречии между палеоклиматическими данными и астрофизическими моделями эволюции Солнца. Исходя из звездного моделирования, солнечная светимость 4 млрд лет назад составляла примерно 75% современной, что должно было бы привести к замерзанию планеты. По данным же палеонтологов средняя температура на Земле в этот период была около 60-70°C, по самым скромным оценкам, не ниже 40°C.

За пятьдесят лет существования парадокса было предложено несколько гипотез его решения, но ни одна на данный момент не признана достаточно убедительной. Самым очевидным решением казалась гипотеза Карла Сагана и Джорджа Маллена [1], заключающаяся в усилении парникового эффекта на молодой Земле. Но данные минералогии наложили ограничение на увеличение концентрации парниковых газов, достаточное для решения парадокса [2].

Автор предлагает гипотезу органической пленки, которая сняла бы это противоречие. В бескислородной атмосфере молодой Земли на поверхности водоемов должна была образовываться органическая пленка, способная существенно изменить газообмен между атмосферой и океаном. К тому же, пленка обладает рядом свойств, которые могли внести вклад в разогрев атмосферы [3,4].

Неожиданным образом, наличие органической пленки на поверхности водоемов может объяснить и другой парадокс – несоответствие спектров поглощения хлорофиллов спектру солнечного излучения. Максимум солнечного излучения лежит в зеленой области спектра, в то время как максимумы спектров поглощения хлорофиллов в синей и красной области. Так как живая природа обладает удивительной адаптационной пластичностью, это несоответствие нуждается в объяснении. В качестве аналога древних органических пленок автором рассмотрены спектры поглощения и флуоресценции нефтяных пленок [5]. Выявленные соответствия могут помочь понять не только процесс зарождения и эволюции фотосинтеза на Земле, но и получить некоторую информацию об особенностях излучения молодого Солнца.

## ЧАСТОТНОСТЬ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЯТНООБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЕ

Осипова А. А.<sup>1</sup>, Наговицын Ю. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, [osisasha@mail.ru](mailto:osisasha@mail.ru)

<sup>2</sup>Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Современная 9000-летняя радиоуглеродная реконструкция солнечной активности [1], шкалированная к индексу суммарных площадей солнечных пятен, с помощью вейвлет-преобразования скорректирована за возможное уменьшение амплитуд для периодов вариаций порядка нескольких десятилетий. Это привело к изменению частотности проявления экстремальных значений активности на длительных временах по сравнению с нашей предыдущей работой [2]. В особенности оценки коснулись глубоких минимумов типа Маундера и Шперера, а также больших максимумов.

Обсуждается применение полученных результатов к звездам солнечного типа с магнитными циклами.

1. Wu C.J., Usoskin I.G., Krivova N., Kovaltsov G.A., Baroni M., Bard E., Solanki S.K. // *Astron. Astrophys.* 2018. V. **615**. Id. A93.

2. Наговицын Ю.А., Осипова А.А. // *Письма в Астрономический журнал.* 2023. Т.49. С.506.

1. C. Sagan and G. Mullen. *Science*, 177:52-56, 1972.
2. M. T. Rosing, D. K. Bird et al, *Nature* 464, 744-747, 2010.
3. Khramova, E.G., 2017. The faint young Sun paradox. «*Life and Universe*» (Zhizn i Vselennaya), Collective Monograph, V.Obridko and M.Ragulskaya (eds.), Spb, BBM, pp. 74-91 (in Russian).
4. Obridko V., Ragulskaya M., Khramova E. Young Sun, galactic processes and origin of life. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, v. 197
5. М.В. Рагульская, В.Н. Обридко, Е.Г. Храмова. Галактические факторы, молодое Солнце, Земля и биофизика живых систем. *Биофизика*, 2020, Т. 65, № 4, стр. 804-817.

## РАЗНОМАСШТАБНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ: КОМБИНАТОРИКА И ВОЗМОЖНЫЕ ПРЕДИКТОРЫ

Рагульская М. В.

*ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [ra\\_mary@mail.ru](mailto:ra_mary@mail.ru)*

Разномасштабные циклы солнечной активности (СА) активно исследуются [1], но их принято рассматривать по отдельности, причем основное внимание обычно уделяется событиям максимумов СА. Однако в первой четверти 21 века сложилась уникальная гелиогеофизическая ситуация [2]: минимумы 24 и 25 циклов СА совпали с квази – столетним минимумом цикла Гляйсберга, а возможно – и с минимумами более длинных циклов. Одним из возможных сценариев наложения минимумов разномасштабных циклов может являться длительное понижение СА до середины 21 века [3]. Для прогнозов времени наступления максимума 11-летнего цикла и его амплитуды эффективно используются динамика полярного поля Солнца и его пятой зональной гармоники [4,5]. Однако, гелиофизических предикторов экстремумов более длинных циклов СА пока не выявлено. При этом реакция биосферных процессов оказалась опережающей. В 23-25 циклах СА количество вирусных пандемий более чем в 3 раза превысило их количество за предыдущие 7 циклов СА [6]. Аналогичное увеличение вирусных пандемий наблюдалось в конце 19 века, и оно тоже совпало с низкой солнечной активностью и предыдущим квази-столетним минимумом СА. В отличие от бактериальных пандемий, развивающихся в максимумах СА, вирусные пандемии происходят и в минимумах, и в максимумах циклов. Причем интенсивность вирусных эпидемий в минимумах цикла может превышать эпидемии максимума до 2-3 раз. Также пандемии некоторых вирусных заболеваний (например, кори) могут служить предиктором времени максимума или минимума солнечного цикла, поскольку развиваются за 12-15 месяцев до экстремума СА. По-видимому, в минимумах СА основным биотропным фактором, влияющим на мутации вирусов, являются галактические космические лучи.

Таким образом, эпидемиологическая роль комбинаторики минимумов цикла Гляйсберга и минимумов 11-летнего цикла СА существенно недооценена. При прогнозировании по динамике полярного поля и нечетным гармоникам глобального поля Солнца низком текущем 25 цикле СА (не выше 130) и возможных низких нескольких следующих циклах, вирусные эпидемии ближайших циклов СА будут происходить и в максимумах и в минимумах циклов, и могут служить предикторами экстремумов разномасштабных циклов СА.

1. Nagovitsyn Yu.A., Osipova A.A // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, V. 505, I. 1, P.1206
2. А. В. Белов и др. // ГА, 2023, Т.63., №4, С. 534
3. Ишков В. Н. // ГА, 2021, Т.61, №6, С. 704
4. Obridko V. et al // АС, 2023, № 1658
5. Рагульская М.В., Обридко В.Н. // Труды !7-й Всероссийской конференции по физике Солнца, 2023, ГАО Пулково, С.277
6. Рагульская М. В. // ГА, 2023, Т.63, №7, С. 984

## СОЗДАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЛИНГВИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБУСЛОВЛЕННЫХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ КОЛЛЕКТИВНЫХ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Ожередов В.А., Бреус Т.К.

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ozheredov2016@gmail.com](mailto:ozheredov2016@gmail.com)*

Создание больших языковых моделей (Large Language Models, LLM) обычно требует огромного вычислительного ресурса типа кластера видеокарт или суперкомпьютера. Это затрудняет применения таких моделей в задачах гелиобиологии, учитывая то обстоятельство, что модели для этих задач приходится обучать с нуля. Мы разработали статистический подход к созданию таких моделей, основанный на повторяемости паттернов (биграмм и триграмм) в текстах определенной направленности. Далее, алгоритм может определять преобладание таких направленностей в привязанных к точному времени создания сообщениях (например, на форуме) и вычислять корреляцию его динамики с факторами космической погоды. Впервые нами показано, что коррелирует именно не само преобладание, а его разброс возле сезонно меняющихся равновесных значений, для чего нами были применены методы анализа морфологии трендов.



## ДЛИТЕЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ПУЛЬСА С АРТЕРИАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ И ВЗАИМООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПОКАЗАНИЯМИ

**Шибает И.Г., Шибает А.И.**

*ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, [ishib@izmiran.ru](mailto:ishib@izmiran.ru)*

В основу исследования положены длительные наблюдения систолического артериального давления (САД), диастолического артериального давления (ДАД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС), на фоне приёма гипотензивных препаратов, взятые из дневника самоконтроля пациента (мужчина, 1940 г. рождения) с гипертонической болезнью II стадии 2-й степени. Измерения проводились ежедневно дважды в сутки: утром, после сна, и вечером перед ужином. В предыдущих публикациях [1, 2] описана методика наблюдения (самоконтроля) и дана общая оценка показаний более чем за 17 лет. Упор делался на статистическое описание и спектральный анализ каждого из рядов наблюдения. Также показана эффективность анализа таких функций, как корреляционные отношения и нормированное пульсовое давление, т.е. функций от двух регистрируемых параметров мониторинга. 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.

Данная работа, используя кластерный анализ и метод главных компонент, продолжает анализ рядов САД, ДАД и ЧСС. Проводится классификация показаний и состояния организма.

1. Isaikina O., Yu. Kuksa, I. Shibaev Estimation of Stability of Arterial Pressure and Pulse at Changes of Geomagnetic Data and Atmospheric Pressure / Annual Research & Review in Biology 9(1): 1-11, 2016. DOI: 10.9734/ARRB/2016/21656

2. Kuksa Yu., Shibaev I., Isaikina O. Continuous monitoring of arterial blood pressure and pulse: comparison of morning and evening readings// Annual Research & Review in Biology, 30(2), 2019, 1-11. DOI: 10.9734/ARRB/2018/45798

## ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА АКТИВНОСТЬ АТМОСФЕРНЫХ И СОВРЕМЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАБАРДИНО-БАЛКАРИИ В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ

**Мальнева И.В., Черкесов А.А.**

*ФБГУ ВГИ, Нальчик, Россия, [malnir@mail.ru](mailto:malnir@mail.ru)*

2022 и 2023 годы на Северном полушарии отличались обилием природных катастроф, в первую очередь, погодных аномалий – волны экстремальной жары, разрушительные лесные пожары. Следует отметить, что лето 2023 г. было не просто жарким, а чрезвычайно жарким, особенно в Западной Европе, а также на всей территории Северного Кавказа. Средние месячные значения температуры воздуха и количества осадков в июле и августе 2022 и 2023 годов значительно отличаются от средних многолетних значений.

В работе представлены результаты сравнений космической погоды и современных геологических процессов в Кабардино-Балкарии за последние годы. При сильных взрывах на Солнце выделялось колоссальное количество энергии, которая затронула магнитное поле Земли и повлияла на атмосферу Земли, прежде всего – на характер атмосферной циркуляции. Значительно активизировалась южная меридиональная циркуляция. Однако, циклоны, приходящие со Средиземного моря, оказали влияние на катастрофические погодные процессы в Крыму и на севере Черноморского побережья Кавказа, а затем прошли севернее Кабардино-Балкарии. Только в июне циклоны проявили свое влияние в Северной Осетии, Чечне и Дагестане, в основном – в среднегорье, где обильные осадки за несколько дней в июне вызвали активизацию селей и оползней в глинистых породах.

Также представлены некоторые примеры селевых проявлений, где основным триггером для начала этих процессов могли послужить солнечная активность. Так, в конце июня 2022 года после ливней сошли небольшие сели в Черекском ущелье (всего 1–3 тыс. м<sup>3</sup>). В ущелье р. Черек Безенгийский вечером 13 августа 2022 г. при отсутствии осадков сошёл сель по р. Мижирги. В Баксанском ущелье прошёл сель по р. Герхожансу 5 августа 2022 г. при незначительной роли атмосферных осадков в формировании селя. Необычным был сель в урочище Джилы-Су 4 октября 2022 г., рассмотренный нами в докладе на конференции «физика плазмы в солнечной системе» в 2023 году. В 2023 году проявления селей на наиболее селеопасных реках не отмечалось.

Для исследования влияния солнечной активности на атмосферные процессы, в том числе на вариации напряженности электрического поля атмосферы, был рассмотрен суточный ход напряженности электрического поля атмосферы в дни, которые попадают под критерий «хорошей погоды» (облачность менее трех баллов, без осадков). Солнечная активность характеризовалась числом вспышек разного класса. Данные напряженности электрического поля были получены измерителем EFM 550, который установлен на высокогорной метеостанции «пик Чегет» (3100 м над уровнем моря). Получено, что при сильной солнечной активности нарушается естественный суточный ход напряженности электрического поля приземной атмосферы.

## ВАРИАЦИИ ПОЛЯРНОГО МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 23-24 МАРТА 2023

Куликов Ю.Ю., Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., Лосев А.Н.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [yuyukul@appl.sci-nnov.ru](mailto:yuyukul@appl.sci-nnov.ru)

Приводятся результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы в Апатитах (67N, 33E) в зимний сезон 2022 – 2023 гг. В измерениях был использован мобильный микроволновый спектрометр с рабочей частотой 110.8 ГГц, который позволяет отслеживать вариации O<sub>3</sub> с 15-ти минутным временным разрешением на высотах средней атмосферы. Выполнены оценки вертикального профиля озона в интервале высот 22 – 60 км. Эти результаты были сопоставлены со спутниковыми данными MLS/Aura о высотных профилях озона и температуры. В настоящем сообщении обсуждается поведение озона средней атмосферы в феврале-марте 2023 года. Изменения озона происходили на фоне внезапного стратосферного потепления (ВСП), которое случилось в середине февраля. ВСП сопровождалось экстраординарным ростом общего содержания озона от 240 е.Д. до 500 е.Д. в течение месяца. Приведен масштаб изменений O<sub>3</sub> на уровнях 25, 40 и 60 км.

23-24 марта 2023 года геомагнитные обсерватории по всему миру зафиксировали наиболее крупную за последние несколько лет магнитную бурю, произошедшую на Земле и имеющую планетарный характер. Главная фаза бури началась в ~17:30 UT 23 марта. Наиболее интенсивная суббуря (балл события в пике 7.66) с максимумом в 21:30 UT и магнитной возмущенностью до ~ 1500 нТл наблюдалась преимущественно в авроральных широтах [1]. Предположительно буря была вызвана попаданием Земли в поток быстрого солнечного ветра. Такие потоки формируются на Солнце в так называемых корональных дырах – темных областях короны с открытыми линиями магнитного поля, вдоль которых происходит истечение вещества в межпланетное пространство.

Непрерывные наземные микроволновые наблюдения озона проводились с 21 по 26 марта, т.е. до и после магнитной бури. Суточные вариации мезосферного озона на высоте 60 км происходили без изменений.

Государственное задание ИПФ РАН (проект FFUF-2021-0008).

1. Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Громов С.В., Кананиди К.Х., Петров В.Г. Магнитная буря 23-24 марта 2023 г.: особенности геомагнитных возмущений во время главной фазы. Проблемы космофизики. Тезисы докладов. Дубна, 10 – 13 июля 2023.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГЛОБАЛЬНУЮ АТМОСФЕРНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ

Диденко К.А., Коваль А.В., Гаврилов Н.М., Головки А.Г., Ермакова Т.С.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Петродворец, Россия, [didenko@izmiran.ru](mailto:didenko@izmiran.ru)

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

С целью изучения влияния термосферных возмущений на изменения меридиональной циркуляции и температурного режима средней атмосферы при изменениях солнечной активности проведены численные расчеты с использованием нелинейной механистической модели средней и верхней атмосферы МСВА. Получены два ансамбля решений, состоящие из 16 пар реализаций, соответствующих высокой и низкой солнечной активности. Для того, чтобы исследовать только термосферные возмущения при изменениях солнечной активности и их влияния на среднюю атмосферу, в радиационном блоке МСВА реализована возможность учитывать задаваемые различные значения F10.7 только на высотах выше 100 км.

Основным механизмом передачи эффекта от изменения солнечной активности в термосфере на нижележащие слои предполагается изменение условий распространения и отражения планетарных волн. Анализ и интерпретация взаимодействий планетарных волн со средним потоком проводится с помощью расчета потоков Элиассена-Палма, и их дивергенции, а также расчета остаточной меридиональной циркуляции. Остаточная меридиональная циркуляция определяется как суперпозиция вихревого и адвективного переноса воздушных масс в меридиональной плоскости, существенно влияющая также на температуру атмосферы. Проанализированы изменения потоков Элиассена-Палма и продемонстрирован эффект изменения отражения распространяющихся из тропосферы планетарных волн, который обусловлен существенным увеличением вертикального температурного градиента при высокой солнечной активности на высотах нижней термосферы. Для анализа волнового воздействия на остаточную меридиональную циркуляцию рассчитана ее вихревая составляющая. Результаты расчетов продемонстрировали, что эта вихревая составляющая существенно уменьшается в зимней стратосфере при высокой солнечной активности, приводя к охлаждению приполярной области и ослаблению остаточной меридиональной циркуляции в стратосфере.

Показано увеличение волновой активности в мезосфере-нижней термосфере Северного полушария, которое сопровождается усилением остаточной меридиональной циркуляции при высокой солнечной активности. Усиление меридионального переноса холодных воздушных масс из района летней мезосферы в зимнее полушарие вызывает охлаждение низко- и среднеширотной мезосферы. Высокоширотная зимняя мезосфера, в свою очередь, нагревается, и ключевую роль в этом играет усиление нисходящей ветви остаточной меридиональной циркуляции и, следовательно, адиабатическое нагревание элементов среды. Обнаруженные изменения атмосферных параметров локализуются главным образом вдоль волноводов планетарных волн, подтверждая критически важную роль их воздействия на глобальную циркуляцию.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом РФ, грант № 20-77-10006-П.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА АФТЕРШОКОВУЮ ЗОНУ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Новиков В.А.<sup>1</sup>, Сорокин В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, [novikov@ihed.ras.ru](mailto:novikov@ihed.ras.ru)

<sup>2</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [sova@izmiran.ru](mailto:sova@izmiran.ru)

На основе выполненных ранее численных исследований [1] показано, что сильные солнечные вспышки могут вызывать всплеск теллурических токов в земной коре того же порядка, что и искусственные источники тока ( $10^{-6}$ - $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>), которые привели к пространственно-временному перераспределению сейсмичности на Памире и Северном Тянь-Шане [2].

Для подтверждения численных оценок проведен статистический анализ воздействия 50 сильнейших солнечных вспышек X-класса (1997-2017) на глобальную сейсмическую активность, на очаги землетрясений, расположенные на освещенной части земного шара, и на очаги землетрясений, расположенные в радиусе 5000 км вокруг подсолнечной точки. Показано, что во всех случаях наблюдается повышение сейсмичности, особенно в районе вокруг подсолнечной точки (до 38%) в течение 10 суток после солнечной вспышки. При этом анализ последовательности афтершоков сильного землетрясения M=9,1 (Суматра-Андаманские острова, 26.12.2004) после солнечной вспышки класса X7.2 (20.01.2005) показал, что число землетрясений с магнитудой M 4.5 в афтершоковой зоне увеличивается более чем в 20 раз с задержкой в 7 суток (см. рис.).



Распределение суточного количества афтершоков сильного землетрясения M9.1 (Индонезия, 26.12.2004) до и после момента солнечной вспышки класса X7.2 (20.01.2005)

Для землетрясения в Дарфилде (M=7.1, Новая Зеландия) показано, что сильные солнечные вспышки класса X и M вероятно вызвали (с одной и той же задержкой 6 суток) два сильных афтершока (M>6) на разломе Порт-Хиллз, который наиболее чувствителен к внешнему электромагнитному воздействию с точки зрения его электропроводности и ориентации, совпадающей с направлением вектора плотности теллурических токов, вызванных солнечной вспышкой.

На основе полученных расчетных результатов и полевых наблюдений показана возможность использования природных электромагнитных триггерных явлений для краткосрочного прогноза землетрясений, особенно в афтершоковой зоне сильного землетрясения во время проведения спасательных работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственные задания ОИВТ РАН № 075-00270-24-00 и ИЗМИРАН №01201356396).

## ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТОВ ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

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

Наивысшие риски снижения уровня техносферной безопасности, вследствие эффектов воздействия космической погоды на высокоширотные объекты систем энергетического оборудования определяются в области аврорального овала.

Сопутствующий мониторинг параметров космической погоды и вариаций геомагнитного поля в Арктическом регионе на сегодняшний день ведется преимущественно посредством пары спутников и нескольких десятков магнитных станций, сконцентрированных главным образом на территории США, Канады, северной и центральной Европы. Сложившаяся ситуация практически как на текущий момент, так и на ближайшую перспективу исключает возможность оперативного диагностирования уровня геоиндуцированных токов (ГИТ) для большей части Арктической зоны РФ, где фактически единственным доступным индикатором состояния космической погоды являются полярные сияния.

В работе предлагается подход к интерпретации полярных сияний с целью оценки эффектов воздействия космической погоды на объекты и системы высокоширотной инфраструктуры. Так, на примере магистральной электрической сети «Северный транзит» было показано, что при появлении полярных сияний на севере, в зените и на юге относительно наблюдателя, наиболее вероятный (усредненный по 30 мин) уровень ГИТ токов составляет 0.08 А, 0.23 А, и 0.68 А соответственно. При этом вероятность того, что усредненный за полчаса уровень ГИТ превысит 2 А (для сияний на севере, в зените и на юге) составляет 6 %, 10 % и 15 % соответственно и экспоненциально снижается с увеличением их абсолютного значения.

### Литература

1. Зеленый Л.М., Петрукович А.А. Арктика. Космическая погода // Природа, № 9, 2015. С. 31–39.
2. Канониди Х.Д., Ораевский В.Н., Белов А.В., Гайдаш С.П., Лобков В.Л. Сбои в работе железнодорожной автоматики во время геомагнитных бурь // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: сборник материалов научно-практической конференции, 2002, С. 41–42.
3. Афанасьев И. Б., Батулин Ю. М., Белозёрский А. Г. и др. Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди. М.: РТСофт, 2005. 752 с.
4. Клименко М. В., Клименко В. В., Бессараб Ф. С. и др. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение радиоволн кв-диапазона. i – ионосферные эффекты // Геомагнетизм и аэрономия, т. 55, № 6, 2015, с. 769–789.
5. Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе // Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. Материалы Всероссийской научной конференции, посвящённой 30-летию ИПНГ РАН, 2017, С. 46.

1. Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. // Atmosphere 2023. V.14, P.458.

2. Зейгарник В.А., Богомолов Л.И., Новиков В.А. // Физика Земли 2022. №1. С.35-66.

## ОТКЛИК ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Миронова И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, [i.a.mironova@spbu.ru](mailto:i.a.mironova@spbu.ru)

В докладе предполагается показать последние результаты по исследованию отклика атмосферы/ионосферы на высыпания энергичных частиц от авроральных электронов до электронов релятивистских энергий, от магнитосферных протонов до протонов во время эруптивных событий. Будут показаны новые результаты в области изучения скоростей ионизации атмосферы и результаты воздействия энергичных частиц на атмосферу Земли во время разных солнечных протонных событий и геомагнитных бурь.

Оценка атмосферного отклика на высыпания энергичных частиц требует знания скоростей ионизации, создаваемых этими частицами. Временная и высотная изменчивость скоростей ионизации в атмосфере Земли зависит от энергетических спектров выпадающих частиц и применяемой функции отклика или параметризации скоростей ионизации атмосферы. В данной работе отдельно анализируются спектры полученные с различных спутников и аэростатных наблюдений за одинаковые промежутки времени. Процессы связанные с ионизацией приводят к образованию озон-разрушающих компонент атмосферы преимущественно в мезосфере и нижней термосфере. Озон является одним из ключевых компонентов радиационного нагрева и охлаждения стратосферы, изменения в его составе непосредственно влияют на температуру в мезосфере-стратосфере и запускают цепочку механизмов динамической связи, влияющих на циркуляцию атмосферы на больших территориях. Хотя основные процессы образования озон-разрушающих компонент, ведущих к потере озона, достаточно хорошо изучены, остаются большие неопределенности в отношении скоростей ионизации в атмосфере Земли связанные с энергетическим спектром выпадающих энергичных частиц.

В данной работе подробно исследуется ряд случаев высыпания электронов и протонов в разные периоды геомагнитной активности и различной интенсивности солнечных эруптивных событий. Оценки электронной концентрации в D слое ионосферы, образования озон-разрушающих компонент атмосферы и разрушения мезосферного озона даны во время геомагнитных возмущений и солнечных эруптивных событий с использованием одномерной фотохимической радиационно-конвективной модели с учетом ионной химии, а также с использованием трехмерной химико-климатической модели в периоды межсезонья.

Работы связанные с изучением эффектов от протонов в атмосфере Земли выполнены в рамках государственного задания СПбГУ. Работы связанные с изучением эффектов от электронов в атмосфере Земли выполнены в рамках договора между СПбГУ и МГУ по гранту РФФИ № 22-62-00048.

## ВЛИЯНИЕ ПРИЛИВНЫХ СИЛ ПЛАНЕТ НА ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [tvkuz3@gmail.com](mailto:tvkuz3@gmail.com)

Геомагнитное поле в каждой точке характеризуется вектором напряжённости  $F$ , величина и направление которого определяются тремя составляющими  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (северной, восточной и вертикальной) в прямоугольной системе координат. Проекция вектора  $F$  на горизонтальную плоскость - горизонтальная составляющая  $H$ , угол между географическим и магнитным меридианами - склонение  $D$ , что дает координаты конца вектора  $F$  вместе  $Z$  в цилиндрической системе ( $H D Z$ ).

Например, компонента с  $T=28$  лет с самой большой амплитудой  $A=68$  нТл в спектре  $Z$ -составляющей геомагнитного поля на основе данных с 1800 года Хартланда – это 2я гармоника цикла Фрица 56 лет, обнаруженная ранее в данных полярных сияний. Рассмотрена восточная составляющая  $Y$ . Компонента с  $T=21$  лет с  $A=7$  нТл есть в  $Y$  и  $D$ -компонентах геомагнитного поля в Хартланда. Она также связана с движением солнца относительно центра масс солнечной системы  $SM$  и 4й гармоникой орбитального периода Урана  $U$  ( $2SM/17=U/4=21$ , где  $U=84$  года). В  $Y$ -компоненте и  $D$ -компоненте геомагнитного поля в Хартланда с 1800 года есть также 12я гармоника Урана  $U$ , равная периоду 7 лет - одной из гармоник движения солнца относительно центра масс солнечной системы  $SM$  ( $2SM/51=7.0=U/12$ ).

Многочисленные планетные периоды обнаружены нами и при анализе спектра геомагнитного поля. Это подтверждает наличие механизмов, с помощью которых очень малые приливные силы планет могут оказывать существенное воздействие на магнитное поле Земли.

## ВЛИЯНИЕ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ (КДО) НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ОЗОНОВОЙ ДЫРЫ В АНТАРКТИКЕ

Габис И. П.

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, [gabis@aari.ru](mailto:gabis@aari.ru)

Интенсивность озоновой дыры в Антарктике изменяется от года к году в значительных пределах, демонстрируя вариации общего содержания озона (ОСО), площади озоновой дыры, ее продолжительности и других характеристик. Эти межгодовые вариации зависят от многих атмосферных процессов, однако доминирует влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО).

КДО наблюдаются в зональном ветре тропической стратосферы ( $\pm 12^\circ$  от экватора, от  $\sim 100$  до  $\sim 3$  гПа ( $\sim 16-40$  км) по высоте), но под их воздействием появляются вариации с аналогичным периодом изменения во многих явлениях вне тропических широт и на высотах от мезосферы до земной поверхности. Для объяснения зависимости интенсивности озоновой дыры от КДО было предложено несколько гипотез, однако, однозначного механизма до настоящего времени не установлено. Одной из основных проблем является постоянное изменение фазы КДО относительно сезонов года.

Нами предложен метод исследования влияния КДО на вариации атмосферных параметров, который основан на учете сезонных закономерностей КДО. При этом значительно уменьшается число возможных вариантов совпадения фаз циклов КДО с сезонами, что позволяет определить типичные особенности межгодовых вариаций характеристик антарктической озоновой дыры, обусловленные КДО.

## ОСОБЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ ВБЛИЗИ БУРИ КЭРРИНГТОНА 1-2 СЕНТЯБРЯ 1859 ГОДА

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [tvkuz3@gmail.com](mailto:tvkuz3@gmail.com)

Цель данной работы – поиск причин появления экстремальных магнитных бурь в прошлом и настоящем, чтобы оценивать вероятность их возникновения в будущем. Известная буря Кэррингтона произошла 1-2 сентября 1859 года. В июле 2012 года NASA STEREO-A зарегистрировал СМЕ с параметрами, которые могли вызвать бурю класса Кэррингтона, но СМЕ прошло мимо Земли. Исследование актуально, так как подобные бури возможны в будущем. Для анализа используется новый ряд солнечных пятен ISN.v.2 [1]. К анализу привлечены точные и известные периоды орбитального движения планет вокруг Солнца, которые способны описать основные характеристики солнечных циклов.

Буря Кэррингтона произошла во время 10го солнечного цикла SC10. Циклы, которые начинаются и заканчиваются максимумом позволяют найти дополнительные характеристики этой бури. Данные таблицы показывают [1], что максимум SC9 был в феврале 1848 года, а SC10 в феврале 1860. Интервал между максимумами SC9 и SC10 равен 12 годам  $T_{\max}(SC9-SC10)=12$  лет, который можно интерпретировать как период 7й гармоники орбитального движения Урана U:  $T_{\max}(SC10-SC9)=12 \text{ лет}=U/7$ , где  $U=84$  года.

Период между максимумами SC10 и SC11 равен 10.5 лет, который равен 8й гармонике орбитального движения Урана:  $T_{\max}(SC10-SC11)=10.5 \text{ л}=U/8$ . Фаза спада SC9 равна  $T_{\text{fall}}=7.833$  лет в [1]. Предлагаем, что  $T_{\text{fall}}=164.8/21=N/21=7.847$  л. Фаза роста SC10 равна  $T_{\text{rise}}=4.123$  в [1]. Предлагаем, что  $T_{\text{rise}}=164.8/40=N/40=4.120$  лет.

Итак, фаза спада  $T_{\text{fall}} SC9$  равна периоду 21й гармоники орбитального движения Нептуна N вокруг Солнца:  $T_{\text{fall}}(SC9)=164.8/21=N/21=7.847$  лет (где  $N=164.8$  л).  $T_{\text{fall}}=7.833$  года в [1]. Разница между величинами в [1] и предложенной здесь интерпретацией  $\Delta=0.014$  г=5.1дней. Фаза роста SC10 равна  $T_{\text{rise}}=4.123$  года в [1]. Предлагается:  $T_{\text{rise}}=164.8/40=N/40=4.120$ . Разница между [1] и предложенной здесь интерпретацией  $\Delta=0.003$  года. Следовательно, разница 5.1 дней между интерпретацией в [1] и здесь связана с определением минимума SC9/SC10.

### Литература

1. List of solar cycles (ISN.v.2.0) [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_solar\\_cycles](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles)

## СРАВНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

Шлык Н.С., Маурчев Е.А., Абунина М.А., Диденко К.А., Абунин А.А., Белов А.В.

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

Выполнено численное моделирование прохождения протонов первичных космических лучей через атмосферу Земли для энергетических спектров нескольких протонных возрастных групп. Рассмотрены семь событий последних трех солнечных циклов (см. таблицу). Описывается различие во влиянии солнечных протонов на атмосферу Земли для событий со схожими солнечными источниками (мощность вспышки, гелиокоординаты), но имеющими разные характеристики потоков ускоренных частиц. Проведен сравнительный анализ характеристик соответствующих вспышек и корональных выбросов массы, а также потоков первичных протонов разных энергий (>10 МэВ, >100 МэВ) по данным аппаратов серии GOES. Важным результатом работы являются количественные оценки скорости ионизации атмосферы в этих событиях для широкого диапазона высот (от уровня моря до 98 км) и различных значений жесткости геомагнитного обрезания (0.17 и 0.64 ГВ). В таблице также приведены рассчитанные значения скорости ионизации атмосферы на высотах 20 и 60 км для частиц с жесткостью геомагнитного обрезания 0.17 ГВ.

Таблица. Основные характеристики рассматриваемых событий.

Группа	№ события	СЦ	Дата и время вспышки	Балл вспышки	Координаты	Дата и время КВМ	Скорость КВМ, км/с	P10, pfu	P100, pfu	GLE, %	Примечания	Скорость ионизации (20 км), см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	Скорость ионизации (60 км), см <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>
I	1	23	2001.04.15 13:19	X14.4	S20W85	2001.04.15 14:06	1199	951	250	237	GLE60	2380.5	132.0
	2	24	2017.09.10 15:35	X8.2	S8W88	2017.09.10 16:00	3163	1040	68	6	GLE72	412.2	31.1
II	3	23	2001.04.10 05:06	X2.3	S23W09	2001.04.10 05:30	2411	355	0.5	0		26.5	454.7
	4	24	2014.01.07 18:04	X1.2	S15W11	2014.01.07 18:24	1830	900	4	0		39.2	4309.3
III	5	23	2000.11.08 22:42	M7.4	N10W77	2000.11.08 23:06	1738	14800	451	0.1	Sub-GLE	134.1	1.3e+5
	6	24	2012.05.17 01:25	M5.1	N11W76	2012.05.17 01:48	1582	300	20	15	GLE71	1315.6	182.3
	7	25	2023.07.17 23:37	M5.7	S26W87	2023.07.17 23:36	1385	620	0	0		26.5	6.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ЧИСЛА УРАГАНОВ С СРЕДНЕГОДОВЫМ ИНДЕКСОМ ТЕМПЕРАТУРЫ СУШИ И ОКЕАНА.

В.А. Лаптухов

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

В данной работе было обнаружено существование высокой корреляции между количеством тропических ураганов в северной Атлантике и среднегодовым индексом температуры суши и океана в северном полушарии Земли. Высокий коэффициент корреляции достигается только при сдвиге данных измерений числа ураганов на девять лет вперед при усреднении десятилетним скользящим средним среднегодового индекса температуры суши и океана и числа ураганов. Здесь коэффициент корреляции составил 0.915 на временном участке с 1930 по 2002 год. Без сдвига на девять лет коэффициент корреляции равен 0.728

Учитывая характер этого сдвига становится ясно, что изменения среднегодового индекса температуры суши и океана в северном полушарии Земли приводят к изменению количества ураганов в северной Атлантике спустя девять лет.

Данные измерений числа тропических ураганов в северной Атлантике были взяты на сайте: <https://skepticalscience.com/translation.php?a=51&l=16>

Здесь на графике изображено число тропических ураганов в северной Атлантике при усреднении десятилетним скользящим средним с 1930 по 2002 год. Данные с этого графика были сняты в цифровом формате с помощью программы GetData Graph Digitizer.

Массив данных измерений среднегодового индекса температуры суши и океана для северного полушария был взят на сайте:

[https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/fig.B.txt](https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/fig.B.txt)

На этом сайте представлен среднегодовой индекс температуры суши и океана в сотых градуса Цельсия (0.01°C) в северном полушарии Земли с 1880 по 2018 год.

Далее среднегодовой индекс температуры суши и океана для северного полушария был усреднен десятилетним скользящим средним. Коэффициент корреляции десятилетних скользящих средних числа тропических ураганов в северной Атлантике и десятилетних скользящих средних среднегодового индекса температуры суши и океана составил 0.728 на временном отрезке с 1930 по 2002 год. После сдвига на девять лет вперед десятилетних скользящих средних числа тропических ураганов в северной Атлантике коэффициент корреляции вырос до значения 0.915

**МУЛЬТИДЕКАДНЫЕ ВАРИАЦИИ В СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И КЛИМАТЕ ЗЕМЛИ**

**Птицына Н.Г., Демина И.М.**

СПбФИЗМИРАН, г. Санкт Петербург, Россия, [nataliaptitsyna@yahoo.com](mailto:nataliaptitsyna@yahoo.com)

Активность Солнца подвержена квазипериодическим колебаниям, самый известный и стабильный из которых - это 11-летний цикл Швабе. Кроме того, широко изучены 22-летний цикл Хойла, ~100-летний цикл Глейсберга и ~200 летний цикл Зюсса. Менее изученным является диапазон периодов между циклом Хойла и циклом Глейсберга. Между тем, этот диапазон вариаций солнечной активности может иметь существенное значение для исследования солнечного влияния на климат Земли. Среди обсуждаемых квазициклическостей в различных метеорологических параметрах одной из наиболее известных является вариация с периодом 30-40 лет, так называемый цикл Брикнера, установленный еще в 19 в. Мультидекадные вариации являются характерной чертой некоторых атмосферных и океанических процессов. Целью данной работы было сравнительное изучение изменчивости солнечной активности и климата в диапазоне периодов 30-80 лет на временной шкале нескольких сотен лет. Для этого использовался инструментальный ряд числа солнечных пятен (1880-2020 гг.), реконструкция числа солнечных пятен (1000-1700 гг.) и данные о глобальных температурных аномалиях в климате Земли по инструментальным измерениям в 1880-2020 гг.

**СЕКЦИЯ «Прогноз космической погоды и прикладная физика магнитосферы и ионосферы»**

**Четверг, 08.02. 2024 г., Комната 202**

Председатель: <u>Калегаяев В.В.</u>			
	Время	Докладчик	Название доклада
1	09.30 - 09.45	Ишков В.Н.	Особенности прогноза геоэффективных активных явлений и воздействия на околоземное космическое пространство в текущем 25 цикле
2	09.45 - 10.00	Козелов Б.В.	Прогнозирование рядов солнечной и геомагнитной активности на основе эмпирических данных
3	10.00 - 10.15	Вахрушева А.А.	2D-моделирование корональных выбросов массы
4	10.15 - 10.30	Капорцева К.Б.	Отбор геоэффективных событий для системы прогноза прихода корональных выбросов масс к земле в режиме реального времени
5	10.30 - 10.45	Токарев Ю.В.	Наблюдения фронта ударной волны от коронального выброса масс в сеансе радиозондирования луны 1 декабря 2023 г. на стенде Сура в диапазоне 9 МГц.
6	10.45 - 11.00	Думин Ю.В.	Топологические критерии прогнозирования "корональных выбросов массы - невидимок"
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Ишков В.Н.</u>			
7	11.30 - 11.45	Ожередов В.А.	Определение момента начала возрастания потока солнечных протонов в задаче предсказания протонных событий
8	11.45 - 12.00	Очелков Ю.П.	Прогноз опасных для авионавигации солнечных протонных событий по данным наблюдения рентгеновских вспышек солнца и корональных выбросов масс
9	12.00 - 12.15	Сормаков Д.А.	Анализ соотношений между величинами индексов магнитной активности PC И AL в ходе предварительной и взрывной фаз магнитной суббури
10	12.15 - 12.30	Роденко С.А.	Вторичные антипротоны в магнитосфере Земли: измерения в эксперименте PAMELA и их значение
11	12.30 - 12.45	Юшков Б.Ю.	Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей
12	12.45 - 13.00	Мингалев О.В.	Новая версия эмпирической модели АРМ_ГЕО Для планетарного распределения характеристик электронных и ионных высыпаний в зависимости от уровня магнитной активности

	<b>13.00 - 14.00</b>	<b>Обед</b>	
<b>Председатель: Струминский А. Б.</b>			
13	14.00 - 14.15	Апатенков С.В.	Влияние космической погоды на орбиты низковысотных спутников
14	14.15 - 14.30	Ягова Н. В.	Длиннопериодные геомагнитные пульсации как элемент воздействия космической погоды на технологические системы
15	14.30 - 14.45	Никифоров О.В.	Использование информационно-аналитической системы ИКИ РАН «Гелиогеофизика» (ИАС ИКИ ГГФ) в экспериментальных работах
16	14.45 - 15.00	Гуляева Т.Л.	Оценка геофизической обстановки во время запусков спутников Starlink в 2019-2023 гг.
17	15.00 - 15.15	Шагурин И. А.	Подсистема для АРМ Геофизик. Визуализация данных Ovation Prime
18	15.15 - 15.30	Владимиров Р.Д.	Многоступенчатый алгоритм прогнозирования геомагнитных индексов методами машинного обучения
	<b>15.30 - 16.00</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>Председатель: Пилипенко В.А.</b>			
19	16.30 - 16.45	Исаев И.В.	Итеративный отбор существенных входных признаков при решении задач прогнозирования состояния магнитосферы земли
20	16.45 - 17.00	Гаджиев И.М.	Кластеризация данных о магнитосфере земли как метод поиска её скрытых состояний
21	17.00 - 17.15	Мягкова И.Н.	Исследование зависимости качества прогнозирования геомагнитных возмущений методами машинного обучения от фазы цикла солнечной активности
22	17.15 - 17.30	Янаков А.Т.	Некоторые результаты работы межведомственной высокоширотной радиотрассы
23	17.30 - 17.45	Мёрзлый А.М.	Особенности оперативного прогноза и оценки условий распространения коротковолновых радиоволн с учетом экспериментальных данных
	17.45 - 18.30	<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии 08.02.2024 «Прогноз космической погоды и прикладная физика магнитосферы и ионосферы»

- 6.1.1 Мирмович Э.Г. Ещё раз о потенциальных источниках чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического характера
- 6.1.2 Зворыгина Е. С., Ягова Н. В. Взаимосвязь между мощностью УНЧ Волн в диапазоне 1-5 мГц и потоком электронов с энергиями порядка 100 кэВ на геостационарной орбите
- 6.1.3 Родькин Д.Г., Слемзин В.А. Связь геоэффективности межпланетных корональных выбросов массы с интегральным магнитным потоком из области диммингов
- 6.1.4 Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Соколов А.Д., Янаков А.Т. Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами и изобража-

- ющими спектрографами с разных орбит и поверхности земли. Часть 2. Авроральные и аврора-подобные структуры, возбужденные природными источниками
- 6.1.5 Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Бычков А.В., Федяй О.В. Требования оперативно-диспетчерского управления к мониторингу геоиндуцированных токов в магистральных электрических сетях
- 6.1.6 Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Петух А.И., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю. Компактные приборы для измерения параметров плазмы
- 6.1.7 Лагойда И.А. Изучение взаимосвязей форбуш понижений с параметрами космической погоды в околоземном пространстве
- 6.1.8 Вахнина В.В. Негативные эффекты воздействия геоиндуцированных токов на блок «генератор-трансформатор»

Пятница, 09.02. 2024 г., Конференционный Зал

<b>Председатель: Сахаров Я.А.</b>			
	<b>Время</b>	<b>Докладчик</b>	<b>Название доклада</b>
1	09.30 - 09.45	Климов С.И.	Использование метода комбинированной волновой диагностики (КВД) для исследования мелко- и крупномасштабных ионосферных плазменно-волновых неоднородностей.
2	09.45 - 10.00	Глашкина Е.В.	Диагностика состояния ионосферы путем анализа сигналов радиостанций кв диапазона
3	10.00 - 10.15	Дашкевич Ж.В.	Некоторые фотометрические методы диагностики характеристик ионосферы и электронного потока в авроральных условиях
4	10.15 - 10.30	Шубин В.Н.	Особенности профиля электронной концентрации в высокоширотной ионосфере
5	10.30 - 10.45	Крашенинников И.В.	Вариации фонового электромагнитного шума в условиях сильной ионосферной бури
6	10.45 - 11.00	Благовещенская Н.Ф.	Характеристики искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в высокоширотную ионосферу: дневные часы измерений.
	<b>11.00 - 11.30</b>	<b>Перерыв на кофе</b>	
<b>Председатель: Мерзлый А.М.</b>			
7	11.30 - 11.45	Соколов А.Д.	Исследование характеристик полярной ионосферы с помощью получения изображений авроральных эмиссий с орбиты перспективной станции РОС
8	11.45 - 12.00	Сорокин В.М.	Формирование ионосферного электрического поля динамическими процессами в нижней атмосфере
9	12.00 - 12.15	Дмитриев А.В.	Сравнение моделирования эффекта поглощения в полярной шапке с наблюдениями на сети станций ААНИИ
10	12.15 - 12.30	Сахаров Я.А.	Геоиндуцированные токи в ночном секторе
11	12.30 - 12.45	Дэспирак И.В.	ГИТ во время сильной геомагнитной активности (бури, суббури и магнитные пульсации) 23–24 апреля 2023 года



12	12.45 - 13.00	Аксенович Т.В.	Классификация геомагнитно-индуцированных токов в нейтрали автотрансформатора с применением машинного обучения
13	13.00 - 13.15	Белаховский В.Б.	События экстремального роста геомагнитно-индуцированных токов в ЛЭП на Кольском полуострове и в Карелии за 11 лет наблюдений
	<b>13.15</b>	<b>ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	

## Особенности прогноза геоэффективных активных явлений и воздействия на околоземное космическое пространство в текущем 25 цикле

**В.Н. Ишков**

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [ishkov@izmiran.ru](mailto:ishkov@izmiran.ru)

Развитие текущего 25 цикла солнечной активности (СА), который уже попадает в семейство средних солнечных циклов (СЦ) и на февраль 2024 г. (49 мес развития) приближается к своему максимуму, позволяет провести первые оценки его способности осуществлять солнечные активные явления, уровень их геоэффективности и сравнить его с циклами средней величины, прежде всего первой эпохи пониженной СА – СЦ13 и15. Во время этой эпохи (1878 – 1933 г. – СЦ12 – 16) наблюдательные данные ограничивались регулярными наблюдениями солнечных пятен, площадей групп пятен, параметров и возмущений геомагнитного поля (внезапных импульсов геомагнитного поля и магнитных бурь). Это даёт возможность, в первом приближении, по сильным геомагнитным возмущениям и низкоширотным полярным сияниям оценить характер и относительную величину вспышечной активности (большие геоэффективные солнечные вспышечные события). По рекуррентным геомагнитным возмущениям и высокоширотным полярным сияниям можно оценить характер и количество распределения их источников (корональных дыр). Общая картина осуществления солнечных активных явлений в текущем СЦ и их геоэффективность мало чем отличается от подобной в прошедшем низком СЦ24, но в тоже время значимо выше для всех видов солнечных активных явлений. Основные особенностями воздействия солнечных активных явлений на околоземное космическое пространство в текущем СЦ25 состоят в следующем:

- значимое уменьшение количества больших вспышечных событий (БСВ) привело к существенному уменьшению сильных спорадических возмущений околоземного (солнечных протонных событий, ионосферных и магнитных бурь), которые напрямую зависят от характеристик БСВ, стало существенно меньше, но несколько больше, чем в низком СЦ24, и значимо меньше, чем в переходном между эпохами СЦ23 и циклами эпохи повышенной СА;
- изменения количества солнечных корональных дыр с характеристиками, обеспечивающими геоэффективность их высокоскоростных потоков значимо уменьшилось ещё в СЦ24 и остаётся на том же уровне в текущем СЦ, привело к уменьшению количества рекуррентных магнитных возмущений и потоков релятивистских электронов в радиационных поясах Земли;
- уменьшение солнечной постоянной и количества спорадических потоков электромагнитного излучения от значимых вспышечных событий привело к заметному сжатию земной атмосферы, что способствует заметному увеличению срока существования низко орбитальных космических аппаратов и к снижения скорости очищения земной атмосферы от космического мусора.

Все эти факторы необходимо учитывать при оценке и прогнозе текущего состояния околоземного космического пространства в настоящее время.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЯДОВ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

**Б. В. Козелов**

*Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область, Россия,  
boris.kozelov@gmail.com*

В моделях ионосферы и верхней атмосферы, важных для многих прикладных вопросов, обычно используются индексы солнечной и геомагнитной активности, которые получаются на основе наблюдений наземными приборами и спутниками в солнечном ветре. Возникающая задача прогнозирования рядов геомагнитной активности вперед с некоторой точностью решается при наличии данных о солнечной активности и о солнечном ветре. Трудно формализуемые связи могут быть включены в модель с помощью нейросетевого подхода.

В имеющихся доступных наборах данных о солнечном ветре (например, база OMNI) имеются пропущенные значения, которые создают проблемы для использования нейросетей. К сожалению, простые стандартные методы заполнения отсутствующих значений, такие как использование медианы или среднего значения, нарушают статистические характеристики рядов и не всегда могут работать успешно.

В докладе на основе базы OMNI за 1995-2023 обсуждается нейросетевой подход к решению следующих задач:

1. Заполнение отсутствующих значений в рядах данных межпланетного поля (ММП)  $V_{tot}$ ,  $V_z$ ,  $V$ ,  $N_p$  по информации об этих величинах за несколько дней и текущих индексов геомагнитной активности SYM-H, AL, AU, AE, Kp.
2. Прогнозирование рядов индексов солнечной активности (число солнечных пятен и F107) с использованием слоев LSTM.
3. Прогнозирование рядов индексов геомагнитной активности SYM-H, AL, AU, AE, Kp на основе данных о предыдущей активности, рядов индексов солнечной активности и параметров солнечного ветра.

Обсуждается статистическая однородность получаемых рядов с точки зрения характеристик, характерных для турбулентных рядов (вейвлет-разложение и спектр фрактальных размерностей).

Работа поддержана РФФ, проект № 22-12-20017. Автор благодарит GSFC/SPDF OMNIWeb за подготовку использованных данных.

## 2D-МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

**Вахрушева А.А.<sup>1,2</sup>, Шугай Ю.С.<sup>1</sup>, Капорцева К.Б.<sup>1,2</sup>, Еремеев В.Е.<sup>1</sup>, Калегаяев В.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, <sup>2</sup> Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия,  
[vakhr.anna@gmail.com](mailto:vakhr.anna@gmail.com)

Одной из часто используемых в прогнозировании распространения корональных выбросов массы (КВМ) моделей является DBM-модель [1]. 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 ветром. Базовый одномерный вариант DBM-модели, описывающий распространение одной точки на фронте КВМ, может быть доработан до двумерного варианта введением геометрии КВМ, например, с использованием модели конуса. Введение формы КВМ позволит уточнить время прибытия МКВМ на околоземную орбиту и его скорость, а также узнать, достигнет ли рассматриваемый МКВМ заданной мишени, в отличие от использования одномерной DBM для всех точек фронта без учета его угловой ширины и направления распространения.

В данной работе проведены расчеты времени прибытия на околоземную орбиту и скорости МКВМ с использованием трех вариантов геометрии КВМ: концентрической модели, модели самоподобного расширения и модели с выравниванием фронта [2]. Прогноз был рассчитан для некоторых событий 24-го солнечного цикла. 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 CACTus (<https://www.sidc.be/cactus/>) [4] по данным коронографа SOHO/LASCO.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

1. Vršnak B., Žic T., Vrbanec 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.

## ОТБОР ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОБЫТИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ПРИХОДА КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС К ЗЕМЛЕ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Капорцева К.Б.<sup>1,2</sup>, Шугай Ю.С.<sup>2</sup>, Вахрушева А.А.<sup>1,2</sup>, Ширяев А.О.<sup>2,3</sup>, Еремеев В.Е.<sup>2</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,2</sup>

1. Физ. фак. МГУ, 2. НИИЯФ МГУ, Москва, 3. БГТУ, Брянск  
kb.kaportceva@physics.msu.ru

В настоящей работе представлены результаты анализа работы системы отбора корональных выбросов масс (КВМ) для прогнозирования времени и скорости их прихода на околоземную орбиту за период 2010-2018 годов.

Прогнозирование времени и скорости прихода КВМ к Земле осуществлялось путем комбинирования DBM-модели [1] и модели высокоскоростных потоков солнечного ветра [2], что позволяет учесть взаимодействие КВМ с фоновым солнечным ветром [3]. Для валидации модели использовался объединенный каталог межпланетных КВМ (МКВМ), зарегистрированных на орбите Земли [4], построенный на основе каталога МКВМ Ричардсона и Кейн [5], информации из системы CCMC SME Scoreboard [6] и данных каталога крупномасштабных типов солнечного ветра ИКИ РАН [7].

В качестве входных данных используются данные открытых баз данных, пополняемых в режиме реального времени, а также данные космического аппарата SDO, что позволяет системе работать автоматически, в режиме реального времени. Используются параметры событий КВМ, зарегистрированных коронографом LASCO на КА SOHO, полученные с помощью обработки изображений системой SACTus [8].

Всего за рассматриваемый период в времени в базе данных SACTus зарегистрировано более 12000 событий типа КВМ. С целью уменьшения количества ложных прогнозов, был разработан алгоритм отбора потенциально геоэффективных КВМ, включающий в себя несколько стадий фильтрации: отбрасывание узких событий, сопоставление КВМ-димминг, фильтрация по параметрам диммингов, получаемых из базы Solar Demon [9]. Использование информации о диммингах позволяет локализовать источник КВМ на солнечном диске и использовать параметры димминга для отбора геоэффективных событий. Малые вычислительные мощности, требующиеся для моделирования, позволяют сначала проводить моделирование для всех исходных событий из базы данных SACTus, а затем проводить сопоставление с наблюдаемыми МКВМ, таким образом контролируя эффективность фильтров отбора событий. Был проведен анализ эффективности работы системы отбора событий, на каждом этапе отбора.

В работе показано, что за рассматриваемый период времени было отброшено 96% зарегистрированных событий КВМ. 74% из отброшенных КВМ невозможно было сопоставить с наблюдаемыми МКВМ по времени наблюдения с точностью 24ч., что говорит об эффективной работе фильтров. Остальные 4% (499 шт) не отброшенных прогнозов были соотнесены с МКВМ, и были сделаны выводы о количестве спрогнозированных и не спрогнозированных МКВМ, а также о количестве ложных тревог. Из всех наблюдаемых событий МКВМ удалось предсказать 35% событий с точностью 24ч., а при уменьшении точности до 48ч. - 51% событий, что сравнимо с современными моделями прогноза КВМ, работающими в онлайн режиме. Лучшие результаты система показывает в максимуме солнечного цикла для наиболее геоэффективных событий. Процент предсказанных МКВМ в этом случае с ошибкой менее 48ч. составляет 87%, а с ошибкой менее 24ч. – 66%.

Работа по моделированию КВМ выполнена Капорцевой К.Б., Шугай Ю.С., Еремеевым В.Е., Вахрушевой А.А., Калегаевым В.В. при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-62-00048.

## НАБЛЮДЕНИЯ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАСС В СЕАНСЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ЛУНЫ 1 ДЕКАБРЯ 2023 Г. НА СТЕНДЕ СУРА В ДИАПАЗОНЕ 9 МГц.

Токарев Ю.В., Шиндин А.В., Востоков А.В., Грехнева К.К.

НИРФИ ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия, [yuri.tokarev@nirfi.unn.ru](mailto:yuri.tokarev@nirfi.unn.ru)

Исследования межпланетных ударных волн (МПУ) проводятся обычно на космических аппаратах. Наземные наблюдения этих объектов менее распространены в силу ряда причин. В частности, из-за разреженности межпланетной плазмы её радиоастрономические наблюдения становятся эффективными лишь на предельно низких частотах. Естественным ограничителем здесь выступают критические частоты ионосферы, меняющиеся в пределах 3...10 МГц. В результате наземные наблюдения различных структур солнечного ветра в длинноволновой части декаметрового диапазона крайне редки и проводятся от случая к случаю.

В докладе приведены результаты наблюдений МПУ на стенде СУРА [1] в диапазоне 9 МГц в ходе плановых работ по радиозондированию Луны [2]. Уже после обработки данных стало ясно, что сеанс 01 декабря 2023 г. резко выпадает из общей схемы. Во-первых, среднее по сеансу отношение сигнал/фон более чем на порядок превышает среднестатистическую величину для лунного радиоэха. Во-вторых, отсутствуют паузы между зондирующим и отражённым импульсами в обсуждаемом сеансе с длительностью посылок 1.5 сек и периодом повторения 5 сек. Из результатов мониторинга солнечного ветра на КА SOHO и DSCOVR выяснилось, что время проведения сеанса (02:50...03:50 мск) совпало со временем прохождения фронта ударной волны от коронального выброса масс в конце 30.11.2023 – начале 01.12.2023 через окрестности Земли.

Можно рассмотреть 2 версии формирования повышенного уровня принятого сигнала: собственное радиоизлучение и радиоэхо МПУ. Во втором случае в спектре флуктуаций принятого сигнала на рабочей частоте 8925 кГц при скорости фронта порядка 500 км/сек должен наблюдаться доплеровский сдвиг частоты порядка 30 кГц. По мере прохождения фронта МПУ через окрестности Земли этот сдвиг должен меняться пропорционально косинусу угла между лучом зрения и скоростью фронта. Обработка квадратурных компонент сигнала в полосе 125 кГц не выявила такой особенности. Вместе с тем, в спектре флуктуаций наблюдался практически неизменный во времени максимум вблизи частот флуктуаций 6...7 кГц. Подобный спектр наблюдался на КА Helios-2 [3] и был интерпретирован авторами проявлением ионно-звуковой турбулентности.

Мы заключаем поэтому, что наблюдавшееся в сеансе локации повышенное излучение представляет собой излучение ионно-звуковой турбулентности на фронте ударной волны, зарегистрированной космическими аппаратами SOHO и DSCOVR вблизи полуночи с 30.11 на 01.12.2023 по всемирному времени. Анализ представленного эксперимента продолжается.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 21-72-10131.

1. Караштин А.Н., Комраков Г.П., Токарев Ю.В., Шлюгаев Ю.В. Радиолокационные исследования на стенде СУРА. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 8. С. 765-779.
2. Шиндин А.В., Токарев Ю.В., Грехнева К.К. Радиолокация Луны на стенде СУРА: аномальное усиление радиоэха в сеансе 17 октября 2022 г.
3. Gurnett D.A., Frank L.A. J. Geoph. Res. 1978. V.F83. P.58.

# ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ “КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ – НЕВИДИМОК”

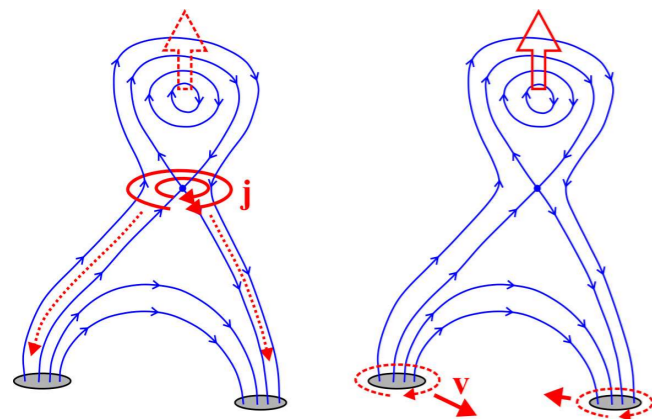
Думин Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [dumin@yahoo.com](mailto:dumin@yahoo.com)

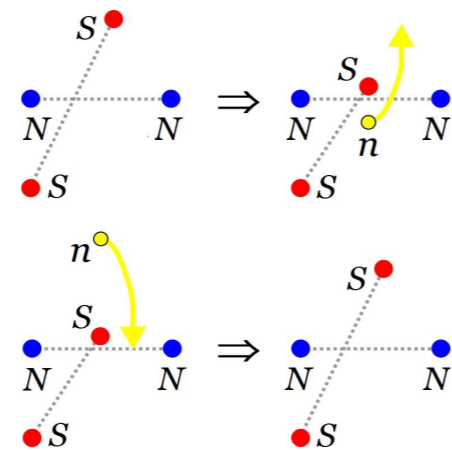
<sup>2</sup>ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

В задачах прогноза космической погоды большое значение имеет изучение корональных выбросов массы – невидимок (или, в английской терминологии, stealth CME), которые невозможно ассоциировать с источниками энерговыделения в нижней атмосфере Солнца, в частности, с солнечными вспышками. В последнее время всё чаще высказывается мнение, что КВМ-невидимки могут вызываться каким-то особым физическим механизмом, однако остаётся непонятно, каким именно.

Цель настоящего доклада – показать, что весьма перспективным подходом для объяснения этих явлений может служить так называемое “топологическое” магнитное пересоединение [1], которое было предсказано ещё в 1988г., однако мало исследовалось в дальнейшем. В отличие от классического магнитного пересоединения, ключевая идея “топологического” механизма состоит в том, что нулевая точка магнитного поля возникает не за счёт локальных токовых систем (левая панель на Рис. 1), а в результате специфического наложения воздействий от удалённых источников, а конкретно, солнечных пятен (правая панель на том же рисунке). В результате этого, процесс эрупции плазменного сгустка может происходить без существенного энерговыделения, т.е. без заметной солнечной вспышки.



**Рис. 1.** Схема зарождения КВМ в классическом (слева) и “топологическом” (справа) механизме магнитного пересоединения.



**Рис. 2.** Место зарождения КВМ и направление его движения при различных типах эволюции источников.

Другими интересными особенностями “топологического” механизма является то, что нулевая точка может зародиться вдали от источников поля (Рис. 2), а её последующее движение происходит по сильно изогнутой, дугообразной траектории [2]. Таким образом, даже если солнечная вспышка и имела место, то она могла быть локализована вдали от области наблюдения КВМ. Более того, благодаря сильно изогнутой траектории велика вероятность наблюдения КВМ, инициированных за лимбом Солнца.

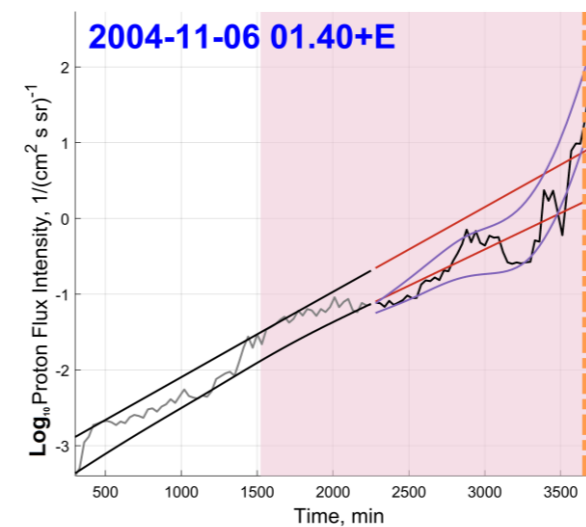
1. Gorbachev V.S., Kel’ner S.R., Somov B.V., Shvarts A.S. // Sov. Astron. 1988. V. 32. P. 308.
2. Dumin Yu.V., Somov B.V. // MNRAS Lett. 2024. V. 528. P. L15.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА НАЧАЛА ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ В ЗАДАЧЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

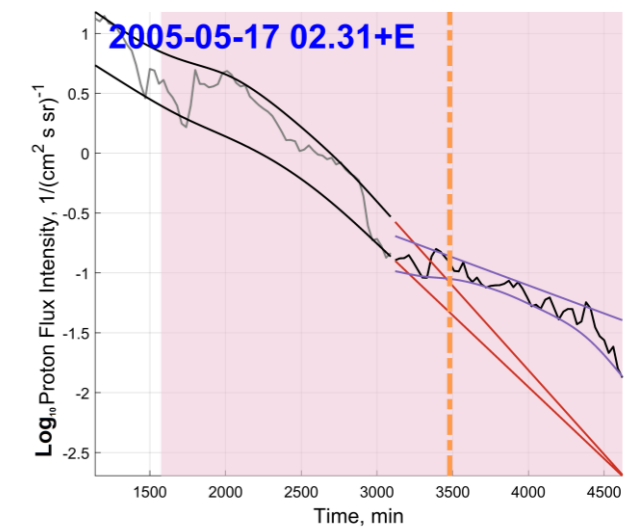
Ожередов В.А., Струминский А.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [ozheredov2016@gmail.com](mailto:ozheredov2016@gmail.com)

Ранее [1] был разработан алгоритм машинного обучения, предсказывающий появление протонного события на состава пересекающихся с горячей фазой вспышки радио-эвентов [2]. При этом ручной анализ неправильно классифицированных SP-источников показал, что добавление к пространству признаков еще одной переменной – скорости сопровождающего вспышку коронального выброса массы >900 км/с, позволяет свести false negative rate к нулю. В качестве положительных прецедентов для обучения выступали события базы данных [3], однако далее уже обученный алгоритм «предсказал» возрастание потока солнечных протонов после еще трехсот девятнадцати вспышек, не входящих в базу [3]. Данное обстоятельство порождает естественный вопрос: является ли семейство пороговых критериев, фигурирующих при составлении каталогов типа [3-4], единственно возможным при ассоциировании вспышки и протонного события? Наша гипотеза состоит в том, что начало протонного события не обязательно сопровождается скачком интенсивности протонного потока – есть минимум еще два других сценария: увеличение скорости роста потока и замедление скорости его падения. Проверка данной гипотезы потребовала создания метода поиска перелома тренда посредством слежения за морфологией доверительных границ тренда интенсивности потока солнечных протонов. Результат: алгоритм обозначил как SEP-источники 189 вспышек, не обозначенных в каталоге [3], из них 103 на восточной и 86 на западной стороне лимба. 16 из них находятся на фазе роста интенсивности потока солнечных протонов, еще по 93-м данные EPHIN испорчены. Из оставшихся 80-ти событий 49 штук оказались на самом деле ассоциированы с протонными событиями. Примеры двух типов поведения интенсивности протонного потока – увеличение скорости роста и замедление скорости падения – приведены на Рис.1-2.



**Рис.1** Увеличение скорости роста потока



**Рис.2** Уменьшение скорости падения потока

Ссылки:

1. Ожередов В.А., Струминский А.Б.// Труды конф. «С. И С.-3. физ.-2023», С. 253-256.
2. <https://www.solarmonitor.org/data/2023/12/14/meta/> // База данных радио-эвентов.
3. <https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/> // Каталог протонных событий, NASA.
4. [https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep\\_events\\_cat/](https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/) // Каталог протонных событий, НИИЯФ.
5. <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm> // База данных по потокам солнечных протонов EPHIN.

## ПРОГНОЗ ОПАСНЫХ ДЛЯ АЭРОНАВИГАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК СОЛНЦА И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС

Очелков Ю.П., Буров В.А.

*ИПГ, РОСГИДРОМЕТ, г. Москва, Россия, yur\_och@mail.ru*

В работе рассматриваются возможности прогнозирования солнечных протонных событий (СПС) опасных для аэронавигации по параметрам солнечных событий: корональных выбросов масс и рентгеновских вспышек Солнца. Опасность для аэронавигации могут представлять СПС с энергией протонов больше чем 100 МэВ, интенсивность в максимуме которых превышает  $1 \text{ част/см}^2 \cdot \text{с}$  (30 мкЗв/час в максимуме события в полярных районах на высоте 14 км). В данной работе для увеличения статистической обеспеченности результатов рассмотрены необходимые и достаточные условия для возникновения СПС с энергией протонов больше чем 50 МэВ и интенсивностью в максимуме события большей или равной  $1 \text{ част/см}^2 \cdot \text{с}$  (в данной работе СПС<sub>50</sub>).

На основе данных за 23 и 24 циклы СА показано, что учет параметров КВМ, предшествующих событиям СПС, позволяет существенно улучшить прогноз СПС, использующий только данные по рентгеновским вспышкам Солнца. СПС<sub>50</sub> практически всегда наблюдаются после корональных выбросов масс типа Halo и Partial Halo, которые имеют скорость равную или большую чем 900 км/с. Этот факт еще раз подтверждает важную роль КВМ в генерации и выходе солнечных протонов в межпланетное пространство. Однако прогноз СПС на основе только параметров КВМ не является достаточно эффективным. В 23 цикле СА наблюдалось 358 КВМ типа Halo и Partial Halo со скоростью  $\geq 900 \text{ км/с}$  и только 61 СПС<sub>50</sub>. От вспышек на западной половине диска наблюдалось не меньше, чем 97 КВМ (это значение получено по количеству привязанных вспышек классов  $\geq M1$ ) и 48 СПС<sub>50</sub>. Поэтому вероятность наблюдения СПС<sub>50</sub> после КВМ от вспышек западной половины диска не превышает 49%. В то же время в 23 цикле наблюдались на западной половине диска 103 вспышки рентгеновского излучения класса  $\geq M5$ . Вероятность наблюдения СПС<sub>50</sub> после них равна 41%. Из этих вспышек только 61 вспышка сопровождалась КВМ типа Halo и Partial Halo со скоростью  $\geq 900 \text{ км/с}$ . Вероятность наблюдения СПС<sub>50</sub> после таких вспышек существенно выше и равна примерно 70%, поэтому наиболее оправдан совместный прогноз СПС<sub>50</sub> по параметрам КВМ и рентгеновского излучения вспышек.

В работе предлагается прогноз факта возникновения СПС<sub>50</sub> по КВМ типа Halo и Partial Halo со скоростью  $\geq 900 \text{ км/с}$  и рентгеновским вспышкам Солнца классов  $\geq M5$  от западной половины диска и классов  $\geq X1$  для вспышек из сектора гелиодолгот (0-30°E). Показано, что для вспышек от западной половины диска эффективность детерминированного прогноза факта возникновения СПС<sub>50</sub> равна: POD= 86%, FAR=33 %, а от вспышек из сектора гелиодолгот (0-30°E) она равна: POD= 83%, FAR=37.5%.

## АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ВЕЛИЧИНАМИ ИНДЕКСОВ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ PC И AL В ХОДЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ И ВЗРЫВНОЙ ФАЗ МАГНИТНОЙ СУББУРИ.

О.А.Трошичев, С.А.Долгачёва, Д.А.Сормаков, Н.А.Степанов

*АНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, olegtro@aari.ru*

Представлены результаты анализа соотношений между величинами AL и PC индексов магнитной активности в ходе предварительной и взрывной фаз магнитных суббурь различной интенсивности. Как известно, магнитная активность в полярных шапках Земли и в авроральной зоне определяется различными системами магнитосферных продольных токов (FAC). PC индекс характеризует интенсивность полярных DP2 возмущений, которые генерируются системой продольных токов R1 FAC, локализованных на приполюсной границе авроральной зоны, т.е. в пределах замкнутой магнитосферы. R1 FAC система наблюдается всегда, вне зависимости от ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) и сезона года, при этом интенсивность R1 токов определяется «функцией взаимодействия»  $E_{\text{кл}}$ , включающей все геоэффективные параметры солнечного ветра. PC индекс считается показателем поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра (Резолюции МАГА–2013 и МАГА–2021). AL индекс на фазе развития магнитной суббури (DP12 возмущения) характеризует интенсивность западного электроджета, генерируемого в авроральной зоне при формировании R2 системы продольных токов. AL индекс на активной фазе суббури (DP11 возмущения) характеризует интенсивность западного электроджета, генерируемого в ночном секторе авроральной зоны в результате взрывного вторжения частиц из плазменного слоя хвоста магнитосферы и, соответственно, формирования независимой системы продольных «биркеландовских» токов во внешней магнитосфере.

Характер развития и интенсивность магнитной суббури в целом контролируется динамикой поведения и величиной PC индекса. На фазе развития суббури (DP12 возмущения) величина и скорость роста AL индекса строго связана с величиной и скоростью роста PC индекса, вне зависимости от начального уровня PC индекса и длительности фазы роста. На взрывной фазе суббури резкие всплески величины AL индекса (DP11 возмущения) могут происходить при любой величине PC индекса, которая и определяет амплитуду всплеска (максимальную величину AL индекса). Как правило, начало DP11 возмущений связано с резким (хотя бы и небольшим) скачком величины PC на фоне медленного растущего, или спадающего, или неизменного уровня PC индекса, при этом время задержки начала взрывной фазы (начала DP11 возмущений) после скачка величины PC индекса может лежать в пределах нескольких минут. Типичным является также развитие DP11 возмущений при волновом характере поведения PC индекса, когда величина PC периодически плавно растёт и уменьшается; в этом случае всплеск величины AL индекса (DP11 возмущение) обычно происходит в начале второй или третьей волны повышения PC индекса. Таким образом, наблюдается несколько типов развития DP11 возмущений, определяемых прежде всего динамикой поведения PC индекса, в отличие от DP12 возмущений, всегда строго линейно-связанных с величиной PC индекса. Это означает, что процессы в плазменном слое хвоста магнитосферы, ведущие к взрывному высыпанию плазмы в полярную ионосферу и формированию «биркеландовских» токов, ответственных за DP11 возмущения, не являются прямым следствием процессов во внутренней магнитосфере, ответственных за DP12 возмущения. Связь тех и других возмущений с PC индексом (показателем эффективности воздействия солнечного ветра на магнитосферу) свидетельствует лишь о строгой зависимости процессов во внутренней и внешней магнитосфере от параметров солнечного ветра.

## ВТОРИЧНЫЕ АНТИПРОТОНЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ: ИЗМЕРЕНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PAMELA И ИХ ЗНАЧЕНИЕ

Роденко С.А., Майоров А.Г.

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [SARodenko@mephi.ru](mailto:SARodenko@mephi.ru)

В период с 2006 по 2016 годы на спутнике Ресурс-ДК1 проводился научный эксперимент PAMELA, основной задачей которого являлось измерение потоков заряженных частиц и античастиц в космическом излучении [1]. Несмотря на то, что основные задачи этого эксперимента были связаны с изучением галактической компоненты, прибор регистрировал вторичные заряженные частицы в широком диапазоне энергий (как альbedo, так и захваченные во внутреннем радиационном поясе Земли).

В 2011 году по результатам измерений спектрометром PAMELA впервые в околоземном космическом пространстве были обнаружены антипротоны вторичного происхождения, измерен энергетический спектр альbedo и захваченных антипротонов космических лучей в диапазоне энергий от 60 до 750 МэВ [2].

Таким образом, механизмы генерации потоков вторичных частиц распространяются на образование и захват античастиц магнитным полем Земли. В частности, механизм CRANbarD применимый для антинейтронов и антипротонов, аналогичен механизму CRAND для нейтронов и протонов, не исключается также процесс генерации антипротонов за счет прямого образования пар протон-антипротон в атмосфере [3, 4].

Спектрометр PAMELA позволяет регистрировать антипротоны низких энергий ( $E < 1$  ГэВ) независимо при помощи двух приборов – магнитной трековой системы и позиционно-чувствительного калориметра. В докладе приводится описание обоих методов идентификации антипротонов, но делается акцент на использовании калориметра и поиске треков первичной частицы до взаимодействия в веществе детектора, а также вторичных частиц, рождённых в процессе аннигиляции. Для этого используется взвешенное преобразование Хафа [5, 6] – один из методов цифровой обработки изображений, – позволяющий искать на изображениях прямые линии, которыми в данном случае являются треки частиц. Такой метод показал более высокую эффективность по сравнению с предложенным ранее [7] и позволил получить результаты измерения потока антипротонов во внутреннем радиационном поясе Земли по данным эксперимента PAMELA за весь период его работы.

Также в докладе обсуждается значение полученных результатов для физики околоземного пространства, анализируются наши представления о механизмах генерации вторичных космических лучей альbedo и их захвата магнитным полем Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-72-10161, <https://rscf.ru/project/19-72-10161/>.

## РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

**Б.Ю.Юшков**

НИИЯФ МГУ, Россия, [clef@srd.sinp.msu.ru](mailto:clef@srd.sinp.msu.ru)

Одним из факторов, определяющих радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, являются галактические и солнечные космические лучи. Их потоки внутри магнитосферы во многом определяются эффектом геомагнитного обрезания. Этот эффект обычно количественно описывается величиной эффективной вертикальной жесткости обрезания. Данная величина непосредственно вычисляется численным интегрированием уравнений движения, что даже при современном быстродействии ЭВМ требует значительных затрат машинного времени и использования специальных программ. Поэтому в практических целях используются различные методы интерполяции или аппроксимации. Один из таких методов [1] обеспечивает вычисление эффективной вертикальной жесткости в околоземном космическом пространстве в зависимости от двух параметров – локального времени и Кр-индекса, характеризующего геомагнитную возмущенность. Метод использует базовые таблицы жесткости, рассчитанные в модели IGRF для высоты 450 км, формулу пересчета к произвольной высоте и поправочные коэффициенты, рассчитанные с использованием модели Цыганенко-89. Сравнение рассчитанных жесткостей с другими работами подтверждает корректность базовых таблиц. Показано, что для практических задач можно пренебречь вековым ходом поля IGRF, а также влиянием показателя спектра протонов на величину жесткости обрезания. Сравнение доз радиации, рассчитанных с помощью данного метода, с экспериментальными данными, полученными на МКС, подтверждает правильность расчетов жесткости обрезания.

1. Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. Метод расчета вертикальной жесткости обрезания в геомагнитном поле. *Космические исследования*. Т.47, №3, с.211-218, 2009

1. Picozza P. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. №. 4. P. 296.
2. Adriani O. et al. // *ApJL* 2011. 737: L 29 P. 5
3. Fuki M., *Int. J. Mod. Phys.* 2005. A, 20, P. 6739
4. Selesnick R.S. et al. *Geophys. Res. Lett.* 2007. 34, P. 20
5. Gonzalez C.R., Woods R.E. *Digital Image Processing*. 2nd. 2002. P. 587.
6. Gonzalez C.R., Woods R.E. *Eddings Digital Image Processing Using Matlab*. 2009. P. 549.
7. Роденко С. А. и др. // *Ядерная физика и инжиниринг*. 2018. Т. 9. №. 5. С. 466.

## НОВАЯ ВЕРСИЯ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АРМ\_ГЕО ДЛЯ ПЛАНЕТАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ.

**О.В. Мингалев**<sup>1,2</sup>, В.Г. Воробьев<sup>1</sup>, О.И. Ягодкина<sup>1</sup>, М.Н. Мельник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

<sup>2</sup>Мурманский арктический университет, филиал в г. Апатиты (Мурманская обл.)

Представлено описание новой версии эмпирической модели высыпаний электронов и протонов для северного полушария АРМ\_ГЕО, в которой границы зон высыпаний, а также средние энергии и плотности потока энергии высыпающихся электронов и протонов рассчитываются как в исправленных геомагнитных координатах, так и в географических на сетке, регулярной по долготе и с фиксированным числом точек по широте в зонах высыпаний. Входными параметрами модели являются дата, время по UT и значения геомагнитных индексов Dst и AL. Границами применимости модели являются условия  $Dst \geq -200$  нТл и  $AL \geq -1500$  нТл. По сравнению с ранее опубликованными версиями модели, в которых в географических координатах рассчитывались только границы зон высыпаний, добавлено вычисление в этих зонах распределений средней энергии и плотности потока энергии высыпающихся электронов в географических координатах, а также добавлено вычисление распределений средней энергии и плотности потока энергии высыпающихся протонов как в исправленных геомагнитных координатах, так и в географических координатах. Кроме того, внутри области аврорального овала улучшено описание границ зоны ускоренных электронных высыпаний между дневным и ночным секторами. Модель реализована в виде комплекса программ на языке FORTRAN, в котором применяются параллельные вычисления и используется созданная Н.А. Цыганенко программа RECALC-08, а также используется перепрограммированная для применения параллельных вычислений программа модели IGRF.

## ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ОРБИТЫ НИЗКОВЫСОТНЫХ СПУТНИКОВ

**Апатенков С.В.**, Бурик О.В.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, [apatenkov@mail.ru](mailto:apatenkov@mail.ru)

В работе обсуждаются факторы космической погоды, влияющие на торможение атмосферой и снижение низковысотных спутников. Построены модели линейной регрессии и LSTM модели для прогнозирования снижения спутников. Обсуждается возможность использования многолетних баз данных орбит спутников, в том числе массовой группировки Starlink, для развития и улучшения моделей верхней атмосферы.

## ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ КАК ЭЛЕМЕНТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Ягова Н. В.<sup>1,2</sup>, Сахаров Я. А.<sup>2,3</sup>, Пилипенко В. А.<sup>1,2</sup>, Селиванов В. Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, [nyagova@ifz.ru](mailto:nyagova@ifz.ru)

<sup>2</sup>ГЦ РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ПГИ, г. Анатиты, Россия

<sup>4</sup>ЦЭС КНЦ РАН, Анатиты, Россия

Наведение геоиндуцированных токов (ГИТ) в протяженных наземных проводниках является наиболее опасным и принципиально неустранимым эффектом возмущений космической погоды. Среди технологических эффектов ГИТ самыми масштабными являются каскадные отключения электрооборудования. Их экономические и гуманитарные последствия могут быть сравнимы с наиболее разрушительными природными катастрофами [1].

Эффективным источником ГИТ являются геомагнитные пульсации, которые могут возникать как во время, так и вне магнитной бури. Рекордные амплитуды ГИТ связаны с длиннопериодными пульсациями Pc5/Pi3 [2]. При этом отношение амплитуды ГИТ к амплитуде пульсаций  $R_{IB}$  даже для одной точки существенно зависит от пространственных и спектральных параметров пульсаций [3,4].

Связанные с ГИТ сбои в работе энергосистем наблюдались не только на авроральных широтах, где преобладают пульсации Pc5/Pi3, но и на субавроральных, и даже на средних [5]. Это ставит вопрос о ГИТ, возбуждаемых типичными для этих регионов Pc3-4 пульсациями. Кроме того, в диапазон Pc4 попадают высшие гармоники более низкочастотных пульсаций, а наличие нескольких гармоник в спектре повышает отношение  $R_{IB}$ .

В настоящей работе исследуются вариации ГИТ и компонент геомагнитного поля, с временным разрешением 10 с, что позволило включить в рассмотрение диапазон пульсаций Pc4. Продемонстрировано наличие ГИТ, вызванных пульсациями этого диапазона и высокая ГИТ-эффективность полигармонических пульсаций. Для этих групп пульсаций порог возбуждения потенциально опасных ГИТ ниже, чем для типичных пульсаций Pc5/Pi3. Таким образом, зона появления связанных с пульсациями потенциально опасных ГИТ расширяется за счет более низкоширотных областей.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-77-30010.

1. Pulkkinen A., Pirjola R., Viljanen A. // Space Weather. 2008. V. 6. Art. No. S07001. DOI: 10.1029/2008SW000388.
2. Apatenkov S. V., Pilipenko V. A., Gordeev E. I., et al. // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47. Art. No. e2019GL086677.
3. Yagova N. V., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A. et al. // Earth Planets Space 2021. V. 73. 88. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01407-2>
4. Sakharov Ya. A., Yagova N. V., Pilipenko V. A., Selivanov V. N. // Russ. J. Earth. Sci. 2022. V. 22. ES1002. doi:10.2205/2021ES000785
5. Marshall R.A., Kelly A., Van Der Walt T. et al. // Space Weather. 2017. V. 15. P. 895. doi:10.1002/2017SW001613.

## Использование информационно-аналитической системы ИКИ РАН «Гелиогеофизика» (ИАС ИКИ ГГФ) в экспериментальных работах

О.В. Никифоров, А.М. Мерзлый, А.А. Петрукович, А.Т. Янаков, И.А. Моисеев, Г.С. Филатов, И.А. Уваров

ИКИ РАН, г. Москва

Целью создания ИАС ИКИ ГГФ является информационное обеспечение потребителей системы магнитосфера-ионосфера-термосфера и специалистов, использующих данные для решения прикладных задач, включая данные о структурах излучения эмиссий ионосферы и верхней атмосферы, в первую очередь в полярной зоне, а также разработки и внедрения методов распознавания авроральных структур различных масштабов в изображениях, типов энергетических спектров выпадающих частиц, классификации, кластеризации, и их интеграции с другими ГИС и базами данных, разрабатываемыми в ИКИ РАН.

Преимущества ИАС ИКИ ГГФ перед аналогичными разработками предполагают мультивариативный принцип использования, точно подстраивая её под конкретные цели и задачи. В частности, ИАС может быть успешно использована при сопровождении экспериментальных работ.

В рамках работ по развёртыванию макета комплекса оперативной диагностики ионосферных параметров в части макета радиомаяка с целью проведения экспериментальных работ по оценке характеристик высокоширотных радиотрасс функционал ИАС ГГФ позволил обеспечить такие задачи, как: автоматизированный сбор экспериментальных данных; формирование блока экспериментальных данных в базе данных (БД) ИАС; тематическая обработка экспериментальных данных; предоставление персонализированного доступа к данным исследователям для выполнения задачи по оценке характеристик высокоширотных радиотрасс; публикация результатов работ на специализированном сервере.

Также, при проведении эксперимента по применению трансionoсферного зондирования на основе ГНСС для оперативной оценки параметров высокоширотной ионосферы во время экспедиции на архипелаге Земля Франца-Иосифа, выполненного в кооперации ИКИ РАН с МИИГАиК, ПГИ и Совета РАН по космосу, был использован функционал ИАС ГГФ. Исследователям для аналитической работы в целях получения экспериментальных результатов был предоставлен доступ к фактическим спутниковым и наземным тематическим данным.

1. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Садовский А.М., Позин А.А., Шукин Ю.А., Потанин Ю.Н. Основы перспективной методики комплексных исследований влияния авроральных характеристик полярной ионосферы на условия распространения трансполярных сигналов. Обзор зарубежных экспериментов и результаты некоторых моделей // Гелиогеофизические исследования, 2021 (в печати).
2. Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Мерзлый А.М., Петрукович А.А., Крученицкий Г.М., Баньщикова М.А. (2019). Орбитальная оптическая авроральная диагностика состояния полярной ионосферы, как часть системного контроля космической погоды // Гелиогеофизические исследования, выпуск 24, С.35-60.
3. Куприянов А.О., Петрукович А.А., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Сахаров Я.А., Чернышев А.А., Янаков А.Т., Замогильный Д. Экспериментальные результаты применения трансionoсферного зондирования на основе ГНСС для оперативной оценки параметров высокоширотной ионосферы во время экспедиции на архипелаге Земля Франца-Иосифа // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Номер 67 (1), стр.6-18; Научное издание Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), 2023.
4. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Моисеев П.П., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Позин А.А., Шукин Ю.А., Янаков А.Т. Перспективная технология диагностики полярной ионосферы на основе МКА в интересах решения задач связи и радиолокации // В сборнике: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Малые космические аппараты». Сборник статей конференции I Всероссийской научно-технической конференции. Анапа, 2021. С. 37-47.
5. Никифоров О.В., Петрукович А.А., Уваров И.А. Информационная система "Аврора-Арктика". Задачи и перспективы развития // В книге: Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Институт космических исследований Российской академии наук. 2018. С. 477.
6. Петрукович А.А., Никифоров О.В., Уваров И.А., Подладчикова Т.В. Информационная система мониторинга и прогноза аврорального овала // В книге: Сборник тезисов докладов пятнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Институт космических исследований Российской академии наук. 2017. С. 429.



## ОЦЕНКА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ВО ВРЕМЯ ЗАПУСКОВ СПУТНИКОВ STARLINK В 2019-2023 ГГ.

Гуляева Т.Л.<sup>1</sup>, Лукьянова Р.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИЗМИРАН, [gulyaeva@izmiran.ru](mailto:gulyaeva@izmiran.ru)

<sup>2</sup> ИКИ РАН, [renata@aari.ru](mailto:renata@aari.ru)

Влияние возмущений в околоземном пространстве необходимо учитывать при запуске космических аппаратов во избежание внештатных ситуаций. Пример аварийного запуска спутников Starlink наблюдался 3 февраля 2022 г., когда 38 из 49 спутников сошли с орбиты во время двухфазной геомагнитной бури [1-3]. С целью оценки условий космической погоды при запусках Starlink рассмотрены изменения нейтральной плотности термосферы (Nn) по данным спутников Swarm и глобального электронного содержания (GEC) по картам GIM-TEC при всех 125+ запусках спутников Starlink в 2019 - 2023 гг. Выделены и проанализированы вариации Nn и GEC за 24-часовой период, центрированный на момент старта. Исследованы пространственное распределение и эволюция Nn и GEC в зависимости от изменения солнечной активности, сезона и уровня геомагнитной активности до и после каждого события запуска Starlink. Даны оценки допустимых пределов возмущений параметров Nn и GEC, при которых можно ожидать благополучного выхода Starlink на расчетные орбиты. Показано, насколько ситуация неудачного выведения 3 февраля 2022 г. отличалась от предыдущих и последующих штатных запусков.

[1] Napgood, M., Liu, H., & Lugaz, N. (2022). SpaceX—Sailing close to the space weather? *Space Weather*, 20(3), e2022SW003074. <https://doi.org/10.1029/2022SW003074>

[2] Gulyaeva, T., Hernández-Pajares, M., Stanislawski, I. Ionospheric Weather at Two Starlink Launches during Two-Phase Geomagnetic Storms. *Sensors*, 2023, 23(15), 7005; <https://doi.org/10.3390/s23157005>.

[3] Gulyaeva T., Lukianova R., Haralambous H. Ionosphere heterogeneities at dawn–dusk terminator related to the Starlink satellites launch disaster on 3–8 February 2022 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2023JA031577. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023JA031577>

## ПОДСИСТЕМА ДЛЯ АРМ ГЕОФИЗИК. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ OVATION PRIME

Шагурин И. А., Попов В. Ю., Никифоров О. В., Уваров И. А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [iashagurin@mail.ru](mailto:iashagurin@mail.ru)

Разрабатывается веб-приложение, которое предназначено для чтения текстовых файлов специального формата с данными, полученными от системы Ovation Prime. Каждый такой файл содержит описание значений функции от набора точек, заданных в геомагнитной системе координат. Программа уже сейчас может визуализировать значения этой функции в виде тепловой карты на плоскости. Кроме того, разработана аналогичная визуализация в виде свечения на трехмерной модели. Приложение позволяет переключаться между данными файлами. Кроме того, каждый из таких файлов соответствует определенному моменту времени. Приложение позволяет выбирать ближайший файл в соответствии с введенным временем. При этом имеются функции отображения границы аврорального овала с заданным порогом, отображения дневной и ночной зоны (которые разделяются терминатором), отображения облачности, фильтрации шума в данных при визуализации, отображения границ континентов, некоторых островов и городов. Программа предназначена для использования в целях исследования и мониторинга космической погоды. Она может пригодиться научному персоналу, экспертам и дежурным, которые в ходе работы имеют дело с данными, полученными от системы Ovation Prime.

## МНОГОСТУПЕНЧАТЫЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Владимиров Р.Д.<sup>1</sup>, Широкий В.Р., Баринов О.Г.<sup>1</sup>, Доленко С.А.<sup>1</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), г.Москва, Россия, vladimirov.rd16@physics.msu.ru*

Целью настоящей работы является адаптация и применение 4-ступенчатого нейросетевого метода анализа многомерных временных рядов с целью прогнозирования наступления тех или иных событий и поиска их предвестников – явлений, представляющих собой некую неизвестную комбинацию значений параметров, описывающих объект [1]. Алгоритм был применен для прогнозирования геомагнитного индекса Кр.

Разработанный подход позволяет адаптивно отбирать как физические входные признаки, так и конкретные используемые значения задержки при учёте предыстории каждого физического признака. Это может дать лучшее понимание процессов, происходящих в исследуемом объекте (в данном случае – в магнитосфере Земли). Для прогнозирования Кр-индекса в качестве входных признаков были использованы среднечасовые значения следующих величин:

1. Параметры солнечного ветра (СВ) в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем: скорость СВ  $v$  (км/с), температура (К), плотность протонов в СВ  $n_p$  ( $\text{см}^{-3}$ )
2. Параметры вектора межпланетного магнитного поля (ММП) в той же точке L1 в системе GSM:  $B_x, B_y, B_z$  (компоненты ММП), модуль ММП  $B_{\text{mag}}$  (нТл).
3. Геомагнитные индексы: экваториальный геомагнитный индекс Dst (нТл), планетарный геомагнитный индекс Кр (безразмерный).
4. Случайные шумовые признаки, добавленные для проверки того, что система распознает их как несущественные для прогнозирования целевой переменной.

Общая схема работы 4 ступенчатого алгоритма включает в себя следующие шаги:

1. Отбор наиболее существенных физических признаков (переменных) из числа тех, от которых, по мнению исследователя, может зависеть прогнозируемая искомая величина. В текущей реализации для этого используется итеративный подход. В рамках этого подхода система оценивает корреляцию (Пирсон/Спирмен) между входным признаком и его задержками и прогнозируемой переменной. Затем по заданному порогу отбирается часть переменных, которые будут использованы далее.
2. Отбор диапазона используемых задержек. Для этого создаются наборы входных признаков следующим образом: 0 набор – выбранные на первом этапе входные переменные в текущий момент времени, 1 набор – к 0 набору добавляются все входные переменные с задержкой в 1 отсчет, 2 набор – к 1 набору добавляются все входные переменные с задержкой в 2 отсчета и т.д. до заданной исследователем границы. На каждом наборе, созданном в рамках описанного цикла, обучается модель машинного обучения, качество которой оценивается на заранее отложенном наборе данных. Цикл прекращается, когда по заданному критерию добавление входных переменных перестает существенно улучшать точность прогнозирования.
3. Отбор наиболее важных входных признаков из полученного многомерного пространства, ограниченного на первых двух этапах. Для этого этапа подходит один из стандартных подходов к оценке важности входных признаков.
4. Подбор гиперпараметров модели.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

## ИТЕРАТИВНЫЙ ОТБОР СУЩЕСТВЕННЫХ ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

**Исаев И.В.<sup>1,2</sup>, Щуров Н.О.<sup>3</sup>, Баринов О.Г.<sup>1</sup>, Доленко С.А.<sup>1</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ):*

*<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), <sup>2</sup>Институт радиоэлектроники имени В.А.Котельникова Российской академии наук (ИРЭ РАН) г.Москва, Россия, isaev\_igor@mail.ru, <sup>3</sup>Физический факультет МГУ*

При прогнозировании состояния магнитосферы Земли с помощью методов машинного обучения необходим учёт предыстории входных параметров. Это связано с тем, что магнитосфера представляет собой динамическую систему, состояние которой зависит не только от воздействия на неё со стороны солнечного ветра, но и от предыстории.

Если не используются рекуррентные алгоритмы, то учёт предыстории осуществляется с помощью так называемого погружения (топологического вложения) входного многомерного временного ряда – подачи на вход задержанных значений параметров в определённом диапазоне задержек.

Однако при этом существенно возрастает входная размерность задачи, что является нежелательным в условиях ограниченного количества данных. В то же время входные признаки, соответствующие одной и той же физической переменной с близкими значениями задержки, несут сходную информацию. Всё это обуславливает необходимость понижения входной размерности задачи. В данной работе рассматривается понижение размерности с помощью итеративного алгоритма отбора существенных входных признаков [1], специально предназначенного для работы в условиях наличия сильной взаимосвязи признаков.

В работе сравниваются между собой и рассматриваются с физической точки зрения множества признаков, отобранных алгоритмом как существенные, при прогнозировании значений геомагнитного индекса Dst на 1 и 3 часа, геомагнитных индексов Dst и Кр на 3 часа, потока релятивистских электронов (с энергией > 2 МэВ) на геостационарной орбите и индекса Dst на 1 и 3 часа.

Показано, что использование алгоритма во всех случаях позволяет кратно понизить количество входных признаков задачи с сохранением уровня погрешности прогнозирования. При этом отбираемые признаки оказываются легко объяснимыми с физической точки зрения. Конкретное количество отбираемых признаков зависит от параметров алгоритма.

При прогнозировании одной и той же физической величины с разными горизонтами прогноза алгоритм отбирает множества признаков, лишь незначительно отличающиеся друг от друга. Подробное сравнение этих множеств, а также множеств признаков, отбираемых алгоритмом при прогнозировании различных физических величин, приводится в докладе.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

1. N.Shchurov, I.Isaev, O.Barinov, I.Myagkova, S.Dolenko. Iterative Selection of Essential Input Features under Conditions of their Multicollinearity in Space Weather Time Series Forecasting. Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023). Artificial Universe: New Horisont [Electronic resource]: Proceedings of the 16th International Conference, October 17–19, 2023, Belarus, Minsk, Belarusian State University. Eds. A.Nedzved, A.Belotserkovsky. Minsk: BSU, 2023, pp.316-319. ISBN 978-985-881-522-6.

1. S.Dolenko et al. LNCS 5769, 295-304. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04277-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04277-5_30)

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ О МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ КАК МЕТОД ПОИСКА ЕЁ СКРЫТЫХ СОСТОЯНИЙ

Гаджиев И.М.<sup>1,2</sup>, Баринов О.Г.<sup>1</sup>, Мягкова И.Н.<sup>1</sup>, Доленко С.А.<sup>1</sup>

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова:*

*<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына*

*(НИИЯФ МГУ), <sup>2</sup>Физический факультет*

*г.Москва, Россия, [ismailgadzhievff@gmail.com](mailto:ismailgadzhievff@gmail.com)*

Магнитосфера Земли представляет собой сложную динамическую систему, состояние которой зависит как от её собственной предыстории, так и от внешнего воздействия на неё (со стороны солнечного ветра). Подобные системы часто характеризуются наличием нескольких характерных скрытых состояний (ХСС), в каждом из которых система проводит значительные отрезки времени, со сравнительно быстрыми переходами между ними. При этом поведение системы в рамках каждого ХСС может описываться отдельной моделью, и такой подход может оказаться эффективнее, чем попытка описать поведение системы единой моделью во всём диапазоне времени её рассмотрения.

В данном докладе рассматривается применение методов кластеризации данных о магнитосфере и воздействии на неё для выделения ХСС. В качестве переменных для кластеризации используются геомагнитные индексы Кр и Dst, компоненты межпланетного магнитного поля и его модуль, скорость и плотность солнечного ветра в точке Лагранжа L1.

Для достижения цели исследования были использованы два основных метода кластеризации – метод К-средних [1] и DBSCAN [2]. К-средних позволяет выделить компактные группы данных с минимизацией внутригрупповых расстояний, тогда как DBSCAN подходит для выявления плотных областей данных, основываясь на плотности объектов. Для оценки качества кластеризации использовалась метрика «силуэт». Построена зависимость метрики «силуэт» в зависимости от числа кластеров (для метода К-средних).

Был произведен анализ полученных кластеров по различным статистикам (таким как средние значения переменных). На основе этого анализа была построена физическая интерпретация состояний, соответствующих кластерам.

Дополнительно, в работе был использован метод визуализации t-SNE [3] для представления многомерных данных в двумерном пространстве, что позволяет лучше понять структуру данных и визуально оценить эффективность кластеризации.

Практическая ценность данного исследования заключается в возможности более точного выделения и классификации ХСС магнитосферы, что может быть ценным при прогнозировании потенциальных геомагнитных бурь и их влияния на технологические системы, энергетические сети и связь. Выявленные закономерности могут быть использованы для разработки более точных моделей прогнозирования космической погоды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

1. Lloyd S., Least squares quantization in PCM (1982), in IEEE Transactions on Information Theory, 28 (2), 129-137, doi: 10.1109/TIT.1982.1056489.

2. Ester M., Kriegel H., Sander J., and Xu X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96). AAAI Press, 226–231.

3. Maaten L.V., Hinton, G.E. (2008). Visualizing Data using t-SNE. Journal of Machine Learning Research, 9, 2579-2605.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ОТ ФАЗЫ ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Баринов О.Г., Доленко С.А.

*НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия, [irina@srd.sinp.msu.ru](mailto:irina@srd.sinp.msu.ru)*

Как известно, прогноз геомагнитных возмущений представляет большой практический интерес, поскольку магнитные бури могут вызывать нарушения работы радиосвязи, трубопроводов, линий электропередачи и электрических сетей [1]. Кроме того, магнитные бури влияют на радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, поскольку примерно после половины магнитных бурь поток релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли увеличивается на порядок и более [2].

Наиболее распространенными геомагнитными индексами являются Dst и Кр. Методы машинного обучения, такие как градиентный бустинг и искусственные нейронные сети, используются в данной работе для прогнозирования амплитуды геомагнитного возмущения. Входными параметрами при обучении, помимо самих индексов, являются скорость и плотность солнечного ветра, а также компоненты и модуль межпланетного поля (по данным измерений космического аппарата ACE в точке Лагранжа L1). Целью настоящей работы является выяснение того, приводит ли к улучшению качества прогнозирования обучение не на полном наборе данных, а на данных, полученных во время фазы солнечных циклов, соответствующей моменту прогнозирования.

Для обучения использовались данные 23 и 24 циклов солнечной активности с 21 октября 1997 года по конец 2019 года, для тестирования – данные 25 цикла за 2020-2023 г. Рассматривались прогнозы индекса Dst с горизонтами 1 и 3 часа и индекса Кр с горизонтом 3 часа.

Рассматривалось деление солнечного цикла на 4 фазы, соответствующие минимуму, росту, максимуму и спаду солнечной активности, а также на 2 фазы (условно высокой и низкой солнечной активности). Для оценки качества прогнозирования использовались статистические показатели прогнозов по отдельным фазам солнечного цикла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

1. Schrijver, C.J., Kauristie, K., Aylward, A.D., Denardini, C.M., Gibson, S.E. et al. 2015. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. Adv. Space Res. V. 55. No. 12. P. 2745–2807. DOI: 10.1016/j.asr.2015.03.023.

2. Qiu, Q., Fleeman, J.A., Ball, D.R. 2015. Geomagnetic disturbance: A comprehensive approach by American electric power to address the impacts. IEEE Elect. Mag. V. 3. No. 4. P. 22–33. DOI: 10.1109/MELE.2015.2480615.

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МЕЖВЕДОМСТВЕННОЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЫ

**Янаков А.Т.<sup>1</sup>, Мёрзлый А.М.<sup>1</sup>, Мингалев И.В.<sup>2</sup>, Моисеев И.А.,<sup>1</sup> Никифоров О.В.,<sup>1</sup>  
Петрукович А.А.<sup>1</sup>, Сахаров Я.А.<sup>2</sup>, Филатов Г.С.<sup>1</sup>, Шубин В.Н.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, [pinegal42@yandex.ru](mailto:pinegal42@yandex.ru)*

<sup>2</sup> *Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия*

<sup>3</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Москва, Россия*

В докладе рассмотрены некоторые результаты расчетных и экспериментальных работ оценки текущих характеристик высокоширотной радиотрассы.

## ОСОБЕННОСТИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА И ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОВОЛН С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

**Мёрзлый А.М.<sup>1</sup>, Куприянов А.О.<sup>4</sup>, Мингалев И.В.<sup>2</sup>, Моисеев И.А.,<sup>1</sup> Никифоров О.В.,<sup>1</sup>  
Петрукович А.А.<sup>1</sup>, Рожко О.И.<sup>5</sup>, Сахаров Я.А.<sup>2</sup>, Филатов Г.С.<sup>1</sup>, Шубин В.Н.<sup>3</sup>, Янаков  
А.Т.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, [pinegal42@yandex.ru](mailto:pinegal42@yandex.ru)*

<sup>2</sup> *Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия*

<sup>3</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Москва, Россия*

<sup>4</sup> *Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия*

<sup>5</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, Москва, Россия*

Оперативный прогноз гелиогеофизической обстановки в арктической зоне актуальной проблемой при решении фундаментальных и прикладных задач. Это обусловлено влиянием полярной ионосферы на функционирование средств связи, навигации и радиолокации. Возникающие магнито-ионосферные возмущения в арктической зоне приводят к изменению гелиогеофизических условий распространения радиоволн различного диапазона. Ухудшение условий функционирования указанных средств различного требует достоверного знания параметров среды распространения для уменьшения влияния возмущений полярной ионосферы.

В докладе рассмотрены некоторые результаты расчетных и экспериментальных работ:

результаты эксперимента и численного моделирования односкачковых лучевых траекторий коротковолновых радиоволн для различных геомагнитных условий;

результаты экспериментов по оценке характеристик высокоширотной радиотрассы (ослабление сигнала) с применением макета радиомаяка;

результаты экспериментальной оценки текущих характеристик высокоширотной ионосферы (границ овала) по данным ГНСС, спутниковых данных КА DMSP, по модели OVATION Prime;

результаты сравнительной оценки модели высокоширотной ионосферы с данными ионозондов вертикального зондирования.

## ЕЩЁ РАЗ О ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКАХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА

**Мирмович Э.Г.**

ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье» г. Химки, Россия, [mirmovich1940@mail.ru](mailto:mirmovich1940@mail.ru)

Многокомпонентные угрозы из космоса являются одним из самых потенциально опасных источников чрезвычайных ситуаций (ПИЧС) из-за своего синергетического характера. Наряду с астероидно-кометной опасностью (АКО), подчиняющейся подобно крупным землетрясениям т.н. распределению Гуттенберга-Рихтера, следом за Туринской шкалой АКО в ноябре 1999 г. вступила в действие шкала космической погоды, разработанная NOAA, где комплекс гелиогеофизических возмущений занимает своё «достойное», но недооценённое на практике место среди негативных воздействий на жизнедеятельность людей и объекты экономики [1]. Например, всеизвестные случаи отключения генераторов энергосистемы Квебека 13.03.89, сбоя радиометров на спутнике «GEOS4» 26.11.82, передатчиков на двух канадских спутниках связи 21.01.94 и др. аварии, источником которых явились вспышки на Солнце и геомагнитные бури, которые разбиты в этой шкале на три категории: геомагнитные бури, радиационные бури и нарушения радиосвязи и подразделяются на 5 баллов. Наиболее опасными являются экстремальные геомагнитные бури, способные привести к полному выходу из строя сетей электропитания, появлению сильных токов в металлических трубопроводах, серьёзным поломкам на космических аппаратах и практически полному прекращению радиосвязи на всех частотах.

В связи с этим ещё в 1993 году, ранее чем NOAA были выработаны и утверждены приказом Росгидромета (РД 52.88.340-93), обновлённые в 1999 году [2] нормативные критерии неблагоприятных и опасных природных (гидрометеорологических и гелиогеофизических) явлений и введены в систему предупреждения органов государственной власти, Вооружённых Сил РФ и населения в целях предотвращения гибели людей на земле и в околоземном космическом пространстве (ОКП) при орбитальных полётах, а также снижения экономического ущерба [3]. Их выработка была основана на измерениях наземных радиометров и ионозондов в арктической зоне [4] и на ИСЗ «Метеор» ( $h \sim 800$  km). Резкое ухудшение радиационной обстановки при этом принимается как ОЯ лишь при условии потока частиц  $I > 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  по этим измерениям. Необходимы дополнительные исследования и корректировка этих критериев, а также формализация прогнозов и способов доведения их до пользователей подобно инструкциям для гидрометеорологических ОЯ и ЧС (РД 4293756585), как в ионосферно-магнитной, так и в радиационной составляющей, что связано с успехами в экспериментальном изучении ОКП. Это учёт фаз солнечной активности, влияния магнитных бурь на объекты экономики, засорения ОКП мусором, превысившего уже риск ПИЧС от АКО и др. [5]. Включить в область прогностических интересов средние и низкие широты, на развитие гелиогеофизических исследований которых в Африке обратил самое серьёзное внимание «Комитет ООН по использованию космического пространства в мирных целях» своим заседанием по космической погоде (Каир, 06-10.11.10).

1. Кривошук А.А. / Влияние космической погоды на земную атмосферу / О.А. Трошичев, И.П. Габис. Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 177-207.
2. Приказ Росгидромета от 15.10.99. № 104. <https://docs.cntd.ru/document/1200036952>.
3. Мирмович Э.Г. Потенциальные источники ЧС гелиогеофизического происхождения // Физика плазмы в солнечной системе. 16-я ежегодная конференция М.: ИКИ. 2021. С. 279. <https://plasma2021.cosmos.ru/docs/2021/PLASMA-2021-AbstractBook-0202.pdf>.
4. Мирмович Э.Г. Арктика как междисциплинарная лаборатория исследования геосферных возмущений гелиогеофизического происхождения. <http://econfr.ae.ru/article/6546>.
5. Мирмович, Э. Г. Прогноз погоды средней атмосферы // «Человек и стихия», Ежегодник. М.: «Наука». 1986. С. 77–80.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ МОЩНОСТЬЮ УНЧ ВОЛН В ДИАПАЗОНЕ 1-5 мГц И ПОТОКОМ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ПОРЯДКА 100 КЭВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

**Зворыгина Е. С.<sup>1</sup>, Ягова Н. В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, [zvorygina-el@yandex.ru](mailto:zvorygina-el@yandex.ru)

<sup>2</sup>ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

По данным измерений на спутнике GOES исследуется вклад УНЧ волн диапазона 1-5 мГц в ускорение электронов. Для количественной оценки взаимосвязи используется максимальное значение коэффициента корреляции и время, на котором он достигается, в зависимости от энергии и направления частиц. Ранее для условий слабой и умеренно возмущенности было обнаружено, что коэффициент корреляции падает, а время достижения максимума корреляции растет от нескольких часов до примерно суток при увеличении энергии электронов от 40 до 400 кэВ [1].

В настоящей работе проверяется устойчивость полученных закономерностей при разных уровнях геомагнитной возмущенности. Для этого результаты, полученные в [1] для одного интервала длиной 30 суток, исследуются в течение нескольких интервалов той же длины. Показано, что закономерности качественно совпадают для разных интервалов. Так для всех комбинаций "компонента поля – энергия/направление потока электронов" сохраняются положительные корреляции. Небольшие количественные отличия между интервалами обнаружены как в значениях максимального коэффициента корреляции и изменение времени его достижения, причем максимальное относительное отличие наблюдается при малых энергиях, когда связь между мощностью УНЧ и потоками электронов более сильная. Выявленные отличия вероятно связаны с отличиями в геомагнитной возмущенности и амплитуд УНЧ.

1. Зворыгина Е. С., Ягова Н. В. // 18-я Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 6-10 февраля 2023, ИКИ РАН, Москва, сборник тезисов, стр. 377.

## СВЯЗЬ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ИЗ ОБЛАСТИ ДИММИНГОВ

Родькин Д.Г., Слемзин В.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, rodkindg@gmail.com

Источниками сильных геомагнитных бурь чаще всего являются межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ), порождаемые корональными выбросами массы (КВМ) в солнечной короне. Известно, что интенсивность геомагнитных бурь коррелирует с величиной южной компоненты магнитного поля ( $B_z$ ) МКВМ, которую заранее предсказать по солнечным наблюдениям пока не удается. В этих условиях предварительный среднесрочный прогноз вероятности возникновения бури может быть получен в предположении, что сила бури связана с величиной магнитного потока из области эрупции, наблюдаемой как димминг на Солнце. Ранее в статьях [1-3] было показано, что для КВМ, приведших к геомагнитным бурям с  $Dst < -100$  нТ, существует высокая степень корреляции между суммарным потоком магнитного поля в областях, затронутых эрупцией и индексами геомагнитной активности. Однако, при оперативном среднесрочном прогнозировании бурь эти результаты напрямую неприменимы, поскольку заранее не известно, вызовет ли КВМ геомагнитное возмущение.

В данной работе рассматривается связь геоэффективности МКВМ с интегральным магнитным потоком из области диммингов на Солнце, для произвольных событий, регистрируемых в рамках оперативного прогноза. В качестве исходных брались данные по диммингам и соответствующим магнитным потокам из статьи [4]. Для исследования были рассмотрено 37 событий за период 2010-2012 гг., для которых можно было поставить в соответствие КВМ из каталога CDAW [5] и сопоставить МКВМ, фиксируемый у Земли по данным OMNI [6]. При установлении соответствия между диммингами на Солнце и появлением МКВМ у Земли использовалась модель магнитодинамического торможения DBM (Drag-Based model, [7]). Данные по  $Dst$ ,  $A_p$  и  $K_p$  - индексам для установленных МКВМ были взяты из World Data Center for Geomagnetism [8] и каталога с сайта GFZ-Potsdam [9].

Результаты показывают, что наблюдается общий тренд на увеличение геоэффективности МКВМ с повышением величины магнитного потока ( $\Phi$ ) из области диммингов. Для диапазона  $\Phi < 4 \cdot 10^{21}$  Мкс было получено, что только 9 из 29 МКВМ привели к магнитным бурям (30% вероятность возникновения бури), а для  $\Phi > 4 \cdot 10^{21}$  Мкс имелось 7 из 8 МКВМ, вызвавших умеренные и сильные бури.

1. I. M. Chertok, V. V. Grechnev, A. V. Belov, A. A. Abunin // Solar Phys. 2013. **282**. 175-199.
2. I. M. Chertok, M. A. Abunina, A. A. Abunin, A. V. Belov, V. V. Grechnev // Solar Phys. 2015. **290**. 627-633.
3. I. M. Chertok, V. V. Grechnev, A. A. Abunin // Solar Phys. 2017. **292**. 62.
4. K. Dissauer, A. M. Veronig, M. Temmer, and T. Podladchikova, K. Vanninathan // Astrophys. J. 2018. **863**. 169.
5. [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)
6. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>
7. B. Vršnak, T. Žic, D. Vrbanec, M. Temmer, T. Rollett, C. Möstl, A. Veronig, J. Calogovic, M. Dumbovic, S. Lulic, Y.-J. Moon, A. Shanmugaraju // Solar Phys. 2013. **285**. 295.
8. [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html)
9. [https://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/Kp\\_ap\\_since\\_1932.txt](https://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/Kp_ap_since_1932.txt)

## АННОТИРОВАННЫЙ АТЛАС ПРИМЕРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМИССИЙ В АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ИМАДЖЕРАМИ И ИЗОБРАЖАЮЩИМИ СПЕКТРОГРАФАМИ С РАЗНЫХ ОРБИТ И ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. ЧАСТЬ 2. АВРОРАЛЬНЫЕ И АВРОРА-ПОДОБНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВОЗБУЖДЕННЫЕ ПРИРОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, ВКЛЮЧАЯ ВОЛНЫ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ

А.К. Кузьмин<sup>1</sup>, А.М. Мерзлый<sup>1</sup>, О.В. Никифоров<sup>1</sup>, А.А. Петрукович<sup>1</sup>, Ю.Н. Потанин<sup>2</sup>, А.М. Садовский<sup>1</sup>, А.Д. Соколов<sup>3</sup>, А.Т. Янаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ЦАО Росгидромет, г. Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

В продолжение работы, начатой в 2022 г, составлена часть 2 аннотированного атласа примеров изображений структур эмиссий и характеристик плазмы в авроральном овале и субавроральной области во время событий, происходивших в разных секторах MLT в основном в геомагнитно-возмущенных условиях суббурь. Мотивацией создания атласа стал дальнейший анализ опыта развития технологии подготовки и проведения комплексных экспериментов, нацеленных на создание системы картографирования и диагностики многообразных динамических авроральных явлений в полярной ионосфере, отражающихся в мгновенном поле градиентов  $Ne$  в различных высотных слоях, являющихся основными «виновниками» проблем при распространении трансполярных сигналов. Как и часть 1, эта работа в основном акцентирована на результатах наблюдений авроральных эмиссий, полученных с помощью изображающих камер с поверхности Земли и с орбит КА с полярным углом наклона плоскости. Большинство представленных примеров конкретных авроральных и аврора-подобных структур, сопровождаются среднемасштабными изображениями частей 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 сканирующих по пространству изображающих спектрографов SSUSI, а также его «предшественника» GUVI на орбите КА TIMED. Некоторые примеры также сопровождаются результатами сопутствующих измерений распределений характеристик потоков высыпавшихся частиц (анализатор SSJ), градиентов магнитного поля и результатах локальных наблюдений градиентов  $Ne$  радарными некогерентного обратного рассеяния в соответствующих секторах полярной ионосферы в близкое к событиям время. В части 1 [Кузьмин и др., 2022] был рассмотрен ряд примеров авроральных структур, включая пульсирующие, возбуждение которых связано с процессами увеличения энергии высыпавшихся электронов Альфвеновскими волнами в ближней магнитосфере, и их флуктуациями и резонансами, а также продольными электрическими полями, и продольными токами, текущими вдоль силовых линий в этих областях. В данной работе **первая** глава посвящена примеру локальной реакции ионосферы на интенсификацию полярных сияний на полярной границе овала, известной как PBI (poleward boundary intensification) [Lyons et al., 2002]. Этот пример сопровождается данными радара некогерентного рассеяния (ISR Incoherent scatter radar) и оптических приборов в Sondrestrom, Гренландия в сочетании с орбитальными измерениями с орбит КА IMAGE и FAST. **Вторая** глава посвящена особенностям относительно редко встречающегося типа динамических авроральных лучевых структур, называемых «пылающими полярными сияниями» (flaming aurora), возбуждаемых высыпаниями авроральных электронов разных энергий и характеристикам, сопутствующих им, естественно усиленных ионно-акустических линий NEIAL (naturally enhanced ion-acoustic lines), наблюдаемых в областях лучевых структур при отражениях (эхо) сигналов радаров некогерентного обратного рассеяния на разных высотах магнитных силовых линий; в **третьей** главе рассмотрены примеры характеристик некоторых аврора-подобных фрагментированных структур и их особенностей, названных авторами их исследователей FAEs (Fragmented Aurora-like Emissions), наблюдаемых на полярной стороне аврорального овала; в **четвертой** главе: анализируются примеры и особенности структур STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement), и часто сопровождающих их мелкомасштабных структур PF (Picket Fence), наблюдаемых в субавроральной области на фазе восстановления. К генерации почти всех рассмотренных структур причастны волны различных типов или их турбулентность. Анализ особенностей и характеристик FAEs таких как: “Lumikot” [McKay et al., 2019]; “Dunes” [Palmroth et al., 2020] и ряд других предполагается рассмотреть в следующей части работы.

## ТРЕБОВАНИЯ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ К МОНИТОРИНГУ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Бычков А.В., Федяй О.В.

*Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия,  
[alekseikovshinov@yandex.ru](mailto:alekseikovshinov@yandex.ru)*

Для режима функционирования магистральных электрических сетей опасность представляют геоиндуцированные токи (ГИТ), величина которых достаточна для насыщения магнитной системы силовых трансформаторов. Наиболее чувствительны к воздействию ГИТ силовые трансформаторы с номинальной мощностью свыше 80÷100 МВА, номинальным напряжением обмоток высокого напряжения 220 кВ и выше, с магнитной системой броневого и бронестержневого типа. Своевременное обнаружение опасных по величине ГИТ является необходимым условием принятия адекватных диспетчерских решений для сохранения устойчивости режима функционирования магистральной электрической сети в условиях геомагнитных возмущений и может быть обеспечено путем мониторинга тока в заземленных нейтралях блочных трансформаторов электростанций, сетевых трансформаторов тупиковых подстанций, узловых и проходных подстанций с различной пространственной ориентацией примыкающих линий электропередачи. Сотрудниками Тольяттинского государственного университета ведется разработка локальной системы мониторинга ГИТ в нейтрали силового трансформатора типа ЛСМ – ГИТ-1000 с учетом требований оперативно-диспетчерского управления режимом функционирования магистральной электрической сетью. К числу основных таких требований относятся следующие:

- режим измерения ГИТ – непрерывный, режим регистрации – по сигналу запуска при насыщении магнитной системы силового трансформатора под воздействием ГИТ;
- регистрируемые сигналы – сигнал тока нейтрали, получаемый от измерительного преобразователя с датчиком Холла, сигналы ГИТ и гармоник тока намагничивания, выделяемые блоком фильтров из сигнала тока нейтрали, сигналы токов и напряжения обмоток силового трансформатора, получаемые от трансформаторов тока и напряжения подстанции (электростанции);
- возможность сохранения информации и передачи по протоколу МЭК 61850 для объединения локальных систем мониторинга ГИТ отдельных силовых трансформаторов в глобальную систему мониторинга ГИТ в критических узлах магистральной электрической сети;
- дополнительная визуальная индикация «светофорного» вида: «зеленый» – ГИТ отсутствует; «желтый» - ГИТ недостаточно большой для насыщения магнитной системы; «красный» - ГИТ вызывает насыщение магнитной системы;
- предпочтительные узлы в магистральной электрической сети для мониторинга ГИТ – блочные трансформаторы электростанций, сетевые трансформаторы тупиковых подстанций, узловых и проходных подстанций с различной пространственной ориентацией примыкающих линий электропередачи;
- предпочтительные силовые трансформаторы для мониторинга ГИТ – номинальной мощностью свыше 80÷100 МВА, с номинальным напряжением обмоток высокого напряжения 220 кВ и выше, с магнитной системой броневого и бронестержневого типа.

Ожидаемый технологический эффект от внедрения систем мониторинга: локальный (при единичном использовании) - предотвращение повреждения силового трансформатора от воздействия ГИТ; системный (при массовом использовании) - уменьшение количества аварийных отключений при геомагнитных возмущениях.

## Компактные приборы для измерения параметров плазмы

Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Петух А.И., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю.

*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [modaldi@cosmos.ru](mailto:modaldi@cosmos.ru)*

Использование современной электронно-компонентной базы позволяет в значительной степени миниатюризировать модули электроники, отвечающие за функционирование высоковольтных источников питания, детекторной части и плат управления, и при этом сохранить высокие показатели надежности разрабатываемых приборов. Совместно с широким использованием компьютерного моделирования при разработке модулей электростатической оптики это дает возможность создать концепцию компактных спектрометров ионов и электронов, отвечающих современным требованиям к плазменным приборам и при этом пригодных для размещения либо на борту малых космических аппаратов, либо в составе служебной аппаратуры на борту спутников.

Подобные спектрометры могут быть использованы как для мониторинга за состоянием магнитосферы и ионосферы в рамках актуальной тематики космической погоды, так и использоваться в качестве дополнительной полезной нагрузки на малых космических аппаратах при осуществлении межпланетных миссий. Так, использование субспутника, оснащенного ионным спектрометром в миссии Венера-Д могло бы значительно повысить ценность научных данных, получаемых комплексом плазменных приборов, а оснащение луноходов компактными спектрометрами плазмы и детекторами энергичных нейтральных атомов позволило бы исследовать процессы взаимодействия солнечного ветра с реголитом на различных участках лунной поверхности, а также исследовать процессы зарядки поверхности луны под воздействием ультрафиолета и потоков космической плазмы.

Перспектива использования компактных спектрометров в составе служебной аппаратуры на борту спутников позволит исследовать зарядку космических аппаратов под воздействием различных факторов, а также, в зависимости от орбиты, выполнять измерения параметров плазмы. Создание орбитальной группировки спутников, оснащенных подобными спектрометрами, позволит осуществлять синхронизированные по времени измерения параметров космической плазмы в различных областях орбиты, обеспечивая мониторинг космической погоды и проводя уточнение моделей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

В данном докладе приводится концепция комплекса компактных спектрометров ионов и электронов, пригодных для разрешения на борту малых космических аппаратов, дается оценка их аналитических и технических характеристик, рассматриваются научные задачи, которые могут быть решены с использованием подобного комплекса приборов.

## ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЙ С ПАРАМЕТРАМИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Лагойда И.А., Майоров А.Г., Сирук С.А., Юлбарисов Р.Ф.

*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, [IALagoida@mephi.ru](mailto:IALagoida@mephi.ru)*

Космической погодой называют совокупность явлений и процессов, происходящих в верхних слоях земной атмосферы, в ионосфере и околоземном космическом пространстве. Эти процессы тесно связаны с активностью Солнца и различными эффектами динамики солнечной плазмы. Корональные выбросы массы (КВМ) являются самыми масштабными явлениями, происходящими в гелиосфере и часто сопровождаются солнечными вспышками. Во время КВМ с атмосферы Солнца выбрасывается огромное количество солнечной плазмы, которая затем распространяется в межпланетном пространстве с большими скоростями. КВМ в солнечном ветре являются основными причинами геомагнитных бурь на Земле, последние могут быть ответственны за нарушения стабильной работы различной спутниковой и наземной аппаратуры, критически важной для поддержания нормального функционирования жизнедеятельности человека. Частицы космических лучей взаимодействуют с движущейся структурой КВМ, что проявляется в виде эффектов, известных сегодня как Форбуш понижения [1].

Таким образом совокупное изучение вышеперечисленных явлений и сопутствующих им процессов является важной научной задачей, заключающейся в создании новых научных методов, позволяющих прогнозировать последствия геомагнитных бурь на Земле. В работе по данным сети нейтронных мониторов и спектрометров PAMELA [2], AMS-02 [3] было отобрано более 10 событий Форбуш понижения, произошедших в период с 2006 по 2019 г. Для изучения характеристик КВМ, потенциально ответственных за формирование наблюдаемых Форбуш понижения, использовались данные обсерватории SOHO [4]. Данные о солнечном ветре, межпланетном магнитном поле и других характеристиках околоземного пространства получены из базы данных OMNI. Проведен корреляционный анализ амплитуд и времен восстановления профилей Форбуш понижения с основными параметрами космической погоды в околоземном пространстве. На основании данных спутниковых экспериментов была откалибрована сеть российских нейтронных мониторов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей» № FSWU-2023-0068 и проекта № 20-72-10170 Российского Научного Фонда.

## НЕГАТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА БЛОК «ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР»

Вахнина В.В.<sup>1</sup>, Кувшинов А.А.<sup>1</sup>, Черненко А.Н.<sup>1</sup>, Пудовинников Р.Н.<sup>1</sup>, Тренькин А.А.<sup>2</sup>, Воеводин С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

<sup>2</sup> *Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Росси, [VVVahkina@yandex.ru](mailto:VVVahkina@yandex.ru)*

Влияние геоиндуцированных токов (ГИТ) становится критичным после достижения некоторого порогового значения, при котором начинается одностороннее насыщение магнитной системы блочного трансформатора, инициирующее возникновение целого ряда негативных эффектов, способных нарушить нормальное функционирование «блока генератор-трансформатор». В частности, происходит увеличение синхронным генератором генерации реактивной мощности, необходимое для компенсации мощности намагничивания блочного трансформатора, но которое сопровождается увеличением тока статора сверх номинального значения и созданием условий для срабатывания защиты генератора от симметричной перегрузки и отключения блока «генератор-трансформатор» от электрической сети. Гармоники тока намагничивания, возникающие при одностороннем насыщении магнитной системы блочного трансформатора, образуют прямую ( $n = 4, 7, 10, 13, \dots$ ) или обратную ( $n = 2, 5, 8, 11, \dots$ ) последовательности, которые трансформируются в цепи статорных обмоток синхронного генератора и создают паразитные асинхронные моменты, которые на несколько порядков меньше синхронного электромагнитного момента при номинальной нагрузке синхронного генератора. Однако, они могут оказывать негативное влияние при работе генератора в режиме синхронного компенсатора или холостого хода. Как показали исследования, в цепи статорных обмоток генератора наибольшим является ток второй гармоники, который может достигать половины номинальной величины статорного тока, что создает условия для срабатывания защиты обратной последовательности с типичным диапазоном уставок ( $0,3 \div 0,7$ ) номинального тока. Вращение второй гармонической составляющей магнитного поля с утроенной угловой синхронной частотой относительно ротора приводит к возникновению радиальных магнитных сил тяжения, которые перемещаются вдоль окружности воздушного зазора генератора, создавая радиальные вибрации ротора с частотой 300 Гц, способные привести к механическому повреждению ротора генератора.

1. Cane H.V. // Space. Sci. Rev. 2000. V. **93**. P. 55.
2. Pamela Collaboration et al. // La Rivista del Nuovo Cimento. 2017. V. **40**. P. 473.
3. Aguilar M. et al. // Phys. Rep. 2021. T. **894**. P. 1.
4. Domingo V., Fleck B., Poland A. I. // Sol. Phys. 1995. V. **164**. P. 1.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОМБИНИРОВАННОЙ ВОЛНОВОЙ ДИАГНОСТИКИ (КВД) ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЛКО- И КРУПНО-МАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ.

**Климов С.И.<sup>1</sup>, Грушин В.А.<sup>1</sup>, Новиков Д.И.<sup>1</sup>, Осадчая Л.А.<sup>1</sup>, Эйсмонт Н.А.<sup>1</sup>, Костров А.В.<sup>2</sup>, Галка А.Г.<sup>2</sup>, Сегеди П.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, [sklimov@iki.rssi.ru](mailto:sklimov@iki.rssi.ru)

<sup>2</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> БЛ-Электроникс, г. Вакдука, Венгрия

Комбинированная волновая диагностика (КВД), как метод, была впервые представлена на *COSPAR COLLOQUIUM'96 Magnetospheric Research with Advanced Techniques, Beijing China, 15-19 April 1996* [1]. Использование КВД практически началось на спутнике ПРОГНОЗ-8 (измерение флуктуаций потока плазмы 0.1 - 125 Гц цилиндром Фарадея). Измерения флуктуаций тока проводились на ПРОГНОЗ-10 и ИНТЕРБОЛ-1. Измерения магнитных флуктуаций производились стандартными способами - индукционными и феррозондовыми датчиками.

Использование КВД на микроспутнике «Чибис-М» [2] позволило исследовать профили плазменно-волновых неоднородностей при его баллистическом снижении с высоты 513 км (25.01.2012 г.) до входа в плотные слои атмосферы (15.10.2014 г.).

В докладе представлены методические и организационные вопросы фундаментальных исследований солнечно-земных связей на Российской орбитальной станции РОС [3], в рамках планируемой целевой работы «Обстановка – РОС», практически объединяющей задачи и технические решения в нереализованных на МКС экспериментах «Обстановка (2-й этап)» и «Трабант». Более высокое, по сравнению с МКС (~52°), наклонение солнечно-синхронной орбиты РОС (96,8°), будет способствовать охвату всей территории России, включая полярные области и созданию базы экспериментальных плазменно-волновых и пространственно-временных данных по состоянию ионосферы Земли для выявления и предотвращения ее катастрофических изменений.

1. Klimov, S.I., M.N. Nozdrachev, A.A. Petrukovich, S.A. Romanov, S. Savin, A. Skalsky, V.A. Grushin, N.E. Ryb'eva, V.E. Korepanov, J. Juchniewicz, J. Blecki, P. Triska, E. Amata, J. Buechner, L.J.C. Woolliscroft. Combined wave diagnostics - a new tool for the plasma turbulence studies. *COSPAR COLLOQUIUM'96 Magnetospheric Research with Advanced Techniques, Beijing China, 15-19 April 1996, Abstracts*, p. 18-19, 1996.

2. Зелёный Л.М., Климов С.И., Ангаров В.Н., Родин В.Г., Назаров В.Н., Суханов А.А., Батанов О.В., Готлиб В.М., Калюжный А.В., Каредин В.Н., Козлов В.М., Козлов И.В., Эйсмонт Н.А., Ледков А.А., Новиков Д.И., Корепанов В.Е., Боднар Л., Сегеди П., Ференц Ч., Папков А.П., Лизунов А.А. Космический эксперимент «Микропутник» на Российском сегменте международной космической станции. *Космическая техника и технологии* № 3(10)/2015, с. 26-37.

3. Российская орбитальная станция (РОС). Официальный сайт ПАО «РКК «Энергия».  
<https://www.energia.ru/ru/spaceactivities/ros-station.html>

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПУТЕМ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ РАДИОСТАНЦИЙ КВ ДИАПАЗОНА

**Е.В. Глашкина<sup>1</sup>, Н.Н. Палей<sup>2</sup>, Н.А. Фрезе<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> ОАО НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, [eglashkina@niidar.ru](mailto:eglashkina@niidar.ru)

<sup>2</sup> ОАО НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, [npaley@niidar.ru](mailto:npaley@niidar.ru)

<sup>3</sup> ОАО НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, [nfreeze@mail.ru](mailto:nfreeze@mail.ru)

Геофизические условия распространения радиоволн КВ диапазона в высоких широтах имеет свою специфику [1]:

резкое изменение параметров ионосферы по времени и пространству;

особые динамические эффекты, вызванных движением границ аврорального овала и

главного ионосферного провала;

недостаточное количество средств измерения параметров ионосферы.

В работе рассмотрен метод изучения ионосферы, в том числе и в высоких широтах.

1. Научно-технический отчет о НИР «Исследование возможностей загоризонтного обнаружения воздушных целей в арктической зоне», АО «НПК «НИИДАР», 2023 г.

## НЕКОТОРЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ И ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В АВРОРАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.

ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [zhanna@pgia.ru](mailto:zhanna@pgia.ru)

Разработаны и предложены методики дистанционной диагностики параметров потока высыпающихся электронов и состояния ионосферной плазмы в области полярных сияний по данным спектрофотометрических наблюдений:

- a) методики оценки параметров потока высыпающихся электронов по данным измерений интенсивности излучения LBH полос молекулярного азота, полос первой отрицательной системы иона молекулярного азота и эмиссии 630.0 нм атомарного кислорода;
- b) методика восстановления высотных профилей энерговыделения, сформированных потоками высыпающихся электронов, на основе триангуляционных наблюдений структур полярных сияний камерами с приемниками, регистрирующими излучение в широком диапазоне длин волн 380.0 ÷ 580.0 нм;
- c) методика оценки высотных профилей концентрации окиси азота NO в полярных сияниях по данным измерения интенсивностей излучения в эмиссиях 427.8, 557.7 и 630.0 нм;
- d) методика для моделирования планетарного распределения интенсивностей свечения и полной электронной концентрации в полярных сияниях по данным эмпирических моделей электронных высыпаний, включающих в себя планетарное распределение потоков энергии и средней энергии высыпающихся авроральных электронов и не требующая каких либо априорных предположений о форме энергетического спектра потока высыпающихся электронов;

## ОСОБЕННОСТИ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Шубин В.Н., Крашенинников И.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [shubin@izmiran.ru](mailto:shubin@izmiran.ru)

Высыпание частиц магнитосферного происхождения вызывает дополнительную ионизацию в высокоширотной ионосфере на высотах E-слоя. В ночное время, особенно зимой и ночью, ионизация слоя E может доминировать над уровнем ионизации слоя F2. Нами были исследованы профили электронной концентрации, полученные из радиозатменных данных спутников CHAMP, Formosat-3/COSMIC и Fengyun-3D. Для извлечения вертикальных профилей, которые показывают абсолютный максимум ионизации в E-слое в диапазоне высот 90–130 км, был разработан алгоритм, который может распознавать форму таких профилей.

Было обнаружено, что высотные профили электронной концентрации Международной справочной модели ионосферы (IRI) в ночной высокоширотной ионосфере становятся некорректными и имеют резкий излом на высотах ~150–200 км. Предложен метод исправления таких профилей электронной концентрации на этих высотах.

## ВАРИАЦИИ ФОНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ

**Крашенинников И.В., Митин О.В..**

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [krash@izmiran.ru](mailto: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, генерируемый циклотронным излучением и токами в среде (широкополосный шум), наиболее интенсивный в километровом диапазоне радиоволн – auroral kilometric radiation (AKR) [1]. В [2] отмечалось появление всплесков излучения на частоте 28 МГц, регистрируемые риометром, сопровождаемые генерацией низкочастотных шумов (8 кГц) и предполагалось, что излучение может генерироваться в ионосфере, возможно, за счет короткоживущих плазменных колебаний в столбах ионизации, создаваемых острым фронтом ионизирующего потока частиц. Амплитуда аддитивной компоненты составляла 1-2 дБ по отношению к галактической составляющей фонового электромагнитного шума [3].

В данной работе представлены результаты регистрации фонового шума и вариаций сигнала от ст. Москва (РВМ) на частоте 5 МГц на ст. Москва (ИЗМИРАН) во время высокоинтенсивной ионосферной бури 05 ноября 2023 г., когда полярный овал доходил до широты 55°. На рис. 1, левая панель представлены сглаженные значения фонового шума в интервале времени 19:30-20:30 UT – в ночное время с низким уровнем антропогенной составляющей иллюстрирующие возрастание интенсивности электромагнитного шума в период подхода экваториальной границы полярного овала с амплитудой ~ 1.5 дБ. Данные регистрации ионозонда “Парус-А” – рис.1, правая панель в 20:00 UT (отмечена след от аврорального слоя E ионосферы в ночных условиях) показывают, что ст. Москва (ИЗМИРАН) действительно находилась на границе области полярного овала.

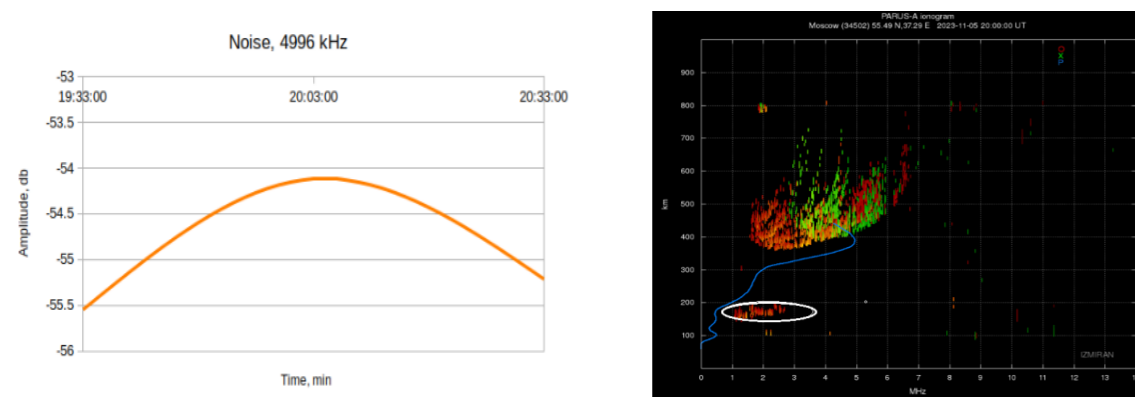


Рис. 1 Уровень фонового электромагнитного шума во время сильной ионосферной бури 05/11/2023 (левая панель) и ионограмма V3 на ст. Москва(ИЗМИРАН) в 20:00 UT.

1. LaBelle, J., Treumann, R.A. Auroral Radio Emissions, 1. Hisses, Roars, and Bursts // Space Science Reviews, 2002. V. 101. P. 295–440. <https://doi.org/10.1023/A:1020850022070>
2. Harang L. Radio noise from aurora // Planetary and Space Science, 1969. V. 17, No. 5, P. 869-877. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(69\)90093-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(69)90093-2).
3. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing, 240 p. 1987.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННОЙ ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ВЫСОКОШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ ПРИ РАБОТЕ НАГРЕВНОГО СТЕНДА EISCAT/HEATING: ДНЕВНЫЕ ЧАСЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**Фролов В.Л.<sup>1,2</sup>, Благовещенская Н.Ф.<sup>3</sup>, Ритвелд М.Т.<sup>4</sup>, Паро М.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет (г. Н. Новгород, 603950, Россия, [frolov@nirfi.unn.ru](mailto:frolov@nirfi.unn.ru))

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет (г. Казань, Россия)

<sup>3</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (г. С.-Петербург, Россия)

<sup>4</sup>EISCAT Scientific Association (Ramfjordmoen, Norway)

<sup>5</sup>Environment Physics and Chemistry Laboratory (Orléans, France)

Представлены результаты измерений характеристик искусственной инжекции (ИИ) энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты при модификации высокоширотной ионосферы Земли мощными КВ радиоволнами. Эти эксперименты проводились в 2006 – 2010 гг. на нагревном стенде EISCAT/Heating, г. Тромсе, Норвегия (69.6° с.ш., 19.2° в.д.,  $L = 6.2$ ) в дневные часы ( $T \approx 10$  UT) в спокойных геомагнитных условиях. Мощная КВ радиоволна О-поляризации излучалась на частотах  $f_0 = 4.040 - 5.423$  МГц в магнитный зенит при эффективной мощности излучения  $P_{эфф} = 120 - 200$  МВт. Регистрация ИИ осуществлялась бортовой аппаратурой французского спутника DEMETER на высоте 660 км. По согласованию с центром управления спутником она оставалась включённой до широт  $\sim 75^\circ$  с.ш., что позволило провести измерения характеристик ИИ как над стендом, так южнее и севернее его.

Выполненные исследования продемонстрировали, что в дневных условиях ИИ имеет двухкомпонентную структуру. Первая компонента определяется широким спектром энергий электронов с  $E$  от 70 до 1000 – 1500 кэВ, но с невысокой или умеренной плотностью потока  $F$  частиц:  $\log F \approx 0.5 - 2$  ( $F$  имеет размерность  $\{эл/(с см^2 стер кэВ)\}$ ) с меньшими потоками для более высоких энергий. Она регистрируется приблизительно в полосе широт  $63 - 75^\circ$  с.ш. с максимумом энергии электронов на широтах  $\sim 66^\circ$  с.ш. Видно, что, как и на средних широтах, область ИИ распространяется от нагревного стенда дальше в сторону магнитного полюса, чем к экватору; протяжённость ИИ вдоль орбиты спутника составляет 1200 – 1700 км, что соответствует смещению по широте  $\sim 1300$  км. В поперечном к геомагнитному полю направлению ИИ регистрировалась до  $\pm 250$  км относительно центра возмущённой магнитной силовой трубки, что соответствует результатам измерений на средних широтах. Отмечается, что интенсивность первой компоненты ИИ остаётся ещё достаточно высокой и через две недели после геомагнитных возмущений, имевших умеренную интенсивность.

Вторая компонента ИИ характеризуется узким спектром энергий электронов до 70 – 150 кэВ, но с высокой плотностью их потока ( $F$  до 2.5 – 3), что на порядок и больше превышает плотность потока первой компоненты для  $E \approx 500 - 1000$  кэВ. Часто область регистрации этой компоненты располагалась несколько севернее области регистрации первой компоненты и характеризуется присутствием нескольких зон ИИ. Отмечается, что изменение интенсивности обеих компонент показывает разное поведение при изменении условий измерений. Эти и другие свойства двух компонент ИИ могут свидетельствовать о разной природе их генерации.

Работа Фролова В.Л. выполнялась по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ. Исследования Благовещенской Н.Ф. выполнялись при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17- 00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ С ОРБИТЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СТАНЦИИ РОС

Соколов А.Д., Кузьмин А.К.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [sokolov.ad@phystech.edu](mailto:sokolov.ad@phystech.edu)

В высоких широтах в ионосфере протекают динамические процессы, которые не происходят на более низких широтах. Основная причина заключается в том, что через полярную ионосферу, магнитосферу и магнитопаузу проходят одни и те же магнитные силовые линии из-за чего процессы в этих областях взаимосвязаны друг с другом.

Дистанционный метод измерений распределений интенсивности конкретных авроральных эмиссий позволяет контролировать характеристики высыпаний заряженных частиц.

Перспективность этих наблюдений в том, что на каждом витке станции РОС авроральные имаджеры будут пересекать северный и южный авроральный овалы в конкретных секторах MLT. Изображения позволят строить карты интенсивностей конкретных авроральных эмиссий. Методически были выведены соотношения [1,2] для авроральных эмиссий, связанные с распределениями средней энергии высыпавшихся электронов, и их потоком энергии, из которых можно вычислять проводимости Холла и Педерсена, интегрированные по высоте, которые можно использовать при анализе процессов в полярной ионосфере.

В данном докладе показана геометрия наблюдений эмиссий в авроральной структуре с помощью изображающих камер с орбиты перспективной Российской Орбитальной Станции (РОС). На платформе, перпендикуляр к которой направлен в надири, планируется установить четыре камеры: две для видимого диапазона ( $\lambda 427,8$  нм  $N_2^+$  и  $\lambda 630,0$  нм [OI]), и две для диапазона вакуумного ультрафиолета в полосах LBH  $N_2$  (135-160 нм и 150-180 нм). Высоты максимумов интенсивности этих эмиссий:  $\sim 105$  км,  $\sim 250-270$  км, и  $\sim 150$  км соответственно.

Отличительной особенностью РОС является, то, что высота предполагаемой орбита станции (300-350 км) будет проходить через F-слой полярной ионосферы (угол наклона плоскости к плоскости экватора  $i \sim 98^\circ$ ). Эти характеристики орбиты «позволят» камерам измерять эмиссии, как внутри F-слоя, так и в E-слое одновременно, что увеличивает точность измерений за счёт уменьшения поглощения и рассеяния излучения эмиссий, а также позволяет изучать электродинамическую обстановку в самом F-слое с помощью локальных методов.

1. Robinson R. M., R. R. Vondrak, K. Miller, T. Dabbs, and D. Hardy (1987), On calculating ionospheric conductances from the flux and energy of precipitating electrons, J. Geophys. Res., 92(A3)

2. Germany G. A., Spann J. F., Parks G. K., Brittnacher M. J., Elsen R., Chen L., Lummerzheim D. and Rees M. H. Auroral observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI) // Geospace Mass and Energy Flow: Results the International Solar-terrestrial Physics Program. Geophys. Monogr. Ser., vol. 104 – 1998.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Сорокин В.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, [sova@izmiran.ru](mailto:sova@izmiran.ru)

К вертикальному переносу зарядов в нижней атмосфере приводят такие процессы, как вертикальная турбулентная диффузия в горизонтальном ветре и вертикальные движения атмосферы в центре тайфуна. Переносимый заряд в атмосфере определяется наличием в ней заряженных аэрозолей. Характеристики концентрации аэрозолей в нижней атмосфере определяются параметром Aerosol Optical Depth (AOD) на основании спутниковых снимков. AOD вычисляется на основании измерения поглощения отраженного от Земли солнечного света на длине волны 550 нм видимого спектра. Известны результаты анализа изменения AOD на основе данных MODIS спутников Terra и Aqua, которые показали существенный рост концентрации аэрозолей за семь дней до землетрясения 12.05.2008 в Wenchuan, в Китае. Увеличение концентрации аэрозолей произошло в окрестности эпицентра вблизи разлома на день ранее возмущения ионосферы, температуры и относительной влажности атмосферы и появления уходящего теплового излучения. Почвенный газ выносит в атмосферу аэрозоли, как над сушей, так и над морем. Результаты экспериментальных исследований, полученные как наземными, так и спутниковыми методами, показали наличие связи между квазистационарными процессами в нижней атмосфере и электромагнитными и плазменными явлениями в ионосфере. Впервые квазистатические электрические поля, связанные с подготовкой землетрясения, были обнаружены перед подводным землетрясением на спутнике «ИКБ-1300». Дальнейшие исследования квазистатических полей на основе прямых спутниковых измерений над сейсмическими районами земного шара позволили сделать вывод о существовании квазистатического электрического поля в ионосфере сейсмической природы. Длительность возмущения электрического поля в ионосфере с амплитудой  $\sim 10$  мВ/м может составлять до 15 дней и, в то же самое время, не превышает его фоновых значений на поверхности Земли. Впервые возмущения электрического поля в ионосфере над районами развития тайфунов обнаружены на спутнике «Космос-1809». Возмущение электрического поля в ионосфере достигает 20 - 25 мВ/м, плотности плазмы возрастает в разы, а флуктуация плотности плазмы составляет 6-8 %. Модель формирования квазистатического электрического поля, соответствующая перечисленным выше его свойствам, основана на возмущении электрического тока в глобальной цепи при инжекции почвенными газами заряженных аэрозолей в атмосферу. В результате их турбулентного и конвективного переноса и гравитационного оседания в приземной атмосфере формируется ЭДС, включение которой в глобальную цепь приводит к возмущению в ней тока проводимости. Электрическое поле в ионосфере над областью тропического тайфуна возникает в результате вертикальных конвективных движений нижних слоев атмосферы в его центре и образованию стороннего тока. Аналогично грозовому облаку, вертикальная конвекция сопровождается разделением зарядов, носителями которых являются аэрозольные частицы с различной подвижностью и массой. Квазистационарный сторонний электрический ток в проводящей атмосфере является источником тока проводимости в глобальной цепи и, связанного с ними, электрического поля. Таким образом, динамические процессы в нижней атмосфере могут оказывать влияние на состояние ионосферы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201356396.

## СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА ПОГЛОЩЕНИЯ В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ НА СЕТИ СТАНЦИЙ ААНИИ

А.В. Дмитриев<sup>1</sup>, С.А. Долгачева<sup>2</sup>, О.А. Трошичев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия.

Эллиптическая модель широты обрезания солнечных космических лучей (СКЛ) рассчитана для событий СКЛ и геомагнитных бурь в феврале, марте сентябре 2014г., июне 2015г. и сентябре 2017г. с целью определения эффекта поглощения в полярной шапке (ППШ). Результаты расчетов сравниваются с наблюдениями эффекта ППШ на сети станций ААНИИ, расположенных на северных широтах России. Рассматривается зависимость широты обрезания от интенсивности магнитной бури, а также эффект дополнительной ионизации протонами СКЛ ночной и дневной ионосферы. Обсуждаются перспективы дальнейшего совершенствования эллиптической модели.

## ГЕОИНДУКТИРОВАННЫЕ ТОКИ В НОЧНОМ СЕКТОРЕ

Сахаров Я.А.<sup>1</sup>, Билин В.А.<sup>1</sup>, Селиванов В.Н.<sup>2</sup>, Аксенович Т.В.<sup>2</sup>, Мёрзлый А.М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, [sakharov@pgia.ru](mailto:sakharov@pgia.ru)

<sup>2</sup> Центр физико-технический проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты

<sup>3</sup> Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

Взаимодействие между солнечным ветром и магнитосферой Земли проявляется в различных явлениях космической погоды. Резкие изменения электрических токов в магнитосфере могут вызывать геомагнитные возмущения (ГМВ), сопровождающиеся возбуждением значительных токов на поверхности земли и в расположенных на земле проводящих системах. Эти геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) связаны с быстрыми изменениями геомагнитного поля, они могут достигать больших величин и приводить к серьезным нарушениям штатной работы технологических систем, таких как линии электропередач, системы автоматики железных дорог, защитных систем трубопроводов и пр. За последние два десятилетия установлены многие причины, определяющие характерные величины возбуждаемых ГИТ при различных ГМВ, однако особенности их развития и зависимость от параметров наблюдаемой сети, проводимости земли и спектрального состава геомагнитного возмущения требует более подробного исследования характеристик ГИТ в каждой наблюдаемой сети. В докладе рассмотрены распределения ГИТ, возбуждаемые в магистральной сети «Северный транзит» в околополуденном секторе местного времени при различных возмущениях.

## ГИТ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ (БУРИ, СУББУРИ И МАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ) 23–24 АПРЕЛЯ 2023 ГОДА

Дэспирак И.В.<sup>1</sup>, Сецко П.В.<sup>1</sup>, Любчик А.А.<sup>1</sup>, Najra R.<sup>2</sup>, Сахаров Я.А.<sup>1</sup>, Lakhina G.<sup>3</sup>,  
Селиванов В.Н.<sup>4</sup>, Tsurutani V.T.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Полярный Геофизический Институт, Анатиты, Россия, [despirak@gmail.com](mailto:despirak@gmail.com)

<sup>2</sup>CAS Key Laboratory of Geospace Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, People's Republic of China

<sup>3</sup>Retired, Vashi, Navi Mumbai, India

<sup>4</sup>Кольский научный центр РАН, Анатиты, Россия

<sup>5</sup>Retired, Pasadena, California, USA

Мы проанализировали интенсивные геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), зарегистрированные во время сложного явления космической погоды, наблюдавшегося 23–24 апреля 2023 года. Две геомагнитные бури с интенсивностью SYM/H -179 нТл и -233 нТл, были вызваны южным ММП Bz -25 нТл в области Sheath и -33 нТл в магнитном облаке (MC). Анализ ГИТ проводился в двух секторах местного времени: ночном (17:00–24:00 UT 23 апреля), во время Sheath-бури, и утреннем секторе (02:00–07:00 UT 24 апреля), во время MC-бури. Используя прямые измерения ГИТ на нескольких подстанциях Карело-Кольской линии электропередачи (расположенной на северо-западе России) и станции газопровода в районе Мантсала (юг Финляндии), нам удалось проследить меридиональный профиль увеличения ГИТ на разных широтах. Показано, что в ночном секторе усиление ГИТ (~18 – 42 А) происходило в соответствии с расширением к полюсу западного электроджета во время суббури. С другой стороны, интенсивные ГИТ в утреннем секторе (~12 – 46 А) были вызваны магнитными пульсациями Ps6. Помимо пульсаций Ps6, в утреннем секторе сопоставимый по интенсивности ГИТ (~44 А) был связан с локальным суббуреподобным возмущением, вызванным структурой высокой плотности в солнечном ветре. Эта структура была частью корональной петли межпланетного коронального выброса массы (ICME). Впервые продемонстрировано влияние корональной петли на появление интенсивных ГИТ.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В НЕЙТРАЛИ АВТОТРАНСФОРМАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аксенович Т.В.

ЦЭС КНЦ РАН, г. Анатиты, Россия, [t.aksenovich@ksc.ru](mailto:t.aksenovich@ksc.ru)

Во время геомагнитных бурь, являющихся следствием взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, в протяженных электрических сетях на поверхности Земли начинают протекать геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ). ГИТ становятся причиной целого ряда негативных явлений, влияющих на нормальную работу всей электроэнергетической системы. Примерами отрицательных эффектов ГИТ являются генерация четных и нечетных гармоник, увеличение потерь реактивной мощности, появление локальных перегревов обмоток и элементов конструкции трансформатора, генерация вибраций сердечника и обмоток трансформатора, нежелательное срабатывание защитных устройств. Обычно длительность протекания токов не превышает нескольких минут, но, из-за повторяющегося воздействия ГИТ на трансформаторы, они могут выйти из строя. В прошлом было зафиксировано несколько случаев, когда во время сильных геомагнитных бурь протекание ГИТ привело к отключениям высоковольтных энергетических систем в Канаде и Швеции.

Для исследования природы этого явления и его возможных эффектов на трансформаторы, в 2011 году была создана система мониторинга ГИТ, устройства которой были установлены на пяти подстанциях Кольско-Карельского транзита на Северо-Западе России. С начала работы системы мониторинга ГИТ было создано более 16000 файлов, содержащих данные токов в нейтралях автотрансформаторов. Общий размер этих файлов составляет около 27 ГБ на начало 2023 года. Непрерывно растущий объем данных, содержащих записи токов в нейтрали, не может быть проанализирован вручную в разумные сроки.

Для автоматического анализа 12-летних данных, накопленных системой мониторинга ГИТ на Северо-Западе России, была разработана модель сверточной нейронной сети (СНС). Для обучения модели СНС был создан набор данных, содержащий 800 изображений скейлограмм двух классов: ГИТ и геомагнитно «спокойные» часы. В результате сравнения производительностей четырех СНС с разной архитектурой, была выбрана модель, которая показала высокую эффективность классификации ГИТ на валидационной выборке (100.00 % точность и 0.0115 значение функции потери бинарной перекрестной энтропии). В состав предложенной модели СНС, помимо основных слоев, вошли слои предобработки и слой дропаута.

**СОБЫТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РОСТА ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ И В КАРЕЛИИ ЗА 11 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ**

**Белаховский В.Б.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Сахаров Я.А.<sup>1,2</sup>, Селиванов В.Н.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

<sup>2</sup> – Геофизический центр РАН, г. Москва

<sup>3</sup> – Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты

belakhov@mail.ru

В данной работе проанализированы случаи с экстремальными значениями геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) на Кольском полуострове и в Карелии за 2012-2022 года. Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом и Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН и включает в себя 5 станций, ориентированных в основном в направлении север-юг. Регистрация ГИТ ведется непрерывно с 2011 года, и к 2022 году сформировался “квазисолнечный цикл” регистрации ГИТ, включающий в себя 24-25 циклы солнечной активности. Данные ГИТ сопоставлялись с данными магнитометров ПГИ в обсерваториях "Ловозеро", "Лопарская", с данными магнитометров сети IMAGE. Экстремальные значения ГИТ и dB/dt сопоставлялись с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, индексами геомагнитной активности.

При анализе событий рассматривались данные авроральной станции Выходной (VKH) и субавроральной станции Кондопога (KND). В качестве экстремальных событий по данным станции VKH были отобрано 85 случаев, когда величина ГИТ превышала 30 А. Анализ показывает, что в большинстве случаев (60%) экстремальный рост ГИТ происходит во время СМЕ магнитных бурь, несколько случаев происходило без магнитных бурь (3%), остальные случаи – во время CIR бурь (37%). При этом наблюдается связь появления экстремальных событий ГИТ с циклом солнечной активности. Так в 2019, 2020 годах, в годы минимума солнечной активности, экстремальных случаев не было зафиксировано.

По данным станции KND отобрано 23 экстремальных события, когда величина ГИТ превышала 10 А. По данным станции KND экстремальные значения ГИТ наблюдаются в 87% случаев во время СМЕ бурь и в 13% случаев во время CIR бурь.

Наибольшие скачки ГИТ происходят во время суббурь (отрицательные магнитные бухты, связанные с развитием западного электроджета). При этом развитие вихревых токовых систем во время суббури (P3/Pc5 геомагнитных пульсаций) может давать заметный вклад в рост ГИТ для ЛЭП, ориентированной в направлении север-юг. Представлен анализ ГИТ во время сильных магнитных бурь за 11 лет наблюдений: 17-18 марта 2013 [1], 28-29 июня 2023 [2], 17-20 марта 2015, 7-8 сентября 2017, 27-29 мая 2017 и др.

1. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. 2018. № 1. С. 56-68.
2. Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Ya. and Selivanov V. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. 2019. 9. A18.

**СЕКЦИЯ «Волновые явления в космической плазме»**

**Среда, 07.02. 2024 г., комната 202**

			Председатель: <u>Шкляр Д.Р.</u>
	Время	Докладчик	Название доклада
1	14.00 - 14.20	Беспалов П.А.	Использование матрицы события для хоров из нижней частотной полосы с целью определения некоторых характеристик механизма их возбуждения
2	14.20 - 14.40	Кузнецов А.А.	Расчет спектральных свойств вейбелевской турбулентности в квазилинейном приближении
3	14.40 - 15.00	Емельянов Н.А.	Влияние столкновений на развитие вейбелевской неустойчивости в магнитоактивной плазме
4	15.00 - 15.20	Артеха Н.С.	Дисперсионные характеристики и поляризационные свойства низкочастотных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности
		<b>15.30 - 16.00</b>	<b>Перерыв на кофе</b>
			Председатель <u>Беспалов П.А.</u>
5	16.00 - 16.30	Викторов М.Е.	Исследование процессов при столкновении встречных потоков плазмы в лабораторной магнитной арке
6	16.50 - 17.10	Зудин И.Ю.	Преобразование формы и спектра электромагнитного импульса в коаксиальной линии, заполненной магнитоактивной плазмой
7	17.10 - 17.30	Воеводин С.В.	Возбуждение МГД-волн рамочной антенной на стенде НПМ-01 и сопоставление результатов с полуаналитической моделью
8	17.30 - 17.50	Романов Д.В.	Зарождение протуберанцев в солнечной атмосфере на нелинейной стадии развития неустойчивости Паркера крупномасштабных колебаний магнитных полей в верхних слоях конвективной зоны солнца
9	17.50 - 18.10	Афанасьев Н.Т.	Влияние хаотических плазменных неоднородностей на рефракцию электромагнитных волн в поле тяготения

**Четверг, 08.02. 2024 г., Конференционный Зал**

			Председатель: <u>Стародубцев С.А.</u>
	Время	Докладчик	Название доклада
1	09.30 - 09.50	Грач В.С.	Взаимодействие релятивистских электронов с пакетами электромагнитных ионно-циклотронных волн конечной длительности: роль нелинейных эффектов

2	09.50 - 10.10	Кузнецов В.Д.	МГД ударные волны в бесстолкновительной плазме солнечного ветра с тепловыми потоками
3	10.10 - 10.30	Рубцов А.В.	Возбуждение УНЧ-волны инверсной неустойчивостью протонов по наблюдениям спутника Arase
4	10.30 - 10.50	Смотровая Е.Е.	Резонансные взаимодействия УНЧ-волн с потоками протонов и электронов
<b>10.20 - 11.30</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
Председатель: <u>Кузнецов В.Д.</u>			
5	11.30 - 11.50	Пилипенко В.А.	Возможно ли зарегистрировать на спутнике УНЧ излучение сейсмогенного источника?
6	11.50 - 12.10	Моисеев А.В.	Исследование особенностей азимутального распространения геомагнитных Pc5 пульсаций и их эквивалентных токовых вихрей по данным наземных и спутниковых наблюдений
7	12.10 – 12.30	Стародубцев С.А.	МГД-волны в области предфронта межпланетных ударных волн 6 и 7 сентября 2017 г.
8	<b>12.30 - 13.00</b>	<i>Климушкин Д.Ю., Магер П.Н.</i> <b>Альфвеновские волны в реалистичных моделях магнитосферы: памяти Анатолия Сергеевича Леоновича</b>	
<b>13.00 - 14.00</b>		<b>Обед</b>	
Председатель: <u>Демехов А.Г.</u>			
9	14.00 - 14.20	Березуцкий А.Г.	Генерация альфвеновских волн сгустками лазерной плазмы в замагниченной плазме при малых числах Маха
10	14.20 - 14.40	Тищенко В.Н.	Резонансное взаимодействие сгустков плазмы с замагниченным фоном: самофокусировка вистлеров
11	14.40-15.00	Чумарин Г. А.	Поляризация синхротронного излучения галактических джетов
12	15.00 - 15.20	Трухачев Ф.М.	Влияние плазменных солитонов акустического типа на функции распределения по энергиям
<b>15.30 - 16.00</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
13	16.00 - 16.20	Трухачев Ф.М.	Перенос вещества как фундаментальное свойство солитонов акустического типа
16.20 - 19.00		<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии 08.02.2024  
«Волновые явления в космической плазме»

- 7.2.1 Ларченко А.В., Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. Распространение СДВ сигналов передатчиков радионавигационной системы РСДН-20 в периоды авроральных высыпаний
- 7.2.2 Ермакова Е.Н., Рябов А.В. Особенности суточной динамики спектральных параметров первой и второй моды шумановского резонанса при разных гелиогеофизических условиях

- 7.2.3 Шубин Д.А., Рубцов А.В., Климушкин Д.Ю. Наблюдения долгоживущих УНЧ-волн в магнитосфере Земли по данным спутников миссии THEMIS
- 7.2.4 Челпанов М.А., Климушкин Д.Ю., Магер П.Н. Нерезонансное взаимодействие электронов и УНЧ-волн
- 7.2.5 Жаравина П.Д., Беспалов П.А., Савина О.Н. Приоритетность возбуждения хором в областях с «изрезанным» геомагнитным полем
- 7.2.6 Демехов А.Г. Питч-угловая диффузия электронов радиационных поясов и потоки высыпавшихся частиц: зависимость от параметров ОНЧ волнового поля
- 7.2.7 Yelagandula N.V. A new insight into the linear theory of magnetoacoustic waves in the homogeneous flux tubes with an abrupt boundary
- 7.2.8 Лундин Б.В. О локальном НГР резонансе при регистрации ОНЧ волн в приземной плазме с электроотрицательными загрязнениями

**Пятница, 09.02. 2024 г., комната 202**

Председатель: <u>Титова Е.Е.</u>			
	<b>Время</b>	<b>Докладчик</b>	<b>Название доклада</b>
1	10.20 - 10.40	Шкляр Д.Р.	Приближенные формулы для показателя преломления электронных волн в плотной и разреженной плазме.
2	10.40 - 11.00	Лужковский А.А.	Перенос энергии между различными группами электронов в результате резонансного взаимодействия с волной свистовой моды
<b>11.00 - 11.30</b>		<b>Перерыв на кофе</b>	
3	11.30 - 11.50	Клейменова Н.Г.	ОНЧ «птички» в магнитные бури 2023 года.
4	11.50 - 12.10	Титова Е. Е.	Особенности спектров шумовых излучений вблизи половины электронной гирочастоты, наблюдаемые в экваториальной области магнитосферы на спутниках Van Allen Probes
5	12.10 - 12.30	Колпак В.И.	Интерпретация изменений спектра аврорального километрового радиоизлучения, наблюдаемого в приэкваториальной области магнитосферы Земли
6	12.30 - 12.50	Дорофеев Д.А.	О возможном механизме генерации гектометрового континуума
<b>13.00 - 13.15</b>		<b>ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>	



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЦЫ СОБЫТИЯ ДЛЯ ХОРОВ ИЗ НИЖНЕЙ ЧАСТОТНОЙ ПОЛОСЫ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМА ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Беспалов П.А.**<sup>1</sup>, **Савина О.Н.**<sup>2</sup>, **Нещеткин Г.М.**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [peter@ipfran.ru](mailto:peter@ipfran.ru)

<sup>2</sup> НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Работа посвящена изучению количественных характеристик механизма возбуждения ОНЧ хоровых излучений посредством анализа данных высокого разрешения с космического аппарата Van Allen Probe. Выбран характерный пример хоров со спектральными формами в нижней частотной полосе (ниже половины электронной циклотронной частоты) в области локального минимума магнитного поля за плазмопаузой в средней магнитосфере. 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. Расположение корней характеристического уравнения, установленных из данных наблюдений хоров, соответствует реализации ВРА (beam pulse amplifier) механизма возбуждения хоров посредством усиления шумовых электромагнитных импульсов в планарном волноводе уплотнения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-12-00268.

# РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В КВАЗИЛИНЕЙНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

**Кузнецов А.А.**, **Нечаев А.А.**, **Гарасев М.А.**, **Кочаровский Вл.В.**

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [kuznetsov.alexey@ipfran.ru](mailto:kuznetsov.alexey@ipfran.ru)

Для разнообразных задач физики космической бесстолкновительной плазмы, включая солнечный ветер и магнитосферы звезд и планет, характерны анизотропные распределения электронов по скоростям, подверженные аperiodической неустойчивости вейбелевского типа. Её развитие приводит к формированию мелкомасштабных токовых филаментов и согласованных с ними квазимагнитостатических турбулентных полей, существенно изменяющих кинетику плазмы. Настоящий доклад посвящен исследованию эволюции пространственного спектра вейбелевской турбулентности в двумерном приближении для подобной задачи с аксиально симметричным анизотропным распределением электронов по скоростям и выявлению роли тех или иных нелинейных эффектов в динамике спектра [1, 2].

Для этого из уравнений Максвелла-Власова была выведена оригинальная квазилинейная система уравнений, описывающая эволюцию пространственных мод (гармоник) распределения частиц по скоростям и связанных с ними электромагнитных полей. В данном выводе применено приближение слабой турбулентности, т.е. учтено взаимодействие мод лишь через их интегральное влияние на однородное в пространстве распределение частиц по скоростям. Для получения численных решений квазилинейной системы уравнений была написана и использована программа, основанная на стандартном алгоритме Стермера-Верле.

Посредством сравнения полученных решений квазилинейной системы с результатами аналогичных расчетов методом частиц в ячейках на основе кода ЕРОСН, учитывающим прямое четырехволновое взаимодействие мод и другие нелинейные эффекты, было установлено, что квазилинейное взаимодействие является определяющим на протяжении длительного промежутка нелинейного развития турбулентности. Вместе с тем, посредством проведенного анализа был выявлен и вклад нелинейного четырехволнового взаимодействия в эволюцию пространственного спектра в целом, а также отдельных мод в частности.

Преимуществом использования полученных численных решений квазилинейной системы является очень низкий уровень шума при исследовании динамики отдельных мод. Это позволило впервые установить и изучить различные стадии их эволюции, включая экспоненциальный и степенной рост, осцилляторное и практически монотонное затухание. Также были установлены некоторые свойства нелинейной эволюции спектра вейбелевской турбулентности, включая квазиавтомодельный характер и хорошо выраженные степенные наклоны спектра в длинноволновой и коротковолновой областях. Кроме того, была изучена зависимость среднего квадрата насыщающего турбулентного магнитного поля от величины начальной анизотропии одноосной функции распределения электронов по скоростям бимаксвелловского и бикаппа вида. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения квазилинейного подхода для детального изучения динамики квазимагнитостатической турбулентности как в области фундаментальной физики плазмы, так и для приложений в различных задачах слабостолкновительной космической плазмы.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект № 19-72-10111-П. 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. Кузнецов А.А., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В., Нечаев А.А., Гарасев М.А. // Физика плазмы 2022. Т. **48**, С. 836.

## ВЛИЯНИЕ СТОЛКНОВЕНИЙ НА РАЗВИТИЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Емельянов Н.А., Кочаровский Вл. В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [n.emelyanov@ipfran.ru](mailto:n.emelyanov@ipfran.ru)

Исследование генерации мелкомасштабных турбулентных магнитных полей актуально для современной физики слабостолкновительной плазмы и требуется для объяснения ряда явлений, наблюдаемых в космических и лабораторных условиях [1]. Так, возникновение подобных полей может существенным образом изменять ее транспортные свойства и приводить к появлению аномальной электро- и теплопроводности, влияя на крупномасштабные процессы и структуры. Одним из наиболее универсальных и часто реализующихся в неравновесной космической и лазерной плазме механизмов генерации мелкомасштабных хаотических магнитных полей является вейбелевская неустойчивость [2], имеющая место при наличии анизотропного распределения частиц по скоростям.

Изучению характеристик, определяющих развитие неустойчивости, таких как ее инкремент, порог возникновения и диапазон волновых чисел неустойчивых мод, посвящено значительное количество работ (см., например, [3]). В том числе исследуется влияние на неустойчивость внешнего магнитного поля [4] или столкновений частиц в плазме [5]. Однако одновременное действие обоих указанных факторов до сих пор не изучалось, несмотря на то что в естественных условиях они оба имеются и в ряде случаев их совместное влияние на динамику вейбелевской турбулентности может быть принципиальным.

В докладе в рамках кинетического подхода с учетом столкновений частиц анализируются дисперсионные свойства неустойчивости вейбелевского типа в магнитоактивной плазме с двухпучковой бимаксвелловской функцией распределения электронов по скоростям. Рассмотрен случай одинаковых встречных пучков, направленных вдоль внешнего магнитного поля, включая предел бимаксвелловской плазмы при нулевой скорости пучков с осью наибольшей температуры, направленной вдоль поля. Получено дисперсионное уравнение для зависимости инкремента от волнового вектора, ортогонального внешнему магнитному полю, и изучены её особенности.

В результате установлено нетривиальное влияние столкновений частиц и внешнего магнитного поля на порог возникновения неустойчивости и обнаружена возможность возрастания, а не только уменьшения инкремента в широком интервале волновых чисел при наличии обоих факторов. В частности, показано, что столкновения частиц могут ослаблять абсолютный порог возникновения неустойчивости вейбелевского типа в магнитоактивной плазме и сильно расширять диапазона волновых чисел неустойчивых мод. В рамках гидродинамического подхода, путем сопоставления инкрементов, получаемых из точного и приближенного решений, дана качественная интерпретация найденного эффекта.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-12-00308).

1. Takabe H., Khanzadeh H. //Physics of Plasmas. 2023. V. **30**. No. 3. P. 030901
2. Weibel E.S. //Phys. Rev. Lett. 1959. V. **2**. No. 3. P. 83-84.
3. Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В., Мартыянов В.Ю. и др. //УФН. 2016. Т. **186**. С. 1267-1314.
4. Ibscher D., Lazar M., Schlickeiser R. //Physics of Plasmas. 2012. V. **19**. No. 7. P. 072116.
5. Mahdavi M., Khanzadeh H. //Physics of Plasmas. 2013. V. **20**. No. 5. P. 052114.

## ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

Н. С. Артеха<sup>1,2</sup>, Д. Р. Шкляр<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>НИУ “ВШЭ”, г. Москва, Россия, [natalya.arteha@mail.ru](mailto:natalya.arteha@mail.ru)

Дисперсионные и поляризационные свойства волн лежат в основе исследований волновых процессов в плазме. Во многих областях магнитосферы Земли электронная плазменная частота  $\omega_p$  значительно превышает электронную гирочастоту  $\omega_c$ . При этом условия явно известны дисперсионное уравнение для волн свистовой моды, выражения для угла Стори, угла Жандрэна, показателя преломления волны и коэффициентов поляризации в зависимости от частоты волны  $\omega$  и угла нормали волны  $\theta$ . Возникает вопрос, как изменятся все эти результаты в случае  $\omega_p < \omega_c$ . Помимо теоретического интереса, этот вопрос имеет практическое значение применительно к авроральной области магнитосферы Земли и для ряда областей магнитосферы Юпитера и Сатурна, где выполняется условие  $\omega_p < \omega_c$ . В докладе исследуются волны в бесстолкновительной магнитоактивной плазме с частотами много ниже электронной циклотронной частоты при произвольном соотношении между электронной плазменной и циклотронной частотами. Особое внимание уделено исследованию низкочастотных свистовых волн в разреженной плазме, когда  $p \equiv \omega_p / \omega_c < 1$ , поскольку среди распространяющихся волновых мод, которые существуют в указанной области параметров, свистовые волны имеют наибольший показатель преломления и играют важную роль в процессах резонансного взаимодействия волн и частиц.

В рассматриваемом случае резонансная частота свистов равна  $\omega_{res} = \sqrt{\omega_p^2 \cos^2 \theta / (1 + p^2 \sin^2 \theta)}$ . Мы рассматриваем частоты между частотой нижнего гибридного резонанса и  $\omega_{res}$ . В полосе частот  $p\omega_p / (1 + p^2) < \omega < \omega_{res}$  имеются две распространяющиеся моды, а при  $\omega < p\omega_p / (1 + p^2)$  — только одна. Найдена максимальная частота  $\omega_{max}(p)$ , ниже которой существует угол Жандрэна:

$$\omega_{max}^2 = \frac{4 + 3p^2 - p\sqrt{8 + 5p^2}}{2(4 + 4p^2 + p^4)} \omega_p^2.$$

Найдено аналитическое выражение для угла Жандрэна. Показано, что в рассматриваемом случае наличие угла Жандрэна является необходимым и достаточным условием существования максимального, не равного  $90^\circ$ , угла отклонения групповой скорости от направления окружающего магнитного поля: так называемого угла Стори. Рассмотрена поляризация низкочастотных волн в плазме произвольной плотности с акцентом на случай разреженной плазмы. Обнаружено существенное различие поляризации магнитного поля свистовой волны в плотной и разреженной плазме: в плотной плазме она практически круговая, а в разреженной плазме — существенно эллиптическая. Получены графические представления для плотности энергии волны для всех частот и углов распространения свистовой моды. В аналитическом виде выведено выражение для плотности энергии волны в случае низкочастотных свистов в сильно разреженной плазме.

1. Артеха Н.С., Шкляр Д.Р. Дисперсионные характеристики низкочастотных электронных волн в магнитоактивной плазме произвольной плотности // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1127-1139.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ АРКЕ

**Викторов М.Е.<sup>1,2</sup>, Коржиманов А.В.<sup>1,2</sup>, Сладков А.Д.<sup>1</sup>, Елясин А.А.<sup>1,2</sup>, Корягин С.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [mikhail.viktorov@ipfran.ru](mailto:mikhail.viktorov@ipfran.ru)

<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Лабораторное исследование взаимодействия сверхзвуковых потоков высокоионизованной плазмы с магнитными полями арочной конфигурации важно для понимания физических механизмов ряда явлений в космической плазме, наблюдаемых во внутренних областях корональных петель на Солнце, в переходных областях планетарных магнитосфер, таких как пограничные слои магнитосферы Земли и планет Солнечной системы. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований на компактной лабораторной установке [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 полностью ионизованной плазмы создаются двумя независимыми плазменными генераторами, которые испаряют материал алюминиевого 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. С использованием теоретических оценок и численного моделирования обсуждаются возможные кинетические 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).

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФОРМЫ И СПЕКТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА В КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ, ЗАПОЛНЕННОЙ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ

**Зудин И.Ю., Гушин М.Е., Коробков С.В., Стриковский А.В., Катков А.Н., Кочедыков В.В., Петрова И.А.**

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [zudin@ipfran.ru](mailto:zudin@ipfran.ru)

Распространение электромагнитных импульсов (ЭМИ) в плазменных средах с дисперсией и резонансным поглощением представляет фундаментальный и практический интерес. В частности, ЭМИ, возбуждаемые грозowymi разрядами [1] либо искусственными источниками [2], могут быть использованы для диагностики околоземной плазмы. Перспективы развития новых трансионосферных каналов связи связаны с технологией сверхширокополосных (СШП) ЭМИ.

Для исследования особенностей взаимодействия СШП ЭМИ с плазмой в ИПФ РАН была создана «гигантская» коаксиальная линия (ГКЛ) с плазменным заполнением. ГКЛ позволяет исследовать распространение СШП ЭМИ на длинной трассе без дифракции и расходимости. Линия имеет длину 10 м и диаметр рабочей секции 1,4 м. ГКЛ установлена внутри вакуумной камеры крупномасштабного плазменного стенда «Крот». С помощью высокочастотного индукционного разряда ГКЛ заполняется плазмой, замагниченной или нет.

В докладе представлены результаты исследования линейных режимов распространения СШП ЭМИ в ГКЛ с плазменным заполнением. Измерения выполнены в условиях, когда длительность СШП ЭМИ сравнима с периодом плазменных колебаний ( $f_p^{-1}$ ), периодом циклотронного вращения электронов ( $f_c^{-1}$ ) либо существенно меньше указанных величин. Установлено, что в плазме без внешнего магнитного поля СШП ЭМИ искажается из-за эффектов отсечки и частотной дисперсии. В плотной магнитоактивной плазме (при  $f_p \gg f_c$ ) СШП ЭМИ распадается на два волновых пакета: высокочастотный ( $f > f_p$ ) и низкочастотный ( $f < f_c$ ). В редкой магнитоактивной плазме ( $f_p \ll f_c$ ) циклотронное поглощение создает длинный цуг затухающих колебаний с частотой, близкой к циклотронной частоте  $f_c$ , следующий за СШП ЭМИ [3].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, проект 075-15-2020-790.

1. Rowland H.L., Fernsler R.F., Huba, J.D., Bernhardt P.A. // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 361.

2. Букин В.В., Долматов Т.В., Ефанов М.В. и др. // *Письма в ЖТФ* 2022, Т. 48, вып. 22. С. 20.

3. Zudin I., Gushchin M., Korobkov S., et al. // *Appl. Sci. (MDPI)* 2024. V. 14 (in press).

## ВОЗБУЖДЕНИЕ МГД-ВОЛН РАМОЧНОЙ АНТЕННОЙ НА СТЕНДЕ НПМ-01 И СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЮ

**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.**

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия  
vovodinsv@gmail.com*

В работе [1] была опубликована полуаналитическая модель для нахождения параметров электромагнитных полей плазменных волн, возбуждаемых электрическим диполем в холодной бесстолкновительной замагниченной плазме на частотах ниже электронной плазменной. Представляло интерес применить модель к результатам лабораторного опыта, проведенного на стенде НПМ-01, в котором МГД-волна возбуждалась рамочной антенной.

Опыты проводились в цилиндрической вакуумной камере длиной 7,6 м и диаметром 1 м в однородном осесимметричном магнитном поле 0,1 Тл. Давление в камере поддерживалось в диапазоне 0,5–0,7 мТор. Рабочий газ гелий. Столб фоновой плазмы диаметром 15 см плотностью  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и температурой электронов  $\sim 10 \text{ эВ}$  генерировался вдоль линий магнитного поля при зажигании разряда между термокатодом и сетчатым анодом. Антенна представляла собой бескаркасную прямоугольную катушку (рамку) 6,6 x 9,4 см состоящую из восьми витков провода ПЭТВ-2 диаметром 0,9 мм, которая ориентировалась так, что одна короткая сторона рамки находилась на оси столба, а другая выходила из него. Антенна была частью цепи колебательного LC-контура, возбуждаемого на частоте 183 кГц (ниже ларморовской частоты ионов  $\omega < \omega_{ci}$ ). Максимальная амплитуда тока в катушке 28 А. Измерение магнитного поля МГД-волны осуществлялось двумя индукционными датчиками на расстоянии около 0,4 и 0,85 м от антенны. Каждый датчик измерял три ортогональных компоненты поля.

Сравнение параметров магнитного поля МГД-волны, зарегистрированных в эксперименте и вычисленных с помощью полуаналитической модели, показало удовлетворительное согласие.

1. Robertson J. // J. Plasma Phys. 2020 V. 86, 835860401

## ЗАРОЖДЕНИЕ ПРОТУБЕРАНЦЕВ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ НА НЕЛИНЕЙНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПАРКЕРА КРУПНОМАСШТАБНЫХ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ВЕРХНИХ СЛОЯХ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЫ СОЛНЦА

**Романов Д.В.<sup>1</sup>, Романов К.В.<sup>1</sup>, Романов В.А.<sup>2</sup>, Степанов Е.А.<sup>2</sup>, Лебедев А.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*КГПУ им. В.П.Астафьева, г. Красноярск, Россия, [k-v-romanov@ya.ru](mailto:k-v-romanov@ya.ru)*

<sup>2</sup>*СГУ им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов, Россия, [valeriy.a.romanov@ya.ru](mailto:valeriy.a.romanov@ya.ru)*

Солнечные вспышки, эруптивные протуберанцы, корональные выбросы массы (СМЕ) являются результатом мощной дестабилизации коронального магнитного поля новым всплывающим магнитным потоком из подфотосферных слоёв в солнечную атмосферу [1].

В настоящей работе изучается физическая природа зарождения крупномасштабных корональных конденсаций (протуберанцев) в условиях аномального прогрева солнечной атмосферы. В работе численно моделируется развитие неустойчивости Паркера для медленных мод колебаний магнитного поля в верхних слоях конвективной зоны Солнца. Исследуется высокочастотная область спектра колебаний: волновое число  $m > 20$ . Детально изучается влияние теплового прогрева на динамику подъема магнитного поля из конвективной зоны в солнечную атмосферу.

В работе представлены результаты расчета подъема тонкой магнитной трубки из конвективной зоны до полного торможения силами натяжения магнитного поля в короне Солнца (стадия насыщения развития неустойчивости Паркера [2,3]). Развитие неустойчивости Паркера целиком определяется взаимодействием плазмы магнитной трубки с гравитационным полем Солнца, и динамикой тепловых потоков внутри трубки. При формировании арочной структуры магнитного поля возрастают градиенты температуры внутри трубки, что приводит к формированию мощных тепловых потоков в боковых частях арочной структуры. Непрерывно теряющая массу центральная часть арки с нарастающим ускорением летит в солнечную атмосферу.

При достижении верхних слоёв солнечной хромосферы реализуется нелинейный рост температуры окружающего газа из-за эффекта аномального прогрева солнечной атмосферы. Разность температур газа внутри и снаружи магнитной трубки меняет знак (теплового прогрева внутри трубки становится недостаточно). Как следствие на этих высотах реализуется смена знака разности плотностей газа внутри и снаружи трубки: плотность газа внутри трубки превышает плотность окружающего газа. Выталкивающая сила Архимеда меняет знак, и трубка начинает тормозиться. Зарождается корональная конденсация. Полное торможение реализуется в нижних слоях короны Солнца.

1. Grigor'ev V.M., Ermakova L.V., Khlystova A.I. // Astron.Rep. 2009. V.53. pp. 869-878.

2. Степанов Е.А., Майоров А.О., Романов К.В., Романов Д.В., Романов В.А. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика, 2021 . Т.21 , № 2. С. 102-115.

3. Parker E.N., Eugene N.. // The Astrophysical Journal. 1994. V. 433. pp. 867-874.

## ВЛИЯНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА РЕФРАКЦИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ

Афанасьев Н.Т., Лукьянцев Д.С., Танаев А.Б.

ИГУ, г. Иркутск, Россия, [spacemaklay@gmail.com](mailto:spacemaklay@gmail.com)

Для оценки влияния хаотических неоднородностей межзвездной плазмы на рефракционные характеристики электромагнитных волн, прошедших поле тяготения, предложен аппарат численно-аналитического моделирования. Основу аппарата составляет приближение геометрической оптики [1] и результаты решения стохастических лучевых уравнений методом возмущений.

С помощью разработанного аппарата проведено математическое моделирование рефракционных характеристик электромагнитных волн различных частотных диапазонов в гравитационном поле группы астрофизических объектов, окруженных космической плазмой. Непрямолинейное распространение волн в поле тяготения массивных объектов рассчитывается с помощью лучевых уравнений в евклидовом пространстве с эффективным показателем преломления вакуума [2]. Для оценки влияния хаотических неоднородностей космической плазмы на рефракционные характеристики волн используются представления о корреляционных свойствах среды [3]. Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для расчета статистических моментов траекторных характеристик волн в картинной плоскости наблюдателя.

Результаты моделирования показали, что хаотические неоднородности плазмы маскируют эффекты поля тяготения и накладывают существенные ограничения на длину электромагнитной волны для наблюдения гравитационного линзирования. Поэтому линзовый эффект гравитационного поля при распространении волн в космической плазме реализуется только в определенном диапазоне электромагнитной шкалы колебаний. Проведенные вычисления показали, что для метрового диапазона длин волн гравитационное линзирование имеет высокую степень статистического замыкания. В тоже время уже в дециметровом диапазоне учет рефракционного рассеяния волн на неоднородностях плазмы не приводит к значительному искажению траекторной картины. Результаты математического моделирования показали, что рабочие частоты метрового диапазона длин волн представляют собой условную низкочастотную границу для наблюдений рефракционного эффекта гравитационного линзирования в хаотической космической плазме. С помощью численных экспериментов выявлены особенности рефракции волн в окрестности различных гравитационных объектов в хаотической межзвездной среде.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004), с использованием УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ» (договор ЕВ-075-15-2021-675).

1. Kravtsov Yu.A and Orlov Yu.I. Geometrical Optics of Inhomogeneous Medium. Berlin: Springer-Verlag. 1990. p 312.
2. Fock V.A. The Theory of Space, Time and Gravitation. New York: Pergamon, U.S.A. (2 nd edition).1964. 411 p.
3. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука. 1984. 392 с.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПАКЕТАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ: РОЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

Грач В.С.<sup>1</sup>, Демехов А.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [vsgrach@ipfran.ru](mailto:vsgrach@ipfran.ru)

<sup>2</sup> ПГИ, г. Апатиты, Россия

В работе рассматривается взаимодействие релятивистских электронов с пакетами электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн конечной длительности в радиационных поясах Земли. На основе численного моделирования методом пробных частиц исследована зависимость характеристик взаимодействия от длины и амплитуды пакета как в линейном, так и в нелинейном режиме. Вычислены потоки частиц, высыпającychся в конус потерь в результате рассматриваемого взаимодействия.

Показано, что как в линейном режиме, так и в режиме силовой группировки, связанной с прямым влиянием силы Лоренца на фазу электрона, уменьшение длительности пакета расширяет область взаимодействия в область малых энергий, находящихся за пределами диапазона резонансных значений для центральной компоненты пакета. При этом области нелинейного захвата и фазовой бунчировки не расширяются в сторону меньших энергий, т.е. эти режимы возможны только для энергий, соответствующих резонансному взаимодействию с центральной компонентой пакета.

При амплитудах ЭМИЦ волн, соответствующих нелинейному взаимодействию, существует диапазон энергий, для которых поток частиц, высыпającychся в конус потерь, равен предельному потоку, соответствующему сильной диффузии, и даже несколько превышает его. Максимальное по энергиям значение отношения потоков высыпającychся и захваченных частиц составляет примерно 1 и (при достаточно высоких амплитудах волны) не зависит от амплитуды или длины пакета. Минимальная энергия, для которой имеют место существенные высыпания, с уменьшением длины пакета убывает от минимального резонансного значения до примерно вдвое меньших значений.

Таким образом, взаимодействие с коротким пакетом ЭМИЦ волн может приводить к существенным (соответствующим режиму сильной питч-угловой диффузии) высыпаниям частиц с энергиями, заметно меньшими, чем резонансная энергия для несущей частоты пакета. Для магнитосферы Земли эти энергии составляют первые сотни килоэлектронвольт.

Работа В.С. Грач поддержана Российским научным фондом, проект № 19-72-10111.

## МГД УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Кузнецов В.Д., Осин А.И.

ИЗМИРАН, г. Москва, г.Троицк, Россия, [kvd@izmiran.ru](mailto:kvd@izmiran.ru)

В рамках 8–моментного приближения для бесстолкновительной плазмы солнечного ветра с тепловыми потоками рассмотрены условия эволюционности МГД ударных волн и получены диаграммы эволюционности, зависящие от величины альвеновской скорости перед фронтом ударной волны и за ним [1]. Используя полученные ранее аналитические решения на скачке для случая параллельной ударной волны [2], определены области эволюционности для быстрой и медленной ударных волн на плоскости безразмерных параметров, характеризующих скорость потока плазмы и поток тепла перед фронтом ударной волны. Определены области параметров плазмы перед фронтом ударной волны, для которых за фронтом ударной волны возникают ионно-звуковая, шланговая и зеркальная неустойчивости [3].

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 075-01306-23-00.

1. Kuznetsov V.D., Osin A.I. // arXiv:2310.10620v1 [physics.plasm-ph] 16 Oct 2023.
2. Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Phys. Lett. A 2018. V.382. P.2052.
3. Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Phys. Lett. A 2020. V.384. P.126346.

## ВОЗБУЖДЕНИЕ УНЧ-ВОЛНЫ ИНВЕРСНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ПРОТОНОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СПУТНИКА ARASE

Рубцов А.В.<sup>1</sup>, Yamamoto K.<sup>2</sup>, Костарев Д.В.<sup>1</sup>, Магер П.Н.<sup>1</sup>, Климушкин Д.Ю.<sup>1</sup>, Nosé M.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, [avrubtsov@iszf.irk.ru](mailto:avrubtsov@iszf.irk.ru)

<sup>2</sup>Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

<sup>3</sup>School of Data Science, Nagoya City University, Nagoya, Japan

В работе представлен анализ данных спутника Arase во время наблюдения компрессионной УНЧ-волны в 19:30–20:00 UT 1 декабря 2018 г., амплитуда которой достигала 15 нТл. Во время наблюдения волны спутник находился в вечернем секторе (MLT ~ 21 час) около геомагнитного экватора (MLAT = 4–7°), возле апогея орбиты ( $L \sim 6$ ). Наблюдение волны пришлось на период слабой геомагнитной активности, когда плотный (до  $32 \text{ см}^{-3}$ ) поток солнечного ветра в сочетании с несколькими поворотами  $B_z$  ММП на юг привёл к трём суббурям с AE ~ 300, 700 и 500 нТл. Волна была зафиксирована на взрывной фазе третьей суббури и завершилась в момент прибытия инжектированных суббурей протонов и ионов кислорода. По данным потока протонов видна отчётливая модуляция частиц с энергиями 1–30 кэВ. Суббуревые инжекции, предвалявшие наблюдение волны, привели к росту отношения давления плазмы к магнитному давлению  $\beta$  до 2. В то же время параметр анизотропии  $\Gamma$  находится около 0. Такое сочетание параметров плазмы может удовлетворить условие раскачки дрейфово-зеркальной моды.

Спектр волны весьма узок, но изменяется во времени от ~7 мГц до ~10 мГц. Характер этих изменений частоты волны неравномерен и неясно, чем они вызваны. Моделирование собственной частоты альвеновской волны даёт лишь частичное совпадение с наблюдаемой частотой, а собственная частота дрейфово-компрессионной моды сильно отличается.

Теоретических расчёт показывает, что в данном случае может иметь место сочетание дрейфового резонанса протонов с энергией ~30 кэВ и баунс-резонанса протонов с энергией ~3 кэВ. Причём условие неустойчивости выполняется для частиц с низкой энергией из-за инверсии функции распределения в области 1–3 кэВ, т.е. имеет место неустойчивость “bump on tail”. Тогда как для частиц с высокой энергией, которые подходят для дрейфового резонанса, нет ни инверсной функции распределения, ни её достаточно сильного радиального градиента, вследствие чего условие неустойчивости не выполняется.

Изучение этого случая наблюдения компрессионной волны представляет особый интерес, потому что по локализации в пространстве оно практически совпадает с наблюдением дрейфово-компрессионной волны 19 ноября 2018 г. тем же спутником. В результате, мы можем проследить, как различные сочетания параметров плазмы приводят к включению разных механизмов генерации волн и появлению разных типов волн.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10032.

## РЕЗОНАНСНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УНЧ-ВОЛН С ПОТОКАМИ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ

**Смотрова Е.Е., Михайлова О.С., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю.**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,  
[katerina.smotrova@mail.iszf.irk.ru](mailto:katerina.smotrova@mail.iszf.irk.ru)*

Проведено исследование резонансных взаимодействий двух ультранизкочастотных (УНЧ) волн с потоками заряженных частиц в полуденном секторе магнитосферы. Космическим аппаратом Van Allen Probe А 15 февраля 2014 года были зарегистрированы две УНЧ-волны на фоне восстановительной фазы магнитосферной суббури. Наблюдались компрессионная УНЧ-волна с частотой около 2 мГц (диапазон Pc5), и полоидальная альфвеновская волна на частоте 6.7 мГц (диапазон Pc4). Амплитуда колебаний доходила до 5 нТл в обоих случаях.

Одновременно с компрессионной волной Pc5 были зарегистрированы модуляции потоков электронов. Анализ показал, что осцилляции происходили на частоте, соответствующей частоте волны Pc5. Распределение потоков электронов по питч-углам и разность фаз между потоком электронов и электромагнитным полем волны соответствует дрейфовому резонансу между волной и электронами с энергиями около 85 кэВ. Наблюдаемая волна являлась фундаментальной гармоникой альфвеновской волны с азимутальным волновым числом  $m \sim 13$ .

В то же время были зарегистрированы модуляции потоков протонов, которые взаимодействовали с полоидальной волной диапазона Pc4 посредством баунс-дрейфового резонанса. Энергия резонансного взаимодействия находилась в диапазоне 160-165 кэВ. Установлено, что полоидальная волна являлась второй гармоникой альфвеновской волны с азимутальным волновым числом  $m \sim -220 - 230$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-77-10032).

## ВОЗМОЖНО ЛИ ЗАРЕГИСТРИРОВАТЬ НА СПУТНИКЕ УНЧ ИЗЛУЧЕНИЕ СЕЙСМОГЕННОГО ИСТОЧНИКА?

**В.А. Пилипенко, Е.Н. Федоров, Н.Г. Мазур**

*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия,*

Разработан теоретический формализм для расчета электромагнитных полей в связанной системе Земля-атмосфера-ионосфера, создаваемых подземным токовым источником конечного масштаба. В этом формализме поле разбивается на потенциальную и вихревую составляющие. Этот подход позволил преодолеть проблему отсутствия осевой симметрии. На основании этой теории построена численная модель, которая позволяет численно рассчитать электромагнитные УНЧ поля во всей системе Земля-атмосфера-ионосфера, возбуждаемых подземным источником тока. Моделирование проведено для наиболее благоприятных условий, когда спутник находился в ночной ионосфере непосредственно над источником на небольшой глубине. Результаты численного моделирования позволяют связать возмущения приземного магнитного поля и электрического поля в ионосфере, создаваемые крупномасштабным подземным источником. Модельные расчеты показывают, что найденные в ранних спутниковых данных возмущения электрического УНЧ поля перед землетрясениями нельзя связать с прямым излучением сейсмогенных источников, т.к. подземный ток необходимой интенсивности должен возбуждать интенсивные возмущения геомагнитного поля на поверхности Земли. Такие возмущения никогда не обнаруживались существующей мировой сетью магнитометров. Теоретическое моделирование позволяет отбросить заведомо нереальные физические механизмы, так как случайные совпадения при наблюдениях могут восприниматься как надежные экспериментальные свидетельства. Работа поддержана грантом РФФ 22-17-00125.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АЗИМУТАЛЬНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ РС5 ПУЛЬСАЦИЙ И ИХ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТОКОВЫХ ВИХРЕЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

**Моисеев А.В., Попов В.И., Стародубцев С.А.**

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

По фазовым задержкам на пространственно-разнесенных станциях, а также по данным спутниковых наблюдений в магнитосфере для ряда событий изучается распространение резонансных всплесков геомагнитных пульсаций в диапазоне РС5. Во время этих событий рассматривается также распространение эквивалентных токовых вихрей. Обнаружено, что пульсации по наблюдениям в магнитосфере и ионосфере, а также эквивалентные токовые вихри в ионосфере распространяются в азимутальном направлении с дневной на ночную сторону. Скорости распространения по наземным наблюдениям составляют 5-15 км/с, по спутниковым наблюдениям 100-450 км/с. Каждый полупериод пульсаций соответствует вихрям противоположного направления т.е. противоположно направленным продольным токам. Предполагается, что наблюдаемая динамика РС5 пульсаций, отражает распространение вихрей в магнитосфере.

## МГД-ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПРЕДФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН 6 И 7 СЕНТЯБРЯ 2017 Г.

**Стародубцев С.А.<sup>1</sup>, Шадрина Л.П.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, [starodub@ikfia.sbras.ru](mailto:starodub@ikfia.sbras.ru), <sup>2</sup> АН РС(Я), г. Якутск, Россия, [lushadr@mail.ru](mailto:lushadr@mail.ru)

В работе анализируется событие сильного возмущения космической погоды с 6 по 10 сентября 2017 г. При этом используется информация о Dst-индексе геомагнитной активности [1], параметрах нормалей к фронтам межпланетных ударных волн (МУВ) [2], прямых измерений параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ) [3], а также низкоэнергичных космических лучей [4, 5].

На основе применения методов спектрального анализа к данным измерений ММП и СВ проведен анализ МГД-волн в области предфронтов 2-х МУВ, ответственных за геомагнитные возмущения в начале сентября 2017 г.

Основные полученные результаты сводятся к следующему:

1. Отмечено, что генерация геомагнитной бури 8 сентября 2017 г. связано с магнитным облаком за 2-й МУВ, тогда как отсутствие его за 1-й МУВ не привело к депрессии геомагнитного поля в начале 7 сентября.
2. Установлен вклад 3-х веток МГД-волн (алфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых) в наблюдаемый спектр ММП. Сделан вывод, что генерация альфвеновских и быстрых магнитозвуковых волн обусловлена наличием потоков штормовых частиц в области предфронта межпланетных ударных волн. При этом обнаружен преобладающий вклад медленных магнитозвуковых волн в спектр ММП. Причина этого остается неизвестной.
3. Разная ориентация нормалей между фронтами МУВ и направлением среднего вектора ММП на достаточно близко расположенных относительно друг друга КА может служить указанием на волнистую структуру фронта МУВ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИКФИА СО РАН (код научной темы FWRS-2021-0012, номер государственного учета в ЕГИСУ НИОКТР 122011700180-7).

1. [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html)
2. <https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks>
3. [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc\\_merge\\_min1.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/sc_merge_min1.html)
4. <https://izw1.caltech.edu>
5. [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind\\_epact\\_step\\_flux\\_hr.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_epact_step_flux_hr.html)



## ГЕНЕРАЦИЯ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ МАХА.

**Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Дмитриева Л.Р., Шайхисламов И.Ф.**

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

В работе представлены результаты численного моделирования генерации протяженных альфвеновских волн, сгустками лазерной плазмы в условиях, когда начальная скорость разлета сгустков плазмы меньше альфвеновской скорости.

С использованием 4-х жидкостной МГД модели исследовались условия «резонанса» [1] при выполнении которых, цуг сгустков лазерной плазмы генерировал единый волновой пакет, длина которого и эффективность преобразования энергии сгустков в волну максимальны. В работе [1] было показано, что предельная длина и эффективность  $\sim 40\%$  генерации альфвеновской волны достигаются при использовании цуга из  $\sim 15$  сгустков лазерной плазмы с числом Маха  $M_A \sim 0.2 \div 0.3$  и массой ионов  $\sim 207$  (Pb+), масса ионов фона менее 15. Азимутальное магнитное поле в альфвеновской волны достигает  $\sim 0.15 \div 0.2$  от магнитного поля фона. Период повторения сгустков и длина волны в  $\sim 2 \div 3$  раза больше, чем при  $M_A \sim 1$ . В настоящей работе исследуются остальные условия резонанса: ионно-плазменная длина  $L_{pi} = c/\omega_{pi}$ , тепловое  $\beta$ , при фиксированных значениях числа Маха  $M_A \sim 0.2$  и количестве плазменных сгустков.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 24-22-00106.

1. Тищенко В. Н., Березуцкий А. Г., Дмитриева Л. Р., и др. // Солнечно-земная физика. – 2022. – Т. 8. – №. 2. – С. 101-107.

## РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СГУСТКОВ ПЛАЗМЫ С ЗАМАГНИЧЕННЫМ ФОНОМ: САМОФОКУСИРОВКА ВИСТЛЕРОВ

**Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Шайхисламов И.Ф.**

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, tvn.25@yandex.ru

В ИЛФ СО РАН предложен метод резонансного взаимодействия сгустков лазерной плазмы с газами и замагниченной плазмой (далее – фон). Метод позволяет генерировать протяженные волны разного типа и струю плазмы, которые содержат более 80% энергии сгустков и распространяются в узкой магнитной силовой трубке.

В докладе представлены результаты расчетов крутильных вистлеров. Варьировались Альфвеновское число Маха  $M_A$  и ионно-плазменная длина  $L_{pi}$ . Показано, что метод позволяет эффективно генерировать вистлеры в исследованном диапазоне значений Маха  $M_A = 0.2 \div 10$ . Магнитные поля вистлеров достигают значений  $\sim 0.2 \div 0.4$ . В дальней зоне вистлеры содержат частоты, отличающихся в десятки раз.

Впервые выявлен эффект самофокусировки вистлеров. Нелинейное взаимодействие интенсивных вистлеров с фоном сопровождается следующими эффектами:

- формирование аксиальных структур концентрации плазмы фона обуславливает фокусировку волн и слабое расширение апертуры потока вистлеров (см. рис. 1 и рис.2);
- в дальней зоне в  $\sim 2$  раза увеличивается магнитное поле высокочастотного пакета вистлеров и возрастает их длина  $\lambda$ , количество периодов уменьшается в несколько раз;

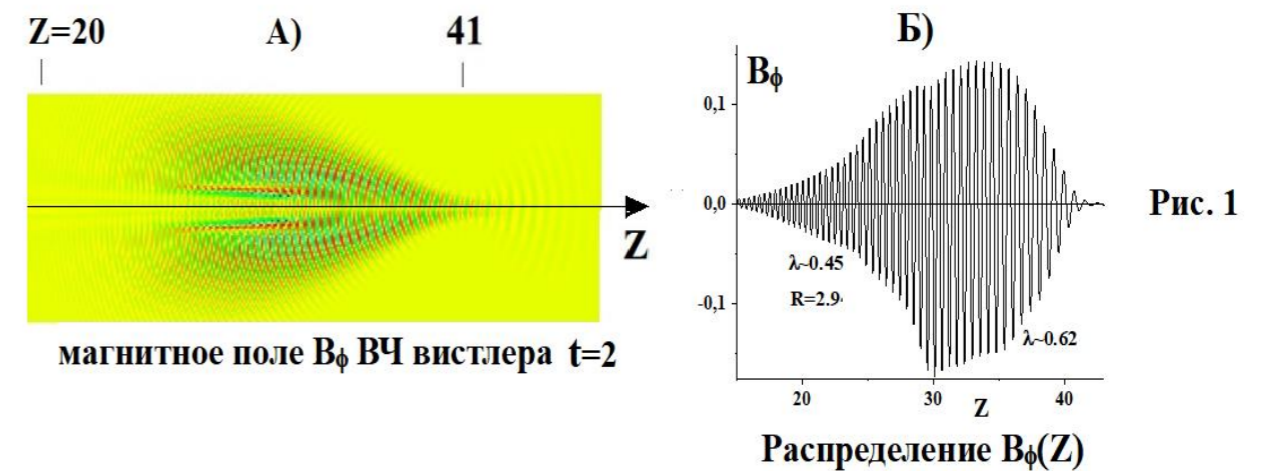


Рис. 1

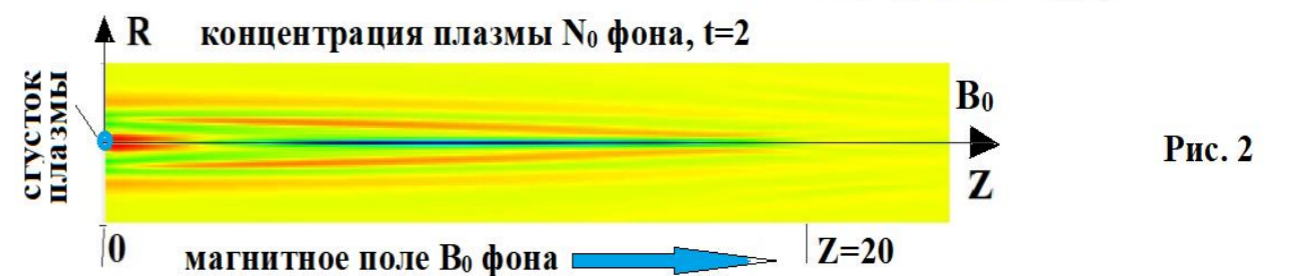


Рис. 2

Рис. 1 Азимутальное магнитное поле  $B_\phi$  вистлера.

Рис. 2 Аксиальные структуры концентрации плазмы фона, создаваемые вистлерами.

Сгусток плазмы создается в точке  $Z=R=0$ . Изображения аксиально симметричны.  $\lambda$  - длина волн,  $t=2$  – момент времени.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0243-2021-0003.

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ДЖЕТОВ

Чумарин Г.А., Юшков Е.В., Соколов Д.Д.

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,  
chumarin.ga21@physics.msu.ru

Анализ электромагнитного излучения является базовым методом исследования окружающей нас Вселенной. Условно основные причины генерации электромагнитных волн можно отнести либо к связанно-связанным переходам, либо к свободно-связанным, либо к свободно-свободным. Однако, в радиодиапазоне существуют и другие механизмы излучения, причем как в плотной плазме (например, спорадическое солнечное излучение), так и в вакууме (например, синхротронное излучение) [1]. Последнее играет в радиоастрономии значительную роль, о нем и пойдет речь в докладе.

Для рассматриваемой задачи важно, что источником синхротронного излучения служат релятивистские электроны, то есть оно является поляризованным [2]. Такое излучение при распространении в среде с замороженным магнитным полем, испытывает на себе эффект Фарадея – эффект поворота плоскости поляризации, пропорциональный направлению вдоль луча зрения магнитному полю и длине пройденного пути. Огромные астрофизические масштабы могут компенсировать слабые магнитные поля и там, где эффект Зеемана и доплеровское уширение малы, эффект Фарадея делает возможным их измерение [3].

В докладе идет речь об известной формуле Берна [4], полученной в 1966 году для зависимости поляризации синхротронного излучения плоской галактики от длины волны. Простота полученного Берном выражения (см. подробнее [5]) обеспечила широкую применимость этого результата для оценки астрофизических магнитных полей вплоть до сегодняшних дней. Невозможно перечислить все труды в данной области, но нельзя не упомянуть работы таких ученых как Р. Велибинский, Э. Беркхаузен, Р. Бек, М. Краузе. Используя формулу Берна, они внесли большой вклад в понимание формирования магнитных полей Вселенной [6], однако в популярности формулы есть серьезная проблема. Не все магнитные структуры похожи на тонкий плоский диск постоянной толщины.

Основная цель доклада – показать неприменимость формулы Берна к объектам, существенно непохожим на плоский диск, в частности, к галактическим джетам, представляющим собой цилиндрические структуры, выходящие под углом к плоским дисковым и спиральным галактикам. Согласно современным представлениям, эти области также насыщены магнитным полем и содержат релятивистские электроны, соответственно, в них происходит фарадеевское вращение плоскости поляризации излучения. Однако геометрия джетовых областей, их азимутальная симметрия и завихренность поля заставляет сомневаться в применимости формулы. В докладе, следуя идеям Берна и других авторов, мы демонстрируем вывод зависимостей степеней поляризации от длины волны для синхротронного излучения таких цилиндрических областей. Мы надеемся, что данное исследование будет представлять интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения для приложений не только к галактическим джетам, но и к другим объектам аналогичной структуры. Работа поддержана грантом фонда БАЗИС № 21-1-3-63-1.

1. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. // Успехи физических наук. 1965. Т. 87. №. 9. С. 65-111.
2. Schott G.A. // University Press. – 1912.
3. Соколов Д.Д. // Природа. 2017. №. 10. С. 30-36.
4. Burn B.J. // MNRAS. 1966. Т. 133. №. 1. С. 67-83.
5. Sokoloff D.D. et al. MNRAS. 1998. Т. 299. №. 1. С. 189-206.
6. Beck R. et al. // Annual review of astronomy and astrophysics. 1996. Т. 34. №. 1. С. 155-206.

## ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СОЛИТОНОВ АКУСТИЧЕСКОГО ТИПА НА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ЭНЕРГИЯМ

Трухачев Ф.М.<sup>1,2,3</sup>, Васильев М.М.<sup>1,3</sup>, Петров О.Ф.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, [firu@mail.ru](mailto:firu@mail.ru)

<sup>2</sup>БРУ, г. Могилев, Беларусь

<sup>3</sup>МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

Плазменные волны являются одним из механизмов нагрева и ускорения заряженных частиц. Подавляющее большинство исследований в данной области посвящено ленгмюровским, электромагнитным и альфвеновским волнам [1-4]. Солитоны акустического типа (ионно-, электронно- и пыле-акустические) до недавнего времени [5-7] практически не изучались в этом плане. При этом уединенные волны играют важную роль в динамике космической и лабораторной плазмы [8]. В работах [5-7] исследовалось влияние солитонов на функции распределения фоновой плазмы по скоростям. В частности показано, что в областях плазмы, населенных солитонами функция распределения по скоростям имеет "beam-like" форму. Представленная работа является продолжением указанных работ, она посвящена анализу влияния одномерных консервативных солитонов на функции распределения фоновой плазмы по энергиям. В рамках одномерной гидродинамической модели электрон-протонной бесстолкновительной плазмы, а также с использованием одночастичного приближения рассчитана ионная функция распределения по энергиям в присутствии ионно-звуковых (ИЗ) солитонов. Возмущенная ионная функция распределения отображена на рисунке 1(б) для солитонов различной скорости (амплитуды).

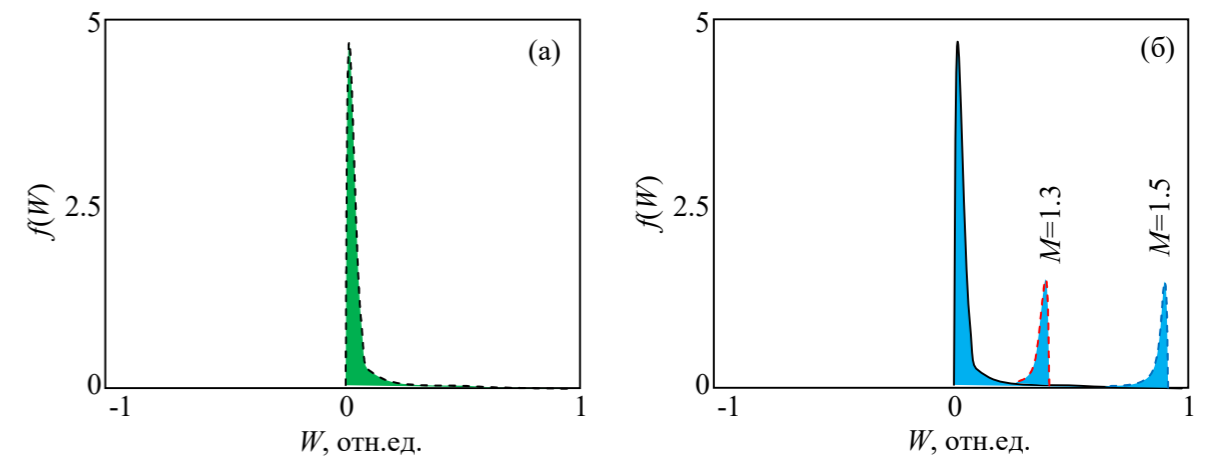


Рис.1 (а) – Невозмущенная ионная функция распределения по энергиям; (б) – Возмущенная ИЗ солитонами ионная функция распределения при разных числах Маха:  $M=1.3$  и  $M=1.5$ .

Полученные результаты будут полезны при описании экспериментальных данных.

1. Escande D. F., et.al. Scientific Reports 2019. V.9(1). P. 14274.
2. Seo J., et.al. Nuclear Fusion 2021. V.61:9. P. 096022.
3. Esarey E., et.al. Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81. P.1229.
4. Cardinali A., et.al. Plasma Phys. Control. Fusion 2020. V. 62. P. 044001.
5. Трухачев Ф.М. и др., Физика плазмы 2022. Т. 48(10). P. 967-974.
6. Трухачев Ф.М. и др., Вестник ОИВТ РАН. 2022. Т. 7. С.15.
7. Trukhachev F.M., et.al. Phys. Plasmas 2023. V. 30. P. 112302.
8. Lakhina G.S., et.al. Plasma 2021. V. 4. P. 681.

## ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА КАК ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ СВОЙСТВО СОЛИТОНОВ АКУСТИЧЕСКОГО ТИПА

Трухачев Ф.М.<sup>1,2,3</sup>, Герасименко Н.В.<sup>2</sup>, Васильев М.М.<sup>1,3</sup>, Петров О.Ф.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, [ftu@mail.ru](mailto:ftu@mail.ru)

<sup>2</sup>БРУ, г. Могилев, Беларусь

<sup>3</sup>МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

С использованием гидродинамических моделей, а также в рамках одночастичного приближения детально исследовано явление переноса заряженных частиц плазмы плоскими солитонами акустического типа в бесстолкновительной плазме без магнитного поля. Показано, что докритические солитоны сжатия осуществляют односторонний перенос заряженных частиц в положительном направлении на конечное расстояние. Подробно рассмотрена ионно-звуковая (ИЗ) мода. В частности показано, что плоский ИЗ солитон сжатия в модели плазмы с "холодными" ионами смещает (сдвигает) всю ионную популяцию на расстояние в несколько радиусов Дебая (до  $4.5 \lambda_D$ ) [1]. В рамках уравнения Кортевега - Де Вриза (КдВ) была найдена явная зависимость дистанции одностороннего перемещения ионов от амплитуды солитона:  $\Delta X(\Phi_0) = 2\sqrt{6\Phi_0}$  (рисунок 1).

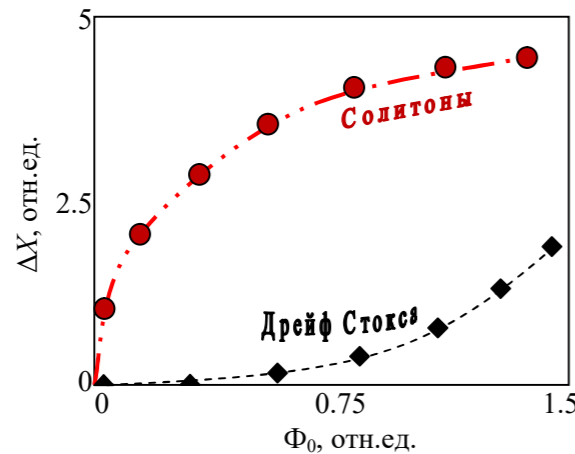


Рис 1. Зависимость от амплитуды для дистанции переноса (сдвига) ионов ИЗ солитоном ("●"). Классический дрейф Стокса отображен ромбиками.

Характер зависимости свидетельствует о том, что переносом ионов нельзя пренебрегать для ИЗ солитонов произвольной (в том числе малой) амплитуды. Механизм солитонного переноса ионов описан в работе [2]. Он аналогичен механизму дрейфа Стокса [3], который описывает нелинейный процесс переноса вещества гармоническими волнами конечной амплитуды. Величина дрейфа Стокса квадратично уменьшается с уменьшением амплитуды гармонической волны, следовательно, дрейфом можно пренебречь для волн малой амплитуды. В то время как дистанция солитонного переноса уменьшается очень медленно ( $\sim(\Phi_0)^{1/2}$ ). Таким образом, для солитонов малой амплитуды перенос начнет проявляться сильнее, чем возмущение потенциала, концентрации и т.д. Проведен анализ и обобщение результатов на электронно- и пыле-акустические плазменные моды.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ СДВ СИГНАЛОВ ПЕРЕДАТЧИКОВ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РСДН-20 В ПЕРИОДЫ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ

Ларченко А.В., Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В.

В работе представлены результаты наземных наблюдений СДВ сигналов радионавигационной системы РСДН-20 на сети высокоширотных станций Полярного геофизического института. Рассмотрены случаи, когда фоне возникновения суббурь при значениях AL индекса от -500 нТл и ниже, возможны снижения регистрируемых амплитуд горизонтального магнитного поля сигналов передатчиков в ночное время. В работе рассматривается гипотеза о том, что наблюдаемый эффект снижения амплитуд сигналов СДВ передатчиков вызван локальными изменениями в нижней ионосфере при высыпаниях заряженных частиц во время суббурь. При помощи эмпирической модели авроральных электронных высыпаний показано, что связать величину относительного понижения амплитуд сигналов в ночное время в периоды суббурь с величиной перекрытия радиотрасс овалом полярных сияний затруднительно и для интерпретации наблюдаемого эффекта необходимо привлечение модели распространения СДВ в неоднородном волноводе Земля – ионосфера. В работе приведено сравнение результатов наблюдений с результатами моделирования распространения СДВ в волноводе Земля-ионосфера в присутствии неоднородностей вызванных электронными высыпаниями.

1. Trukhachev F.M., Gerasimenko N.V., Vasiliev M.M., Petrov O.F. // Phys. Plasmas 2023. V. 30. P. 112302.
2. Трухачев Ф.М., Васильев М.М., Петров О.Ф. // ТВТ 2020. Т. 58(4). С. 563
3. Stokes G.G. // Trans. Camb. Philos. Soc. 1847. V. 8. P. 441.

## ОСОБЕННОСТИ СУТОЧНОЙ ДИНАМИКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ МОДЫ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА ПРИ РАЗНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**Ермакова Е.Н., Рябов А.В.**

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, [Lermakova@nirfi.unn.ru](mailto:Lermakova@nirfi.unn.ru)

В работе исследована зависимость влияния суперпозиции трех резонаторов, Шумана, ИАР и суб-ИАР, на спектральные параметры магнитного шума в полосе первой и второй моды шумановского резонанса (ШР) от уровня солнечной, геомагнитной активности и сезона. Были проанализированы данные мониторинга компонент УНЧ магнитного шума на станциях разных широт: высокоширотная станция Ловозеро (LOZ, 68N, 35E), среднеширотная обсерватория НИРФИ ННГУ (NL, 56N, 46E), низкоширотная станция на о. Крит (CR, 35.15N, 25.20E). Целью анализа данных было исследование закономерностей суточной динамики параметров поляризации и амплитуды первого и второго ШР при разном состоянии ионосферной плазмы. Обнаружено, что на станции NL в годы минимального уровня солнечной активности восходящий тренд в суточной динамике  $\epsilon$  в соответствующих полосах ШР первые 1-1.5 часа после захода солнца связан с влиянием нижнего резонатора суб-ИАР с граничной частотой  $f_{gp} <$  частоты первого ШР. Далее, вариации значений  $\epsilon$  в частотной полосе первого ШР связаны с влиянием суб-ИАР с  $f_{gp} >$  частоты первого ШР и влиянием ИАР, приводящего к РСС с меняющимися частотными масштабами. Причем этот период в зимние месяцы может составлять основную часть темного периода суток. Обнаружено, что на станции NL в годы, близкие к максимуму солнечной активности наблюдается восходящий тренд  $\epsilon$  в полосе первого ШР в течение всего темного периода суток, что связано со значениями  $f_{gp} <$  частоты первого ШР в этот период. На частоте второй моды ШР, как правило, наблюдается рост значений  $\epsilon$  весь темный период суток при любом уровне солнечной активности, т.к.  $f_{gp} <$  частоты второй моды ШР. Надо также отметить, что влияние суб-ИАР на поляризацию первой и второй моды ШР зависит и от того насколько  $f_{gp}$  меньше частоты первого ШР: при значениях  $f_{gp} < 2$  Гц значения  $\epsilon$  могут возвращаться к дневным значениям. Такой случай наблюдается, например, при возникновении спорадических слоев  $E_s$  со значениями плазменной частоты  $f\theta > 5-6$  МГц. Таким образом, интенсивные слои  $E_s$  могут нивелировать влияние суб-ИАР на поляризацию первой и второй моды ШР. На низкоширотной станции CR величина  $f_{gp}$  остается меньше частоты первой моды ШР независимо от сезона и уровня солнечной активности. Поэтому влияние суб-ИАР приводит, как правило, к уменьшению степени эллиптичности магнитного поля на частоте первого ШР. Вариации  $\epsilon$  в темное время суток на станции CR определяются близостью  $f_{gp}$  к частоте первой моды и добротностью суб-ИАР. Сравнительный анализ суточного хода  $\epsilon$  на частотах первой и второй моды ШР на станциях NL и LOZ показал, что из-за более низкой добротности суб-ИАР вариации  $\epsilon$  в темное время суток менее выражены на станции LOZ: 0.05-0.1 - на станции LOZ и 0.15-0.2 – на станции NL. При повышении уровня геомагнитной активности до  $K_p > 5$  в начальной фазе магнитной бури влияние локальных резонаторов на амплитуду и поляризацию первой и второй моды ШР исчезает. Установлено, что восстановление влияния суб-ИАР на поляризацию первого и второго ШР после средней и сильной магнитной бури происходит быстрее на станции NL, чем на высокоширотной станции LOZ. Поэтому в этот период вариации  $\epsilon$  в темное время суток на этих станциях имеют различный характер. Модельные расчеты суточной динамики  $\epsilon$  на частотах первой и второй моды ШР подтвердили влияние локального суб-ИАР на характер вариаций  $\epsilon$  при разном состоянии ионосферной плазмы.

Работа выполнена по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

## НАБЛЮДЕНИЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ УНЧ-ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ МИССИИ THEMIS

**Шубин Д.А., Рубцов А.В., Климушкин Д.Ю.**

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [d.shubin@iszf.irk.ru](mailto:d.shubin@iszf.irk.ru)

В работе представлено статистическое исследование долгоживущих ультранизкочастотных (УНЧ) волн в диапазонах Pc4 (6.7 мГц – 22 мГц) и Pc5 (1.7 мГц – 6.7 мГц) в магнитосфере Земли по данным миссии THEMIS. Для исследования взят период с января 2017 года по февраль 2018 года, за который спутники совершили по одному полному обзору магнитосферы. Особенностью миссии THEMIS является то, что орбита пересекает границу магнитосферы, что позволяет регистрировать события от Земли до магнитопаузы. Кроме того, в рассматриваемый период спутники А, D и E двигались по схожей высокоэллиптической орбите, что позволяет получать данные о примерно одном и том же участке пространства с небольшой разницей во времени, что помогает детектировать долгоживущие УНЧ-волны. Долгоживущими мы будем называть те волны, которые наблюдаются одним спутником в течение 2 часов и более либо наблюдаются в той же области пространства при ближайшем пролёте другим спутником.

Долгоживущие УНЧ-волны представляют интерес, так как сам факт того, что они наблюдаются в течение длительного времени говорит о постоянно действующем механизме генерации. Таким образом, в качестве источника генерации таких волн могут выступать продолжительные возмущающие процессы в солнечном ветре, например, транзиенты из форшока. Однако, в исследованиях отдельных случаев наблюдения долгоживущих волн источником зачастую оказывается внутренняя неустойчивость плазмы.

Таким образом, вопрос об источнике долгоживущих волн и причина их столь долгого существования остаётся открытым. В настоящей работе мы, используя статистику наблюдения долгоживущих волн спутниками А, D и E миссии THEMIS, постараемся определить причины их появления.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-77-10032.

## НЕРЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И УНЧ-ВОЛН

**Челпанов М.А., Климускин Д.Ю., Магер П.Н.**

*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, [max\\_chel@iszf.irk.ru](mailto:max_chel@iszf.irk.ru)*

Анализ ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний электромагнитного поля в магнитосфере Земли, совместно с исследованием потоков энергичных частиц, попадающих в магнитосферу во время суббурь, позволяет установить характер генерации волн и их взаимодействия с заряженными частицами. За взаимодействие с плазмой отвечает азимутальное электрическое поле волны, которое наиболее значимо по величине у волн с поперечной поляризацией (магнитное поле волны радиальное). В случае распространяющихся на запад волн, взаимодействие преимущественно происходит с протонами, которые дрейфуют в том же направлении. При распространении волны на восток она может обмениваться энергией с электронами.

При этом случаи распространения волн на запад наблюдаются в магнитосфере существенно чаще, чем случаи распространения на восток. В соответствии с этим, случаи наблюдения генерации и усиления волн облаками электронов достаточно редки. Обычно при описании таких случаев фигурируют дрейфовый резонанс, а также градиентная и инверсная дрейфовые неустойчивости — сильный отрицательный пространственный градиент плотности частиц и неустойчивое распределение частиц по энергиям [1]. Однако, в работах [2, 3] был предложен механизм генерации альфвеновских волн потоком частиц, представляющим собой переменный ток из-за конечного размера облака. Такой механизм может объяснить наблюдательные особенности пульсаций.

В работе представлен анализ случаев наблюдения волн с помощью космических аппаратов MMS, а также потоков электронов, с которыми взаимодействуют волны. Показано, что волны получают энергию от электронов в процессе дрейфового резонанса. При этом частицы не формируют неустойчивого распределения, которое могло бы быть источником волн. Вероятным способом генерации в этом случае является механизм генерации движущимся источником, предложенный в [2, 3].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-10139.

1. Mikhailova O.S., Smotrova E.E., Mager P.N. // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. **49**. P. e2022GL100433.
2. Золотухина Н.А. // *Иссл. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца* 1974. В. **34**. С.20.
3. Золотухина Н.А., Гульельми А.В. // *Иссл. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца* 1980. В. **50**. С.129.

## ПРИОРИТЕТНОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХОРОВ В ОБЛАСТЯХ С «ИЗРЕЗАННЫМ» ГЕОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**Жаравина П.Д.<sup>1</sup>, Савина О.Н.<sup>2</sup>, Беспалов П.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [pdzharavina@edu.hse.ru](mailto:pdzharavina@edu.hse.ru)*

<sup>2</sup> *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

В работе представлена обнаруженная нами зависимость вероятности возбуждения ОНЧ электромагнитных излучений с хоровой структурой динамического спектра от «изрезанности» магнитного поля, представляющей собой резкие колебания величины магнитного поля вблизи его локальных минимумов. Именно в этой области, вне плазмосферы, возбуждаются изучаемые излучения. При наличии «изрезанности» вероятность обнаружения хоров более 70%, а при отсутствии или очень низкой «изрезанности» вероятность отсутствия каких-либо излучений около 80%. Эти выводы сделаны в результате обработки данных, накопленных при выполнении миссии Van Allen Probes. Собрана большая база данных с динамическими спектрами излучений в условиях, когда аппарат Van Allen Probe А находился в зоне возможного возбуждения хоров вблизи локального минимума магнитного поля. Например, за январь 2015 года было проанализировано 78 событий, для которых имеются данные высокого разрешения. Из этих событий 95% согласуются с установленной закономерностью. Для некоторых событий зависимость вероятности возбуждения хоров от «изрезанности» магнитного поля была проверена по данным наблюдений с космического аппарата Van Allen Probe В. В работе предложен способ количественного определения степени «изрезанности» магнитного поля. Отмечена возможность объяснения установленной закономерности в условиях реализации ВРА (beam pulse amplifier) механизма возбуждения хоров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-12-00268.

## ПИТЧ-УГЛОВАЯ ДИФФУЗИЯ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ И ПОТОКИ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ: ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОНЧ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ

Демехов А.Г.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [andrei@ipfran.ru](mailto:andrei@ipfran.ru)

Количественно исследована зависимость эффективности питч-угловой диффузии энергичных электронов в магнитосфере Земли от распределения волнового поля свистовых волн вдоль геомагнитной силовой трубки для параметров, отвечающих местоположению КВ нагревных стенов “Сура” и НААРР. Продемонстрировано расширение энергетического диапазона высыпаний с увеличением области геомагнитных широт, занятых волнами. По вычисленному коэффициенту питч-угловой диффузии для заданного спектра волн и их распределения вдоль силовой трубки определено отношение потоков высыпающихся и захваченных частиц на малой высоте. Показано, что при типичной интенсивности волн, соответствующей хоровым ОНЧ-излучениям и плазмосферным шипениям, потоки высыпающихся и захваченных электронов могут быть сопоставимы друг с другом. Вместе с тем, для амплитуды волн, наблюдавшихся как результат действия нагревных стенов, поток высыпающихся электронов пренебрежимо мал.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00385.

## A new insight into the linear theory of magnetoacoustic waves in the homogeneous flux tubes with an abrupt boundary

Naga Varun. Y

SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Russia, [naga.varuny@gmail.com](mailto:naga.varuny@gmail.com)

An important and interesting issue is brought to notice in the standard linear theory of the magnetoacoustic waves in the homogeneous magnetic flux tubes with an abrupt magnetic boundary, which are representative of the coronal, chromospheric, and photospheric loops of the solar atmosphere.

In the well-known linear theory of magnetoacoustic waves in homogenous magnetic flux tubes, we first linearize the ideal magnetohydrodynamic equations (MHD) in the cylindrical geometry  $(r, \psi, z)$  and the obtained set of these equations are further Fourier analyzed and solved for the radial component to obtain a Bessel differential equation in terms of the radius ‘ $r$ ’. But the dispersion relation obtained for different physical cases is obtained by considering the following two boundary conditions given by the relations:  $P_{Ti}(a) = P_{Te}(a)$  and  $v_{ri}(a) = v_{re}(a)$ , here  $a$  is the radius of the magnetic flux tube representative of coronal, chromospheric loops,  $v_r(r)$  is the radial velocity component of the plasma perturbation and  $P_T(r)$  is the total pressure perturbation in the linear approximation. The subscripts  $i$  and  $e$  represent the interior and the exterior of the tube respectively. However, if we observe the radial perturbation of the magnetic field, we have the following relation between the radial component of the magnetic field and the radial velocity component, which is given by:  $B_r(r) = -B_0 \frac{k}{\omega} v_r(r)$ , where  $k$  and  $\omega$  are the wavenumber and frequency of the linear phase wave and  $B_r(r)$  is the radial magnetic field perturbation component. But we do know from the boundary conditions of classical electrodynamics that the normal component of the magnetic induction vector across a magnetic inhomogeneity should be continuous because of the fact that  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$ . As in the linear theory of MHD waves the change in the equilibrium radius of the flux tube is infinitesimal, therefore we must have  $B_{ri}(a) = B_{re}(a)$ . But the before mentioned boundary condition  $v_{ri}(a) = v_{re}(a)$  has implications that go straight against this electrodynamic boundary condition and thereby violate the fundamental electrodynamic boundary condition.

It was shown rigorously in our present work [3] that this paradox arises because the very procedure of linearization fails at the abrupt magnetic boundary and the proper dispersion relation would therefore be obtained by considering the continuity of the total pressure perturbation and the continuity of the radial magnetic perturbation. This gives us the following dispersion relation that doesn't violate the electrodynamic boundary condition:  $\frac{P_{Ti}(a)}{B_{ri}(a)} = \frac{P_{Te}(a)}{B_{re}(a)}$ . Further the dispersion curves that stem from the corrected dispersion relation are analysed and graphically represented. Fortunately, the solution set of  $\frac{P_{Ti}(a)}{B_{ri}(a)} = \frac{P_{Te}(a)}{B_{re}(a)}$  is very close to the solution set of  $\frac{P_{Ti}(a)}{v_{ri}(a)} = \frac{P_{Te}(a)}{v_{re}(a)}$ , in the case of solar corona and chromosphere, which perhaps was the reason, why this issue was earlier not noted in the numerical simulations but in the case of the solar photosphere it was shown that there are some qualitative differences indeed. The obtained new and correct dispersion relation provides a new insight and basis for developing more advanced nonlinear theories based on the abrupt boundary model of a magnetic flux tube.

1. Edwin P. M., Roberts B., // Solar Physics 1983. V. 88. P. 179-191.
2. Zajtsev V. V., Stepanov A. V. // IGAFS. 1975. V. 37. P. 3-10.
3. Yelagandula N. V., // DOI 10.3847/1538-4357/ace783.

Acknowledgments: This work is supported by the Russian science grant No075-15-2022-262 (13.MNPMU.21.0003) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

# О ЛОКАЛЬНОМ НГР РЕЗОНАНСЕ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ОНЧ ВОЛН В ПРИЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ С ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ЗАГРЯЗНЕНИЯМИ

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, [lundin.bv@gmail.com](mailto:lundin.bv@gmail.com)

При изучении эволюции амплитуды волновых пакетов свистовых волн в квазирезонансных режимах вдоль нисходящих лучей, формирующихся вблизи геомагнитного экватора из восходящих потоков низкочастотного излучения грозовых разрядов, удобно использование специальных (для заданной частоты пакета) криволинейных ортогональных систем координат. Возможность их построения связана с ортогональностью волновых векторов и групповых скоростей для электронных свистовых волн в холодной плазме вблизи косоугольного гибридного резонанса. Однако, такой подход возможен лишь в областях превышения частотой волнового пакета локальной нижегибридной НГР частоты.

Наличие локальных загрязнений приземной плазмы ионами и/или молекулярными, пылевыми конгломератами с высоким сродством к электронам и сопутствующие локальные уменьшения фоновой электронной плазменной частоты (при адгезии части электронов загрязнениями) приведут к локальному росту фоновых значений НГР частоты [1], а также к росту нормированных (на плазменную частоту) волновых чисел квазирезонансных свистов в зоне загрязнения. В этом случае формирование (на высотах вблизи локальных НГР резонансов) квазирезонансных эхо-свистов на характерных «петлевых» лучевых траекториях в пространственных зонах сближения («сверху») частоты нисходящего квазирезонансного волнового пакета и локального значения НГР частоты произойдет с меньшим расхождением их частот в зоне формирования «петли». «Петлевая часть» лучевой траектории ограничивает снизу пространственную область засветки нисходящим квазирезонансным свистовым волновым пакетом.

Таким образом при наличии электроотрицательных загрязнений приземной плазмы появляется возможность более точного установления соответствия между областью регистрации повышенной интенсивности квазирезонансного поля электронных свистовых волн и областью максимального сближения с частотой локального НГР резонанса. Отметим, что при существенном превышении удельных зарядов превалирующих ионов исходного плазменного фона над удельными зарядами загрязнений, возникших после адгезии электронов, ионная плазменная частота «загрязненной плазмы» будет близка к исходной.

1. Lundin B., Krafft C. // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P 1606.

# ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛН В ПЛОТНОЙ И РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ

Шкляр Д. Р.<sup>1</sup>, Артеха Н. С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [david@iki.rssi.ru](mailto:david@iki.rssi.ru)

<sup>2</sup>НИУ «ВШЭ», г. Москва, Россия, [natalya.arteha@mail.ru](mailto:natalya.arteha@mail.ru)

Несмотря на несомненную важность наличия достаточно простых аналитических выражений для показателей преломления волновых мод в магнитоактивной плазме, такие выражения известны лишь в некоторых частных случаях. Для электронных волн с частотами, намного превышающими частоту нижнего гибридного резонанса, такое выражение известно только для свистовых волн в плотной плазме, когда электронная плазменная частота значительно превышает электронную циклотронную частоту. В этом докладе мы предлагаем простые «рабочие» выражения для квадратов показателей преломления  $N^2$  всех четырех электронных мод в магнитоактивной плазме, а именно: быстрой магнитозвуковой (БМ) моды, также называемой свистовой модой, медленной необыкновенной (МН) моды, обыкновенной (О) и быстрой необыкновенной (БН) моды. Вид этих выражений не зависит от величины отношения электронной плазменной частоты  $\omega_p$  к электронной циклотронной частоте  $\omega_c$ , которое мы обозначим как  $p$ . Несмотря на то, что предлагаемые выражения для показателей преломления электронных волн в холодной магнитоактивной плазме дают хорошие аппроксимации точных значений в широком диапазоне параметров: частот волн, углов волновой нормали  $\theta$  и параметра  $p$ , эти выражения, естественно, являются приближенными и имеют свою область применимости. Так, приближенное выражение для величины  $N^2$  свистовых волн является достаточно точным для  $p \gg 1$  и  $p \ll 1$  для всех углов  $\theta$ , кроме  $\theta \rightarrow \pi/2$  в области малых  $p$ . Выражение  $N^2$  для МН моды работает достаточно хорошо для большинства углов  $\theta$  и значений параметра  $p$ , кроме малых  $\theta$  в области больших  $p$ . Выражение для О моды не работает для малых  $\theta$  и  $p \leq 1$ , а выражение для БН моды хорошо работает для всех значений  $\theta$  и  $p$ , кроме малых  $\theta$  и  $p \sim 1$ . Тот факт, что для трех последних мод модельные выражения не работают при малых  $\theta$  неудивителен, поскольку при их выводах мы исходили из строгих выражений для  $\theta = \pi/2$ , когда наши модельные выражения являются точными.

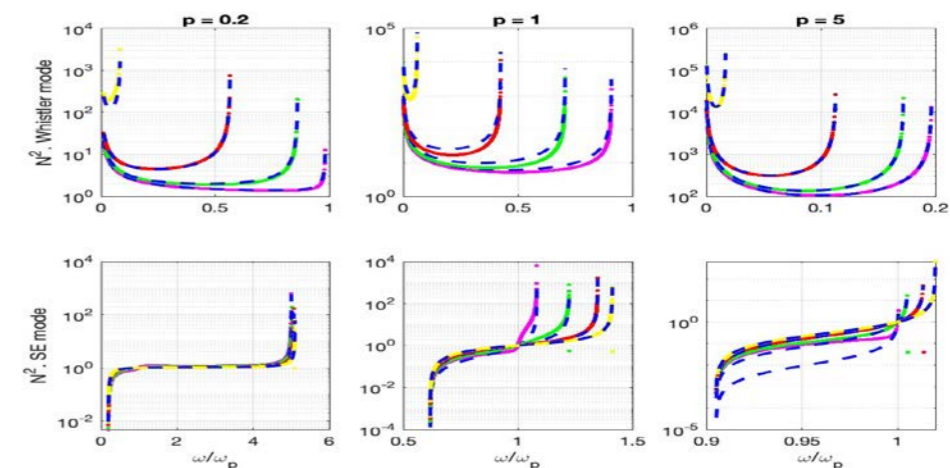


Рис. 1: Сравнение модельных (сплошные цветные линии) и точных (синие пунктирные линии) значений квадрата показателя преломления как функции нормированной частоты для четырех значений угла волновой нормали: 10° (малиновая), 30° (зеленая), 55° (красная) и 85° (желтая) линии. Величина  $N^2(\omega)$  показана для двух волновых мод: свистовой моды (верхний ряд) и МН моды (нижний ряд) для трех значений параметра  $p = \omega_p/\omega_c$ , указанных на рисунке.

# ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ МЕЖДУ РАЗЛИЧНЫМИ ГРУППАМИ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕЗОНАНСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВОЛНОЙ СВИСТОВОЙ МОДЫ

Лужковский А. А., Шкляр Д. Р.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [luzartyom@yandex.ru](mailto:luzartyom@yandex.ru)

Исследуется резонансное взаимодействие энергичных электронов радиационных поясов Земли с квазимонохроматическим пакетом свистовых волн, распространяющимся в магнитосфере под углом к внешнему магнитному полю. В этом случае резонансное взаимодействие реализуется на всех циклотронных резонансах ( $v_{rn} = (\omega - n\omega_c)/k_{||}$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), однако, мы ограничиваем наше рассмотрение тремя наиболее эффективными резонансами, вносящими основной вклад в инкремент свистовой волны:  $n = 1$  (первый циклотронный резонанс),  $n = 0$  (резонанс Ландау) и  $n = -1$ . Закон сохранения энергии в системе волна – резонансные частицы устанавливает равенство абсолютных величин и противоположность знаков изменений плотности энергии волны и резонансных частиц. Результатом резонансного взаимодействия может быть как возбуждение волн за счет энергии электронов, так и ускорение электронов волнами. Последний процесс имеет определенные ограничения, связанные с оценками плотности энергии волны, которая зачастую оказывается на несколько порядков меньше плотности кинетической энергии резонансных частиц. Стоит также отметить, что изменение энергии отдельной частицы может быть как положительным, так и отрицательным, а интегральный эффект воздействия частиц на волну, выражаемый инкрементом волны, определяется их функцией распределения. Изучение проблемы резонансного взаимодействия, ограничивающееся инкрементом волны, упускает из виду процесс обмена энергией между различными группами частиц, в котором волна играет роль посредника. Основной целью нашей работы является исследование дифференциального вклада в инкремент волны различных популяций резонансных электронов в зависимости от номера циклотронного резонанса, широты резонансного взаимодействия и кинетической энергии электронов.

Предполагается, что квазимонохроматический пакет свистовых волн малой амплитуды возбуждается из теплового шума на экваторе с частотой и углом волновой нормали ( $\theta = 0^\circ$ ), соответствующими максимальному значению линейного инкремента. Лучевая траектория волнового пакета фиксированной частоты рассчитывается на основе уравнений геометрической оптики в приближении электрон-протонной плазмы, дипольного магнитного поля Земли и гиротропной модели плотности холодной плазмы. Амплитуда волнового пакета вдоль траектории определяется в соответствии с законом сохранения энергии. В приближении заданного поля волны для случая сильной неоднородности, при котором нелинейный инкремент волны является локальной функцией ее амплитуды, было получено самосогласованное решение системы уравнений Больцмана-Власова – Максвелла. Детальный анализ нелинейного инкремента показал, что волновой пакет возбуждается электронами первого циклотронного резонанса вблизи экватора и затухает на средних и высоких широтах преимущественно вследствие взаимодействия с электронами Ландау резонанса. Кроме того, были произведены оценки, согласно которым среднеквадратичное изменение энергии энергичных электронов значительно превосходит их среднее изменение, что говорит о большей эффективности процесса обмена энергией между частицами, опосредованного волной, по сравнению со средним обменом энергией между частицами и волной.

# ОНЧ «ПТИЧКИ» В МАГНИТНЫЕ БУРИ 2023 ГОДА

Клейменова Н.Г.<sup>1</sup>, Маннинен Ю.<sup>2</sup>, Громова Л.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИФЗ РАН, г. Москва, Россия; [kleimen@ifz.ru](mailto:kleimen@ifz.ru)

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

<sup>3</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

По данным наземной регистрации в авроральных широтах Скандинавии (финская станция Каннуслехто) исследованы особенности дневных ОНЧ излучений типа «птичек» [1-3] на частотах выше 4-5 кГц во время магнитных бурь 2023 года, т.е. на подъеме нового цикла солнечной активности (СА). В минимуме солнечной активности ОНЧ «птички» появлялись крайне редко. Было найдено, что с развитием цикла СА число «птичек» увеличивалось, при этом «стаи» ОНЧ «птичек» длительностью 3-5 часов наблюдались, как правило, в позднюю восстановительную фазу магнитных бурь, когда значения  $Dst$ -вариации ( $Sym/H$ ) все еще оставались отрицательными, около  $-(20-30)$  нТл. Детально рассмотрены особенности динамических спектров ОНЧ «птичек» во время трех магнитных бурь весны 2023 г. Показано, что наиболее часто «птички» наблюдаются в полосе  $\sim 6-8$  кГц в виде внезапно появляющихся хаотических всплесков излучений длительностью менее 1 мин, состоящих из тесно следующих друг за другом дискретных сигналов возрастающей частоты. Как отмечалось и ранее, иногда всплески излучений начинаются с узкой полосы ОНЧ хисса («нос»). Было установлено, что после наиболее сильных магнитных бурь 2023 г. (24 апреля с  $Dst \sim 210$  нТл и 5 ноября с  $Dst \sim 180$  нТл) ОНЧ «птичек» практически не отмечалось. Во время появления «птичек» не было обнаружено никаких значительных возмущений ни на земной поверхности, ни в магнитосфере, ни в межпланетном космическом пространстве. Это позволяет предположить, что генерация «птичек» происходит в магнито-спокойное время за счет собственных процессов во внутренней магнитосфере, источником которых может быть энергия, накопленная в магнитосфере в предшествующее время, т. е. в главную фазу магнитной бури.

1. Маннинен Ю. и др. Новый вид дневных высокочастотных ОНЧ излучений в авроральных широтах («птички»), Геомагнетизм и Аэрономия, 2017, 57(1), 36-44. <https://doi.org/10.1134/S0016793217010091>
2. Manninen J., Kleimenova N.G. et al. New type of short VLF-patches (“VLF birds”) above 4-5 kHz, JGR-Space Physics, 2021, 126, <https://doi.org/10.1029/2020JA028601>.
3. Manninen J., Kleimenova N.G. et al. Unexpected VLF bursty-patches above 5 kHz, Surveys in Geophysics, 2022, 43(6), <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09741-0>.



## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ШУМОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОЛОВИНЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ГИРОЧАСТОТЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ НА СПУТНИКАХ VAN ALLEN PROBES

Титова Е. Е.<sup>1,2</sup>, Любчик А. А.<sup>1</sup>, Шкляр Д. Р.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>ПГИ, г. Анапты, Россия, [lena.titova@gmail.com](mailto:lena.titova@gmail.com)

<sup>2</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Анализ свистовых волн на спутнике Van Allen Probes В, наблюдавшихся 29-30 ноября 2015 г. в экваториальной области магнитосферы на расстояниях  $\sim 3-5 R_E$ , показал, что вблизи половины гирочастоты электронов  $f_{ce}/2$  наблюдались следующие особенности в спектрах шумовых ОНЧ излучений: две полосы излучений со спектральными максимумами ниже и выше  $f_{ce}/2$  и только одна верхняя полоса шумов на частотах выше  $f_{ce}/2$ .

Вблизи экваториальной области магнитосферы спектральные характеристики шумовых излучений, генерируемых при развитии электронной циклотронной неустойчивости, должны быть тесно связаны с локальным коэффициентом усиления. Измерения волн и частиц на спутниках Van Allen Probes позволяют рассчитать коэффициенты усиления свистовых волн. Основной целью доклада является сопоставление их с наблюдаемыми спектрами ОНЧ шумов.

Сравнение спектральных характеристик регистрируемых ОНЧ излучений и рассчитанных инкрементов свистовых волн часто показывает их достаточно хорошее соответствие, включая существование двух спектральных максимумов ниже и выше половины электронной гирочастоты. Также по данным спутника Van Allen Probes В определены энергии резонансных электронов и рассмотрены особенности их функций распределения, приводящие к возникновению двух максимумов в зависимости инкремента от частоты и соответствующей двухполосной структуры наблюдаемого спектра.

В отличие от ОНЧ шумов, регистрировавшихся в двух полосах выше и ниже  $f_{ce}/2$ , спектры одиночной верхней полосы шумов на частотах выше  $f_{ce}/2$  не соответствовали полосе частот рассчитанного инкремента, который был положительным как выше, так и ниже  $f_{ce}/2$ . Мы связываем такое несовпадение с волноводным распространением этих излучений в неоднородностях с пониженной плотностью, которые наблюдались на спутнике. При этом максимальные интенсивности шумовых излучений на частотах выше  $f_{ce}/2$  регистрировались внутри неоднородностей, а перепад мощностей ОНЧ волн внутри и вне их достигал двух порядков. Внутри неоднородностей ОНЧ волны распространялись вдоль магнитного поля с углами волновых нормалей  $< 20^\circ$ , плотность плазмы уменьшалась в 2-3 раза, а характерные размеры неоднородностей на Van Allen Probes были  $\approx 200 - 350$  км.

Интерпретация изменений спектра аврорального километрового радиоизлучения, наблюдаемого в приэкваториальной области магнитосферы Земли

**В.И. Колпак** 1 2 3, **М.М. Могилевский** 3, **Д.В. Чугунин** 3, **А.А. Чернышов** 2 3, **И.Л. Моисеенко** 3

1. *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.*

*Пушкова РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия, [lera.kolpak@yandex.ru](mailto:lera.kolpak@yandex.ru)*

2. *Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, 101000 Москва, Россия*

3. *Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия*

Представлены результаты обработки электрической компоненты электромагнитных излучений, измеренных на спутнике ERG в диапазоне частот от 50-800 кГц вблизи внешней границы плазмосферы Земли, и приведена интерпретация зарегистрированных в эксперименте искажений спектра аврорального километрового радиоизлучения (АКР). В предыдущих работах были представлены измерения АКР, распространяющихся в каналах – неоднородности плазмы, вытянутые вдоль магнитного поля. В этой работе приведены расчеты распространения АКР в таких каналах с использованием упрощенной модели: не учитывается расходимость канала при увеличении высоты, стенки предполагаются взаимно параллельными, границы канала полагаются резкими и пр. Однако даже при таких упрощениях получены результаты, качественно совпадающие с измерениями. В частности, в результате обработки экспериментальных данных АКР было получено уменьшение частотной составляющей 400 кГц на два порядка по сравнению с частотой 200 кГц. Модельные расчеты дают очень близкое значение. Отсюда следует, что изменение формы спектра АКР, наблюдаемое в эксперименте, может быть признаком захвата и распространения излучения в плазменном канале.

## О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ГЕНЕРАЦИИ ГЕКТОМЕТРОВОГО КОНТИНУУМА

Дорофеев Д.А.<sup>1,2</sup>, Чернышов А.А.<sup>1</sup>, Чугунин Д.В.<sup>1</sup>, Могилевский М.М.<sup>1</sup>, Шапошников В.Е.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [dadorofeev\\_1@edu.hse.ru](mailto:dadorofeev_1@edu.hse.ru)

<sup>2</sup> НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Измерения электрической составляющей электромагнитного поля в диапазоне частот 2 кГц – 10 МГц на японском спутнике ERG (Arase) позволили обнаружить новое излучение типа гектометровый континуум, которое представляет собой линейчатый спектр на частотах 600 – 1700 кГц. Была собрана статистика за три года (489 случаев), согласно которой удалось установить, что данный тип излучения наблюдается в основном в ночное время, не зависит от геомагнитной активности, а также предполагаемый(ые) источник(и) находится на низких широтах. Возможным механизмом генерации гектометрового континуума является механизм двойного плазменного резонанса, который состоит в резком усилении неустойчивости плазменных волн при совпадении частоты либо верхнего, либо нижнего гибридного резонанса с одной из гармоник гирочастоты. В результате чего возбуждаются плазменные волны, которые после трансформируются в интенсивное электромагнитное излучение посредством механизма трёхволнового взаимодействия. Реализация данного механизма должна происходить на градиенте магнитного поля и концентрации. Предполагается, что градиент концентрации вызван, так называемой «ионосферной дырой», которая формируется на низких широтах на высотах ~1000 – 2500 км. Работа Чернышова А.А. поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

## СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения токовых слоев»

Понедельник, 05.02.2024 г., комната 200

Председатель: <u>Шайхисламов И.Ф.</u>			
	Время	Докладчик	Название доклада
1	14.00 - 14.15	Тревес Т.В.	Сравнительный статистический анализ свойств токовых слоев в межпланетных корональных выбросах масс и областях перемешивания солнечного ветра
2	14.15 - 14.30	Нечаев А.А.	Моделирование локальных неустойчивостей токового слоя типа магнитопаузы с различными энергетическими распределениями частиц
3	14.30 - 14.45	Леоненко М.В.	Сильные неидеальные электрические поля внутри токовых слоев электронных кинетических масштабов в хвосте земной магнитосферы по данным миссии MMS
4	14.45 - 15.00	Малыхин А.Ю.	Анализ токонесущей популяции электронов тонкой токовой структуры на диполизационном фронте
5	15.00 - 15.15	Царева О.О.	Разрывная неустойчивость сверхтонких токовых слоев
	15.15 - 15.30	<i>Резервное время</i>	
	15.30 - 16.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
<b>Председатель: <u>Зеленый Л.М.</u></b>			
6	16.00 - 16.15	Руменских М.С.	Токовый слой на границе взаимодействия сферического облака лазерной плазмы с замагниченным водородным фоном
7	16.15 - 16.30	Мозговой А.Г.	Формирование и исследование токовых слоев в плазме
	16.30 - 17.30	<i>Секция «Магнитосфера»</i>	
	17.30 - 18.00	<b>Постерная сессия</b>	

Доклады постерной сессии 05.02.2024 «Теория и наблюдения токовых слоев»

8.1.1 Кирий Н.П. О нагреве ионов в окрестности нулевой линии лабораторного токового слоя, сформированного в плазме тяжелых инертных газов

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ МАСС И ОБЛАСТЯХ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

**Тревес Т.В.<sup>1</sup>, Хабарова О.В.<sup>2,1</sup>, Кислов Р.А.<sup>3,1</sup>**

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия, [timothy.treves@gmail.com](mailto:timothy.treves@gmail.com)

<sup>2</sup>Raymond & Beverly Sackler Faculty of Exact Sciences, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel

<sup>3</sup>Ariel University, Ariel, Israel

В данной работе мы проводим статистический анализ параметров плазмы и магнитного поля на токовых слоях и в их окрестности в двух типах потоков солнечного ветра: в корональных выбросах масс (Interplanetary Coronal Mass Ejections – ICMEs) и в областях перемешивания разнородных потоков (Stream Interaction Regions – SIRs). Для исследования используется база токовых слоев на 1 а.е. (<https://csdb.izmiran.ru>), полученная в результате применения метода автоматической идентификации этого типа разрывов по методу Khabarova et. al, JGR, 2021, doi:10.1029/2020JA029099. Общие тенденции поведения физических параметров в SIR и ICME изучены с помощью метода наложенных эпох. Подобные исследования обычно полагаются на нормализацию данных к параметрам плазмы и магнитного поля на переднем крае потока. Это приводит к размыванию профиля потоков, так как внутренние области ICME и SIR разнятся по длине. Например, ширина ICME шиса и магнитного облака у всех ICME разная. Вместо этого мы нормализуем данные, приводя их к масштабу, определяемому типичной шириной передней части потоков. Нормализация производится от переднего края потока до конца лидирующего крупномасштабного плазменного образования, а именно от ударной волны до конца шиса в случае ICME или от переднего края SIR до stream interface (SI). Это масштабирование сохраняет наблюдаемые тенденции в отдельных SIRs и ICMEs, позволяя нам анализировать их крупномасштабные свойства и соответствующие свойства токовых слоёв в выделенных частях потоков. Обсуждаются результаты сравнительного статистического анализа типичных характеристик токовых слоёв в ICME sheath и магнитном облаке, а также в SIR до и после SI, по данным наблюдений 451 SIRs и 91 ICMEs в 1998-2012 гг.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ТОКОВОГО СЛОЯ ТИПА МАГНИТОПАУЗЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ ЧАСТИЦ

**Нечаев А.А., Гарасёв М.А., Кочаровский Вл.В.**

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, [a.nechaev@ipfran.ru](mailto:a.nechaev@ipfran.ru)

Осуществлено численное моделирование двух- и четырехкомпонентных токовых слоев типа магнитопаузы, найденных аналитически для произвольного распределения частиц по энергиям и описывающих распределенную границу между областями бесстолкновительной плазмы с различными величинами магнитного поля и концентрации частиц [1].

В расчетах эволюции токового слоя, выполненных методом частиц в ячейках (макрочастиц) на основе кода ЕРОСН [2], самосогласованное стационарное аналитическое решение уравнений Власова – Максвелла задавалось в качестве начального условия. При этом использованные решения допускали параметры, для которых либо возможно, либо исключено развитие мелкомасштабной неустойчивости вейбелевского типа во внутренней части слоя. Исследованы оба случая и проведен сравнительный анализ неустойчивости для двух вариантов начального энергетического распределения частиц — максвелловского и каппа [3]. Ранее в рамках такой постановки задачи анализ развития вейбелевской турбулентности в магнитопаузе не осуществлялся.

В докладе обсуждаются результаты численного моделирования, выявившие особенности возникновения и нелинейной эволюции квазимагнитостатической вейбелевской турбулентности в условиях существования противотоков электронов и ионов, наличия неоднородного собственного магнитного поля слоя и неоднородности распределения плазмы с анизотропным распределением частиц по скоростям. Установлено, что наличие градиентов локальных свойств магнитоактивной плазмы значительно изменяют спектр возникающей турбулентности и характер его постепенной эволюции из коротковолновой в длинноволновую область по сравнению со случаем пространственно однородной магнитоактивной плазмы. Показано, что возмущения вейбелевского типа на больших временах могут существенно изменять регулярное поле токового слоя во внутренней его части, хотя его крупномасштабная структура остается стабильной.

Построенные модели токовых слоев и установленные свойства их мелкомасштабной неустойчивости вейбелевского типа, приводящей к формированию квазимагнитостатической турбулентности, представляют интерес для описания физических явлений в окрестности внешних частей планетарных магнитосфер, подверженных звездному ветру, и коронах звезд поздних спектральных классов.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 20-12-00268).

1. Nechaev A. A. et al. // JETP Lett. 2023. V. 117. P. 214.
2. Arber T. D. et al. // PPCF. 2015. V. 57. P. 113001.
3. Nechaev A. A., Garasev M. A., Kocharovskiy V. V. // arXiv:2312.05863.

## СИЛЬНЫЕ НЕИДЕАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ВНУТРИ ТОКОВЫХ СЛОЕВ ЭЛЕКТРОННЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МАСШТАБОВ В ХВОСТЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ МИССИИ MMS

Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [makarleonen@gmail.com](mailto:makarleonen@gmail.com)

В работе проведен анализ сверхтонких токовых слоев (СТС) вблизи нейтральной плоскости в быстрых плазменных потоках, направленных как к Земле, так и от Земли. В исследуемом интервале с 15:24 по 16:05 6 июля 2017 г. при помощи автоматического метода детектирования токовых слоев было обнаружено 179 событий с плотностью электрического тока  $> 25 \text{ нА/м}^2$  в плоскости (y, z) GSE системы координат вблизи нейтральной плоскости ( $B_x < 5 \text{ нТл}$ ).

В областях наблюдения СТС было обнаружено нарушение замороженности электронной компоненты плазмы. Нарушение замороженности происходит из-за появления неидеальных электрических полей, которые определяются как  $E' = E + [V_e \times B]$ , где  $E$  – наблюдаемое электрическое поле,  $V_e$  – электронная потоковая скорость,  $B$  – магнитное поле. Наблюдаемые неидеальные электрические поля внутри СТС в некоторых случаях достигают  $100 \text{ мВ/м}$ , и в 57 событиях наблюдается интенсивное ( $|E'| > 10 \text{ мВ/м}$ ) неидеальное электрическое поле. События наблюдений интенсивных  $E'$  могут быть разделены на 4 типа.

I тип (5 событий): электростатические солитоны ( $\sim 50 \text{ Гц}$ ), параллельные внешнему магнитному полю. Они составляют наиболее интенсивные неидеальные электрические поля с амплитудой до  $100 \text{ мВ/м}$ . Объемная плотность мощности трансформации энергии в них достигает ( $j \cdot E'$ )  $\sim 1 \text{ нВт/м}^3$ . Солитонные поля наблюдались только в потоке от Земли, что может быть связано с недостаточной статистикой наблюдений и требует уточнения. Преимущественно наблюдаются в горячих ( $T_e \sim 2.5 \text{ кэВ}$ ) токовых слоях.

II тип (8 событий): электростатические высокочастотные ( $\sim (100-1000) \text{ Гц}$ ) колебания, параллельные внешнему магнитному полю. Величина неидеального электрического поля достигает  $\sim 45 \text{ мВ/м}$ . Максимальная по модулю величина ( $j \cdot E'$ ) внутри СТС строго отрицательна, что может свидетельствовать о генерации таких полей при ослаблении (разрушении) тока. Наблюдаются в более холодных ( $\sim 1 \text{ кэВ}$ ) токовых слоях в потоках как к Земле, так и от Земли.

III тип (21 событие): низкочастотные ( $\sim 10 \text{ Гц}$ ) электромагнитные колебания, распространяющиеся из удаленного источника, перпендикулярные внешнему магнитному полю. Величина неидеального электрического поля достигает  $\sim 20 \text{ мВ/м}$ . Волновая форма полей наблюдается на временных масштабах больших, чем время наблюдения соответствующих СТС, что свидетельствует о возможной генерации в удаленных источниках (возможно, других СТС).

IV тип (23 события): низкочастотные ( $\sim 10 \text{ Гц}$ ) электромагнитные колебания, локализованные на масштабах СТС, перпендикулярные внешнему магнитному полю. Величина неидеального электрического поля достигает  $\sim 60 \text{ мВ/м}$ . Обнаружено, что величина неидеального электрического поля типа IV растет с ростом плотности электрического тока в СТС. Поля типа II и III также усиливаются с ростом тока в слабых токовых слоях и ослабляются в слоях с  $j > 50 \text{ нА/м}^2$ . Солитонные поля типа I, также усиливаются с ростом плотности тока в СТС, достигая максимума при  $j \sim 55 \text{ нА/м}^2$ . В СТС с большей плотностью электрического тока солитонные поля не наблюдаются, что также может быть связано с недостаточностью статистики.

Наблюдаемые неидеальные электрические поля приводят к значительной плотности мощности энергии, преобразуемой в СТС ( $j \cdot E'$ ). В слоях с интенсивной трансформацией энергии наблюдается вариация электронной температуры до  $\sim 35\%$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

## АНАЛИЗ ТОКОНЕСУЩЕЙ ПОПУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ТОНКОЙ ТОКОВОЙ СТРУКТУРЫ НА ДИПОЛИЗАЦИОННОМ ФРОНТЕ

Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Леоненко М.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [anmaurdreg@gmail.com](mailto:anmaurdreg@gmail.com)

Плазменный слой геомагнитного хвоста представляет собой динамичную магнитоплазменную структуру, которая является одной из основных частей магнитосферы Земли. Многолетние исследования позволили получить как общие, так и более детальные знания о динамике геомагнитного хвоста и процессах, наблюдаемых в нем. Одним из ключевых элементов этой динамики является процесс диполизации магнитных силовых линий, который проявляется в резком возрастании северной компоненты магнитного поля.

Многочисленные наблюдения, полученные различными космическими миссиями, позволили изучить общую структуру как отдельных диполизационных фронтов (ДФ), так и крупномасштабных диполизаций, однако, до сих пор не удалось полностью и детально описать токовую структуру диполизаций на электронных кинетических масштабах. Ранее было показано, что с ДФ связаны сложные многомасштабные токовые структуры, однако, в силу особенностей большинства миссий, их детальное изучение на субионных и электронных кинетических масштабах было невозможно. Научная аппаратура и конфигурация миссии MMS впервые позволили исследовать такие магнитоплазменные структуры, а также динамику электронной компонентой плазмы и электрических полей, трёхмерные измерения которых измерены впервые.

В силу многомасштабности продолжительных диполизаций, детальное исследование их токовой структуры лучше проводить на примере изолированных ДФ. В частности, это позволяет отделить влияние многомасштабной структуры продолжительной диполизации от структуры самих ДФ. В данной работе детально исследованы интенсивные токовые структуры и определена токонесущая популяция плазмы. Также сделаны выводы о природе сильных электрических полей, наблюдаемых на ДФ, и исследована пространственная структура мелкомасштабных токов и электрических полей, связанных с ДФ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

## РАЗРЫВНАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

**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](mailto:olga8.92@mail.ru)*

Исследована возможность возникновения разрывной неустойчивости в новом классе сверхтонких токовых слоев (СТС) на размагниченных электронах. В работе была использована равновесная модель СТС [1], которая учитывает потоки двух групп электронов: размагниченных и замагниченных (с анизотропным тензором давления).

С помощью линейной теории возмущений были найдены волновые числа и скорости роста разрывной моды для различных параметров равновесной модели СТС, таких как доля размагниченных электронов, зависящая от нормальной компоненты магнитного поля; соотношение электронной тепловой скорости к потоковой; коэффициент анизотропии давления замагниченных электронов. Было показано, что увеличение этих параметров приводит к накоплению свободной энергии СТС за счет утоньшения СТС и к подавлению эффекта электронной сжимаемости за счет уменьшения доли замагниченных электронов. Размагниченные электроны в СТС могут способствовать развитию быстрой разрывной моды на коротких длинах волн. При этом скорость роста электронной разрывной неустойчивости достаточно велика, чтобы дестабилизировать СТС на временных масштабах в несколько секунд. Ионная разрывная мода растет медленнее и может дестабилизировать ТС только за десятки секунд.

Наблюдения MMS подтвердили, что быстрый рост мелкомасштабных магнитных возмущений приводит к прерывистому характеру динамики токового слоя, то есть к образованию магнитных островов или плазмоедов. При этом быстрая разрывная мода сопровождается сильными индуктивными электрическими полями.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

1. Tsareva O.O., Leonenko M.V., Grigorenko E.E., et. al. // JGR 2023. V. 128, P. e2023JA031459.

## ТОКОВЫЙ СЛОЙ НА ГРАНИЦЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ЗАМАГНИЧЕННЫМ ВОДОРОДНЫМ ФОНОМ

**Руменских М.С., Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Посух В.Г., Захаров Ю.П., Шайхисламов И.Ф.**

Импульсное расширение локализованного плазменного облака в относительно разреженную, замагниченную окружающую плазму характеризует множество астрофизических и космических явлений. В таких разреженных средах бесстолкновительные электромагнитные процессы, а не кулоновские столкновения, определяют передачу импульса и энергии от облака к фоновой плазме.

Взаимодействующие плазмы в космической среде зачастую представлены ионами разных сортов. Раздельная диагностика широкого ряда ионов возможна благодаря развитию спектральных методов. Кроме того, применение оптических методов при лабораторном моделировании космических процессов позволяет максимально точно воспроизвести условия эксперимента с использованием космических телескопов, не внося возмущений в исследуемую область.

Данная работа содержит результаты лабораторного моделирования разлета квазисферического облака лазерной плазмы в замагниченную фоновую водородную плазму, в частности измерение вращения ионов разных сортов на границе взаимодействия. Эксперимент проводился на вакуумном стенде «КИ-1» лаборатории энергетики сверхмощных лазеров ИЛФ СО РАН. Для демонстрации эффекта вращения ионов лазерной и фоновой плазм приводятся спектры излучения ионов лазерной и фоновой плазм, а также данные измерений потоков ионов.

Благодарности Работа выполнена при поддержке программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики.

## ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ПЛАЗМЕ

Мозговой А.Г.

ФИАН РАН, г. Москва, Россия, [amozgovoy@gmail.com](mailto:amozgovoy@gmail.com)

Токовые слои в плазме в экспериментах возбуждают различными способами - это разряд в газе между электродами от нескольких источников энергии с образованием X – точек [1], плазменный фокус, тэта пинч или индукционный разряд. Наибольший интерес представляют замкнутые токовые слои. Такой виток – это индуктивный накопитель магнитной энергии равной  $-LI^2/2$ , где L -индуктивность витка, I- ток в ней. Под действием силы Ампера такой виток и в плазме солнечной короны обязан расширяться, что будет вызывать коллективное ускорение ионов, а при обрыве тока в петле, возникающее высокое напряжение будет сопровождается импульсом излучения в широком диапазоне вплоть до жесткого рентгена, за которым следует более быстрый поток коллективно ускоренных частиц - образуется солнечный ветер. Экспериментальные результаты наблюдений подтверждают это предположение [2].

Замкнутые витки (слои) с током в плазме исследуются с 50-годов прошлого века. Сейчас такую осесимметричную конфигурацию витка называют **компактным тором** или **FRC – Field Reversed Configuration**. Такие торы можно ускорять и сжимать внешними магнитными полями, что и используют в исследованиях по термоядерному синтезу и для создания электроракетных двигателей. В настоящее время в Национальной Лаборатории США в Лос Аламосе создается новая экспериментальная платформа для исследований **FRC**. Известны частные американские компании - **Tri Alpha Energy** (освоено более \$ 1.2 млрд., из них 50 млн. от Роснано) и **Helion Energy** – последняя даже анонсировала в 2024 году выдачу энергию со своего нового термоядерного коллаидера Polaris (инвестировано в 2021 г. \$ 570 млн., с обязательством еще \$ 1.2 млрд, главный инвестор - **Sam Altman**, компаньон **Elon Musk** по Open AI -ChatGPT AI, заключены контракты с **Майкрософт** на поставку реактора в 2028 г и с **Nucor Inc.** на \$ 35 млн).

Работы проводятся и в ФИАН, где был предложен и запатентован новый способ формирования компактных торов в **индуктивных накопителях** энергии [3]. Данный метод показал высокую эффективность преобразования магнитной энергии накопителя - до 70 процентов запасенной энергии передается в плазмоид, ток достигал несколько десятков килоампер при диаметре плазмоида 30 см, а его скорость составила 40 км/сек. Два плазмоида, ускоренных навстречу друг друга, дали в месте столкновения температуру плазмы более 1 кэВ и длительность мягкого рентгеновского излучения около одной микросекунды, что на **три порядка** превышает длительность такого излучения на установках с Z,X-пинчем и плазменным фокусом. Это показывает реальную возможность осуществления инерциального термоядерного синтеза, а многократное ускорение компактного тора магнитными полями – это и новый вид электроракетных двигателей для космоса.

Предлагаем создать коллаборацию для осуществления исследований по этой теме с привлечением ведущих научных организаций России и дружественных стран, а также инвестиционных компаний для подачи совместной заявки в ВЭБ РФ на 3 млрд р. и на срок до 20 лет, и в Фонд Прямых Инвестиций.

1. Франк А.Г., Артемьев А.В., Зелёный Л.М. // ЖЭТФ 2016. Т. 150. С. 807.
2. Kai E. Yang at.al. // The Astrophysical Journal, 959:54 (19pp), 2023 December 10 <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad077d>
3. Патент РФ № RU 2523427, Способ формирования компактного плазмоида

## О НАГРЕВЕ ИОНОВ В ОКРЕСТНОСТИ НУЛЕВОЙ ЛИНИИ ЛАБОРАТОРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО В ПЛАЗМЕ ТЯЖЕЛЫХ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

**Кирий Н.П.**

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, [natalya.kyrie@yandex.ru](mailto:natalya.kyrie@yandex.ru)

Исследования двумерного распределения концентрации электронов [1] показали, что в сформированном токовом слое имеются значительные градиенты плотности плазмы вдоль толщины слоя (меньшего из поперечных размеров слоя), при этом вдоль ширины слоя (большого из поперечных размеров) плотность плазмы распределена практически равномерно. Целью настоящей работы было исследование распределения ионной температуры аргоновой и криптоновой плазмы вдоль поверхности (ширины) токового слоя, сформированного в двумерных (2D) и трехмерных (3D) магнитных конфигурациях.

Исследования были выполнены на экспериментальной установке ТС-3D (ИОФ РАН) методами спектроскопии. Температура ионов определялась из доплеровских уширений спектральных линий Ar II 480.6 нм и C IV 580.1 нм (углерод присутствует в аргоновой плазме в качестве примеси), а также Kr II 473.9 нм, измеренных вдоль электрического тока, текущего в плазме [1], поскольку все направленные движения плазмы происходят в плоскости, перпендикулярной току. Для изучения распределения температуры ионов система приема излучения плазмы перемещалась вдоль ширины слоя в плоскости симметрии токового слоя. Пространственное разрешение спектральных измерений составляло ~ 2.6 см. Измерения проводились в следующих экспериментальных условиях: начальное давление рабочего газа  $p = 30$  мТорр, градиент поперечного магнитного поля  $h = 0.57$  кГс/см, амплитуда электрического тока в плазме  $J_z = 45$  кА, индукция продольного магнитного поля  $B_z = 0/2.9$  кГс (2D/3D магнитные конфигурации, соответственно).

Установлено, что температура ионов аргона Ar II (потенциал ионизации  $E_i = 27.6$  эВ) распределена вдоль ширины токового слоя практически равномерно, мало меняется в процессе эволюции слоя как в 2D, так и 3D магнитных конфигурациях и составляет  $T_i \approx 40 - 50$  эВ, соответственно. При формировании токового слоя в 2D магнитной конфигурации ионная температура, измеренная по уширению линии ионов углерода C IV 580.1 нм ( $E_i = 64.5$  эВ), достигает величины  $T_i^{max} \approx 90$  эВ, что в ~ 2 раза превышает температуру ионов аргона Ar II. Следовательно, температура ионов аргона Ar II характеризует нагрев периферийных областей плазменного слоя [2], а температура ионов примесного углерода C IV 580.1 нм – нагрев центральной области токового слоя.

Показано, что распределение температуры ионов криптона Kr II ( $E_i = 24.6$  эВ) вдоль ширины слоя в начале эволюции токового слоя практически однородно, слабо меняется со временем, характерная величина температуры составляет  $T_i \approx 50$  эВ. Затем, в 3D магнитной конфигурации температура ионов уменьшается по всей ширине токового слоя, а в 2D конфигурации, напротив, увеличивается, при этом в центре слоя образуется локальный максимум температуры  $T_i^{max} \approx 80$  эВ.

Таким образом, установлено, что распределение температуры ионов вдоль ширины плазменного токового слоя, сформированного в 2D магнитной конфигурации при разряде в аргоне или криптоне, является неоднородным: центре слоя, в окрестности нулевой линии, образуется локальная область горячей плазмы с температурой ионов  $T_i^{max} \approx 80 - 90$  эВ.

1. Франк А.Г., Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Островская Г.В. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том III-2. М: Янус-К. 2008. С. 335.
2. Кирий Н.П., Франк А.Г., Васильков Д.Г. // Физика плазмы. 2019. Т.45 (4). С. 313.

