



Российская Академия Наук

**ВОСЕМНАДЦАТАЯ
ЕЖЕГОДНАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

6-10.02.2023

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

18



**РОССИЯ
МОСКВА
Профсоюзная, 84/32**

Уважаемые Коллеги!

Перед вами сборник тезисов докладов, представленных на Восемнадцатой конференции по “Физике плазмы в Солнечной системе”. Всего на конференцию заявлено 363 доклада (269 устных и 94 стендовых). Доклады, отобранные Программным комитетом, доложены в рамках восьми тематических секций, которые шли параллельными сессиями в два или три потока в течение пяти рабочих дней с 6 по 10 февраля 2023 года. Также проведено четыре пленарных заседания, где было представлено семь докладов от шести секций.

Сборник тезисов организован следующим образом: сначала идут тезисы пленарных докладов, далее тезисы представлены по секциям, где они идут в хронологическом порядке по дням согласно программе.

Мы благодарим всех Авторов тезисов.

*От имени Программного и организационного комитетов
Восемнадцатой конференции по “Физике плазмы в Солнечной системе”
(А.Б. Струминский, И.В. Зимовец, И.Н. Шарыкин, А.Б. Нечаева)*

Оглавление

Пленарные доклады:

Л.М. Зеленый Токовые структуры в космической плазме. Путешествие внутрь «сингулярности»	6
Weiqun Gan ASO-S: The Preliminary Performance in the Orbit	8
С.А. Богачев, Л.С. Леденцов Памяти Б.В. Сомова	9
С.Д. Корольков, В.В. Измоленов О механизме нагрева солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях: новое объяснение старым данным Вояджера-2	10
Б.В. Козелов Диагностика свойств ионосферы с помощью оптических измерений в арктическом регионе	11
Пулинец С.А. Высокочастотная радиоспектрометрия космической плазмы. Прошлое и будущее	12
Морозова Л.Н. А.Л. Чижевский и С.П. Королев	13

Секции:

1. Теория и наблюдения Солнца	14-135
2. Солнечный ветер и гелиосфера	136-186
3. Магнитосфера	188-241
4. Ионосфера	242-309
5. Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли	310-339
6. Прогноз космической погоды и прикладная физика магнитосферы и ионосферы	340-389
7. Волновые явления в космической плазме	390-446
8. Теория и наблюдение токовых слоёв	448-461

Распределение секций конференции «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ – 2023»

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>ЦО (Line 3), время</i>
Понедельник 06.02.2023	<i>Утро</i>	Теория и наблюдения Солнца 09:00-10:30	Ионосфера 09:00-10:30	Магнитосфера 09:00-09:45
	10:30-11:00	<i>кофе</i>		
		Теория и наблюдения Солнца 11:00-12:30	Ионосфера 11:00-12:30	Солнечный ветер и гелиосфера 11:00-12:30
	12:30-12:45	ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ		
	<i>Пленарный час</i> 12:45-13:30	Токовые структуры в космической плазме. Путешествие внутрь «сингулярности» (Л.М. Зеленый)		
	13:30-14:30	<i>обед</i>		
	<i>День</i>	Теория и наблюдения Солнца 14:30-16:00	Ионосфера 14:30-16:00	Токовые слои 14:30-16:00
	16:00-16:30	<i>кофе</i>		
	<i>Вечер</i>	Теория и наблюдения Солнца 16:30-18:00	Ионосфера 16:30-17:45	Токовые слои 16:30-17:15
Постерная сессия до 18:30		Постерная сессия до 18:30	(свободно)	
Вторник 07.02.2023	<i>Утро</i>	Теория и наблюдения Солнца 09:00-10:30	Магнитосфера 09:00-10:30	Атмосфера и климат Земли 09:00-10:30
	10:30-11:00	<i>кофе</i>		
		Теория и наблюдения Солнца 11:00-12:30	Магнитосфера 11:00-12:30	Атмосфера и климат Земли 11:00-12:30
	<i>Пленарный час</i> 12:30-13:30	ASO-S: The Preliminary Performance in the Orbit (Weiqun Gan, Китай)		
		Памяти Б.В. Сомова (С.А. Богачев, Л.С. Леденцов)		
	13:30-14:30	<i>обед</i>		
	<i>День</i>	Теория и наблюдения Солнца 14:30-16:00	Магнитосфера 14:30-16:00	Атмосфера и климат Земли 14:30-16:00
	16:00-16:30	<i>кофе</i>		
	<i>Вечер</i>	Теория и наблюдения Солнца 16:30-18:00	Магнитосфера 16:30-18:00	Атмосфера и климат Земли 16:30-18:00
Постерная сессия до 18:30		Постерная сессия до 18:30	Постерная сессия до 18:30	

Среда 08.02.2023	Утро	Солнечный ветер и гелиосфера 09:00-10:30	Ионосфера 09:00-10:30	Теория и наблюдения Солнца 09:00-10:30	
	10:30-11:00	<i>кофе</i>			
		Солнечный ветер и гелиосфера 11:00-12:30	Ионосфера 11:00-12:30	Теория и наблюдения Солнца 11:00-12:30	
	Пленарный час 12:30-13:30	О механизме нагрева солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях: новое объяснение старым данным Вояджера-2 (С.Д. Корольков, В.В. Измоденов)			
		Диагностика свойств ионосферы с помощью оптических измерений в арктическом регионе (Б.В. Козелов)			
	13:30-14:30	<i>обед</i>			
	День	Солнечный ветер и гелиосфера 14:30-16:00	Волновые явления 14:30-16:10	Теория и наблюдения Солнца 14:30-16:00	
		16:00-16:30 кофе		16:10-16:30 кофе	
Вечер	Солнечный ветер и гелиосфера 16:30-17:30	Волновые явления 16:30-18:10	Теория и наблюдения Солнца 16:30-18:00		
	Постерная сессия до 18:30	Постерная сессия до 19:00	Постерная сессия до 18:30		
Четверг 09.02.2023	Утро	Волновые явления 10:00-12:20	Космическая погода 09:00-10:30	(свободно)	
			10:30-11:00 кофе		
			Космическая погода 11:00-12:30		
	Пленарный час 12:30-13:30	Волны (С.А. Пулинец)			
		Чижевский и Королев (..... Морозова, Калуга)			
	13:30-14:30	<i>обед</i>			
	День	Волновые явления 14:30-16:10	Космическая погода 14:30-16:00	(свободно)	
		16:10-16:30 кофе			
Вечер	Волновые явления 16:30-17:30	Постерная сессия до 18:30			
	Постерная сессия до 19:00				
19:00-21:00	банкет				
Пятница 10.02.2023	Утро	Космическая погода 09:00-12:00	Волновые явления 10:00-12:00	(свободно)	
	12:15	заккрытие конференции			

ТОКОВЫЕ СТРУКТУРЫ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ. ПУТЕШЕСТВИЕ ВНУТРЬ «СИНГУЛЯРНОСТИ»

Зеленый Л.М.

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

Среди трех основных проблем, ключевое значение которых стало ясно после начала космической эры, Чарльз Ф. Кеннел выделил пересоединение магнитных полей (остальные два – бесстолкновительные ударные волны и коллективное взаимодействие волн и частиц – требуют отдельного подробного и не менее интересного разговора),

В 1960-ые годы большое внимание привлекла ожесточенная дискуссия между сторонниками моделей стационарного пересоединения (Н.Е. Petscek) и динамических токовых слоев (С.И. Сыроватский). Дискуссия, на мой взгляд, надуманная – в природе ничего стационарного не бывает и вслед за формированием и эволюцией токового слоя (ТС) наступает фаза его разрыва, которая и приводит к магнитному пересоединению, которое в некоторых сверхидеализированных случаях иногда может реализовываться достаточно близко к описанию Петчека.

«Восточноевропейская школа Сыроватского» (так ее называли на западе) сделала очень много, введя в научный обиход представление, что эволюция плазменных течений в высокопроводящей плазме в магнитной гидродинамике обязательно приводит к формированию сингулярных токовых структур. В трехмерной геометрии эти структуры могут иметь сложную магнитную конфигурацию, но для простоты ниже мы будем называть их токовыми слоями (ТС).

Даже самая изощренная МГД модель, не может дать больше чем она может – то есть если токовый слой возникает, то он возникает как токовая сингулярность. Уже давно, во времена замечательных КА «Geotail» и «ИНТЕРБОЛ» стало ясно, что подобные токовые слои в хвосте магнитосферы Земли являются тонкими, то есть их толщина не может превышать сотен и первых тысяч километров. Ограниченное временное и пространственное разрешение плазменных измерений тех лет позволяло получать только верхние оценки толщины слоя.

Параллельно с улучшением качества измерений развивалась и теория. Ясно, что динамика плазмы даже не в очень тонком слое, уже не может описываться в МГД приближении и, как минимум, требует отдельного описания движения электронов и ионов. Особую сложность, в силу их большого Ларморовского радиуса (который может превышать толщину слоя) представляет описание ионов. Здесь большую роль сыграла так называемая квазиадиабатическая теория описания движения заряженных частиц при наличии резких магнитных градиентов, развитая автором и Й. Бюхнером, и примененная для моделирования ионной динамики. В течение многих лет считалось, что электроны при этом могут считаться замагнитченными очень слабым, но конечным магнитным полем внутри слоя – и для описания их движения можно пользоваться классическим приближением ведущего центра. Совместно с Х. Маловой, М. Ситновым и В. Поповым была построена серия полуаналитических самосогласованных моделей ТС, предсказывающая, что его толщина может достигать первых сотен километров, то есть быть соизмерима с Ларморовским радиусом ионов. Эти теоретические результаты подробно обсуждались в связи с измерениями европейской 4-х спутниковой системы «CLUSTER» и согласие эксперимента с теорией часто оказывалось «неприлично хорошим».

Но время шло и детальная физика внутреннего (вложенного) электронного слоя привлекала все большее внимание исследователей. Это, в первую очередь, было связано с запуском в США в 2015 году тоже четырехспутниковой, но «тесно упакованной» системы MMS (magnetospheric multiscale). Система MMS была способна разрешить (и разрешила) структуры с масштабами уже достигающими первых десятков километров. Это фактически величины соизмеримые с электронным гирорадиусом - когда и для электронов становится неприменимо приближение ведущего центра. В недавних экспериментальных работах Е.Е. Григоренко и М. Леоненко подобные «сверхтонкие» слои были детально исследованы в хвостах магнитосфер Земли и Марса. Со сверхтонкими слоями обычно связано протекание локализованных, но очень сильных электронных токов.

Хотя спутники MMS и не могут видеть полную картину возникающей многослойной геометрии, их сопоставление с предыдущими более глобальными измерениями (CLUSTER, Интербол) позволяет восстановить «матрешечную» структуру «сингулярности» разглядываемой со все большим пространственным разрешением – внутрь тонкого ионного слоя очень часто оказывается вложен сверхтонкий электронный слой. Существование внутреннего сверхтонкого слоя существенно увеличивает запас магнитной энергии, который запасается в плазменной конфигурации и очень важно для понимания самого главного свойства токовых слоев - их метастабильности.

Недавно развитая теория (О.Царева), в которой уже не только ионы, но и электроны, описываются в квазиадиабатическом приближении, позволяет разработать новые модели, пригодные для описания, как толстых, так и тонких и даже сверхтонких токовых слоев, неплохо согласующиеся с современными спутниковыми наблюдениями.

Несколько десятилетий прошло уже со времени создания С.И. Сыроватским его замечательной модели динамического токового слоя. Поучителен опыт совершенствования как экспериментальной техники, так и теоретического аппарата, позволивший заглянуть внутрь этих удивительных структур, и понять их сложную природу. Надеемся, что рано или поздно человечество найдет способы использовать магнитные токовые аккумуляторы, основанные на способности метастабильных ТС запасать большие количества энергии и в повседневной жизни.

ASO-S: THE PRELIMINARY PERFORMANCE IN THE ORBIT

Gan Weiqun

Purple Mountain Observatory, Nanjing, China wqgan@pmo.ac.cn

Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S), being the first comprehensive solar mission in China, was launched on October 9, 2022. In the talk I will present the whole mission briefly, and then in particular the performance during the commissioning phase, including both the technical issues and the scientific results.

ПАМЯТИ БОРИСА ВСЕВОЛОДОВИЧА СОМОВА

Богачёв С.А., Леденцов Л.С.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com

2 декабря 2022 года ушел из жизни выдающийся ученый, специалист в области физики Солнца и космической электродинамики, доктор физико-математических наук, профессор Борис Всеволодович Сомов.

Борис Всеволодович Сомов родился 7 января 1945 года в г. Краснодар. В 1969 году окончил Московский физико-технический институт, после чего начал работу в Теоретическом отделе Физического института им. П.Н. Лебедева под руководством Сергея Ивановича Сыроватского. Б.В. Сомов стал одним из основоположников теории пересоединения магнитных полей в солнечных вспышках, внёс значительный вклад в теорию движения плазмы в сильных магнитных полях, а также в понимание механизмов высвобождения энергии в солнечных вспышках. В 1982 году в составе коллектива ФИАН Б.В. Сомов был удостоен Государственной премии СССР за цикл работ «Динамика токовых слоев и солнечная активность». С начала 1990-х годов перешел в Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, где занял пост заведующего отделом физики Солнца Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга. На протяжении всей жизни Борис Всеволодович настойчиво и терпеливо передавал знания своим ученикам, воспитал более десяти кандидатов и докторов наук, много лет вёл научный семинар «Плазменная астрофизика и физика Солнца», очередное 705 заседание которого провел всего за несколько дней до своего ухода.

Научные достижения, талант физика-теоретика, а также глубокая человеческая порядочность снискали ему известность и уважение в научном мире.

Светлая память о Б.В. Сомове, несомненно, сохранится в сердцах его учеников и коллег.

О МЕХАНИЗМЕ НАГРЕВА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА БОЛЬШИХ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ: НОВОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ СТАРЫМ ДАННЫМ ВОЯДЖЕРА-2

Корольков. С.Д., Измоленов В.В.

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

МГУ, Московский центр фундаментальной и прикладной математики

Измерения параметров плазмы на космическом аппарате Вояджер-2 показывают аномально высокие значения температуры на больших гелиоцентрических расстояниях. Вместо того, чтобы уменьшаться с увеличением гелиоцентрическим расстоянием по адиабатическому закону, температура плазмы медленно убывает до 25 а.е., затем начинает возрастать. Современные объяснения такого поведения температуры основаны на моделях с учетом диссипации турбулентной энергии. Турбулентная энергия изначально присутствует в солнечном ветре, но начальная энергия по различным оценкам быстро диссипирует, что приводит к необходимости учитывать возможные физические процессы генерации турбулентной энергии как в ближнем, так и дальнем ветре. В настоящее время полагается, что во внешней гелиосфере существенными являются три источника турбулентных флуктуаций: сдвиговые течения, течения сжатия, а также источники, связанные захваченными протонами.

Для объяснения данных Вояджера-2 мы предлагаем иной подход. В отличие от предыдущих моделей мы основываемся не на осредненных по времени уравнениях газовой динамики с источниками энергии из-за диссипации турбулентных флуктуаций, а напрямую моделируем нестационарное течение солнечного ветра с максимально возможным временным и пространственным разрешением. В работе предложена простая газодинамическая модель (на основе данных OMNI на 1 а.е.) качественно воспроизводящая температуру протонов до 80 а.е. Основной механизм нагрева солнечного ветра заключается в эффективном нагреве протонов на ударных волнах/ударных слоях (слои, ограниченные двумя ударными волнами с двух сторон), постоянно возникающих в солнечной короне или в ближнем ветре. Простая газодинамическая модель также была расширена до двух-жидкостной для учёта резонансной перезарядки (и магнитных полей), чтобы воспроизвести не только нагрев, но и торможение протонов в дальнем ветре. Показано, что нагрев ударными волнами является основным и достаточным для объяснения неадиабатического профиля температуры вплоть до 50 а.е. На больших гелиоцентрических расстояниях (более 50 а.е.) необходимо учитывать также нагрев протонов в результате резонансной перезарядки на нейтральных атомах водорода, но, в работе отмечено, что влияние этого источника в 5 раз меньше, чем предполагалось ранее.

Korolkov S.D., Izmodenov V.V., 2022, *Astronomy and Astrophysics*, 667, L5.
doi:10.1051/0004-6361/202244523

Диагностика свойств ионосферы с помощью оптических измерений в арктическом регионе

Козелов Б.В.

ПГИ, Апатиты, Мурманская область, Россия, boris.kozelov@gmail.com

Пространственно-временная структура авроральных возмущений в значительной степени отражает структуру процессов в магнитосферно-ионосферной плазме. Описание этой структуры важна как для изучения фундаментального изучения плазменных процессов, так и для многих актуальных прикладных вопросов, связанных с прохождением радиоволн в ионосфере и жизнедеятельностью в высоких широтах. Полярный геофизический институт многие годы проводит наблюдения и регистрацию ночного неба в Мурманской области и на арх.Шпицберген. Использование оптических данных для научных исследований всегда осложняется необходимостью обработки, которая требует значительных затрат времени и квалификации. Многие годы институт выпускает квартальные сборники с каталогами таких наблюдений. В докладе делается обзор по имеющимся в институте данным и оптическим приборам. Приведены примеры, какую информацию такие могут дать для исследования высокоширотной ионосферы. Обсуждаются вопросы автоматической обработки данных последних лет, имеющихся в цифровом формате, с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Работа поддержана грантом РНФ и Министерства образования и науки Мурманской области №22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ РАДИОСПЕКТРОМЕТРИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ. ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ

Пулинец С.А.¹, Ижовкина Н.И.², Клос З.³, Кирага А.³, Роткель Х.³

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pulse@rssi.ru

²ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия

³ЦКИ ПАН, г. Варшава, Польша, hrot@cbk.waw.pl

Высокочастотными в физике плазмы считаются волны, распространяющиеся в диапазоне собственных колебаний электронов (f_{He}, f_p, f_{uh}). Для высот ионосферы это диапазон 0.1 – 20 МГц. Несмотря на важность информации об этих излучениях для понимания плазменно-волновых взаимодействий в космической плазме, основной поток информации, публикаций и обсуждений концентрируется на низкочастотном диапазоне, характерном для ионных частот. В настоящей работе предлагается обзор исследований, проводившихся на советских и российских спутниках в течение нескольких десятилетий, а также рассматриваются новые возможности ВЧ радиоспектрометрии в спутниковом проекте ИОНОЗОНД-2025.

Основной объем данных был получен в рамках советско-польской кооперации [1] на спутниках Интеркосмос-19, Интеркосмос-24 (Активный), Космос 1809, Интеркосмос-25 (АПЭКС), КОРОНАС-И и РЭЛЕК. В рамках этих экспериментов был разработан ряд совместных инструментов (АВЧ-2, ИРС-1, ПРС-2, ВЧВ-ВК, СОРС, РЧА), которые впервые позволили получить глобальные распределения ВЧ излучений естественного и антропогенного характера. Полученные данные позволяли определить положения и конфигурацию основных структур ионосферы и магнитосферы: главного ионосферного провала, аврорального овала, каспа, экваториальной аномалии [2]. К наиболее интересным можно отнести результаты о взаимодействии корпуса спутника с космической плазмой: формирование спутникового следа, генерацию широкополосного ВЧ излучения в спутниковом следе, которое в зарубежных публикациях ошибочно идентифицировалось как гектаметровое излучение Земли [3], фотоэмиссии электронов от солнечных батарей.

В докладе будут представлены результаты активных экспериментов, полученные в рамках проектов АРАКС и АПЭКС при инжекции пучков электронов и плазмы с борта космического аппарата, надбарьерное проникновение ВЧ излучений от нагревного стенда СУРА в экспериментах АПЭКС и КОРОНАС-И, открытие ускорения частиц импульсным излучением спутникового ионозонда в проектах Интеркосмос-19 и Космос 1809 [4].

Отдельное место занимают исследования импеданса дипольной антенны в плазме. Они приобретают особое значения при интерпретации данных измерений, когда необходимо определить, что является резонансом плазменных волн, а что – результат резонансных свойств антенны в плазме [5].

В связи с приближающимся запуском первых двух спутников «Ионосфера-М» в рамках проекта ИОНОЗОНД-2025 появляется возможность использовать опыт многолетних волновых ВЧ измерений при планировании экспериментов со спутниковым ионозондом ЛАЭРТ, в котором заложены возможности проведения ВЧ радиоспектрометрических измерений.

А.Л. ЧИЖЕВСКИЙ И С.П. КОРОЛЁВ

Морозова Л.Н.

ГМИК им. К.Э. Циолковского (отдел «Дом-музей А.Л. Чижевского»), г. Калуга, Россия, morozova@gmik.ru

Труды учёного-биофизика А.Л. Чижевский имеют принципиальное значение для космонавтики. В 1918 г. он защитил докторскую диссертацию «О периодичности всемирно-исторического процесса», которая заложила основы гелиобиологии – науки о солнечно-земных связях. В 1926 г. Чижевский провёл первые в мире исследования по изучению влияния космической радиации на живую клетку.

В 1942 г. по ложным доносам учёный был обвинён в антисоветской агитации и приговорён к 8 годам заключения в ИТЛ, а затем ещё на 8 лет оставлен на поселение в Караганде.

В 1958 году Чижевский вместе со своей второй женой Ниной Вадимовной переехал в Москву и стал искать возможность практического применения своих научных трудов, в том числе и в космонавтике.

Обсудить возможность аэроионизации космических кораблей с С.П. Королёвым Чижевскому посоветовал О.К. Антонов. Связаться с Королёвым было очень сложно, попытка найти контакт через Академию наук не увенчалась успехом. Помощь пришла от знакомого Чижевских К. К. Кобызева, у которого близкий друг работал одним из ближайших помощников Королёва. Он передал Королёву письмо, написанное Чижевским.

Королёва заинтересовало предложение Чижевского, по его поручению к Чижевским приехали Д. И. Григоров и В. Н. Серебряков. На протяжении 1961 г. сотрудники Королёва часто бывали у Чижевского на консультациях по вопросам состава воздуха кабины космического корабля.

Встреча Чижевского и Королёва состоялась в 1962 г. Сергей Павлович предложил Александру Леонидовичу взять на себя консультацию, помочь в разработке и составить штатное расписание лаборатории и тематический план работ. Чижевский написал Королёву Памятную записку, где подробно изложил возможность использования аэроионизации в космонавтике, и составил план работы Лаборатории аэроионификации.

В письме Королёву от 31 марта 1962 г. Чижевский подробно пишет о том, что при изучении траектории полёта космического корабля необходимо принимать во внимание солнечные выбросы, время их появления и затухания, их расположение и движение в окосолнечном пространстве, и другие параметры.

Вскоре Королёв предложил официально оформить Чижевского. Александр Леонидович заполнил предоставленную анкету, приложил соответствующие документы, но вскоре анкета была возвращена с объяснением о том, что необходимость отпала.

Скорее всего так случилось в связи с особой секретностью космонавтики. Получить только что реабилитированному Чижевскому возможность работать в особо секретной отрасли не представлялось возможным.

В своих дневниках Нина Вадимовна пишет о контактах с Королёвым и в связи с рукописью воспоминаний Чижевского о встречах с Циолковским.

1. Pulinets S.A., Kiraga A., Klos Z. // Adv. Space Res. 1990. V. **10**, P. (8)71- (8)74.
2. Rothkaehl H., Klos Z., Kiraga A., Pulinets S.A. // Adv. Space Res. 1993. V. **13**, P. 127- 130.
3. Kiraga A., Klos Z., Rothkaehl H., Pulinets S.A. // Physica Scripta. 1987. V. **35**, P. 895-898.
4. Shuiskaya F.K., Galperin Yu.I., Serov A.A., Baranets N.V., Kushnerevsky Yu.V., Pulinets S.A., Vasiliev G.V., Fligel M.D., Selegey V.V. // Planet. Space Sci, 1990. V. **38**, P. 173-180.
5. Kiraga A., Klos Z., Rothkaehl H., Zbyszynski Z., Oraevsky V.N., Pulinets S.A., Prutensky I.S. // Adv. Space Res. 1997. V **20**, P. 1083-1095.

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца»

Понедельник, 06.02. 2023 г., Конференц-Зал (Line 1)_____

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			Председатель: <u>Наговицын Ю.А.</u>
1	09.00 - 09.15	Соколов Д.Д., Юшков Е.В., Серенкова А.Ю.	Параметрический резонанс в задаче динамо
2	09.15 - 09.30	Серенкова А.Ю., Соколов Д.Д., Юшков Е.В.	Влияние магнитной диффузии на параметрический резонанс в паркеровской модели солнечного динамо
3	09.30 - 09.45	Юшков Е.В., Абушзаде И.З., Соколов Д.Д.	Мелкомасштабная генерация в каскадной модели мГД-турбулентности
4	09.45 – 10.00	Пипин В.В.	Нелокальные эффекты в динамо солнечного типа
5	10.00 – 10.15	Kuzanyan K.M., Kleeorin N.I., Rogachevskii I.V., Safiullin N.T.	Observational proxies of magnetic helicity in the Sun, its origin, transport, and role in the solar dynamo models
6	10.15 -10.30	Гетлинг А.В., Косовичев А.Г.	Вращение конвективных структур в подфотосферной зоне Солнца
	10.30 – 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
			Председатель: <u>Соколов Д.Д.</u>
7	11.00 – 11.15	Ишков В.Н.	Развитие текущего 25 цикла солнечной активности в первые три года
8	11.15 -11.30	Биленко И.А.	Динамика глобального магнитного поля солнца в 21–24 циклах

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

9	11.30 -11.45	Илларионов Е.А., Тлатов А.Г.	Новый формат данных Кисловодской горной астрономической станции – новые возможности для исследователей
10	11.45 – 12.00	Наговицын Ю.А., Иванов В.Г., Осипова А.А.	Правило Гневьшева-Оля и предсказуемость солнечной активности
11	12.00 - 12.15	Козлов В.И.	О достоверности прогноза фазы максимума спорадической активности солнца по данным мониторинга космических лучей
12	12.15 -12.30	Шибяев И.Г.	Преобразование Гильберта и свойства солнечных циклов в переменных «огибающая--мгновенная частота»
	12.30 - 13.30	<i>Пленарный час</i>	
	12:30-12:45	<i>Открытие конференции</i>	
	13:45-13:30	Зеленый Л.М.	Токовые структуры в космической плазме. Путешествие внутрь «сингулярности»
	13.30 – 14.30	<i>Обед</i>	
Председатель: <u>Абраменко В.И./Цап Ю.Т.</u>			
12	14. 30 - 14.45	Кацова М.М., Обридко В.Н., Соколов Д.Д.	Циклы активности солнца и звезд – отсутствие синхронизации с вращением экзопланет
13	14.45 -15.00	Обридко В.Н., Соколов Д.Д., Кацова М. М., Лившиц И.М.	Солнечные и звездные вспышки - единая зависимость от запятненности
14	15.00 – 15.15	Ахтемов З.С., Цап Ю.Т., Малащук В.М.	Динамика магнитных полей пятен в 24 цикле солнечной активности по данным КрАО и MWO
15	15.15 – 15.30	Жукова А.В., Абраменко В.И., Сулейманова Р.А.	Циклические вариации удельных магнитных потоков активных областей разных магнито-морфологических классов в 23-м и 24-м циклах
16	15.30 – 15.45	Абраменко В.И., Сулейманова Р.А.	Генерация активных областей в периоды глубоких минимумов солнечной активности

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

17	15.45 – 16.00	Романов К.В., Романов Д.В., Романов В.А., Степанов Е.А., Лебедев А.А.	Конвективный вынос магнитных полей на фотосферный уровень при зарождении солнечных пятен
	16-00 – 16-30	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Обридко В.Н.</u>			
18	16.30 -16.45	Садыков А.М., Красоткин С.А.	Потоки магнитного поля и радиальной скорости на начальных стадиях развития активных областей по наблюдениям на уровне фотосферы Солнца
19	16.45 -17.00	Куценко А.С., Абраменко В.И., Литвишко Д.В	Вариации скорости вращения по диску Солнца всплывающих активных областей
20	17.00 – 17.15	Вернова Е.С., Тясто М.И., Баранов Д.Г.	Чередование положительных и отрицательных магнитных полей в фотосфере Солнца
21	17.15 -17.30	Плотников А.А., Куценко А.С., Абраменко В.И.	Связь геометрических характеристик с потерей магнитного потока в униполярных солнечных пятнах
21	17.30 – 17.45	Старченко С.В.	Суммарный тепломассоперенос, магнитная энергия и стабилизация пятен
22	17.45 – 18.00	Тлатова К.А., Тлатов А.Г.	Время жизни солнечных пор и пятен
	18.00 -18.30	Постерная сессия	

Постеры

1. Абушзаде И.З., Юшков Е.В., Соколов Д.Д.
Пороговый режим мелкомасштабного динамо в рамках каскадного подхода
2. Гетлинг А.В., Косовичев А.Г.
Масштабы и временные вариации мощности течений в конвективной зоне Солнца
3. Илларионов Е.А., Арльт Р.
Солнечная активность в период минимума Дальтона по наблюдениям О. Флержера

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

4. Костюченко И.Г., Вернова Е.С.
Вращение групп пятен, формирующих активную долготу в минимуме солнечной активности между циклами 24/25
5. Морозова Е.И., Безродных И.П., Петрукович А.А.
Связь структуры вариаций солнечных пятен (11-летние и QBO-вариации) с временной динамикой параметров динамического магнитного поля Солнца
6. Пипин В.В., Косовичев А.Г.
Бюджет магнитного цикла в моделях солнечного динамо
7. Плеханов П.Г., Михайлова Л.Н.
Модель строения конвективной зоны раздельной конвекции плазмы в полушариях солнца.
8. Старченко С.В., Яковлева С.В.
Корреляция временных рядов чисел Вольфа с их производными и возможности ее применения для прогноза XXV солнечного цикла
9. Шibaев А.И. Аппроксимация длиннопериодной компоненты ряда чисел Вольфа с учетом взаимосвязи длительности циклов с их амплитудой

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ЗАДАЧЕ ДИНАМО

Соколов Д.Д., Юшков Е.В., Серенкова А.Ю.

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

Гравитационное воздействие планеты, обращающейся вокруг центральной звезды, приводит к небольшим периодическим изменениям течений в конвективной зоне звезды. В литературе многократно высказывалась гипотеза о том, что возмущения, вызываемые влиянием Юпитера на Солнце, период которых составляет 11 лет, могут быть причиной 11-летнего цикла солнечной активности. Однако эта гипотеза не находит подтверждений в современных исследованиях, что, однако, не означает, что планетарные эффекты в силу своей малости вообще не могут играть никакой роли в работе солнечного и звездного динамо. Мы показываем, что небольшое периодическое возмущения источников динамо может приводить к резонансу, в результате которого динамо, являвшееся в невозмущенной звезде слегка подкритическим, становится слегка надкритическим и приводит к образованию цикла звездной активности. Этот эффект вряд ли существенен для солнечного динамо, однако вполне может оказаться важным для центральных звезд некоторых экзопланетных систем, в которых массивные экзопланеты находятся недалеко от центральной звезды.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ДИФФУЗИИ НА ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ПАРКЕРОВСКОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

Серенкова А.Ю.^{1*}, Соколов Д.Д.^{1,2}, Юшков Е.В.^{1,2,3}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, Москва, Россия, serenkova.ai19@physics.msu.ru

² Московский центр фундаментальной и прикладной математики, 119991, Москва, Россия

³ Институт космических исследований Российской академии наук, 117997, Москва, Россия

Одной из первых моделей, предложенных для описания 11-летнего солнечного цикла, была динамо-модель Юджина Паркера 1955 года [2], и, несмотря на кажущуюся для настоящего времени простоту, она смогла дать ответы на два основных вопроса — почему происходит генерация среднего магнитного поля и почему среднее поле осциллирует со временем. Именно поэтому данная модель активно используется и в современных работах, особенно когда идет речь о явлениях, связанных не конкретно с Солнцем, а с магнитными полями звезд и планет вообще. В нашем докладе мы как раз и исследуем такой общий вопрос: если модель Паркера описывает процессы генерации одновременно с осцилляциями, то возможно ли при периодическом изменении параметров системы появление параметрического резонанса [1]. При этом мы не пытаемся ответить на другие важные вопросы, например, что могло послужить причиной такого параметрического влияния — внутренние процессы в звезде или влияние других астрофизических тел, а сосредотачиваемся на исследовании возможности резонанса.

Следует заметить, что данный вопрос поднимался в теории динамо неоднократно [3, 4], однако попытка конкретизировать динамо-систему, приводила к тому, что в разных работах даются разные ответы. В одних параметрический резонанс имеет классический вид, то есть происходит на удвоенной частоте и кратных частотах, в других работах — классического резонанса в динамо-системах нет вообще. Мы наоборот идем путем упрощения, в частности, нами была рассмотрена даже не модель Паркера, которая получается из усреднённого по турбулентному зеркально-несимметричному потоку плазмы уравнения магнитной индукции, соответствующему конвективной оболочке Солнца, при котором к тому же происходит разделение магнитного поля на полоидальную и тороидальную компоненты — а было рассмотрено одно из наиболее известных упрощений данной системы, известное как маломодовая модель, в которой обе компоненты поля раскладываются по первым двум членам ряда Фурье по углу с учетом их симметрии относительно экватора, остальные же гармоники отбрасываются. Такой подход сводит задачу к системе из четырех обыкновенных дифференциальных уравнений, которую можно рассмотреть с точки зрения выделения резонансных эффектов. Нами было показано, что при симметричных диссипативных слагаемых в такой системе наблюдается так называемый неизбирательный резонанс, отличительной чертой которого является отсутствие четко выделенного узкого максимума резонанса на кратных частотах. В то же время, в общем случае видна суперпозиция избирательного и неизбирательного резонанса. Другими словами, именно диссипативные слагаемые отвечают за вид параметрического резонанса.

В рамках доклада мы ответим на следующий вопрос: как именно наличие и вид диссипативных слагаемых влияет на параметрический резонанс в системе Паркера, а также обсудим возможную применимость полученных результатов к экзопланетным системам, для которых планеты находятся близко к соответствующим звездам, и к системам двойных звезд.

Численный анализ параметрического резонанса в динамо-системах выполнен при поддержке Минобрнауки РФ в рамках программы Московского центра фундаментальной и прикладной математики (проект № 075-15-2019-1621). Асимптотический анализ периодического воздействия на генерацию крупномасштабных структур проводился при поддержке фонда БАЗИС (грант № 21-1-3-63-1).

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики I. Механика. // Москва. Наука. С. 103—109. 1973.
2. Parker, E. N. Hydromagnetic Dynamo Models // *Astrophys. J.* V. 122. P. 293. 1955.
3. D. Moss and D. Sokoloff, *Astr. and Astrophys.* 553, A37. 2013.
4. Л.Л. Кичатинов, А.А. Непомнящих, *Письма в Астрон. Ж.* 41(7), 409. 2015.

МЕЛКОМАСШТАБНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В КАСКАДНОЙ МОДЕЛИ МГД-ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Юшков Е.В.¹, Абушзаде И.З.², Соколов Д.Д.³

1) *Институт космических исследований Российской академии наук, 117997, Москва, Россия*

2) *Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан*

3) *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, 119991, Москва, Россия*

yushkov.msu@mail.ru

Вмороженность магнитного поля в проводящую среду обуславливает возможность эффективной перекачки энергии турбулентного движения в энергию магнитного поля. Такая перекачка может происходить, как при наличии роста среднего поля – такой процесс обычно называют крупномасштабным динамо, так и без растущего среднего поля – такой процесс, в свою очередь, принято называть мелкомасштабным динамо. Основная модель мелкомасштабной генерации была предложена А.П.Казанцевым, который показал, что при достаточно больших магнитных числах Рейнольдса будет наблюдаться рост магнитной энергии на малых масштабах [1]. Одновременно с ростом магнитной энергии может наблюдаться рост магнитной спиральности, при этом скорость экспоненциального роста будет много больше скорости роста крупномасштабного поля [2]. В связи с чем возникает вопрос, может ли генерируемая мелкомасштабная энергия и спиральность влиять на крупномасштабные мгд-процессы? Другими словами, интересно, успеет ли сгенерированная мелкомасштабная магнитная спиральность переместиться на большие масштабы, до того, как нелинейные эффекты насыщения остановят мелкомасштабный процесс.

Однако модель Казанцева плохо подходит для ответа на этот вопрос, так как в этой модели случайные характеристики поля скорости считаются зафиксированными, то есть предполагается, что магнитное поле не влияет на поле скорости и каскадный транспорт как таковой не работает. Кроме того, в модели Казанцева предполагается поле скорости с одинаковыми временными корреляциями на разных масштабах, то есть неколомгоровская турбулентность, что также является проблемой при сравнении с реальными процессами. Поэтому нами был использован другой – каскадный подход. Каскадные модели, для гидродинамических систем обуховского типа, рассматривают не мгд-систему, а ее Фурье-образ, при этом не на непрерывной спектральной шкале, а на конечном числе спектральных оболочек. Нелинейное взаимодействие магнитного поля и поля скорости описывается через взаимодействие соседних спектральных оболочек, то есть учитывается обмен энергией и спиральностью между вихрями близкого размера. Если при этом предположить выполнение законов сохранения идеальной магнитогидродинамики, то можно описать как реалистичный прямой каскад энергии, так и обратный каскад спиральности. Используя каскадную модель, предложенную П.Г. Фриком [3], мы моделируем экспоненциальный рост мелкомасштабной магнитной энергии и спиральности, при разных параметрах системы. Полученные результаты сравниваются с генерацией в классическом подходе Казанцева, для спирального потока описываемой системой Вайнштейна-Кичатинова. На основании сравнения скорости транспорта спиральности и скорости стабилизации генерации, делается вывод о возможности влияния мелкомасштабной генерации на крупномасштабные процессы.

Численный анализ каскадной модели и ее сравнение, проводилось при поддержке фонда БАЗИС, грант № 21-1-3-63-1. Особую благодарность, хотелось бы выразить Бакинскому государственному университету, за помощь в организации совместной работы.

1. Kazantsev A.P. // Soviet Physics JETP 1967. V. **26(5)**. P. 1031.

2. Yushkov E.V., Lukin A.S. // GAFD 2017. V. **111**. P.128-148.

3. Frick P., Sokoloff D. // Phys. Rev. E 1998. V. **57**. P. 4155-4164.

НЕЛОКАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ДИНАМО СОЛНЕЧНОГО ТИПА

В.В. Пипин

ИСЗФ, Иркутск, pip@iszf.irk.ru

Магнитная гидродинамика средних полей, [1], является одним из основных инструментов для построения теоретических и численных моделей солнечного динамо. Основное допущение теории опирается на предположение о разделении масштабов вариаций средних и турбулентных магнитных полей и течений. В данном случае, турбулентная ЭДС, которая описывает эффекты турбулентности на генерацию, диффузию и перенос среднего магнитного поля, может быть выписана в виде ряда Тэйлора по производным среднего поля. В тоже время, наблюдения солнечной и звездной активности показывают отсутствие разделения масштабов как пространственных, так и временных вариаций магнитной активности на Солнце и звездах солнечного типа. Таким образом, необходим выход за рамки двухмасштабного приближения. В общем случае выражение для турбулентной ЭДС является интегральной сверткой эффектов турбулентности и среднего магнитного поля. Ранее, в численных экспериментах было замечено, что ядро интегральной свертки, описывающей турбулентные эффекты, имеет Лоренцевский тип, [2]. Это позволяет аппроксимировать интегро-дифференциальное уравнение для средней электродвижущей силы параболическим уравнением. Интересно, что в такой постановке задачи, аналитические (или численные) оценки ЭДС полученные в двухмасштабном приближении, можно принять в качестве нулевого приближения, [3]. Решение задачи на собственные значения обнаруживает несколько любопытных свойств модели динамо с нелокальными эффектами средней электродвижущей силы. Помимо снижения порога критической динамо неустойчивости, отмеченного в более ранних исследованиях, наблюдается увеличение динамо периодов неустойчивых мод. В то же время нелокальная модель показывает существенно меньшую скорость роста неустойчивых мод динамо вблизи критического порога первой неустойчивой моды, чем модель, использующая приближение масштабного разделения. Кроме того, мы находим, что для нелокальной модели ряд различных колебательных и стационарных мод динамо может возбуждаться в непосредственной близости от порога первой неустойчивой моды динамо. Мы проверили эти результаты, используя нелинейную модель динамо. Модель показывает эволюцию крупномасштабного осесимметричного магнитного поля солнечного типа. Нелокальные эффекты средней электродвижущей силы наиболее сильны вблизи дна конвекционной зоны. Решение нелинейного динамо показывает увеличение концентрации крупномасштабного тороидального магнитного поля по направлению к дну конвекционной зоны из-за гашения магнитной плавучести среднего поля.

[1] Krause F., Rädler K.-H., 1980, Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory. Berlin: Akademie-Verlag

[2] Rheinhardt M., Brandenburg A., 2012, Astronomische Nachrichten, 333, 71

[3] Brandenburg A., Chatterjee P., 2018, Astronomische Nachrichten, 339, 118

OBSERVATIONAL PROXIES OF MAGNETIC HELICITY IN THE SUN, ITS ORIGIN, TRANSPORT, AND ROLE IN THE SOLAR DYNAMO MODELS

K. M. Kuzanyan^{1,2}, N. I. Kleorin^{1,3}, I. V. Rogachevskii³, N. T. Safiullin^{1,4}

¹*Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, kuzanyan@gmail.com ;*

²*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк, Москва, Россия; IZMIRAN, Moscow, Russia*

³*Dept. of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel;*

⁴*Институт радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета, г. Екатеринбург, Россия; UrFU, Yekaterinburg, Russia*

Magnetic helicity plays an important role in magnetohydrodynamics as an inviscid invariant. In the context of solar physics, it is extremely important in several aspects. Firstly, its relaxation time is much longer than the turnover time of solar turbulence, and therefore observations of magnetic structures such as active regions may bring essential information for knowledge of its global distribution. Secondly, the local distribution and dynamics of its observational proxies is linked with the potential for solar flaring activity. And more, the transport of magnetic helicity which is generated by the solar dynamo mechanism and released to the heliosphere (where it is taken out by the solar wind) provides an important constraint to the dynamo models. The balance of helicity plays a role of a nonlinear feedback which determines complexity of dynamics of the solar activity. We show that important observable properties of solar cyclic activity can be obtained even with simple self-consistent models of solar dynamo with helicity.

The work is supported by Russian Science Foundation grant 21-72-20067.

ВРАЩЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ СТРУКТУР В ПОДФОТОСФЕРНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА

Гетлинг А.В., Косовичев А.Г.

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

Допплеровские измерения скорости вращения Солнца обнаруживают явление суперротации супергранул: супергрануляционная картина вращается с большей угловой скоростью, чем солнечное вещество [1, 2]. Такого рода эффект был также выявлен теоретически ([3] и др.). Его зависимость от глубины, требующая информации о подповерхностных скоростях, до сих пор не исследовалась.

В докладе представлены результаты анализа полей скорости на разных глубинах в конвективной зоне, измеренных методами пространственно-временной гелиосейсмологии по данным инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту орбитальной Обсерватории солнечной динамики (SDO). Это данные относятся к глубинам до 19 Мм и охватывают период с мая 2010 по сентябрь 2020 г. Скорость движения супергранул как структур поля дивергенции горизонтальных скоростей определяется методом локального корреляционного трассирования в его одномерном варианте. Для подавления шумовой составляющей измеряемого поля применяется спектральная фильтрация: поле разлагается по сферическим гармоникам, из спектра удаляется его коротковолновая часть и затем делается обратный переход из спектрального в физическое пространство. Для оценки ошибок определения скоростей процедура трассирования применяется к модельному полю, получаемому наложением заданного дифференциального вращения на реальные поля. Выявленные систематические ошибки используются для внесения поправок в результаты. Полученные широтные профили угловой скорости усредняются по годичным интервалам.

Найдено, что скорость вращения поля структур растет с глубиной, причем на глубинах порядка 6 Мм дифференциальность вращения этого поля быстро уменьшается и вращение становится близким к твердотельному. Таким образом, можно предположить, что на больших глубинах вместо супергрануляционного поля становится заметным поле структур с другими характерными масштабами и другим законом вращения.

1. Duvall T.L., Jr. // Solar Phys. 1980. V. **66**. P. 213.
2. Snodgrass H.B., Ulrich R.K. // Astrophys. J., 1990. V. **351**. P. 309.
3. Busse F.H. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. **91**. Paper 244501.

РАЗВИТИЕ ТЕКУЩЕГО 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ПЕРВЫЕ ТРИ ГОДА

В.Н. Ишков

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

Текущий 25 цикл, второй цикл эпохи пониженной солнечной активности (СА), начался в январе 2020 г. и темп его развития на февраль 2023 г. (37 месяцев) всё более соответствует ходу развития солнечных циклов (СЦ) средней величины. Правило Вальдмайера после 24 месяцев этот вывод подтверждает. Над отметить, что на статистике достоверных (10-24) СЦ внутри эпох СА, наблюдательные правила и закономерности неуклонно выполнялись.

С началом текущего СЦ25 мы впервые получили возможность современными методами исследовать и накопить наблюдательный материал по различным проявлениям СА цикла средней величины эпохи пониженной СА, тем самым получив полный набор СЦ средней величины с разными значениями фоновых значений общего магнитного поля Солнца, что даст возможность в дальнейшем иметь добротную базу для более глубокого изучения их развития и характеристик.

За рассматриваемый период СА прошла полуфазу минимума ветви роста, длительность которой составила почти 2 года, что является рекордом для СЦ средней величины и вступила в фазу роста текущего 25 СЦ. К февралю 2023 г. на видимом диске Солнца наблюдалось не менее 110 групп пятен. Первая устойчивая (≥ 7 сут) группа пятен образовалась 24.01.2020, а следующая только 17.10.2020. С 12.04.2021 группы пятен наблюдаются постоянно. На Солнце осуществились 9 вспышек рентгеновского класса X (X2.2), 13 –больших класса $M \geq 5$ и 93 среднего класса M1–M4.9, не менее 30 выбросов солнечных волокон. За это время осуществилось не менее 18 солнечных протонных событий с потоками частиц в максимуме ≥ 1 rfu, что является рекордом по их количеству за всю историю наблюдений солнечных протонов, что позволяет сделать вывод о сохранении облегчённого выхода протонов в малых вспышечных событиях, как и наблюдалось в СЦ24, с которого началась 2-ая эпоха пониженной СА. В геомагнитном поле зарегистрированы 25 магнитных бурь: 2 большие и 2 умеренные. По всем показателям активности текущий СЦ превосходит прошедший низкий СЦ24, но значимо уступает циклам средней величины эпох повышенной СА и переходным между эпохами циклам 17 и 23.

ДИНАМИКА ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА В 21–24 ЦИКЛАХ

Биленко И.А.

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

Глобальное магнитное поле (ГМП) Солнца проявляется в циклических вариациях формы солнечной короны, крупномасштабных магнитных полей, смене знака магнитного поля на полюсах в максимумах солнечной активности, в динамике фоновых магнитных полей, в межпланетном магнитном поле. На основе данных наземных и космических обсерваторий проведено исследование топологии, асимметрии и пространственно-временных вариаций крупномасштабных магнитных полей, и их дрейфов по широте и долготе, являющихся проявлением динамики полоидальной и тороидальной компонент ГМП в 21–24 циклах солнечной активности.

Анализ структуры ГМП показал, что чем более стабильной является топология ГМП в цикле, тем выше значения напряженности ГМП, а чем более изменчива структура ГМП тем ниже максимальные значения магнитного поля. Структурные изменения ГМП выше на фазах роста и максимума каждого цикла и они наиболее значительны на фазе роста 23 цикла. Скорость изменения топологии ГМП имеет минимальные значения на фазах спада, что соответствует стабильным долгоживущим структурам ГМП формирующимся в эти периоды. В высоких 21 и 22 циклах наблюдались высокие значения напряженности магнитного поля и минимальные значения коэффициента структурных изменений. В низких 23 и 24 циклах значения напряженности магнитного поля ниже, а коэффициент структурных изменений достигает максимальных значений.

По динамике широтно-долготных распределений ГМП исследованы закономерности смены знака магнитного поля на полюсах в 21–24 циклах. Полученные результаты свидетельствуют о том, что асимметрия магнитных полей отличается в четных и нечетных циклах и зависит от широты. Дисбаланс крупномасштабных магнитных полей положительной и отрицательной полярности растёт с широтой и отражает процесс смены знака магнитного поля в северном и южном полушариях.

Полученные результаты сопоставлены с данными гелиосейсмологии и FTD (flux transport dynamo) и SFT (surface flux transport) моделями.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПЕРИОД МИНИМУМА ДАЛЬТОНА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ О.ФЛОЖЕРГА

Илларионов Е.А., Арльт Р.

МГУ, г. Москва, Россия, egor.mypost@gmail.com

Астроном-любитель О. Флोजерг проводил наблюдения солнечных пятен в 1782—1830 годы, на которые приходится минимум солнечной активности, известный как минимум Дальтона. Для наблюдений использовался телескоп, оснащенный в разные годы прямоугольной, кривой или ромбовидной сеткой, а записи наблюдений состоят из времен прохождения диска Солнца и солнечных пятен через направляющие этой сетки. Мы оцифровали эти записи и нашли способ восстановить гелиографические координаты пятен. Таким образом, мы имеем возможность взглянуть на солнечную активность в период минимума Дальтона с точки зрения положений отдельных пятен, в то время как ранее мы располагали лишь оценками индексов солнечной активности. В докладе мы обсудим методику восстановления координат и представим полученную широтно-временную диаграмму. Следует отметить, что в каталогах Флोजерга, помимо той информации, которую нам уже удалось восстановить, содержится целый ряд любопытных текстовых комментариев о наблюдаемой картине солнечного диска, которые, как нам кажется, должны вдохновить на дальнейшие исследования.

Восстановленные координаты пятен доступны в онлайн репозитории <https://github.com/observethesun/Flaugergues>.

ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА-ОЛЯ И ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Наговицын Ю.А.^{1,2}, Иванов В.Г.¹, Осипова А.А.¹

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, nag-yury@yandex.ru

²ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

В середине 19 века после изучения текущих и прошлых наблюдений солнечной активности Р.Вольф ввел нумерацию 11-летних циклов, так что номер «0» имеет цикл, максимум которого наблюдался в 1750 году. Позже Тернер [1] показал, что четные (E) и нечетные (O) циклы в этой исторической последовательности отличаются по своей форме: нечетные в среднем выше четных. Это исследование было в дальнейшем развито Людendorffом [2]. Также нужно иметь в виду, что в 1913 году Хэйл открыл 22-летний магнитный цикл, обнаружив, что соседние 11-летние циклы имеют противоположный характер полярности пятен в группах. Отсюда возникло понятие пары соседних циклов. Тернер [1] утверждал, что первым в паре является нечетный цикл.

В 1948 году Гневывшев и Оль [3] на временном интервале с 1700 по 1944 гг. рассмотрели специальную величину: сумму среднегодовых чисел Вольфа (называемых сейчас числом пятен SN) за цикл SN_{Σ} . Оказалось, что в то время как $SN_{\Sigma}(E)$ четного цикла достаточно сильно коррелирует с $SN_{\Sigma}(O)$ последующего нечетного (коэффициент корреляции $\rho = 0.9$), в противоположной паре $SN_{\Sigma}(O)$ с последующим $SN_{\Sigma}(E)$ практически не коррелирует, $\rho = 0.5$. Отсюда следует вывод о том, что именно четный цикл с последующим нечетным образует пару – единое целое, в которой 22-летний цикл Хэйла начинается четным циклом, обуславливая величину нечетного.

С другой стороны, мы знаем, что существуют длительные циклы: Гляйсберга 80-90 и Зюсса 200-210 лет, т.е. последовательные 22-летние циклы тоже должны быть связаны. Работа посвящена именно таким связям. Предлагается дополнение правила Гневывшева-Оля для связей нечетного цикла с последующим четным.

1. Turner H. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1913. V. 74. P. 82.
2. Ludendorff H. // Zs. f. Ap. 2021 V. 2. P. 370.
3. Гневывшев М.Н., Оль А.И. // Астрон. Журн. 1948. Т.25. С.18.

О ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА ФАЗЫ МАКСИМУМА СПОРАДИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Козлов В.И.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера, СО РАН,
г. Якутск, cosmoprognoz@mail.ru

Фаза смены знака общего магнитного поля Солнца (в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла), как наиболее геоэффективная, представляет наибольший интерес в плане прогноза спорадической активности Солнца. Это обусловлено тем, что в окрестности максимума и в начале ветви спада 11-летнего цикла регистрируется наибольшая вспышечная активность, сопровождаемая серией СМЕ и ударных волн. В этой связи, целью работы является определение достоверности среднесрочного прогноза активной фазы солнечного цикла с заблаговременностью $\Delta\tau=2(\pm 1)$ оборота Солнца. Способ прогноза основан на определении характеристик *переходного* режима к активной фазе солнечного цикла по изучению *групповых* особенностей флуктуаций интенсивности галактических космических лучей. Используются результаты анализа динамики флуктуаций космических лучей в течение 2-х предыдущих солнечных циклов 23-24, а также в текущем 25 цикле. Прогноз явно выраженных активных фаз текущего 25 цикла указывал бы на реализацию сценария выхода на режим восстановления 11-летней цикличности Солнца. Возможно, на уровень активности равный или выше средних значений. Ситуация с выбором сценария развития нового 25 цикла становится все более интересной, в связи с намечающейся тенденцией к *расхождению* реального, текущего профиля чисел Вольфа от *ожидаемого* профиля, т.е. их прогноза на 25 цикл.

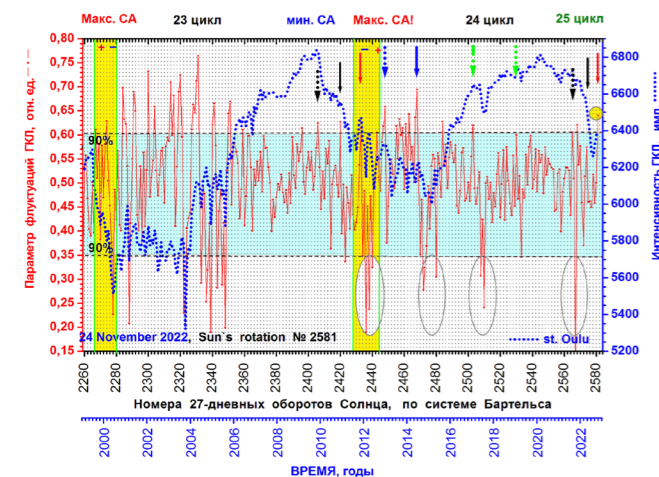


Рис. Результаты мониторинга космических лучей с 1999-2022 гг. (оборот № 2581, 24 ноября 2022). Сплошная кривая – 27-дневные значения параметра флуктуаций ГКЛ в относительных единицах, шкала слева. Показан 90% уровень значимости. Значения параметра, лежащие внутри области $0,34 < P < 0,61$, отнесены к области «Космического шума» (штриховка зеленого цвета). Значения параметра, **превышающие** верхний уровень «Космического шума» - отнесены к **предвестникам**. Пунктирная кривая - скорость счета космических лучей ст. Оулу (Финляндия) в импульсах за 5 минут, усредненная по 7776 точкам пятиминутных значений в течение каждого оборота Солнца. **Предвестники:** начало 24 цикла показано точечной стрелкой, фаза *роста* – сплошная стрелка, фаза *максимума* 24 цикла - сплошная стрелка красного цвета, завершение фазы *инверсии* поля - пунктирная стрелка синего цвета, геоэффективная фаза начала ветви *спада* – сплошная стрелка синего цвета. Низкие значения параметра флуктуаций в 2011-2012, 2014-2015, 2017 гг. и в 2021 г. (заключены в овал) - означают *диагностику* активных фаз солнечного цикла. Предвестник на **последнем** обороте **2581** (стрелка красного цвета) заключен в кружок желтого цвета.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ГИЛЬБЕРТА И СВОЙСТВА СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ «ОГИБАЮЩАЯ–МГНОВЕННАЯ ЧАСТОТА»

Шибяев И.Г.

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

Характер спектра ряда среднемесячных чисел Вольфа W позволяет уверенно выделить длиннопериодную компоненту $P1$ и несколько основных спектральных интервалов $P2 \div P4$, которые соответствуют следующим временным периодам T в годах: $P1 \Rightarrow [24 < T]$; $P2 \Rightarrow [6.8 < T < 24]$; $P3 \Rightarrow [4.26 < T < 6.8]$; $P4 \Rightarrow [1.66 < T < 4.26]$. Амплитуды циклов и их длительность фактически описываются суммой рядов $P1$ и $P2$, ряд $P3$ корректирует ветви роста и спада, а составляющая $P4$ трансформирует гладкий рельеф циклов за счет квазидвухлеток. Возможно появление локальных максимумов, влияние на положение основного максимума и нечеткая выраженность конца цикла, приобретающего более индивидуальный характер. Можно отметить хорошее совпадение ряда $P13=P1+P2+P3$ с ежемесячным рядом чисел Вольфа, усредненным по 13 месяцам W^* . Преобразование Гильберта [1] позволяет снять неопределенность при нахождении огибающей и фазы узкополосного сигнала, а по их гладкости оценивать характер процесса. Применяя преобразование к рядам $P2$ и $P3$, мы переходим к медленно меняющимся функциям: огибающим (амплитудам) и «мгновенным» частотам этих компонент. В работе рассмотрено соответствие такого описания циклов принятому представлению циклов (максимум W_m , длительность T_s , длительность ветви роста T_m).

[1] Бендат Дж., А. Пирсол. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.

ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА И ЗВЁЗД – ОТСУТСТВИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ С ВРАЩЕНИЕМ ЭКЗОПЛАНЕТ

Кацова М.М.¹, Обридко В.Н.², Соколов Д.Д.^{2,3}

¹ ГАИШ МГУ им.М.В.Ломоносова, Москва, Россия,

² ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия,

³ Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова mkatsova@mail.ru

Циклы активности Солнца и звёзд традиционно связывают с генерацией магнитного поля механизмом динамо, при котором энергия полоидального поля превращается в энергию тороидального компонента за счёт дифференциального вращения. Однако существует альтернативная точка зрения, объясняющая генерацию поля влиянием гравитации планетной системы и, прежде всего, Юпитера. Эта гипотеза может быть проверена сравнением периодов вращения экзопланет с долговременными изменениями активности связанных с ними звёзд. Мы провели такое сравнение и получили отрицательный вывод. Отсутствие связи между гравитационным влиянием экзопланет и циклом активности звезды, хозяина экзопланеты, найдено в любом из рассмотренных случаев. Более того, есть основания полагать, что сильное гравитационное влияние может полностью устранить циклические вариации звёздной активности.

СОЛНЕЧНЫЕ И ЗВЕЗДНЫЕ ВСПЫШКИ — ЕДИНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ЗАПЯТНЕННОСТИ

В.Н.Обридко, Д.Д. Соколов, М. М. Кацова, И.М.Лившиц

ИЗМИРАН (г. Москва, Троицк, Россия, obridko@izmiran.ru) МГУ, ГАИШ, ВГУ

Известно, что супервспышки на звездах солнечного типа превышают энергию самых мощных солнечных вспышек на 4-5 порядков. Этот эффект не объяснен до сих пор, возможным объяснением является сильное различие их механизмов. Прежние попытки объяснения этого эффекта с помощью зависимости от запятненности не дали определенного ответа. В нашей работе проанализированы параметры зависимости с учетом принципиальных методических различий в наблюдениях. Эти различия учтены с помощью модельных параметров. Показано, что с учетом этих различий наблюдения энергий солнечных и звездных вспышек можно описать единой моделью зависимости от запятненности. Таким образом, проблема сводится к поискам возможных отличий в механизмах генерации магнитных полей и возникновения на звездах гигантских пятен с площадями, на 2-3 порядка превышающими предельные значения площадей солнечных пятен.

M. M. Katsova, V. N. Obridko, D. D. Sokoloff, and I. M. Livshits, Solar and Stellar Flares: Frequency, Active Regions, and Stellar Dynamo; The Astrophysical Journal, 936:49 (9pp), 2022 September 1

ДИНАМИКА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЯТЕН В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ КРАО И MWO

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т., Малащук В.М.

ФГБУН «КрАО РАН» zubeir@rambler.ru

Проведен сравнительный анализ эволюции максимальных напряженностей магнитных полей солнечных пятен B , полученных в Mount Wilson Observatory (MWO) и БСТ-2 КрАО РАН за период с 2009 по 2019 гг. С учетом значительного временного сдвига (~14 часов), сравниваются одни и те же пятна с $B > 1500$ Гс. Показано, что, несмотря на подобие в поведении напряженностей, имеются и существенные различия. Данные MWO дают в среднем заниженные на несколько сот гаусс значения магнитного поля пятен. Обсуждается возможная причина полученного несоответствия. Исходя из динамики поведения напряженностей магнитного поля пятен и чисел Вольфа в 24 цикле, сделан вывод об определяющем вкладе в индекс солнечной активности $F_{10.7}$ теплового тормозного механизма радиоизлучения активных областей.

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ УДЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ РАЗНЫХ МАГНИТО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ КЛАССОВ В 23-М И 24-М ЦИКЛАХ

Жукова А.В., Абраменко В.И., Сулейманова Р.А.

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

Каталог магнито-морфологических классов активных областей (ММК АО) КрАО [1, 2] (<https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmс-ars>), содержащий магнитные потоки АО, рассчитанные на основе данных инструментов HMI/SDO и MDI/SOHO, был использован для анализа 3046 АО, появившихся на диске с мая 1996 по декабрь 2021 гг. Каждая группа солнечных пятен была классифицирована как регулярная биполярная АО (классы А1 и А2), нерегулярная биполярная АО (класс В1) или нерегулярная многополярная АО (классы В2 и В3). Одиночные пятна были выделены в самостоятельный класс U.

Исследования магнитных потоков АО разных ММК классов, начатые в работе [3], были продолжены для удельных потоков (потоков, приходящихся на одну АО) и показали следующие результаты. Удельные потоки АО сложной конфигурации выше, чем удельные потоки биполярных групп. Самые маленькие удельные потоки демонстрируют одиночные пятна. Удельные потоки биполярных АО сохраняют примерно одинаковый уровень на протяжении всего цикла, включая фазы подъема и спада и исключая лишь минимум. Удельные потоки АО сложной конфигурации демонстрируют выраженные скачки и принимают наибольшие значения в максимуме цикла. Самые высокий пик наблюдаются во втором максимуме цикла, что может быть связано с усилением турбулентной составляющей динамо. Хотя признаки многопиковой структуры цикла наиболее выражены для АО наиболее сложной магнитной конфигурации, они присутствуют в профилях АО всех ММК классов, что может быть связано с квазидвухлетней периодичностью солнечной активности и согласуется с результатами работы [4].

Работа выполнена в рамках НИР № 1021051101548-7-1.3.8.

1. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomag. Aeron. 2018. **58**. 1159.
2. Abramenko V.I. // MNRAS, 2021, **507**, 3698.
3. Abramenko V.I., Suleymanova, R.A., Zhukova A.V. // MNRAS, 2022, **518**, 4746.
4. Zhukova A.V., Sokoloff D.D., Abramenko V.I., Khlystova A.I. // Adv. Space Res., <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.09.013>.

ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ПЕРИОДЫ ГЛУБОКИХ МИНИМУМОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Абраменко В.И., Сулейманова Р.А.

ФГБУН КРАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, vabramenko@gmail.com

Солнечное динамо генерирует тороидальное магнитное поле, которое появляется на поверхности в виде биполярных магнитных структур – активных областей (АО). Большинство из них имеют правильную (согласующуюся с теорией динамо) магнитную структуру, а именно, соответствующую закону полярностей Хейла магнитную полярность лидирующего пятна, соответствующий закону Джоя наклон оси АО к экватору, доминирующее лидирующее пятно. Однако турбулентность в конвективной зоне неизбежна. Она может двояко повлиять на поднимающиеся жгуты тороидального поля: либо исказить уже созданные регулярные тороидальные жгуты, либо генерировать нерегулярные магнитные структуры независимо от солнечного цикла. В периоды минимальной активности слабое тороидальное поле уходящего цикла постепенно исчезает, а поле наступающего цикла медленно набирает силу. В эти периоды можно диагностировать роль турбулентности конвективной зоны в генерации активных областей.

Мы исследовали два глубоких минимума: первый между 23 и 24 циклами (2008.0 – 2009.5) и второй между 24 и 25 циклами (2018.3 – 2020.3). В эти периоды мы выявляли активные области на расстоянии не более 60 градусов от центра диска и обладающие магнитным потоком в максимуме развития не менее 10^{21} Мкс. Для каждой АО определялся магнитоморфологический класс (ММС) согласно предложенной ранее классификации [1,2]. Регулярные активные области, согласующиеся с динамо, принадлежат классу А, остальные принадлежат классу В, куда входят неправильные биполи (В1) и сложные мульти-полярные структуры (В2 и В3). Униполярные пятна выделены в отдельный класс U.

Оказалось, что в периоды минимумов существенно преобладают (и по количеству, и по потоку) активные области класса А. Они составляют (59-64)%, в то время как АО класса В составляют лишь (22-29)%. Суммарный поток АО класса А в три раза превосходит аналогичную величину для АО класса В. При этом для обоих классов характерно доминирование простейших биполярных структур: в классе А из 40 АО наблюдалась только одна АО с дельта-структурой (подкласс А2), а в классе В отмечены только 3 сложных мультиполярных АО подкласса В2, все остальные 17 АО класса В - это неправильные биполи (В1). Таким образом, для периодов глубокого минимума характерно отсутствие мультиполярных АО, пониженная численность и поток простых биполярных нерегулярных АО, доминирование по численности и по потоку регулярных АО без дельта-структур.

Данные позволяют предположить, что турбулентность конвективной зоны не в состоянии производить активные области, в противном случае в периоды предельно слабого тороидального поля мы наблюдали бы повышенный нерегулярный поток в виде активных областей, не подчиняющихся законам динамо. Следовательно, генерация магнитных структур масштаба активной области происходит за счет единого механизма (глобального динамо), обуславливающего солнечный цикл. С другой стороны, известно, что на мелких масштабах (<500 км) в фотосфере и подфотосферных слоях имеет место генерация поля за счет турбулентности - мелкомасштабное динамо. По-видимому, магнитные жгуты, формирующие активные области, проводят большую часть времени подфотосферной эволюции на достаточно больших глубинах, где масштаб турбулентности велик и имеет место лишь деформация магнитных жгутов без значительной дополнительной генерации магнитного потока.

КОНВЕКТИВНЫЙ ВЫНОС МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ФОТОСФЕРНЫЙ УРОВЕНЬ ПРИ ЗАРОЖДЕНИИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Романов К.В.¹, Романов Д.В.¹, Романов В.А.², Степанов Е.А.², Лебедев А.А.²

¹КГПУ им. В.П.Астафьева, г.Красноярск, Россия, k-v-romanov@yandex.ru

²СГУ им. Н.Г.Чернышевского, г.Саратов, Россия

Структура расположения солнечных пятен на фотосферном уровне фактически определяет пространственную структуру всей активной области в пределах солнечной атмосферы [1]. В области тени солнечных пятен температура газа существенно ниже (~4000 К) температуры окружающей среды (~6000 К [2]). Феномен данного различия температур детально не изучен вплоть до настоящего времени. В монографии Паркера [3] имеется указание на реализацию охлаждения газа в пятнах за счёт нелинейных МГД-процессов, протекающих при всплывании магнитных полей с высокими значениями напряжённости из конвективной зоны в атмосферу Солнца. В настоящей работе исследуется процесс адиабатического охлаждения тонкой магнитной трубки, всплывающей из средних слоёв конвективной зоны к фотосферному уровню. Начальные значения МГД-параметров газа в трубке определяются развитием неустойчивости Паркера длинноволновой части спектра глобальных колебаний магнитного поля с длиной волны порядка горизонтальных размеров стандартных активных областей на фотосферном уровне Солнца [4]. Результаты расчётов позволяют детально проанализировать изменение МГД-параметров плазмы трубки при всплывании к фотосферному уровню, и получить значения физических параметров зарождающихся солнечных пятен, допускающие прямое сопоставление с наблюдательными данными [5]. В работе показано, что главным физическим параметром, определяющим устойчивость зарождающейся активной области, является её горизонтальный размер (длина волны развития неустойчивости Паркера). Напряжённость магнитного поля в трубке не играет такой важной роли как размер магнитной структуры. Глубина срыва магнитного поля (развития неустойчивости Паркера) с ростом напряжённости магнитного поля уменьшается незначительно. Но данное уменьшение глубины срыва магнитного поля объясняет явление более раннего по времени формирования ведомой части биполярной активной области по сравнению со временем формирования ведущей части. Также объясняется наблюдательный эффект более позднего формирования в пучке петель магнитного поля тех участков активной области, которые расположены на более низких широтах по отношению к экватору Солнца [5].

[1] Обридо В.Н.. Солнечные пятна и комплексы активности // М.: Наука. 1985. 255с.

[2] Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна // М.: Мир. 1967. 385с.

[3] Паркер Е.М.. Космические магнитные поля. Их образование и проявления // М.: Мир. 1981. Т.1. 608с., Т.2. 408с.

[4] Степанов Е.А., Майоров А.О., Романов К.В., Романов Д.В., Романов В.А.. Математическое моделирование развития неустойчивости Паркера крупномасштабных колебаний магнитных полей в конвективной зоне Солнца // Изв. Саратовского унив., Новая Серия Физика. 2020. Т.20. вып.1. с 4-15

[5] Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И.. Динамика трубок магнитного поля в процессе формирования большого солнечного пятна // Астрон. журн.. 2012. Т.89., №11, С.967-975.

1. Abramenko V.I. // MNRAS 2021. V. 507, P.3698.

2. Abramenko V.I., Suleymanova R.A., Zhukova A.V. // MNRAS 2023. V. 518, P.4746.

ПОТОКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА УРОВНЕ ФОТОСФЕРЫ СОЛНЦА

Садыков А.М.¹, Красоткин С.А.¹

¹Кафедра физики космоса, Физический факультет, МГУ, г. Москва, Россия, sadykov.am19@physics.msu.ru

На сегодняшний день отсутствуют общепринятые представления о физических процессах, происходящих в конвективном слое и фотосфере Солнца, связанные с солнечной активностью. Самой известной моделью зарождения и развития активных областей (АО) является гипотеза о всплывании магнитного потока. Для проверки данной гипотезы необходимо изучить динамику усиления магнитного поля и радиальной скорости вещества на начальных этапах развития АО. По гипотезе, оба явления должны быть взаимосвязаны, с увеличением положительного потока скорости вещества должен увеличиваться полный поток магнитного поля.

Целью нашей работы является изучение взаимодействия магнитного потока и потока радиальной скорости вещества в зарождающихся активных областях. Для этого были рассмотрены данные глобальной сети телескопов GONG (Global Oscillations Network Group). Для работы отобраны 30 АО (2011–2022 гг.), удовлетворяющие критериям. Для каждой АО данные рассматриваются с временным шагом в 4 часа на протяжении 6 дней, вплоть до сближения пятен с западным лимбом.

Полученные результаты показывают, что существует статистически значимая корреляция между магнитным полем и отрицательным потоком скорости вещества. При этом корреляция для потока положительной скорости слабо выражена. Эти результаты показывают, что не существует всплывающих магнитных потоков, используемых в гипотезе. Эти результаты указывают, что в зарождающихся активных областях при увеличении магнитного потока усиливается поток отрицательной скорости, причем эта зависимость близка к линейной.

ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ПО ДИСКУ СОЛНЦА ВСПЛЫВАЮЩИХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Куценко А.С., Абраменко В.И., Литвишко Д.В.

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

Анализ движения ведущей и хвостовой полярностей активных областей во время всплытия показывает, что по отношению к кэррингтоновской долготе ведущая полярность быстрее удаляется от места первоначального появления диполя [1]. Такое поведение может свидетельствовать о том, что вершина всплывающей магнитной петли, формирующей активную область, имеет наклон в восточном направлении. С другой стороны, более современные исследования обнаружили, что разделение ведущей и хвостовой полярностей происходит симметрично относительно локальной скорости вращения плазмы на поверхности [2]. В данной работе мы измеряем изменение скорости вращения активной области на этапе всплытия по отношению к ее скорости в развитом состоянии.

Для анализа были отобраны 65 активных областей, всплывающих на видимом диске Солнца и наблюдавшихся инструментом SDO/HMI с 2010 по 2016 гг. Для каждой активной области вычислялись средневзвешенные по магнитному потоку центры обеих магнитных полярностей. Центр всей активной области определялся как геометрический центр между этими двумя точками. Зависимость полученной долготы активной области от времени разбивалась на участки длительностью 12 часов, для каждого из участков проводилась линейная аппроксимация кривой. Наклон аппроксимации принимался за мгновенную скорость вращения активной области.

Мы обнаружили, что активные области из нашей выборки показывают три характерных картины изменения скорости вращения при всплытии: 15 активных областей из 65 показывали ускорение, 25 активных областей замедлялись и еще 25 активных областей не меняли значительно скорость вращения. Интересно, что после всплытия большинство активных областей практически не изменяет скорость вращения.

Полагая, что изменение скорости вращения связано с геометрическим наклоном вершины всплывающей магнитной петли, можно сделать вывод об отсутствии систематического наклона. Приблизительно треть активных областей показывает наклон в восточном направлении, треть - в западном, тогда как еще треть предположительно не показывает наклона вообще. Наклон магнитной трубки может объясняться действием эффекта Кориолиса на всплывающий магнитный жгут. Ряд гидродинамических эффектов может приводить к наклону как в одну, так и в другую сторону [3]. По-видимому, механизм формирования наклона не является универсальным и наклон формируется в каждом случае индивидуально.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 18-12-00131.

1. van Driel-Gesztelyi L., Petrovay K. // Sol. Phys. 1990. V. **126**. P. 285.
2. Schunker H., Braun D.C., Birch A.C., Birston R.B., Gizon L. // Astron. and Astrophys 2016. V. **595**. A107.
3. Fan Y. // Liv. rev. in Sol. Phys. 2021. V. **18**. article id. 5.

ЧЕРЕДОВАНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА

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

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

Проведено исследование особенностей распределения положительных и отрицательных магнитных полей по поверхности Солнца. Для этой цели используются синоптические карты фотосферного магнитного поля Национальной Солнечной Обсерватории Китт Пик за 1978-2016 гг. Синоптические карты, усредненные по долготе, использованы при построении диаграммы широта-время. На диаграмме бабочек около максимума солнечной активности хорошо видны потоки Rush-to-the-Poles (RTTP), время жизни которых на фиксированной широте составляет около 3 лет. Магнитное поле этих потоков имеет тот же знак, что и поле хвостовых пятен. Дрейфуя от широты 30° к полюсу, потоки RTTP вызывают переполюсовку полярного поля.

На диаграмме бабочек доминируют сильные поля групп пятен, что мешает рассмотреть всю картину распределения магнитных полей. Для исследования распределения слабых магнитных полей фотосферы Солнца предложен метод построения диаграммы широта-время с предварительной трансформацией синоптических карт, которая ограничивает влияние сильных полей. На каждой синоптической карте были оставлены без изменения только поля по модулю меньше 5 Гс, а большие, или меньшие, поля были заменены соответствующими предельными значениями +5 Гс или -5 Гс. Полученная таким методом диаграмма широта-время позволяет увидеть два типа потоков: Rush-to-the-Poles и ripples - серии потоков с чередующейся полярностью и с временем жизни каждого отдельного потока в серии 0.5-1.0 год. Магнитные поля ripples дрейфуют от экватора до широт $\sim 50^\circ$. Потоки ripples наблюдаются на фазе спада, минимума и подъема солнечного цикла, от одного Rush-to-the-Pole до другого (в среднем в продолжение ~ 9 лет). Этот период соответствует эпохе постоянства знака полярного поля.

Установлена преимущественная роль слабых полей в возникновении циклической структуры типа ripples. При этом изменение знака потоков происходит одновременно как для слабых, так и для более сильных полей, в результате чего учет сильных полей не изменяет, а только усиливает характерную картину чередования полярностей, полученную для самых слабых магнитных полей. Проведено исследование циклических структур в распределении магнитных полей и получены оценки амплитуды и периода вариаций ripples. Было установлено, что циклическая смена полярности потоков происходит с периодом 1-2 г. что указывает на возможную связь с квазидвухлетней вариацией. Амплитуда вариаций следовала определенной зависимости: амплитуда была выше в том полушарии, в котором полярное поле имело положительный знак.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что два типа потоков - Rush-to-the-Poles и ripples совместно образуют регулярно повторяющуюся структуру в магнитном поле фотосферы, которая тесно связана с солнечным магнитным циклом.

СВЯЗЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПОТЕРЕЙ МАГНИТНОГО ПОТОКА В УНИПОЛЯРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТНАХ

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

КрАО РАН, н. Научный, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

В настоящее время распространена теория потери солнечным пятном магнитного потока за счет т.н. «турбулентной эрозии» - конвективные движения внутри пятна ослаблены, а потеря потока происходит за счет внешней турбулентности, «вырывающей» магнитные структуры с границы пятна [1].

На основании данных SDO/HMI для нескольких униполярных активных областей проведено сравнение длин изогаусс (прокси-величина для периметра пятна) со скоростью потери полного магнитного потока пятном. В различных пятнах обнаружено существенное различие в удельных (на единицу длины периметра) величинах потока, теряемого через границу. Если эрозия является основным механизмом потери потока пятном, то для различных пятен эти величины должны быть близкими. Данный результат может говорить о том, что турбулентная эрозия является не единственным механизмом потери потока активной областью, либо в некоторых активных областях могут образовываться условия, существенно препятствующие потере магнитного потока с помощью данного механизма.

1. Petrovay, K., Moreno-Insertis, F. // ApJ 1997. V. **485**, I. 1, P. 398.

СУММАРНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС, МАГНИТНАЯ ЭНЕРГИЯ И СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЯТЕН

Старченко С.В.

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

Гидромагнитное динамо в конвективной зоне Солнца, прежде всего, базируется на порождающей динамо энергии конвекции. Эта энергия формально определяется отклонениями температуры или энтропии от адиабатического состояния. В рассматриваемом приближении подобные отклонения полностью задают Архимедово ускорение плавучести A , направленное параллельно сферическому радиусу, а эволюционное уравнение для энтропии или температуры преобразуется в уравнение для A . Интегрируя это уравнение по сфере радиуса r , получаем радиальный баланс конвективных и диффузионных тепловых потоков. Дальнейшее интегрирование по радиусу приблизительно дает тепловые потоки, усредненные по заданным сферическим слоям, а энергетическое уравнение, как и в [1], сводится к

$$AV=W. \quad (1)$$

Здесь фигурируют усредненные по соответствующему слою величины: A – Архимедово ускорение, V – скорость течений, W – удельная конвективная мощность слоя в Вт/кг или конвективный тепловой поток. Независимым образом, конвективный тепловой поток определяется из аналогичного интегрирования скалярного произведения скорости динамотечения \mathbf{V} на уравнение Навье-Стокса. При этом приблизительно выражаем и глобальную (т.е. по всему рассматриваемому слою) мощность магнитной силы Лоренца, которую вместе с энергетическим потоком магнитной диффузии так же оцениваем и из уравнения индукции (последнего в динамо-системе) магнитного поля \mathbf{B} .

Окончательно, в рассматриваемом слое, получаем наипростейшее линейное неоднородное дифференциальное уравнение для эволюции суммарной магнитной энергии E в виде

$$dE/dt = 2MW - 2E/\tau. \quad (2)$$

Здесь: M – известная масса рассматриваемого сферического конвективного слоя, а постоянное в рассматриваемом приближении τ – это характерное время магнитной диффузии.

Простейший случай с постоянной во времени мощностью W дает стабилизацию энергии на уровне τMW . Этот уровень хорошо согласуется как с известными моделями глубинной части конвективной зоны [2], так и с ранее рассмотренной автором простейшей моделью пятна или группы пятен [3]. Для пятен здесь в аналоге (2) используется удельная энергия $E\rho/M=B^2/2\mu_0$, где B – среднеквадратичное магнитное поле, а ρ средняя плотность. При этом время стабилизации пятна соотносится по порядку величины с τ , временем жизни пятна и с наблюдаемыми величинами магнитных полей пятен, что позволяет оценить связи локальной мощности конвекции, времен жизни и величин поля.

ВРЕМЯ ЖИЗНИ СОЛНЕЧНЫХ ПОР И ПЯТЕН

Тлатова К.А., Тлатов А.Г.

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

Выполнен анализ времени жизни отдельных солнечных пор и пятен солнечных пятен по данным наблюдений космической обсерватории НМИ/SDO в 24 и 25-м циклах активности. Границы солнечных пятен и пор выделялись на изображениях в континууме. Отслеживание пятен происходило при идентификации отдельных пятен и пор на различных изображениях во времени. Обработывались пять изображений в день. Для более точной идентификации солнечных пятен границы пятен совмещались с магнитограммами. Таким образом, были сформированы цепочки отдельных солнечных пятен и пор во времени, по которым выполнялся анализ эволюции и времени жизни.

Получено, что время жизни отдельных пятен и пор значительно отличается от правила Гневешева–Вальдмайера $T_g \sim W \cdot A$, сформулированного для групп солнечных пятен. Зависимость времени жизни носит различную закономерность, так для пор ведущей и хвостовой полярности магнитного поля зависимость имеет логарифмический вид от площади: $T_{\text{por}} = 0.24(0.01) + 0.55(0.14) \cdot \lg(S_{\text{mx}})$ для $S_{\text{mx}} < 50 \text{ mhm}$. Для регулярных солнечных пятен ведущей полярности зависимость близка к линейной: $T_{\text{ledspot}} = -0.62 (\pm 0.2) + 0.036 (\pm 0.002) \cdot S_{\text{mx}}$. Для солнечных пятен хвостовой полярности $T_{\text{trspot}} = 0.95 (\pm 0.1) + 0.01 (\pm 0.001) \cdot S_{\text{mx}}$.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01021032422589-5, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 23-22-00165.

1. Starchenko S.V., Jones C.A. // Icarus 2002. V. 157. P. 426-435.
2. Кичатинов Л.Л. // Письма в Астрон. журн. 2019. Т. 45. С. 45-54.
3. Старченко С.В. // Геомагнетизм и Аэронавигация 2022. Т. 62. С. 139-143.

ПОРОГОВЫЙ РЕЖИМ МЕЛКОМАСШТАБНОГО ДИНАМО В РАМКАХ КАСКАДНОГО ПОДХОДА

Абушзаде И.З.¹, Юшков Е.В.², Соколов Д.Д.³

1) Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан

2) Институт космических исследований Российской академии наук, 117997, Москва, Россия

3) Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический

факультет, 119991, Москва, Россия

ilyasabushzade@gmail.com

В настоящее время механизм формирования крупномасштабного магнитного поля звезд и планет в целом понятен и описывается так называемой теорией магнитного динамо. Однако помимо этого хорошо изученного процесса генерации, есть также и весьма похожий процесс перекачки гидродинамической энергии в магнитную – мелкомасштабное или турбулентное динамо.

Мелкомасштабное динамо описывает процесс генерации магнитной энергии на масштабах меньших или сравнимых с характерной корреляционной длиной случайного поля скорости. Этот процесс генерации описывается путем усреднения второго момента магнитного поля, так как в отличие от крупномасштабного среднее поле в мелкомасштабном процессе может не расти, а растет только средняя магнитная энергия. Для простейшего случая, без дифференциального вращения и без зеркальной асимметрии уравнение для мелкомасштабного динамо впервые было получено А.П. Казанцевым [1]. Отличительной чертой модели Казанцева является то, что такая мелкомасштабная генерация — является пороговым явлением, то есть генерация возможна, только если магнитное число Рейнольдса достаточно велико, больше критического значения. Однако все оценки до настоящего времени были получены именно в рамках модели Казанцева для короткокоррелированного конвективного потока в линейном режиме [2].

В нашем докладе мы пытаемся отойти от этих требований, рассматривая процесс генерации не в рамках подхода Казанцева, а с помощью каскадного подхода. Каскадные модели МГД-турбулентности в упрощенном виде описывают взаимодействие турбулентных вихрей разного масштаба друг с другом [3]. Полученные преобразованием Фурье из уравнения движения плазмы и уравнения магнитной индукции на конечном числе спектральных оболочек, эти модели позволяют анализировать каскад гидродинамической и магнитной энергии по спектру, накопление энергии и ее диссипацию со временем. В случае слабого начального магнитного поля каскадные модели показывают, что магнитная энергия растет экспоненциально и локализуется на малых масштабах. Это позволяет предположить, что наблюдаемая генерация является отражением мелкомасштабного динамо-процесса, но без предположений о короткой коррелированности или линейности режима. В настоящей работе, мы исследуем скорости роста магнитной энергии, которые получаем для различных магнитных чисел Рейнольдса и отвечаем на вопрос, является ли мелкомасштабное динамо, наблюдаемое в рамках каскадного подхода, пороговым явлением также, как и в классическом подходе Казанцева, или нет.

1. Kazantsev A.P. // Soviet Physics JETP1967. V. 26(5). P. 1031.

2. Novikov V.G. // Applied Mathematics Institute, USSR Academy of Sciences JETP1983. V. 85. P. 909-918

3. Фрик П.Г. // Турбулентность: подходы и модели. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. — 332 с

МАСШТАБЫ И ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ МОЩНОСТИ ТЕЧЕНИЙ В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА

Гетлинг А.В., Косовичев А.Г.

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

Для исследования структуры и временных вариаций конвективных течений в солнечной подфотосферной зоне используются поля скоростей, найденные методами пространственно-временной гелиосейсмологии по данным наблюдений с помощью инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту орбитальной Обсерватории солнечной динамики (SDO) с мая 2010 г. по сентябрь 2020 г. Спектральный анализ пространственной структуры солнечной подфотосферной конвекции выполнен по картам подповерхностных скоростей на глубинах до 19 Мм. Поле дивергенции горизонтальной составляющей скорости конвективных течений разлагается по сферическим гармоникам. Диапазон масштабов, довольно широкий в неглубоких слоях, сужается по мере перехода к большим глубинам. Горизонтальные масштабы течений растут с глубиной от супергрануляционных значений до характерных размеров гигантских ячеек и указывают на присутствие крупномасштабных течений в подповерхностном сдвиговом слое. Характер спектра указывает на суперпозицию разномасштабных течений, локализованных вплоть до разных глубин под поверхностью. В глубоких слоях прослеживается тенденция к возникновению меридионально удлинённых (банановых) конвективных структур. Исследована вариация интегральной мощности конвективных течений в цикле солнечной активности. Найдено, что в подповерхностных слоях эта мощность обнаруживает антикорреляцию с числом солнечных пятен, а на больших глубинах – положительную корреляцию. Причиной этого эффекта может быть перераспределение энергии конвективных течений по глубине, вызванное действием изменяющейся в ходе цикла активности картины магнитных полей.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПЕРИОД МИНИМУМА ДАЛЬТОНА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ О.ФЛОЖЕРГА

Илларионов Е.А., Арльт Р.

МГУ, г. Москва, Россия, egor.mypost@gmail.com

Астроном-любитель О. Флोजерг проводил наблюдения солнечных пятен в 1782—1830 годы, на которые приходится минимум солнечной активности, известный как минимум Дальтона. Для наблюдений использовался телескоп, оснащенный в разные годы прямоугольной, косой или ромбовидной сеткой, а записи наблюдений состоят из времен прохождения диска Солнца и солнечных пятен через направляющие этой сетки. Мы оцифровали эти записи и нашли способ восстановить гелиографические координаты пятен. Таким образом, мы имеем возможность взглянуть на солнечную активность в период минимума Дальтона с точки зрения положений отдельных пятен, в то время как ранее мы располагали лишь оценками индексов солнечной активности. В докладе мы обсудим методику восстановления координат и представим полученную широтно-временную диаграмму. Следует отметить, что в каталогах Флोजерга, помимо той информации, которую нам уже удалось восстановить, содержится целый ряд любопытных текстовых комментариев о наблюдаемой картине солнечного диска, которые, как нам кажется, должны вдохновить на дальнейшие исследования.

Восстановленные координаты пятен доступны в онлайн репозитории <https://github.com/observethesun/Flaugergues>.

ВРАЩЕНИЕ ГРУПП ПЯТЕН, ФОРМИРУЮЩИХ АКТИВНУЮ ДОЛГОТУ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ МЕЖДУ ЦИКЛАМИ 24/25

Костюченко И.Г., Вернова Е.С.

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

Существование и происхождение феномена активных долгот на Солнце остается дискуссионным несколько последних десятилетий. Ранее было показано [1-2], что в минимумах солнечной активности большая часть крупных групп пятен и наиболее высоких значений магнитного потока наблюдается именно в области активных долгот, а их предполагаемый источник вращается со скоростью, превышающей Кэррингтоновскую.

В данной работе анализируется скорость вращения индивидуальных групп пятен в наиболее продолжительном и слабом минимуме солнечной активности между циклами 24/25. Используются данные из каталога <http://solarcyclescience.com/activerregions.html> о координатах и площадях солнечных пятен, а также значения магнитных потоков, полученные из магнитографических синоптических карт обсерватории Вилкокса (<http://wso.stanford.edu>). Сравнительно небольшое количество групп солнечных пятен, наблюдавшихся на протяжении этого минимума, позволило достаточно надежно выделить те из них, которые формируют активную долготу. Получено их распределения по широте, по размерам и распределение их индивидуальных скоростей вращения, которое сравнивается с найденной скоростью вращения источника активной долготы. Также проводится сравнение с аналогичными характеристиками групп пятен, наблюдавшихся на Солнце в тот же период времени вне выделенной области активной долготы.

1. *Benevolenskaya, E. E., Kostyuchenko, I. G.* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 8, pp. 1019–1025.
2. *Kostyuchenko, I.G., Benevolenskaya, E.E.* // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, Vol. 55, No. 8, pp. 1039–1044.

СВЯЗЬ СТРУКТУРЫ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН (11-ЛЕТНИЕ И QVO-ВАРИАЦИИ) С ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКОЙ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

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

В статье исследуется связь динамики солнечной активности с временной динамикой динамического магнитного поля Солнца (ДМП). Проводится анализ динамики числа солнечных пятен для 8 циклов солнечной активности (17-24 циклы): 11-летних вариаций и вариаций, сконцентрированных в диапазоне $\sim 1.5-3.5$ года (так называемые квазидвухлетние вариации или QVO –вариации). В работе проведен сравнительный анализ временной динамики тонкой структуры периодов вариаций SSN (диапазон периодов $\sim 1,3 - 4$ года) и динамики широтной компоненты ДМП (тахосферного магнитного поля), были сделаны количественные оценки временных вариаций напряженности и широты динамического магнитного поля Солнца (ДМП). Перенос магнитных потоков к поверхности и формирование динамики солнечных пятен в цикле, в основном, определяется динамикой широтной и меридианной компонентами ДМП. Это объясняет характерные для всех циклов сдвоенные максимумы числа солнечных пятен вблизи максимума цикла (Gnevyshev gap) и, соответственно, длительность фазы роста и спада солнечного цикла. Скорость движения магнитных потоков к солнечной поверхности определяет временная динамика широты ДМП, которая для фазы спада активности в среднем равна $\sim 2,3$ град/год (для 20 и 23 циклов $\sim 1,6$ град/год). Для фазы роста активности эти величины в среднем равны $\sim 3,6$ град/год и $\sim 2,6$ град/год. Динамика напряженности ДМП определяет динамику числа солнечных, функция SSN(B) для всех циклов меняется в пределах $\pm 12\%$ от среднего значения $\sim 10,7$ ssn/kГс. Анализ показал, что вариаций солнечной активности (11-летние вариации и вариации 1,5-4 года) формируются в рамках развития единого динамо-механизма, определяющего временную динамику магнитного поля и широты ДМП.

БЮДЖЕТ МАГНИТНОГО ЦИКЛА В МОДЕЛЯХ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

¹В.В. Пипин, ²А.Г. Косовичев

¹ ИСЗФ, Иркутск, pip@iszf.irk.ru

² New Jersey Institute of Technology, NJ 07102, USA

Бюджет солнечного магнитного цикла, который характеризуется параметрами скорости генерации, потерь и амплитуды вариаций тороидального и полоидального магнитного потока Солнца. Согласно результатам Камерона и Шюсслера [1], оценка параметров бюджета цикла по данным наблюдений магнитной активности фотосферы Солнца, показывает справедливость сценария динамо Бэбкока-Лейтона. Напомним, что в сценарии Бэбкока-Лейтона основной механизм генерации полоидального магнитного поля связан с наклоном биполярных активных областей возникающих из тороидального магнитного поля. Недавно, в нашей работе [2], было показано, что фотосферная активность тороидального поля в форме биполярных активных областей вполне вписывается в модели среднего поля и может быть использована для моделирования особенностей циклов 23 и 24 при помощи базы данных солнечной магнитной NOAA. Мы оценили параметры бюджета цикла используя результаты модели. Оценки показывают, что широтное дифференциальное вращение является основным источником тороидального магнитного потока Солнца. Таким образом крупномасштабное радиальное поле на поверхности звезды может играть существенную роль в процессах динамо. Это обстоятельство объясняет относительный успех сценария Бэбкока-Лейтона в моделях солнечного цикла. Вместе с этим, наши результаты показывают, что бо́льшая часть бюджета динамо в недрах Солнца, тратится на поддержание среднего уровня магнитной активности конвективной зоны. Таким образом, для адекватного описания солнечного цикла необходим одновременный учет поверхностной активности биполярных групп пятен и модель турбулентного динамо в конвективной зоне.

[1] Cameron, R., & Schüssler, M. 2015, Science, 347, 1333, doi: 10.1126/science.1261470

[2] Pipin, V. V. , Kosovichev, A. G. , Tomin, V. E., 2023, ApJ published online, arXiv:2210.08764.

МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЫ РАЗДЕЛЬНОЙ КОНВЕКЦИИ ПЛАЗМЫ В ПОЛУШАРИЯХ СОЛНЦА.

Плеханов П.Г., Михайлова Л.Н.

Астрономическая лаборатория СКБ ГБОУ СПО СМК, г. Самара. skb.smk@yandex.ru

Проведен анализ существующих моделей строения конвективной зоны Солнца изложенных в работах [1;3;4]. Так в работе [4], рассматривается двухполюсная конвекция вещества по двум потокам в верхней и нижней границе конвективной зоны от экватора к полюсу в полушариях Солнца одной полярности. Это противоречит законам солнечной активности (закон Шперера и закон Хейла). В работе [2] изложен механизм генерации слабого магнитного поля в недрах Солнца. В данном докладе приводится модель строения конвективной зоны раздельной конвекции плазмы от полюсов Солнца к его экватору противоположной полярности. В модели рассматриваются процессы: периодического формирования в полюсах Солнца малых торов разной полярности, силовыми магнитными линиями и вмороженной в них плазмы. Полоидальное магнитное поле преобразуется в тороидальное и также усиливается до максимума. При дифференциальном вращении Солнца малые торы смещаются к экватору (закон Шперера), увеличиваются в размерах до максимума, увеличивается количества солнечных пятен в полушариях Солнца (закон Вольфа). В период максимума солнечной активности меняется диполь Солнца, формированием в его полюсах новых малых торов противоположной полярности следующего цикла солнечной активности (закон Дж. Хейла). В зоне экватора торы в размерах уменьшаются до минимума, противоположные поля нейтрализуются, что приводит к окончанию цикла солнечной активности.

Выдвигаемая нами модель строения конвективной зоны с периодическим формированием торов и их эволюции в полушариях Солнца, впервые объясняет физику трех законов солнечной активности. Получен фундаментальный вывод о существовании единого механизма генерации слабого магнитного поля в недрах Солнца и усиление в конвективной зоне в его полушариях.

- 1.Витинский Ю.И. Солнечная активность. М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы,1983.-192с.
- 2.Плеханов П.Г. Солнечная активность (раздельная динамо-модель смены 11 и 22-х летних циклов). Монография, Издательство Инкома-пресс, г. Самара, 2011-52с.
- 3.Сообщение геофизики Интернет от 18. 12. 2013г.
- 4.Цзюньвэй Чжао, Р. С. Богарт (Обнаружение меридионального потока в направлении экватора и свидетельстве двухэлементной меридиональной циркуляции внутри)

КОРРЕЛЯЦИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА С ИХ ПРОИЗВОДНЫМИ И ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА XXV СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Старченко С.В. и Яковлева С.В.

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

Определены базовые корреляционные зависимости между сдвигаемыми по времени относительно друг друга рядами чисел Вольфа и их производными (W и W'). В качестве исходных данных были использованы среднегодовые числа Вольфа W с 1700 по 2021 годы в версии v2. Временные производные $dW/dt \equiv W'$ получены посредством взятия среднего от производной слева и справа, что несколько сглаживает ошибки, проистекающие из наблюдательного и договорного определения W .

Наиболее значимые (до 0.87 и -0.85) коэффициенты корреляции и анти корреляции получаются при сдвигах на два-три года для фрагментов, охватывающих последние 11-14 лет. Для более длительных фрагментов коэффициенты остаются значимыми (на уровнях от 0.87 до 0.79) при сдвигах на эти же 2-3 года. Поэтому сдвиг по фазе между W и W' примерно четверть солнечного цикла, что физически соответствует преимущественной связи пятен с магнитной энергией. При этом также значим сдвиг на 8-9 лет, которому соответствуют коэффициенты корреляции от -0.70 до -0.85.

Для потенциальных прогностических оценок на Рисунке приведены сдвинутые назад в прошлое графики. Для соответствующих величин можно сделать прогноз по «опережающим» их графикам. Тестовые расчеты показали, что наиболее эффективным является калибровочный коэффициент, рассчитанный для аналогичной фазы предыдущего цикла. Лучший коэффициент линейной парной корреляции приближения МНК - 0,94.

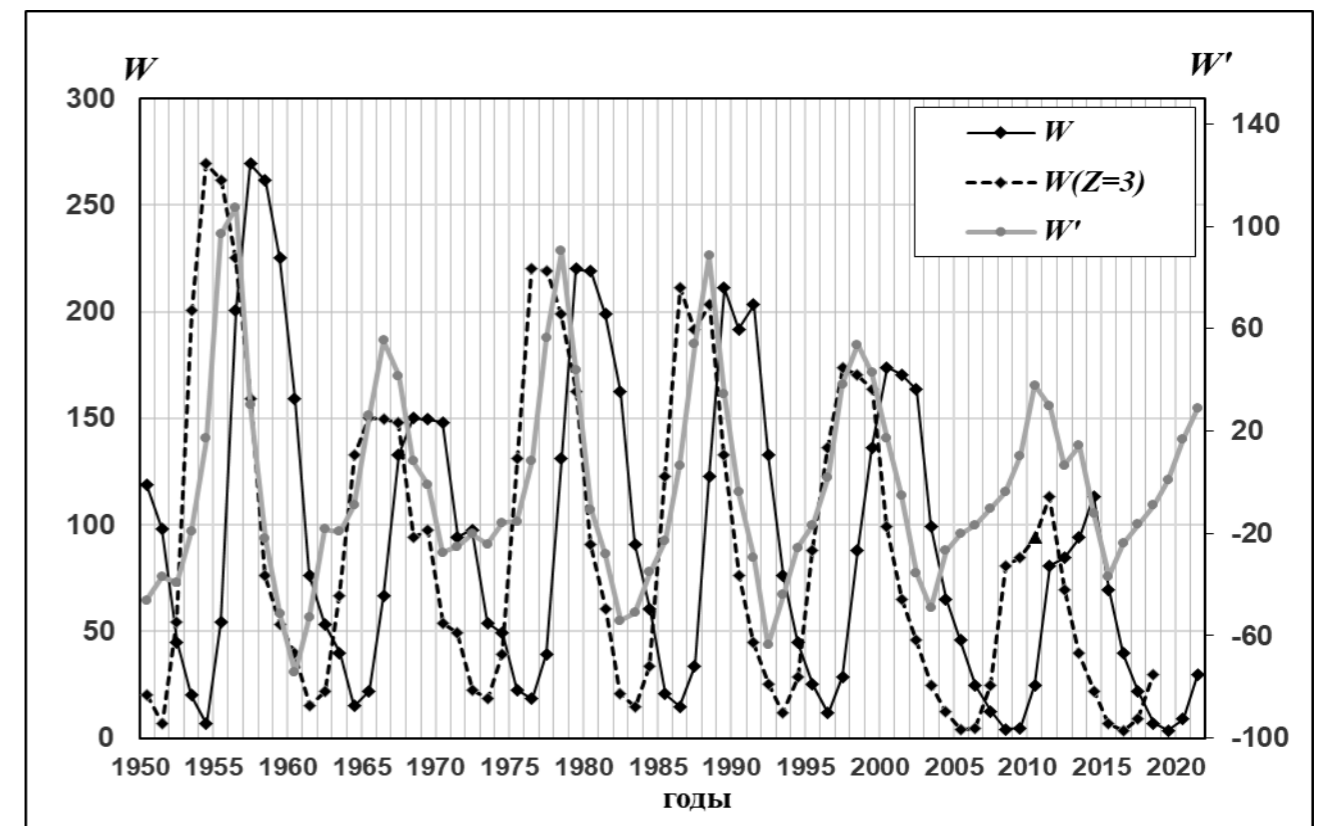


Рисунок. Графики смещения W относительно W' для $Z = 3$ (лет) на основе расчетов по XIX-XXIV магнитным солнечным циклам.

АППРОКСИМАЦИЯ ДЛИННОПЕРИОДНОЙ КОМПОНЕНТЫ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА С УЧЕТОМ ВЗАИМОСВЯЗИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛОВ С ИХ АМПЛИТУДОЙ

Шибяев А.И.

МГУ, г. Москва, Россия, alexshibaev@yandex.ru

В работе [1] показана зависимость периода синус-аппроксимации длиннопериодной компоненты ряда WSN от длины самого ряда. Отмечен рост периода синуса с 82 до 110 лет при увеличении длины ряда от 18 до 24 циклов. Начальная периодичность максимумов в семь – восемь циклов трансформируется в десять – одиннадцать циклов. Ряд WSN включает восстановленные данные *Wrest* с 1749 по 1849 г. и далее данные регулярных наблюдений -- достоверные данные *Wtool*. Данные *Wrest* – это объединение отрывочных показаний с различными плотностью наблюдений, амплитудным разрешением и масштабированием, что нарушает согласованность временных фрагментов разного масштаба (например, структура циклов и их взаимосвязь). С этим и связана неустойчивость периода синус-аппроксимации длиннопериодной компоненты ряда WSN.

При анализе только ряда *Wtool* период аппроксимирующего синуса равен 150 годам [2], это соответствует периодичности максимумов в четырнадцать циклов, что разумно взять за асимптотику периода синус-аппроксимации ряда WSN.

В работе для полного периода эпох максимума с минимумом (14 циклов) предложен шаблон, в основу которого положена коррекция 150-летней гармонике, учитывающая связь амплитуды циклов с их длительностью.

Влияние Солнца, через солнечно-земные связи, на климат и человека определяет традиционный интерес к индексам солнечной активности. Цюрихский ряд среднемесячных чисел Вольфа WSN является наиболее представительным и широко используется в различных приложениях. Проявление эпох максимума и минимума солнечной активности в повседневной жизни вызывает устойчивый интерес к длительным периодам активности и, в первую очередь, к «вековой» гармонике, коррекция которой предложена в данной работе.

[1] Shibaev A. Connection between period of low-frequency component Wolf's numbers (WNS) and length of Wolf's numbers series // *Aerospace Research in Bulgaria*, V. 29, P. 5–9, 2017.

[2] Шибяев И.Г. Оценка восстановленной части ряда чисел Вольфа и возможность её коррекции // *Астрономический вестник*. // Т. 42. № 1. С. 66 – 74. 2008.

Вторник, 07.02. 2023 г., Конференц-Зал (Line 1)_____

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			Председатель: <u>Струминский А.Б.</u>
1	09.00 - 09.15	Андреева О.А., Малащук В.М.	Вращение долгоживущей корональной дыры в 24 цикле солнечной активности
2	09.15 -09.30	Борисенко А.В., Богачев С.А.	Влияние полярных корональных дыр на скорость солнечного ветра в минимумы 23 и 24 солнечного цикла
3	09. 30 - 09.45	Блуменау М.И., Воробьев Д. Л., Хабарова О.В., Фридман М.Л., Никитин И.С.	Развитие модели идентификации солнечных магнитных торнадо
4	09.45 – 10.00	Агапова Д.В., Завершинский Д.И., Белов С.А., Молевич Н.Е.	Влияние магнитного поля на динамику магнитоакустических волн в солнечной короне
5	10.00 – 10.15	Рящиков Д.С., Завершинский Д.И., Молевич Н.Е.	Влияние теплового дисбаланса на акустико-гравитационные волны в солнечной атмосфере
6	10.15 -10.30	Белов С.А., Рящиков Д.С., Молевич Н.Е.	Распространение нелинейных крутильных альфвеновских волн в однородных магнитных трубках
	10.30 – 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
			Председатель: <u>Мельников В.Ф.</u>
7	11.00 – 11.15	Завершинский Д.И., Молевич Н.Е., Рящиков Д.С., Белов С.А.	Анализ эволюции медленных магнитоакустических волн в горячих корональных петлях и его приложение к диагностике плазмы
8	11.15 -11.30	Куприянова Е.Г., Кальтман Т.И.	Об отклике микроволнового излучения на изгибные осцилляции плазменного слоя

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

9	11.30 -11.45	Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г.	Электрические токи и изгибные колебания корональных петель
10	11.45 – 12.00	Степанов А.В., Зайцев В.В., Куприянова Е.Г.	Особенности джоулевой диссипации в переходном слое солнца и нагрев короны
11	12.00 - 12.15	Алексеева Л.М., Кшевецкий С.П.	Градиентно-Холловская эволюция мелкомасштабных неоднородностей хромосферной плазмы как фактор нагрева солнечной короны
12	12.15 -12.30	Кузнецов А.А., Флейшман Г.Д., Nita G.M., Анфиногентов С.А.	Диагностика механизмов нагрева солнечной короны по наблюдениям Сибирского Радиогелиографа
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	12:30-13:00	Gan Weiqun	ASO-S: the preliminary performance in the orbit
	13:00-13:30	Богачёв С.А., Леденцов Л.С.	Памяти Бориса Всеволодовича Сомова
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: <u>Степанов А.В.</u>			
13	14. 30 - 14.45	Алтынцев А.Т., Глоба М.В., Мешалкина Н.С.	Спокойная корона Солнца: ежедневные изображения на длинах волн 8.8 - 10.7 см
14	14.45 -15.00	Мешалкина Н.С., Алтынцев А.Т.	Тонкая структура как индикатор нетеплового энерговыделения в ярких корональных точках
15	15.00 – 15.15	Богод В.М., Лебедев М.К., Овчинникова Н.Е., Рипак А.М.	Особенности наблюдений тонких спектральных эффектов в дециметровом излучении короны Солнца
16	15.15 – 15.30	Чернов Г.П., Фомичев В.В.	Медленно дрейфующие радио волокна
17	15.30 – 15.45	Соловьев А.А., Киричек Е.А., Королькова О.А.	Новые свойства бессиловых магнитных жгутов
18	15.45 – 16.00	Богачёв С.А., Завершинский Д.И., Белов С.А., Леденцов Л.С.	Измерение энергетического распределения нановспышек малой мощности

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

	16.00 – 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Богачев С.А.</u>			
19	16.30 -16.45	Жданов Д.А., Алтынцев А.Т.	Статистический анализ микровспышек по данным спектрополяриметра 4-8 ГГц
20	16.45 -17.00	Думин Ю.В., Верещагин Ф.В., Сомов Б.В.	Синхронные микровспышки: наблюдательные данные и их интерпретация в рамках топологической модели
21	17.00 – 17.15	Кочаровский Вл.В., Емельянов Н. А., Зайцев В.В.	Синхронная инициация нановспышек и вейбелевская неустойчивость в корональной арке
22	17.15 -17.30	Подладчикова Е.В., Вармут А., Подладчикова Т.В.	Пиковспышки в солнечной короне зарегистрированные на расстоянии 0.5 а.е.
23	17.30 – 17.45	Шарыкин И.Н., Зимовец И.В., Мешалкина Н.С.	Исследование предвестников замкнутой солнечной вспышки X1.8 класса, произошедшей 23 октября 2012 г.
24	17.45 – 18.00	Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., Нечаева А.Б., Низамов Б.А.	Квазипериодическое предвспышечное энерговыделение как результат магнитного пересоединения вследствие относительного движения солнечных пятен
	18.00 – 18.30	Постерная сессия	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

Постеры

1. Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А.
Микроволновое излучение солнечных активных областей перед вспышками
2. Борисенко А.В., Подгорный И.М., Подгорный А.И.
Источник первой вспышки над ао 10365 по результатам МГД моделирования и данным радиогелиографа Nobeyama
3. Naga Varun Y.
A fundamental flaw in the standard theory of linear magnetoacoustic waves in the homogenous magnetic flux tubes and its resolution
4. Нечаева А.Б., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н.
Эволюция магнитного поля и вертикального электрического тока в активных областях Солнца от начала их зарождения: до и во время мощных вспышек
5. Никитин И.С., Обридко В.Н., Харшиладзе А.Ф., Хабарова О.В., Блуменау М.И., Воробьев Д.Л.
Солнечные магнитные торнадо и нейтральные линии магнитного поля Солнца
6. Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г.
Филаментация электрических токов и МГД устойчивость
7. Якунина Г.В.
Эволюция солнечных корональных струй

ВРАЩЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Андреева О.А., Малащук В.М.

КрАО РАН, Научный, Крым, Россия, olga@craocrimea.ru

В работе обсуждаются результаты статистического исследования характеристик вращения долгоживущей корональной дыры (КД). Работа основана на анализе изображений полного диска Солнца, полученных SDO/AIA в линии Fe XII 193Å. КД наблюдалась с июня 2015 по март 2017г. – 24 кэррингтоновских оборота (CR). Рассматривались 3 этапа эволюции КД (возникновение и рост – CR(2165-2168); максимум развития – CR(2172-2179) и CR(2181-2185) – уменьшение с последующим исчезновением КД).

В этом исследовании мы решали две задачи:

- Анализ смещения центра КД на широте 40° в течение трех последовательных дней для каждого оборота.

- Анализ изменения долготы центра КД (L0_КД) со временем и сравнение с долготой диска Солнца (L0). Данные за три дня в обороте для обоих типов данных.

Установлено, что средняя скорость вращения долгоживущей КД на широте 40° близка к стандартной скорости в начальной стадии (12,3°/сутки) и в стадии максимального развития КД (12,4°/сутки); меньше – в конечной фазе развития КД (11,7°/сутки). Стандартная скорость вращения диска Солнца в короне на широте 40° составляет, примерно, 12°/сутки [1]. По более новым данным 2006 года [2] 12,6°/сутки.

Согласно современным теориям, вращение солнечной короны отражает вращение подфотосферных слоев. Более высокие слои короны отражают вращение более глубоких слоев Солнца. Результаты, полученные в нашей работе, показывают, что скорость вращения КД, в максимальной фазе ее развития, больше скорости вращения диска Солнца. Возможно, это свидетельствует о том, что КД могут быть связаны с глубокими солнечными слоями через конфигурацию глобального магнитного поля и что источник образования КД находится более глубоко, чем источник фонового поля.

1. Аллен, К.У. *Астрофизические величины*. //Справочник. Перевод с англ. Х.Ф. Халиуллина; Под ред. Д.Я. Мартынова. - Перераб. и доп. изд. - Москва : Мир, 1977. - 446 с

2. Бадалян О. Г., Обридко В. Н., Сикора Ю.// *Астрономический журнал*. 2006, Т. 83, № 4, С. 352.

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МИНИМУМЫ 23 И 24 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Борисенко А.В.¹, Богачев С.А.²

¹*Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, sunw77@mail.ru*

²*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия*

С целью изучения влияния полярных корональных дыр (КД) на скорость солнечного ветра (СВ) у орбиты Земли были рассмотрены периоды минимумов солнечной активности на фазе роста и спада 22 летнего солнечного цикла (магнитный цикл Хейла). Для проведения такого исследования необходимы условия глубокого минимума, когда весной ближе всего наклон южного полюса Солнца и осенью, ближе всего наклон северного полюса Солнца к Земле в периоды отсутствия других корональных дыр. Полученные высокие коэффициенты корреляции (0.8-0.9) между площадью одиночной полярной КД и усредненной скоростью СВ на земной орбите на большом временном интервале с высоким временным разрешением (24 измерения в сутки) показали, что магнитные потоки полярных КД также могут оказывать существенное влияние на скорость СВ у орбиты Земли, но слабее рекуррентных короткоживущих экваториальных КД. Поскольку скорость СВ в исследованные периоды не превышала 450 км/с геомагнитных бурь на Земле не наблюдалось. Полученные результаты исследований таких периодов 'спокойного Солнца' (1996-2020) гг подтвердили результаты многих авторов, в том числе первых исследователей корональных дыр, о возможном влиянии магнитных потоков полярных КД на Землю в минимумы. В большинстве случаев получена квазилинейная зависимость между среднезапаздывающим СВ и площадью полярной КД. Наблюдаемое у орбиты Земли замедление запаздывающего СВ с ростом площади полярной КД (низкие и отрицательные корреляции также присутствовали) можно попытаться объяснить влиянием более сильных открытых магнитных потоков с противоположного полюса, который будет сжимать полярную КД с более слабым магнитным полем. По видимому такие условия возможны в периоды глубокого минимума, когда открытые магнитные потоки с противоположных полюсов могут оказывать влияние друг на друга, поскольку в такие периоды глубокого минимума другие магнитные потоки на экваторе и низких широтах, в том числе от активных областей практически не препятствуют друг другу.

РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ТОРНАДО

Блуменау М.И.^{1,2}, Воробьев Д. Л.^{1,2}, Хабарова О.В.¹, Фридман М.Л.^{1,2}, Никитин И.С.^{1,2}

¹ ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия, miblumenau@edu.hse.ru

² НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

В прошлом году нами был предложен новый метод идентификации солнечных магнитных торнадо по изображениям SDO/AIA в нескольких длинах волн. Магнитные торнадо определяются как магнитоплазменные образования с вращающимся веществом и магнитным полем в короне и хромосфере Солнца. Из-за особенностей динамики данные структуры сложны для моделирования и теоретического описания [Wedemeyer-Böhm et al, 2012, Nature]. Лишь небольшое количество работ посвящено их исследованию, выделение торнадо происходит на глаз, нет общей базы идентифицированных торнадо. Всё это тормозит развитие их изучения.

Прошлая версия нашего метода базировалась на хорошо зарекомендовавших себя в сфере машинного обучения алгоритмах: сверточной нейронной сети, градиентном бустинге и рекуррентных блоках. Текущая версия усовершенствована применением новых алгоритмов, представленных в семействах нейронных сетей EfficientNet [Tan et al, 2019, ICML], MobileNetV3 [Howard et al, 2019, ICCV], EfficientNetV2 [Tan et al, 2021, ICML].

В докладе будет представлено сравнение различных алгоритмов, обзор результатов идентификации торнадо и статистический анализ их характеристик.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДИНАМИКУ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Агапова Д.В., Завершинский Д.И., Белов С.А., Молевич Н.Е.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, agapovadaria2019@gmail.com

Тепловая неустойчивость рассматривается как один из основных механизмов, ответственных за формирование различных пространственно-временных структур в солнечной атмосфере, которая представляет собой крайне неоднородную и термически активную плазму. Она реализуется посредством неадиабатических процессов, таких как нагрев и радиационное охлаждение, которые уравнивают друг друга в стационарных условиях и зависят от термодинамических параметров плазмы. В связи с этим, возмущение установившихся параметров среды может привести к дисбалансу между нагревом и охлаждением, вызывая положительную или отрицательную обратную связь между возмущением и средой. В частности, подобная обратная связь приводит к усилению или затуханию магнитоакустических (МА) волн.

Проведенные ранее исследования динамики МА волн в плазменном слое с тепловым дисбалансом были выполнены на основе предположения, что мощности нагрева и охлаждения определяются только локальной плотностью и температурой плазмы. В настоящей работе, мы расширили данные исследования, рассматривая зависимость функции нагрева не только от плотности и температуры плазмы, но и напряженности магнитного поля.

В ходе проведенного исследования, на основе предположения о сильном магнитном структурировании, были получены дисперсионные соотношения для осесимметричных и изгибных МА волн. Данные уравнения были решены численно для характерных параметров петель с температурой 1 МК и напряженностью магнитного поля 10 Гс и 50 Гс. Из анализа численного решения установлено, что фазовая скорость медленных волн подвержена существенному влиянию не только дисперсии из-за конечной ширины плазменного слоя, но и дисперсии, определяемой тепловым дисбалансом. При этом основное влияние теплового дисбаланса приходится на длинноволновую часть спектра. Так, в частности, длинноволновым пределом является не классическое выражение для адиабатической трубочной скорости, а модифицированное выражение, учитывающее влияние мощностей нагрева и охлаждения плазмы.

Для магнитного поля с напряженностью 10 Гс, модифицированная трубочная скорость имеет разные значения для различных видов функциональной зависимости нагрева, от величины магнитного поля. Однако для более сильных полей, например для 50 Гс, разница в значениях трубочной скорости исчезает.

В то же время, тепловой дисбаланс не оказывает существенного влияния на фазовую скорость быстрых волн.

Как и прежде, медленные МА волн подвержены более сильному затуханию, чем быстрые, за счет явления теплового дисбаланса. Так, наибольшее затухание медленных волн прослеживается для магнитного поля с напряженностью 50 Гс вне зависимости от сценария нагрева. Затухание быстрых волн больше для случая меньшего по мощности внутреннего магнитного поля. При этом, время затухания уменьшается с увеличением мощности магнитного поля, что подчеркивает чувствительность быстрых МА волн к зависимости сценария нагрева от магнитного поля.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ДИСБАЛАНСА НА АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Рящиков Д.С., Завершинский Д.И., Молевич Н.Е.

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

Рассмотрено совместное влияние гравитации и теплового дисбаланса на динамику акустико-гравитационных волн в солнечной атмосфере. Показано, что в случае процессов нагрева и охлаждения, заданных в виде степенных функций, стационарный профиль температуры линейно меняется с высотой. Оценки отношения характерной длины, связанной с тепловыми процессами, к гравитационной высоте показывают преобладающее влияние тепловых процессов в диапазоне температур до 2 МК и сравнимое влияние тепловых процессов и гравитационной стратификации на динамику акустических гравитационных волн в диапазоне от 2 до 10 МК. Исследование дисперсионных свойств акустико-гравитационных волн в изотермической атмосфере показало, что в режимах с преобладающим влиянием тепловых процессов частота акустической отсечки уменьшается до $\sqrt{\gamma}$ раз. При этом максимальная частота гравитационной моды (аналог частоты Брента – Вайсяля в среде без неадиабатического нагрева и охлаждения) уменьшается с ростом мощности тепловых процессов, и тогда гравитационная мода может стать нераспространяющейся.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ТРУБКАХ

Белов С.А., Рящиков Д.С., Молевич Н.Е.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru

Альфвеновские волны из-за своей несжимаемости рассматриваются в качестве возможного переносчика энергии в солнечную корону из нижних слоев солнечной атмосферы. Однако данная несжимаемость в линейном пределе не позволяет напрямую детектировать альфвеновские волны так, как это происходит с магнитоакустическими волнами. Более того, крутильные альфвеновские волны являются неколлективными – каждая магнитная цилиндрическая поверхность эволюционирует независимо, в результате чего может возбуждаться не весь объем волновода. Тем не менее, в нелинейном режиме альфвеновские волны способны индуцировать сжимаемые возмущения плазмы, которые могут выступить в качестве потенциальной наблюдательной сигнатуры альфвеновских волн, однако вопрос о коллективности/неколлективности данных возмущений остается нерешенным.

В данной работе показано, что при распространении нелинейных крутильных альфвеновских волн в однородной магнитной трубке происходит генерация сжимаемых возмущений плазмы. При этом индуцированное возмущение плотности не зависит от радиальной координаты, а его значение определяется условиями непрерывности радиальной скорости и полного давления на границе магнитной трубки.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ГОРЯЧИХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ

Завершинский Д.И., Молевич Н.Е., Рящиков Д.С., Белов С.А.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, dimanzav@mail.ru

В настоящее время магнитоакустические колебания и волны регулярно наблюдаются в различных областях солнечной короны. Это позволяет использовать их как средство диагностики параметров плазмы и происходящих в ней процессов. Диагностика, в свою очередь, требует достаточно надежной МГД-модели для описания эволюции волн.

Эффективным подходом является использование для этой цели эволюционных волновых уравнений и/или дисперсионных уравнений. Однако дисперсионные соотношения позволяют получить лишь общее описание спектральных характеристик волн. При этом точное аналитическое описание эволюции произвольного начального возмущения отсутствует. Без последнего задача о развитии начального возмущения может быть решена только численно.

В рамках текущего исследования авторы постарались внести свой вклад в решение проблемы отсутствия точных аналитических моделей. А именно, авторами решалась задача о нахождении аналитического описания линейной эволюции произвольного начального газодинамического возмущения в корональной петле. Рассмотрение волн проводилось в рамках приближения бесконечно сильного магнитного поля. Также полагалось, что периоды исследуемых волн являются достаточно короткими, что влиянием эффекта теплового дисбаланса нагрева и радиационного охлаждения можно пренебречь. Таким образом, основным неадиабатическим процессом, влияющим на динамику волны, являлась теплопроводность.

Точное решение эволюционного уравнения для возмущений плотности, давления, температуры и скорости было получено с помощью метода разделения переменных (метод Фурье). Благодаря данному методу появляется возможность не только проследить эволюцию полного решения, но также и эволюцию его составных частей: одной энтропийной/тепловой волны и двух медленных магнитоакустических волн. Более того, также имеется возможность проследить эволюцию произвольной гармоники начального возмущения, независимо от того, принадлежит ли она энтропийной или медленной моде.

На основе полученных решений авторами также были получены выражения для фазовых сдвигов и амплитуд различных параметров плазмы. Показано, что на эти характеристики не влияет форма и тип начального возмущения, что существенно отличается от случая, когда периоды волн таковы, что основным источником дисперсии для них являются процессы нагрева и охлаждения.

Полученное решение и его следствия использовались для оценок параметров корональной плазмы, а также для исследования вопроса о распределении энергии начального возмущения между бегущими медленными волнами, и энтропийной волной, которая не распространяется.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, 0023-2019-0003).

ОБ ОТКЛИКЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ИЗГИБНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ

Кальтман Т.И.¹, Куприянова Е.Г.²

¹ СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

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

Гиротронное (ГС) излучение ускоренных электронов, находящихся в плазменных структурах солнечной короны, очень чувствительно к таким параметрам, как величина и направление магнитного поля, плотность плазмы, спектральный индекс и т. д. Поэтому осцилляции плазменных структур приводят к вариациям потока микроволнового излучения. В нашей работе мы исследуем модуляции интенсивности микроволнового излучения, вызванные стоячей линейной изгибающей (kink) быстрой магнитозвуковой волной в плазменном слое. Невозмущенный слой вытянут вдоль прямолинейного однородного магнитного поля. Плотность плазмы неоднородна в перпендикулярном направлении и описывается симметричным профилем Эпштейна. Ускоренные электроны заполняют центральную область слоя. Параметр плазмы β принят равным нулю, что является хорошим приближением для активных областей солнечной короны. Данной моделью могут быть представлены, например, такие структуры, как токовый слой в активной области в короне Солнца или стример. Были проведены моделирование временных профилей микроволнового излучения в оптически тонкой части спектра GS, и были проанализированы их типичные спектры Фурье. Показано, что микроволновый отклик на линейную изгибающую магнитогидродинамическую (МГД) волну является нелинейным. Найдено, что временные профили микроволнового излучения в узле МГД волны осциллируют с той же частотой, что и частота возмущающей изгибающей МГД волны, в то время как частота микроволновых колебаний в антиузле в два раза выше частоты изгибающей волны. При постепенном перемещении от узла к антиузлу происходит постепенное преобразование одного типа временных профилей в другой. Этот результат не зависит от ширины ГС-излучающей области внутри слоя. Анализируется диагностический потенциал найденного эффекта для диагностики изгибных колебаний, в частности, их высоких гармоник, в микроволновых наблюдениях и интерпретации микроволновых квазипериодических пульсаций в солнечных и звездных вспышках.

Работа выполнена в рамках государственных заданий САО РАН № 121051000017-0 и ГАО РАН № 1021032422589-5.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ И ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ

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

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

За активность Солнца ответственна свободная энергия магнитного поля, которая определяется электрическими токами, протекающему в его атмосфере. Если измерение электрических токов в фотосфере активных областей проводятся уже на протяжении около 60 лет, то их изучение в солнечной короне из-за высокой температуры плазмы до сих пор сталкивается с серьезными трудностями. В связи с чем возникает необходимость разработки новых методов диагностики электрических токов в корональных петлях. В представленной работе предпринята попытка связать параметры изгибных колебаний скрученных петель, моделируемых в виде прямых магнитных жгутов, с продольными электрическими токами.

На основе вариационного принципа в приближении тонкой магнитной трубки проведен анализ собственных мод изгибных колебаний токового жгута с некомпенсированным электрическим током в условиях солнечной короны. Получено дисперсионное уравнение для собственных изгибных мод. Исследованы особенности дисперсионных кривых. Обсуждается возможность применения методов корональной сейсмологии для диагностики электрических токов магнитных петель в короне Солнца.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (No. 22-12-0030).

ОСОБЕННОСТИ ДЖОУЛЕВОЙ ДИССИПАЦИИ В ПЕРЕХОДНОМ СЛОЕ СОЛНЦА И НАГРЕВ КОРОНЫ

Степанов А.В., Зайцев В.В., Куприянова Е.Г.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, astep44@mail.ru

Проблема нагрева короны - одна из нерешенных проблем физики Солнца. Для нагрева необходимо компенсировать радиационные потери и потери из-за теплопроводности, составляющие величину $\sim 10^{28}$ эрг/с. Нами обращено внимание на максимальную величину джоулевой диссипации в переходном слое солнечной атмосферы, вызванной ростом сопротивления Каулинга в этой области (<https://pos.sissa.it/425/>). С другой стороны, именно в переходной области происходит основной нагрев спикул II типа - кандидатов на нагрев короны (<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1197738>). В докладе рассчитан нагрев токонесущих магнитных трубок - спикул II типа, при джоулевой диссипации в переходном слое. Показано, что для нагрева спикул величина электрического тока в спикулах должна превышать $I > 3 \times 10^9$ А, а число спикул II типа для нагрева короны должно быть не менее 10^4 , что составляет около 1% от количества спикул, одновременно наблюдающихся на Солнце.

ГРАДИЕНТНО-ХОЛЛОВСКАЯ ЭВЛЮЦИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ХРОМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ КАК ФАКТОР НАГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Алексеева Л.М.¹, Кшевецкий С.П.²

¹НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, l.m.alekseeva@yandex.ru; ²БФУ, г. Калининград, Россия

В хромосфере Солнца постоянно присутствует множество разнообразных крайне динамичных мелкомасштабных образований. Мы исследуем их влияние на крупномасштабные свойства хромосферы, считая электронно-протонную плазму верхней хромосферы столкновительной и, простоты ради, изотермической. Для ее описания используется классическая полностью самосогласованная система нелинейных МГД уравнений, где учтены сила тяжести, конечная проводимость и эффект Холла [1, 2]. Поскольку, по современным оценкам, примерно 95 % магнитного потока, поступающего через фотосферу в хромосферу, не доходит до короны, в промежуточной области апексных частей магнитных силовых линий верхней хромосферы поле в основном слабое ($\beta > 1$). Предположение, что его линии представляют собою горизонтальные параллельные прямые и все физические величины неизменны вдоль них, позволяет обратиться к 2D версии указанной выше МГД системы. (Очевидно, решения 2D системы не будут иметь отношения к процессу пересоединения, поскольку он делает скорость вещества неодинаковой вдоль силовой линии.) Магнитное поле в МГД меняется по трем причинам: из-за сноса («вмороженности»), омической диссипации и холловского воздействия. Мы хорошо представляем себе, как действуют по-отдельности первые два фактора, но действие третьего фактора самого по себе еще до сих пор не выяснено. В 2D случае при слабом поле сразу видно, что холловское воздействие не равно нулю там, где градиент магнитного давления оказывается не коллинеарным градиенту бальмановского распределения плотности плазмы, т.е. практически везде. Чтобы определить, насколько эта «градиентно-холловская эволюция» (ГХЭ) магнитного поля значима по сравнению с действием двух других факторов, сделаем еще на два шага. *Первый.* Представим себе, что мы наблюдаем одну ГХЭ. Если профиль мелкомасштабной неоднородности в начальный момент гораздо резче изменялся по горизонтали, чем по вертикали, 2D система уравнений позволяет найти решение аналитически. Оказывается, ГХЭ весьма специфически меняет горизонтальный профиль неоднородности, укручая его в тех частях неоднородности, которые соответствуют восходящему электрическому току (иначе говоря, увеличивая здесь плотность тока), и делая профиль более пологим в локациях нисходящего тока. *Второй.* Располагая аналитическим решением, мы можем определить область параметров, где ГХЭ с усилением разреженности становится более значимой, чем вмороженность и диссипация. Оказывается, критическая (минимальная) высота, где это достигается, соответствует основанию короны (табличным значениям температуры и концентрации частиц этого слоя плазмы). Там ГХЭ совершают магнитные неоднородности с горизонтальным размером $\approx 30 \times \beta^{1/4}$ м. В процессе ГХЭ их внутренние локации с восходящим током за $\approx 5 \times \beta^{1/2}$ мин уменьшают свой размер настолько, что попадают под доминирование омической диссипации, полностью превращая свою энергию в тепло. Диапазон таких конфигураций быстро расширяется с высотой, а нарастающая теплопроводность отводит тепло еще выше. Таким образом, сила тяжести, создающая разреженность плазмы (рождая и бальмановский градиент плотности плазмы, и усиление эффекта Холла на высоте), через механизм ГХЭ хромосферных неоднородностей греет корону, четко ограниченную снизу.

ДИАГНОСТИКА МЕХАНИЗМОВ НАГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

Кузнецов А.А.¹, Флейшман Г.Д.², Nita G.M.², Анфиногентов С.А.¹

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

²NJIT, New Jersey, USA

Проблема нагрева солнечной короны остаётся одним из наиболее актуальных вопросов солнечной физики. Для идентификации физического механизма (или механизмов), ответственных за нагрев корональной плазмы до миллионов градусов, прежде всего необходимо выяснить, как процессы нагрева связаны с локальными и глобальными характеристиками плазмы и магнитного поля. Одним из наиболее перспективных средств для исследования процессов в солнечной короне является тепловое гирорезонансное излучение в микроволновом диапазоне, которое генерируется в мощных магнитных полях активных областей и является чувствительным к температуре и плотности плазмы и к напряжённости и ориентации магнитного поля.

Мы представляем результаты анализа многоволновых наблюдений с высоким пространственным разрешением, выполненных новейшим радиоастрономическим инструментом – Сибирским Радиогелиографом (в режиме тестирования). Рассмотрены две крупные биполярные активные области: AR 12924 (наблюдалась 9 января 2022 г. на 16 частотах в диапазоне 6-12 ГГц) и AR 13007 (наблюдалась 15 мая 2022 г. на 32 частотах в диапазоне 3-12 ГГц). Было проведено сравнение наблюдаемых микроволновых изображений с результатами моделирования, полученными с помощью программного пакета GX Simulator. Распределения температуры и плотности плазмы в короне для различных режимов нагрева находились на основе гидродинамической модели EBTEL; использовалась параметрическая модель нагрева, в которой интенсивность нагрева Q вдоль заданной магнитной силовой линии имеет вид $Q \propto B^a L^{-b}$, где L – длина силовой линии, B – среднее магнитное поле вдоль этой линии, и индексы a и b различны для различных физических механизмов нагрева.

Целью моделирования было определение параметров модели нагрева (a и b), которые обеспечивают наилучшее согласие модельных изображений с наблюдаемыми. Показано, что наблюдения на одной частоте не позволяют однозначно решить эту задачу: различные комбинации параметров могут давать сравнимые (по степени согласия модели с наблюдениями) результаты. В то же время, использование многоволновых наблюдений позволяет существенно ограничить возможный диапазон параметров модели нагрева короны: для рассмотренных активных областей было найдено $a \approx 0$ и $b \approx 2.5$. Мы сравниваем полученные результаты с предсказаниями существующих теоретических моделей нагрева корональной плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 21-12-00195.

1. Брагинский С.И. // Вопросы теории плазмы 1963. В. 1. С. 183.
2. Алексеева Л.М., Кшевецкий С.П. // Геомагн. и аэроном. 2022. Т. 62. В. 4. С. 411.

СПОКОЙНАЯ КОРОНА СОЛНЦА: ЕЖЕДНЕВНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ДЛИНАХ ВОЛН 8.8 — 10.7 СМ

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

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, altyntsev@fiszf.irk.ru

Одним из основных индексов солнечной активности, используемых в качестве входных параметров в моделях ионосферы Земли является интегральный микроволновый поток Солнца на частоте 2.8 ГГц, так называемый индекс F10.7. В докладе обсуждаются результаты наблюдений диска Солнца, полученные во время тестовых испытаний низкочастотной решетки диапазона 3 — 6 ГГц Сибирского Радио Гелиографа. Рассматривается связь величин полных потоков радиоизлучения с изменениями структуры источников на диске Солнца в течение интервала длительностью 50 дней. В период ежедневных наблюдений с 1 сентября по 20 октября 2021 года величина интегрального потока на частоте 2.8 ГГц менялась до 1.5 раз. Оцениваются изменения относительного вклада в интегральный поток тормозного излучения из прилибмовых уярчений и факельных площадок, магнитотормозного излучения в магнитных полях активных областей. Для интерпретации привлекается моделирование радиокарт яркостной температуры по расчетам дифференциальной меры эмиссии по данным наблюдений EUV излучения на телескопе AIA/SDO. Полученные результаты сравниваются с известными примерами измерений яркостных температур на длинах волн около 10 см. Полученные результаты могут быть использованы для коррекции прокси-индекса солнечной активности F10.7 с целью выделения тормозной составляющей и разработки методов его краткосрочного прогноза.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА КАК ИНДИКАТОР НЕТЕПЛОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ЯРКИХ КОРОНАЛЬНЫХ ТОЧКАХ

Мешалкина Н.С.¹, Алтынцев А.Т.¹

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

Особый интерес к наблюдениям источников субсекундных импульсов (ССИ) в сантиметровом диапазоне вызывает их близость к местам первичного всплещного энерговыделения, что свидетельствует о высоком диагностическом потенциале. Новая стадия в исследовании всплесков с тонкой временной структурой началась при появлении одновременных наблюдений пространственного распределения яркостной температуры и динамических спектров радио всплесков с миллисекундным разрешением.

За всю историю наблюдений тонкой структуры Сибирским Солнечным Радио телескопом с 2000 по 2013 годы мы обнаружили третье (после 30 марта 2001 и 14 апреля 2002 года) событие 6 сентября 2012 с тонкой временной структурой, записанное одновременно интерферометром ССРТ на двух частотах, что дает нам возможность оценки параметров нетепловых электронов и диагностики механизма генерации ССИ. Отличительной особенностью тонкой структуры является то, что она наблюдалась на протяжении всей вспышки GOES класса C3.2, SOL2012-09-06T02:32, так как существовали благоприятные условия выхода микроволнового излучения благодаря повышенной плотности в компактных областях

В этой работе мы использовали большой набор одновременных наблюдений, полученных от инструментов: ССРТ, ВВМС, RSTN, Нобеяма радиогелиограф и поляриметры, телескопы жесткого рентгеновского излучения RHESSEI, FERMI, ультрафиолетовый телескоп AIA/SDO.

Группы ССИ были разделены по пространству и наблюдались в компактных областях повышенной яркости, видимых в ультрафиолете, в так называемых ярких корональных точках, размерами порядка 3 угл. сек., и повышенной плотности, примерно на порядок выше фоновой. Рентгеновские данные показали корреляцию с микроволнами только для двух основных всплесков и не обнаружили тонкую структуру.

Показано, что микроволновое излучение с узкой спектральной полосой имеет когерентную природу и генерируется на частоте около удвоенной плазменной частоты электронами с энергиями нескольких десятков килоэлектрон-вольт. Результат свидетельствует, что наблюдения микроволнового излучения обладают высоким диагностическим потенциалом обнаружения ускорительных процессов в относительно слабых вспышках.

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ ТОНКИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ИЗЛУЧЕНИИ КОРОНЫ СОЛНЦА

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

СПб Ф САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, vbog_spb@mail.ru

Наличие непрерывных процессов охлаждения и нагрева является важными условиями, определяющие существование высокотемпературной солнечной короны. Однако их изучение в оптических диапазонах ограничено низкой плотностью в короне. Радио диапазон обладает более высокой чувствительностью, и диапазон 1-3 ГГц оптимален для регистрации весьма слабых структур зарождающей активности. С другой стороны, радиоастрономический диапазон тоже имеет сложности, как по пространственному разрешению, так и по ограничению динамического диапазона ввиду высокой температуры короны Солнца.

Наблюдения показывают, что использование инструментов с большой эффективной площадью позволяет преодолеть основную проблему, связанную с влиянием мощного излучения спокойного Солнца на ухудшение шумов аппаратуры.

Между тем, существует ряд принципиальных объектов важные для изучения природы солнечной короны. Например, исследования рекомбинационных линий, которые являются принципиальным методом изучения физических условий в космической плазме. Попытки обнаружения рекомбинационных линий в радиоизлучении солнечной короны предпринимались неоднократно [1, 2, 3]. Делались попытки обнаружения циклотронных линий по наблюдениям круговой поляризации в радиодиапазоне [4]. Привлечение для поиска линий в радиоастрономических наблюдениях имеет сложности, как по частотному диапазону ММ, СМ или ДМ, и пространственному разрешению, так и по ограничению динамического диапазона ввиду высокой температуры короны Солнца.

В связи с проведением существенных изменений в идеологии радиоспектроскопии [5] начата работа по созданию серии широкодиапазонных спектральных комплексов с перекрытием несколько октав и высоким частотным разрешением. Здесь мы представляем результаты первых серий наблюдений на комплексе в диапазоне 1-3 ГГц для поиска и изучения квазипериодических пульсаций в солнечной короне, которые используются как инструмент для изучения важных спектральных параметров в структурах активных областей. Методика обработки многоканальных данных позволяет реализовывать мульти объектный режим, т.е. выделять слабые сигналы в короне Солнца на фоне мощных фоновых сигналов.

Попутным результатом этих наблюдений явились регистрации узкополосного поглощения в частотной полосе 1520 МГц -1630 МГц вблизи известной линии поглощения ОН (1612 МГц-1720 МГц). Обсуждаются возможные пути объяснения природы такого поглощения в короне Солнца.

Работа выполняется в рамках Государственного задания № 0037-2021-0010 .

1. А. Ф. Дравских, Известия ГАО **164**, 128 (1960).
2. В.К. Херсонский, Д.А.Варшалович, Астрон. журн, **57**, с. 621-623. 1980
3. А. Ф. Дравских, Н. Г. Петерова, Н. А. Топчило, Астрон. журн. **96**, 246 (2019)
4. V.M. Bogod, V.I. Garaimov, V.V. Zheleznyakov, et al., Astron. Zh. 2000, V.77, N1, P.1-8;
5. В.М. Богод, М.К.Лебедев и др., Космические исследования, 2023, в печати

МЕДЛЕННО ДРЕЙФУЮЩИЕ РАДИО ВОЛОКНА

Г.П. Чернов*, В.В. Фомичев

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

* e-mail: gchernov@izmiran.ru

e-mail: fomichev@izmiran.ru

Тонкая структура континуального излучения солнечных радиовсплесков IV типа богата большим разнообразием тонкой структуры (полосы зебра-структуры, радио волокна (fiber bursts), спайки, пульсации и т.д.). Но до сих пор остаются без внимания иногда появляющиеся одиночные волокна в метровом и дециметровом диапазонах с небольшим частотным дрейфом. В данной работе приводятся примеры динамических спектров таких радио волокон. Одиночные волокна наблюдаются в основном в дециметровом диапазоне, хотя есть примеры, как в метровом, так и в микроволновом диапазонах. Они обнаруживают ряд признаков классических волокон (fiber bursts), объясняющихся взаимодействием вистлеров с плазменными волнами. В работе анализируются условия реализации и эффективность такого механизма в солнечной короне. Приведены оценки уровня низкочастотной турбулентности типа вистлеров и напряженности магнитного поля в источниках радиоизлучения. В рамках рассматриваемого механизма частотный дрейф излучения определяется групповой скоростью распространения вистлеров, т.е можно записать

$$(L_N / c) \cdot df / dt = (f_H \cdot f_w)^{1/2} (1 - f_w / f_H)^{3/2}, \quad / \quad (1)$$

где f_w – частота вистлеров, f_H – гирочастота электронов, $L_N = N (dN/dr)^{-1}$ – масштаб неоднородности электронной концентрации в солнечной короне. Так для модели распределения электронной плотности с высотой 2 Ньюкирка по данным о частотном дрейфе (Elgarøy, 1982; Chernov, 2011) для источника на частоте $f = 300$ МГц и $df / dt = 7.4$ МГц/с получим оценку напряженности магнитного поля $H \approx 5$ Гс, а на частоте $f = 150$ МГц и $df / dt = 3.1$ МГц/с $H \approx 1.4$ Гс.

Работа выполнена при поддержке Проекта Минобрнауки КП19-270.

Chernov, G.P. 2011, *Fine Structure of Solar Radio Bursts*, Berlin,

Heidelberg: Springer, 282 pp.

Elgarøy, Ø.: 1982, *Intermediate drift bursts*, Report N 53, ITA, Univ. Oslo.

НОВЫЕ СВОЙСТВА БЕССИЛОВЫХ МАГНИТНЫХ ЖГУТОВ

Соловьев А.А., Киричек Е.А., Королькова О.А.

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

Рассматривается прямой экранированный магнитный жгут, как часть слабо искривленной магнитной петли, все параметры которого зависят от одной переменной – расстояния r от оси симметрии жгута. Когда при выходе жгута в разреженную солнечную атмосферу внешнее давление, удерживающее жгут от бокового расширения, падает до некоторого критического значения, продольное магнитное поле жгута обращается в ноль на той магнитной поверхности, где меняет знак продольный электрический ток. При этом азимутальный ток на этой поверхности неограниченно растет. Это приводит к тому, что дрейфовая скорость электронов в данной области превышает скорость ионного звука и обеспечивает возбуждение плазменной ионно-звуковой неустойчивости, как триггера вспышечного энерговыделения. Согласно теории Арцимовича, Сагдеева (Физика плазмы для физиков, 1979) проводимость плазмы падает при этом на 6-7 порядков. Быстрая диссипация магнитной энергии на аномально низком сопротивлении ведет к генерации индуктивного электрического поля, значительно превосходящего дрейсеровский предел, что объясняет эффективное ускорение частиц в области быстрой диссипации магнитного поля. Полученные в рамках теоретической модели результаты хорошо соответствуют данным группы Флейшмана Г.Д. (Science,2020; Nature,2022) по исследованиям микроволнового радиоизлучения солнечной вспышки в короне.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОВСПЫШЕК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Богачёв С.А., Завершинский Д.И., Белов С.А., Леденцов Л.С.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com

Вопрос о наличии на Солнце вспышек очень малых энергий в диапазоне ниже 10^{23} эрг всё ещё не имеет однозначного ответа. Современные наблюдения, осуществляемые с помощью телескопов AIA, не позволяют уверенно выделять события в этом диапазоне, так как их амплитуда оказывается сравнимой с амплитудой фотонного шума. В то же время наличие или отсутствие таких событий имеет существенное значение для проблемы нагрева короны, так как полной энергий нановспышек в исследованной области выше 10^{23} эрг не хватает для полной компенсации потерь короны на излучение.

В настоящей работе мы исследовали возможность статистического выделения малых событий (нановспышек) из фотонного шума на изображениях SDO/AIA в линии 171 Å. Мы исходили из того, что распределение нановспышек, согласно исследованиям иных авторов, имеет степенную форму и, по этой причине, начиная с какого-то порога, должно доминировать над распределением шума.

С указанной целью мы изучили два фрагмента спокойного Солнца, наблюдавшиеся SDO/AIA в минимуме солнечной активности в мае 2019 года. В обоих случаях мы, действительно, обнаружили расхождение между теоретическим распределением для фотонного шума и фактическим распределением сигнала. Разница между распределениями имеет степенную форму, то есть согласуется с ожидаемым распределением солнечных вспышек малых энергий. Мы разработали метод калибровки спектра путем сравнения его с распределениями нановспышек, полученных иными авторами.

Результаты исследования предварительно показывают, что вклад вспышек малых энергий можно проследить как минимум до энергий порядка 10^{22} эрг, что примерно на порядок величины ниже, чем порог, до которого нановспышки обнаруживаются методами, основанными на поиске отдельных событий. В области энергий ниже 10^{22} эрг происходит завал спектра, говорящий о том, что либо при таких энергиях число нановспышек начинает уменьшаться, либо точности метода становится недостаточно.

Полный поток энергии нановспышек в области от 10^{22} эрг до 10^{26} эрг, согласно нашим данным, составляет $P \approx 2 \times 10^4$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Отметим, что это всё еще недостаточно для компенсации радиационных потерь солнечной короны, составляющих 3×10^5 эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Также, согласно нашим результатам, наклон спектра малых вспышек в области энергий от 10^{22} эрг до 10^{23} эрг не изменяется и совпадает с наклоном спектра в области от 10^{23} эрг до 10^{26} эрг. Мы считаем этот факт существенным для ведущейся дискуссии о сохранении формы спектра вспышек в области низких энергий или формировании здесь излома.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-22-00879).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИКРОВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА 4-8 ГГц.

Жданов Д.А., Алтынцев А.Т.

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

Радиоизлучение является источником уникальной информации о структуре и динамике солнечной атмосферы на высотах выше температурного минимума. Особое внимание заслуживают спектральные и поляризационные характеристики микроволнового излучения, которые позволяют сделать оценку энергетическим характеристикам излучающих электронов и величинам магнитного поля в источниках методами недоступными для наблюдений в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах.

Радионаблюдения слабых транзитных событий являются одним из современных перспективных методов исследования нетепловых процессов и энерговыделения в активных областях на Солнце [1]. Развитие инструментальной базы позволяет вести радионаблюдения широкого класса слабых транзитных корональных явлений, недоступных ранее для анализа, таких как квазистационарные уярчения и слабые вспышки рентгеновского класса В и ниже [2]. Наблюдение слабых событий позволяет разделять и локализовать источники тепловой и нетепловой компоненты излучения, разделение которых в сильных солнечных вспышках затруднено, либо не возможно. Кроме этого, в природе, число слабых событий значительно превышает число экстремальных событий, что сказывается на диагностическом статистически значимом результате анализа.

В 2021 году на новом многоволновом Сибирском Радио Гелиографе (СРГ) с привлечением спектральных данных Спектрополяриметра 4-8 ГГц получены оригинальные радионаблюдения 44 вспышек рентгеновского класса от А9.0 до С1.9, характеризующихся как солнечные микровспышки.

В докладе представлены уникальные статистические результаты анализа спектральных характеристик отобранных слабых событий. Дальнейшей задачей является выявление закономерностей генерации импульсной компоненты микровспышек, генерируемой релятивистскими электронами и исследование связи между появлением серий микровспышек и эволюцией структуры магнитного поля активной области. Работа поддержана грантом РФФИ №22-22-00019.

1. Altyntsev A.T., Meshalkina N.S. et al. // AJ 2020. V. **905**. Iss 2. P. 149.
2. Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., et al. // STP 2020. V. **6**. Iss 2. P. 30.

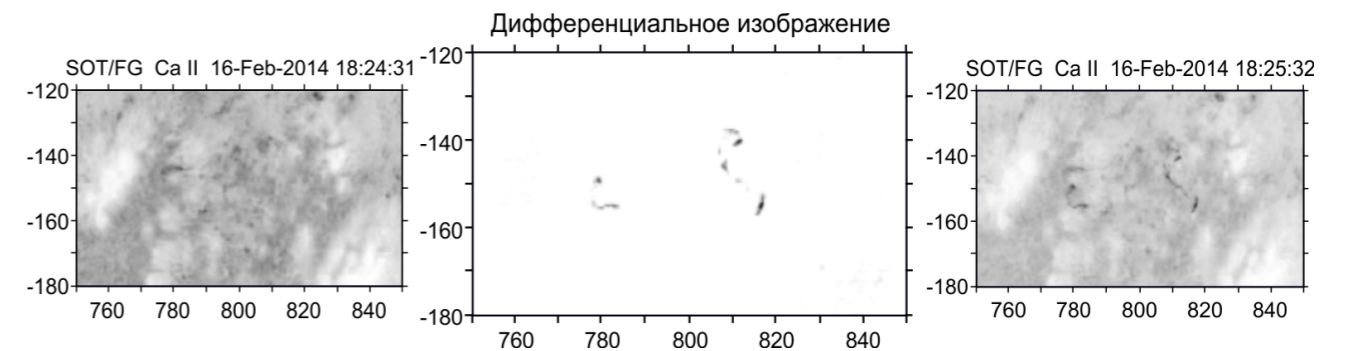
СИНХРОННЫЕ МИКРОВСПЫШКИ: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ В РАМКАХ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Думин Ю.В.^{1,2}, Верещагин Ф.В.¹, Сомов Б.В.¹

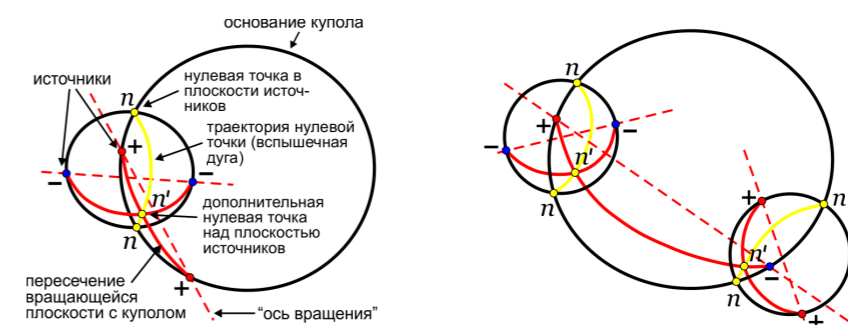
¹ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, dumin@yahoo.com

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Детальный анализ архивных данных по эмиссии в хромосферной линии CaII, регистрируемой прибором SOT на спутнике Hinode [1], позволяет выявить в некоторых случаях солнечные микровспышки, возникающие практически синхронными парами на достаточно большом удалении друг от друга; пример такого события приведён на Рис. 1 (все изображения – негативные). Важно подчеркнуть, что две светящиеся дуги локализованы в областях противоположной полярности магнитного поля, т.е. каждая из дуг является “униполярной” [2]. Таким образом, это заведомо не является аналогом хорошо известных “двухленточных” вспышек, состоящих из совокупности магнитных петель, опирающихся своими концами на области противоположных полярностей.



Несмотря на кажущуюся противоестественность вышеописанного явления, оно находит своё разумное объяснение в рамках модели “топологического триггера”, теория которого была развита ещё в конце 1980-х годов В.С. Горбачёвым и др. [3]. В этой модели развитие процесса энерговыделения идёт не по силовой линии, а по сепаратору магнитного поля в процессе глобальной перестройки его топологии. В простейшем случае одной эмиссионной дуги такая перестройка может быть наглядно представлена как опрокидывание “двухкупольной структуры”, сформированной двумя парами источников (солнечных пятен) противоположного знака; см. левую панель на Рис. 2. Обобщение этой модели на случай трёх опрокидывающихся куполов, сформированных шестью источниками (тремя положительными и тремя отрицательными), даёт естественное объяснение синхронного возникновения двух эмиссионных дуг, как проиллюстрировано на правой панели Рис. 2.



1. Shibata K. et al. // Science 2007. V. **318**. P. 1591.
2. Dumin Yu.V., Somov B.V. // Res. Not. Amer. Astron. Soc. 2017. V. **1**. p. 15.
3. Горбачёв В.С. и др. // Астрон. журн. 1988. Т. **65**. С. 601.

СИНХРОННАЯ ИНИЦИАЦИЯ НАНОВСПЫШЕК И ВЕЙБЕЛЕВСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В КОРОНАЛЬНОЙ АРКЕ

Кочаровский Вл.В., Емельянов Н. А., Зайцев В.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru

Разработана модель одновременной инициации большого числа нановспышек в процессе солнечной вспышки, происходящей в отдельной корональной арке при инъекции в неё высокоэнергичных (мультикэв-ных) электронов. Показано, что нановспышки могут быть обусловлены развитием вейбелевской (филаментационной) неустойчивости в присутствии внешнего магнитного поля и множественным формированием филаментов тока типа z-пинчей.

В докладе представлен анализ линейной стадии развития вейбелевской неустойчивости, дано аналитическое выражение для инкремента неустойчивости и оптимального волнового числа, как функций параметра анизотропии распределения электронов по скоростям, плотности плазмы и величины магнитного поля корональной арки, а также приведены оценки для насыщающего и подавляющего магнитных полей и размеров токовых филаментов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00416).

ПИКОВСПЫШКИ В УФ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ НА РАССТОЯНИИ 0.5 АЕ ОТ СОЛНЦА

Подладчикова Е.В.¹, Вармут А.¹, Подладчикова Т.В.^{2#}

¹ АИП, г. Потсдам, Германия, epodlad@gmail.com

² СКОЛТЕХ, г. Москва, Россия

Первые рентгеновские динамические изображения солнечной короны вдохновили Юджина Паркера объяснить ее нагрев совокупностью элементарных событий выделения энергии - нановспышек. Энергия одной нановспышки 10^{24} ergs была рассчитана как диссипация всех токов в одной корональной петле длиной > 10000 км. Ю. Паркер предсказал наблюдение еще меньших вспышек более чувствительными телескопами будущего. До сих пор существование более мелких вспышек подтверждено не было. Более того, физический порог для наименьших вспышек на Солнце был однозначно установлен на уровне 10^{24} ergs (одна нановспышка) исходя из данных космических солнечных телескопов оперирующими на расстоянии 1 АЕ.

30 мая 2020 года Solar Orbiter High Resolution Imager, впервые находясь на расстоянии 0,5 АЕ от Солнца и оперируя в линии 174 А, зарегистрировал большое количество внезапных событий нагрева, так называемых костров (campfires), с богатой морфологией и меньшими пространственно-временными характеристиками, чем нановспышки. Мы обнаружили:

- Костры излучают тепловую энергию в диапазоне пиковспышек 10^{20} - 10^{24} ergs.
- Связь между мерой эмиссии EM и температурой костров T подчиняется степенному закону $EM \sim T^2$ охватывающему температурный диапазон 1 - 2.7 МК.
- Пиковспышки продолжают распределение нановспышек на более высоких частотах.
- Неучтенный ранее вклад пиковспышек в нагрев: 1% от общей мощности требуемой для нагрева солнечной атмосферы включая хромосферу и рентгеновскую корону.
- Наблюдаемый закон распределения должен продолжиться до фемтовспышек 10^{18} ergs, чтобы полностью объяснить нагрев.

Угловое отдаление Солар Орбитера от линии Земля-Солнце позволило впервые определить высоты наблюдаемых вспышек в оптически тонкой короне, используя стереоскопические методы при совместном наблюдении со спутником SDO. Все изученные вспышки произошли (a) в магнитных арках, (b) в тонком транзитном слое на верхней границе хромосферных ячеек, тогда как до настоящего момента предполагалось более широкое распределение нановспышек, и на большей высоте. Другими словами, полученные вертикальные высоты вспышек указывают на их происхождение в слоях атмосферы Солнца с $\beta \ll 1$, тогда как модельно для нановспышек берутся более высокие слои $\beta \gg 1$.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗАМКНУТОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ X1.8 КЛАССА, ПРОИЗОШЕДШЕЙ 23 ОКТЯБРЯ 2012 Г.

Шарыкин И.Н. (1)*, Зимовец И.В. (1), Мешалкина Н.С. (2)

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

2 – ИСЗФ СО РАН, г.Иркутск, Россия

В работе обсуждаются детальные многоволновые исследования свойств предвспышечного энерговыделения замкнутой солнечной вспышкой X1.8 класса, произошедшей 23 октября 2012 г. Событие выбрано, в первую очередь, из-за отсутствия ярко выраженного коронального выброса массы («замкнутость вспышки») и наличия качественных многоволновых наблюдений SDO/AIA, RHESSI и NoRH. Стоит отметить, что большинство предшествующих исследований предвспышечных фаз затрагивало именно эруптивные события. В рамках данного исследования мы рассматриваем интервал предвспышечного времени длительностью около трех часов и ставим себе цель определить основные свойства предвестников данной солнечной вспышки и сравнить с тем, что мы знаем о предвестниках эруптивных солнечных вспышек. Далее мы укажем найденные основные наблюдательные особенности предвспышечной фазы выбранного события.

Выделяются две морфологические предвспышечные структуры, соответствующие высоким магнитным петлям и нижним петлям вытянутым вдоль предполагаемой нейтральной линии. Рентгеновские и 17 ГГц радиоисточники были локализованы либо наверху нижней системы петель либо чуть выше под системой высоких петель. Данная конфигурация источников излучения также соответствует геометрии tether-cutting, но при этом мы не наблюдаем формирования эруптивного жгута и расширения (подъема системы петель), как это имело место быть для эруптивных событий. Возможно данный факт характерен именно для замкнутых вспышек.

Радиоизлучение источника над нейтральной линией на 17 ГГц с точки зрения временной динамики состояло из двух составляющих: медленно меняющейся (диффузный источник излучения) и транзитной в виде отдельных всплесков, связанных с более компактными источниками вблизи НЛ.

Первоначальное энерговыделение вспышки началось с очень низких высот вблизи НЛ. Первоначальный рентгеновский источник <20 кэВ был локализован вблизи НЛ и именно там наблюдался локальный выброс (который не развился в итоге в КВМ), после чего пошла основная импульсная фаза.

Экстраполяция магнитного поля методом NLFFF выявила скрученный магнитный жгут вдоль НЛ, погруженный в магнитную конфигурацию купольного («dome») типа с шипом («spine»). Наблюдавшиеся УФ предвестники были локализованы, как в нижних компактных петлях с большим магнитном широм, так и в высоких петлях купола.

В итоге можно сделать следующие основные выводы. Также как и в случае многих эруптивных событий, мы скорее всего наблюдаем конфигурацию tether-cutting, но погруженную в магнитную структуру типа купола. При этом предвспышечное энерговыделение, наблюдаемое в виде всплесков, на фоне медленно меняющихся источников излучения не приводит к росту магнитного жгута, подъему магнитных петель и последующей дестабилизации с эрупцией. Конкретные причины замкнутости вспышки мы не исследуем в данной работе.

Также дополнительно проведен анализ рентгеновских спектров RHESSI в диапазоне 5-25 кэВ на базе двухкомпонентной модели. Спектральный анализ показывает наличие плазмы до 15 МК и небольшого кол-ва сверхгорячей компоненты до 35 МК, если рассматривать двух-температурную модель. Также возможно наличие ускоренных электронов, если в качестве второй компоненты использовать модель толстой мишени.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЕ ПРЕДВСПЫШЕЧНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ КАК РЕЗУЛЬТАТ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

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

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

В активных областях (АО) на Солнце перед началом вспышек часто детектируются квазипериодические пульсации в различных диапазонах спектра от радиоволн до рентгеновских лучей. В качестве основных механизмов таких пульсаций рассматриваются магнитогидродинамические (МГД) осцилляции корональных арок или осцилляции электрического LRC контура, которым могут представляться арки с продольным током. Применимость этих механизмов, однако, не доказана и необходимы дополнительные исследования.

В этой работе мы представляем анализ эволюции АО 11675, где 17 февраля 2013 г. произошла вспышка класса M1.9, которой предшествовала серия предвспышечных рентгеновских пульсаций нарастающей амплитуды с периодом 4-6 мин. Эти пульсации присутствовали во временном профиле потока рентгеновского излучения (<25 кэВ) по измерениям инструментами на разных космических аппаратах (RHESSI, Fermi/GBM, GOES/XRS), а также в профиле температуры вспышечной плазмы по данным GOES/XRS. Таким образом, эти пульсации не могли быть артефактом измерений.

Анализ рентгеновских (RHESSI) и ВУФ (SDO/AIA) изображений показал, что источники предвспышечных пульсаций и основной вспышки располагались в одной АО, но испускались последовательно из различных ее участков в пределах 20 угл. сек. – из различных корональных арок. В некоторые моменты времени в рентгеновских спектрах пульсаций присутствовали нетепловые «хвосты» (до ~50 кэВ), указывающие на ускорение электронов. В основной вспышке ускорение электронов было более эффективным - до нескольких сотен кэВ и с более высокой интенсивностью.

Вспышечная область представляла собой магнитную квадрупольную систему в окрестности головного пятна АО, с парами пятен противоположной полярности в центральной части и по краям. Источники предвспышечных пульсаций и основной вспышки располагались над центральным диполем, пятна которого перемещались друг относительно друга (при этом пятна на краях были почти стационарны). До начала пульсаций относительная скорость движения и угол между векторами скорости центральных пятен возрастали, а после начала резко уменьшились. Электрические токи и магнитная энергия запасались в АО задолго (несколько часов) до начала вспышки, но примерно за 1.5 ч (с началом усиления относительного движения пятен) наблюдался дополнительный рост магнитного потока, вертикального тока и свободной магнитной энергии в рассматриваемой области. Свободная магнитная энергия начала падать во время пульсаций и падала до завершения основной вспышки. Обратная величина ее изменения с избытком превышала суммарную величину кинетической энергии нагретой плазмы и ускоренных электронов.

Экстраполяция магнитного поля в корону в нелинейном бессиловом приближении с использованием векторных магнитограмм SDO/HMI позволило исследовать трехмерную структуру магнитного поля (и токов) и ее изменение в области источников излучений. Предвспышечные пульсации и вспышка могли представлять собой серию последовательных эпизодов магнитного пересоединения в токовых слоях, формировавшихся в окрестности квазисепараторных слоев вследствие усиления относительного движения солнечных пятен.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-10158).

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПЕРЕД ВСПЫШКАМИ

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

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

²НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Представлено исследование квазипериодических флуктуаций (КПФ) микроволнового излучения активных областей (АО) Солнца на предвспышечной стадии. Использовались данные наблюдений на радиогелиографе Nobeyama (NoRH) (корреляционные кривые). Проанализированы все вспышки классов X и M (по классификации GOES), произошедшие за временные интервалы наблюдений на NoRH. В значительной части рассмотренных случаев перед вспышками наблюдается появление (или существенное усиление) флуктуационных процессов. Периоды QPF различны в разных случаях: от нескольких секунд до нескольких минут. Длительность предвспышечных цугов колебаний в периодах колебаний во всех случаях примерно одинакова и не превышает 10 импульсов. Характер предвспышечных флуктуаций в разных случаях разный. В некоторых событиях они представляют собой почти гармонические колебания, в некоторых они больше похожи на последовательность слабых вспышек. Возможно, природа предвспышечных флуктуаций в разных случаях различна.

ИСТОЧНИК ПЕРВОЙ ВСПЫШКИ НАД АО 10365 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫМ РАДИОГЕЛИОГРАФА NOBEYAMA

Борисенко А.В.¹, Подгорный И.М.², Подгорный А.И.³

¹Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, sunw77@mail.ru

²Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

В момент появления первой вспышки M 1.9 класса GOES (26.05.2003 _UT 05:34) над активной областью (АО) 10365 радиогелиографом Nobeyama (NoRH/17 Ghz) был зафиксирован всплеск радиосигнала. Как показали результаты магнитогиродинамического (МГД) моделирования до появления M 1.9 вспышки над АО 10365 в окрестности особой линии магнитного поля X-типа наблюдалось образование максимумов плотностей тока на высотах 16000-18000 км в нижней короне. После вспышки наблюдается исчезновение максимумов плотностей тока. По данным NoRH/17 Ghz в местах появления максимумов плотностей тока показаны источники яркой эмиссии радиоизлучения, изменяющиеся со временем. Характер изменения наблюдаемой магнитной структуры в окрестности особой линии магнитного поля X-типа до вспышки и после вспышки свидетельствует о наблюдаемом токовом слое (ТС). Такие ТС в окрестности особой линии магнитного поля X-типа могут образовываться под действием течений плазмы и достаточно долго сохранять энергию, пока не произойдет быстрое магнитное пересоединение в результате возникшей неустойчивости ТС. Таким образом результаты проделанной работы по мнению авторов подтверждают механизм С.И. Сыроватского (1925—1979) гг и др. авторов, согласно которому во время солнечной вспышки освобождается энергия, накопленная в магнитном поле ТС. Как мы предполагаем по полученным данным МГД моделирование позволяет более точно найти местонахождение токовых слоев -источников будущих вспышек в пространстве, что часто труднодоступно по одним только данным наблюдений.

A fundamental flaw in the standard theory of linear magnetoacoustic waves in the homogenous magnetic flux tubes and its resolution

Naga Varun. Y

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

A flaw is brought to notice in the standard linear theory of the magnetoacoustic waves [1, 2] in the homogenous magnetic flux tubes, which are representative of the coronal, chromospheric and photospheric loops of the solar atmosphere. It is shown that the standard theory is applicable only in the case of $\beta = 0$, where β is the usual plasma parameter given by the ratio of the thermodynamic gas pressure to the magnetic pressure.

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, ψ, 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: $B_r(r) = -\frac{k}{\omega} v_r(r)$, where k and ω are the wavenumber and frequency of the linear phase wave and $B_r(r)$ is the radial magnetic field perturbation component. But we do now 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 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$ [3]. 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.

We can quite rigorously show 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: $\frac{P_{Ti}(a)}{B_{ri}(a)} = \frac{P_{Te}(a)}{B_{re}(a)}$. But when $\beta = 0$, then this relation transforms

into $\frac{P_{Ti}(a)}{v_{ri}(a)} = \frac{P_{Te}(a)}{v_{re}(a)}$, which is the earlier dispersion relation.

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 $\frac{P_{Ti}(a)}{v_{ri}(a)} = \frac{P_{Te}(a)}{v_{re}(a)}$, which perhaps was the reason, why this flaw was earlier not noted in the numerical simulations and the coronal seismological calculations.

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. Sommerfeld A., // Academic Press 1964. T. **3**. P. 371.

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.

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА ОТ НАЧАЛА ИХ ЗАРОЖДЕНИЯ: ДО И ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК

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

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

Анализ поведения электрических токов в активных областях (АО) Солнца может быть полезен для понимания происходящих в них физических процессов. Токи связаны со свободной энергией магнитного поля, с которой, в свою очередь, связана вспышечная активность в этих областях [1].

Поскольку на данный момент магнитное поле рутинно измеряется лишь в тонком слое на фотосфере, мы можем получить информацию только о вертикальном электрическом токе j_z . В данной работе изучается эволюция нескольких АО, в которых происходили вспышки как минимум М-класса. Особый интерес представляют АО, которые зарождались в поле зрения прибора SDO/HMI. Мы отобрали 3 таких области: NOAA 11158, 12673 и 12036. Активная область 12673 представляет особый интерес для изучения, так как именно в ней произошли самые сильные вспышки 24 солнечного цикла. Нами была изучена эволюция магнитного поля и вертикального тока как во время всего прохождения АО по диску Солнца с шагом в 2 часа, так и короткий промежуток в течение 2 дней с шагом 24 минуты для периода, когда в АО наблюдались самые мощные вспышки.

В этой работе мы изучали эволюцию таких параметров как суммарный вертикальный ток с учетом знака и без на фотосфере в АО, максимальная плотность тока, суммарный беззнаковый вертикальный и горизонтальный магнитный потоки, а также их максимумы, и параметров функции плотности вероятности $PDF(|j_z|)$. Функция $PDF(|j_z|)$ типично выглядит как гауссов "колокол" для низких значений токов, а для высоких значений как степенной "хвост", который, в отличие от "колокола", и определяет поведение вертикального электрического тока в АО. В начале развития АО форма $PDF(|j_z|)$ имеет гауссов вид из-за того, что в области пока не успели образоваться крупные структуры сильных токов. По мере развития АО вследствие всплывания нового магнитного потока в ходе формирования токовых структур появляется степенной "хвост", и показатель степени этого "хвоста" в какой-то момент выходит на некоторое устойчивое значение. Когда магнитный поток достигает значений $(2 - 6) * 10^{22}$ Мкс, полный беззнаковый ток значений $(1.5 - 2.0) * 10^8$ статампер/см², показатель степени перестает сильно изменяться (ошибки определения степени не превышают 10%), мы определяем АО как сформировавшуюся. После этого происходят серии вспышек [2].

В результате данного исследования были найдены некоторые закономерности в поведении рассматриваемых нами параметров. Например, показатель степенной функции для $PDF(|j_z|)$ для периода, когда в рассмотренных АО возникали вспышки, находился в пределах от -5 до -3 [3]. Это может рассматриваться в качестве дополнительного условия возникновения вспышек. Интересно также отметить, что в АО 12673 степенной показатель $PDF(|j_z|)$ вышел на квазипостоянный уровень -4 ± 0.3 до начала значительного всплывания магнитного потока.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме "ПЛАЗМА".

1. Priest, E. Magnetohydrodynamics of the Sun // Cambridge University Press, 2014.
2. Ишков В.Н. // Известия РАН. Серия физическая, 2022.
3. Zimovets, I.V., Nechaeva, A.B., Sharykin, I.N., and Gan, W.Q. // Astrophysics 2020. V. **63**. P. 408.

СОЛНЕЧНЫЕ МАГНИТНЫЕ ТОРНАДО И НЕЙТРАЛЬНЫЕ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Никитин И.С.^{1,2}, Обридко В.Н.¹, Харшиладзе А.Ф.¹, Хабарова О.В.¹, Блуменау М.И.^{1,2}, Воробьев Д.Л.^{1,2}

¹ ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия, isnikitin_1@edu.hse.ru

² НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

Магнитные торнадо – это долгоживущие протуберанцы с закрученным магнитным полем и плазмой. Эти объекты обнаружены недавно и их физическая природа и механизмы образования активно дискутируются в литературе. Ранее нами был предложен метод автоматического обнаружения таких магнито-плазменных образований в атмосфере Солнца. Одним из прикладных аспектов разработки нашей методики является исследование свойств и закономерностей в расположении магнитных торнадо на поверхности Солнца. В частности, мы исследуем взаимосвязь между данными структурами и нейтральными линиями магнитного поля. Ранее было отмечено формирование множественных торнадо на локальных нейтральных линиях магнитного поля [Wedemeyer et al, 2013, APJ]. С помощью открытых данных Wilcox Solar Observatory можно получить информацию о расположении наиболее крупномасштабных нейтральных линий магнитного поля на уровне фотосферы, например, о солнечном магнитном экваторе дипольного магнитного поля. К сожалению, точность данного метода ограничена, так как разрешение получаемых снимков низкое. Мы строим обратную PFSS модель, восстанавливающую полное магнитное поле в короне и на уровне фотосферы с большей точностью. Сравнивая полученные данные с изображениями, полученными SDO/AIA на длине волны 171 А (корона и верхняя хромосфера), мы делаем вывод о взаимосвязи солнечных магнитных торнадо с нейтральными линиями магнитного поля. Это даёт ключ к пониманию физики образования устойчивых вращающихся протуберанцев в атмосфере Солнца.

ФИЛАМЕНТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ И МГД УСТОЙЧИВОСТЬ

Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г.

КрАО РАН, н.г.т. Научный, yur_crao@mail.ru

Считается, что крупномасштабные квазистационарные электрические поля могут приводить к эффективному ускорению электронов в солнечных вспышках вплоть до релятивистских энергий. Однако это предполагает нереально большие значения магнитного поля направленного пучка заряженных частиц, достигающие в атмосфере Солнца порядка 10^7 - 10^8 Гс (парадокс Колгейта). Одно из возможных решений возникшего парадокса может быть связано с процессом филаментации электрического тока, который сводится к формированию тонких магнитных жгутов (филаментов) диаметром менее нескольких километров. Поскольку филаменты должны быть сильно скрученными тонкими магнитными трубками с очень малым ($\ll 1$) отношением радиуса к его длине, то, согласно критерию Крускала-Шафранова, это должно приводить к развитию так называемой изгибной неустойчивости. В представленной работе нами показано, что филаменты могут быть стабилизированы обратным электрическим током, ответственным за их экранировку. Обсуждены следствия полученных результатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (№. 22-12-0030).

ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУЙ

Якунина Г.В.

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

Кратко рассмотрены результаты наблюдений корональных и хромосферных струй на Солнце, полученные за последние десятилетия. Были собраны данные о струях разных типов. Рассматриваются их свойства, такие как время жизни, длина, толщина, скорости, связь с основным магнитным полем и предполагаемая роль в переносе горячей плазмы и энергии в корону. Используются наблюдения как с помощью наземных телескопов, таких как Шведский солнечный телескоп (SST) на Ла-Пальме, солнечный телескоп Goode (GST) в обсерватории BBSO, Солнечный телескоп Данна (DST) в Национальной солнечной обсерватории (NSO), так и с помощью космических станций (TRACE, Hinode, SOHO, SDO). Корональные струи (jets, jetlets) являются источником значительного поступления массы и энергии в верхние слои солнечной атмосферы и солнечный ветер.

Активность в короне отчетливо связана с активизацией в хромосфере, хромосферными струями (спикулами). Оценки энергии, обеспечиваемой спикулами типа II, показывают, что спикулы могут играть большую роль в нагревании короны.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Среда, 08.02. 2023 г., комната ЦО (Line 3)_____

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			Председатель: <u>Григорьева И.Ю.</u>
1	09.00 - 09.15	Моторина Г.Г., Цап Ю.Т., Смирнова В.В., Моргачев А.С., Шрамко А.Д.	О связи предвестников и суб-терагерцового излучения солнечной вспышки 28.03.2022
2	09.15 -09.30	Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Рыжов В.С., Моторина Г.Г., Моргачев А.С., M. Bárta	Вспышечное излучение события 04.05.2022 и его миллиметровая компонента
3	09. 30 - 09.45	Мельников В.Ф., Мешалкина Н.С.	Динамика системы магнитных петель во время солнечной вспышки 15.01.2022
4	09.45 – 10.00	Кашапова Л.К., Куприянова Е.Г., Reid H.A.S., Long D., Zhang J.	Возможный механизм связи между радиовсплесками iii типа и источником микроволнового излучения во время слабой солнечной вспышки
5	10.00 – 10.15	Шамсутдинова Ю.Н., Кашапова Л.К., Zhang J., Жданов Д.А., Reid H.A.S., Мышьяков И.И.	Слабая солнечная вспышка 3 июня 2021 года в микроволновом и метровом диапазонах
6	10.15 - 10.30	Мотык И.Д., Сетов А.Г., Шамсутдинова Ю.Н., Кашапова Л.К., Куприянова Е.Г., Мышьяков И.И., Жданов Д.А.	Быстроживущее событие на фазе спада вспышки 22 мая 2021
	10.30 – 11.00	Перерыв на кофе	
			Председатель: <u>Шарькин И.Н.</u>
7	11.00 – 11.15	Лысенко А.Л., Флейшман Г.Д.	Совместные наблюдения солнечных вспышек в рентгеновском диапазоне инструментами KONUS-WINDи SOLO/STIX

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

8	11.15 -11.30	Мерзляков В.Л.	Анизотропия мягкого рентгеновского излучения солнечной вспышки
9	11.30 -11.45	Головко А.А., Салахутдинова И.И.	Мультифрактальная структура магнитного поля и поля скоростей в очагах солнечных вспышек
10	11.45 – 12.00	Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б.	Расчет модели спокойного протуберанца
11	12.00 - 12.15	Березин И.А., Тлатов А.Г.	Наблюдения начальной стадии эрупции волокон
12	12.15 -12.30	Радивон А.В, Зимовец И.В.	Применение метода регуляризации для исследования кинематики солнечных эрупций
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	12:30-13:00	Корольков С.Д., Измоденов В.В.	О механизме нагрева солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях: новое объяснение старым данным Вояджера-2
	13:00 -13:30	Козелов Б.В.	Диагностика свойств ионосферы с помощью оптических измерений в арктическом регионе
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: Зимовец <u>И.В.</u>			
13	14.30 - 14.45	Ожередов В.А., Струминский А.Б.	Построение и валидация аналитической модели траектории КВМ по данным LASCO
14	14.45 -15.00	Рева А.А., Богачев С.А., Лобода И.П., Кириченко А.С., Ульянов А.С.	Нагрев плазмы во время корональных выбросов массы
15	15.00 – 15.15	Киселёв В.И., Гречнев В.В., Уралов А.М., Мышьяков И.И.	Возбуждение ударных волн в событиях без КВМ

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

16	15.15 – 15.30	Вахрушева А.А., Шугай Ю.С., Капорцева К.Б., Калегаев В.В., Еремеев В.Е.	Динамика параметров корональных диммингов в течение 24-го солнечного цикла
17	15.30 – 15.45	Чариков Ю.Е., Шувалова В.И., Складорова Е.М., Шабалин А.Н.	Временной масштаб ускорения электронов в солнечных вспышках
18	15.45 – 16.00	Шабалин А.Н., Овчинникова Е.П., Чариков Ю.Е.	Временные характеристики жестких рентгеновских источников в модели вспышки с вертикальным токовым слоем
	16.00 – 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Лысенко А.Л.</u>			
19	16.30 -16.45	Филатов Л.В., Мельников В.Ф.	Ускорение нетепловых электронов во вспышечной петле на турбулентности вистлеров: режим согласованного взаимодействия
20	16.45 -17.00	Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Галкин В.И.	Высокоэнергичное гамма-излучение в свете современных представлений о развитии импульсной фазы эруптивных солнечных вспышек
21	17.00 – 17.15	Юшков Б.Ю., Курт В.Г., Галкин В.И.	Сопоставление наблюдений рентгеновского и гамма-излучения солнечной вспышки 25 августа 2001 года с процессами магнитного пересоединения
22	17.30 – 17.45	Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.	Темп ускорения электронов в солнечных вспышках и регистрация протонов с энергией >100 МэВ вблизи Земли
23	17.15 -17.30	Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.	О необходимых и достаточных условиях солнечных протонных вспышек
24	17.45 – 18.00	Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И.	Изолированные события СКЛ, обусловленные приходом быстрых штормовых частиц (ESP)
	18.00 -18.30	Постерная сессия	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

Постеры

1. Бакунина И.А., Мельников В.Ф., Абрамов-Максимов В.Е.
Особенности эруптивных вспышек рентгеновского класса М
2. Забаринская Л. П., Ишков В.Н., Сергеева Н.А.
Каталог геоэффективных вспышечных событий текущего 25 цикла в современном представлении
3. Мельников В.Ф., Филатов Л.В.
Роль синхротронных потерь в генерации суб-тГц излучения солнечных вспышек
4. Рожкова Д. В., Кашапова Л.К.
Исследование связи между рентгеновским излучением во время солнечной вспышки и временными профилями событий в солнечных космических лучах с помощью моделирования
5. Шарыкин И.Н.
Статистическое исследование гелиосейсмически активных солнечных вспышек
6. Шарыкин И.Н.
Исследование особенностей динамики фотосферного магнитного поля и фотосферных возмущений в гелиосейсмически активной солнечной вспышке М3.5 класса, произошедшей 22 августа 2015 г.
7. Шаховская А.Н., Григорьева И.Ю.
Исследование солнечных вспышек и связанных с ними протонных событий, в августе 2011 года
8. Полухина С.А., Кашапова Л.К.
Особенности эволюции слабой солнечной вспышки 03 февраля 2022 года

О СВЯЗИ ПРЕДВЕСТНИКОВ И СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 28.03.2022

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

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

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

Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondřejov, Czech Republic

Настоящая работа направлена на детальный анализ солнечной вспышки 28 марта 2022 года рентгеновского класса M4.0, зарегистрированной на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частоте 93 ГГц. Наблюдения также проводились в мягком (GOES) и жестком (GBM/FERMI) рентгеновском, крайнем ультрафиолетовом (AIA/SDO) и микроволновом (RT-2, RT-3, INAF RT) диапазонах. По данным AIA/SDO в результате решения обратной задачи определена дифференциальная эмиссия плазмы, ответственной за ультрафиолетовое излучение. Это позволило численно рассчитать поток теплового миллиметрового излучения ультрафиолетовой плазмы, который оказался значительно меньше наблюдаемых значений. Сделан вывод о хромосферной природе суб-терагерцового источника. Установлено, что за его нагрев не могут быть ответственны ускоренные в короне электроны, а также тепловые потоки из вершины корональной арки. Обсуждается возможная причина нагрева хромосферы в предимпульсной фазе вспышки.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ №20-52-26006, РФФИ №22-12-00308, РФФИ №20-72-10158, Государственного задания №0040-2019-0025 и Минобрнауки (НИР №. 1021051101548-7-1.3.8; 075-03-2022-119/1).

ВСПЫШЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СОБЫТИЯ 04.05.2022 И ЕГО МИЛЛИМЕТРОВАЯ КОМПОНЕНТА

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

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

Сравнительно недавно, благодаря уникальному инструменту Atacama Large Millimeter Array (ALMA) появилась возможность наблюдать слабые солнечные вспышки с высоким пространственным разрешением в миллиметровом радиодиапазоне. В частности, в работе [1] было изучено 5 событий рентгеновского GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) класса В, наблюдавшихся на 1.2 и 3 мм. Наблюдения вспышек на ALMA проводились в режиме сканирования всего диска Солнца одиночной антенной (single-dish mode) диаметром 12 м, с пространственным разрешением ~28 и 60 угл. сек на длинах волн 1.2 и 3 мм соответственно. Временное разрешение в используемом режиме наблюдений составило около 5 (3 мм) и 10 (1.2 мм) мин. Карты распределения интенсивности радиоизлучения сравнивались с рентгеновскими наблюдениями (GOES), а также с данными в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах, полученными на инструментах Atmospheric Imaging Assembly и Helioseismic and Magnetic Imager, космической обсерватории Solar Dynamic Observatory (SDO).

Комплексный анализ вспышечных событий позволил сделать вывод, что источники миллиметрового излучения – довольно динамичные образования и могут соответствовать основаниям или вершинам «горячих» петель, послевспышечными петлям, H α -волоконкам, а в некоторых случаях их вообще не удастся отождествить с какими-либо магнитными структурами. Интересно также отметить, что по данным солнечного радиоспектрометра e-CALLISTO (20 - 300 МГц) и Radio Solar Telescope Network (RSTN, сантиметровый диапазон) каких-либо всплесков от исследуемых событий обнаружить не удалось.

Существенный недостаток работы [1] заключается в том, что полученные результаты в силу множества принятых ограничений и предположений едва ли можно считать надежными. Кроме того, авторы уделили недостаточное внимание анализу «холодных» хромосферных линий для отобранных слабых вспышечных событий, что могло заметным образом сказаться на полученных результатах.

В настоящей работе, на основе наблюдений на радиотелескопе РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана на частоте 93 ГГц, а также других наземных и космических инструментах исследовано происхождение суб-ТГц излучения солнечной вспышки рентгеновского класса M 5.7, произошедшей 04.05.2022 г. Анализ динамики резонансной хромосферной линии Mg II k ($\lambda 2796.34 \text{ \AA}$), сделанный на основе наблюдений на космическом аппарате Interface Region Imaging Spectrograph, позволил сделать вывод о формировании вспышечного миллиметрового излучения в хромосфере Солнца, что хорошо согласуется с результатами численных расчетов [2].

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-52-26006.

1. Skokić I, Benz A.O., Brajša R., Sudar D., Matković F., and Bárta M. // A&A 2022. eprint arXiv:2211.16935. doi:10.1051/0004-6361/202244532
2. Rubio F, Kleint L. // ApJ 2017. V.842. #2. p.82. doi: 10.3847/1538-4357/aa6eaf

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ ПЕТЕЛЬ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 15.01.2022

Мельников В.Ф.¹, Мешалкина Н.С.²

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург,
v.melnikov@gaoran.ru

² Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Исследована динамика (подъём и опускание) петлеобразной структуры, представляющей собой систему вспышечных петель во время вспышки 15.01.2022 по данным в ультрафиолетовом (SDO/AIA) и микроволновом (Сибирский радиогелиограф -- SRG) диапазонах. Обнаружен новый характер поведения петельной структуры. В отличие от ранее известных случаев видимого сокращения размеров вспышечных петель на фазе роста и их увеличения на фазе спада потока вспышечного излучения, в этой вспышке имел место прямо противоположный процесс: подъём петли на фазе роста и опускание петли на фазе спада. Отличительной чертой данного события от описанных в литературе является также то, что в нём не наблюдалось ни увеличения расстояния между основаниями петельной структуры на фазе роста, ни его уменьшения на фазе спада, свидетельствующие о появлении новых вспышечных петель и характерные для известных двух-ленточных вспышек. Эти факты указывают на то, что петельная структура поднималась и опускалась как единое целое, давая основание для предположения о важной роли изменения в ходе вспышки величины свободной магнитной энергии во вспышечной петле (азимутальной компоненты магнитного поля и силы электрического тока) в динамике высоты вспышечной петли.

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ СВЯЗИ МЕЖДУ РАДИОВСПЛЕСКАМИ III ТИПА И ИСТОЧНИКОМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ СЛАБОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Кашапова Л.К., Куприянова Е.Г., Reid H.A.S., Long D., Zhang J.

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

Возникающие во время солнечной вспышки потоки ускоренных электронов участвуют в генерации таких явлений как рентгеновские и микроволновые всплески, а также радиовсплески III типа. Согласно общепринятой модели солнечной вспышки, должна существовать связь между всеми этими явлениями, но механизм этой связи может быть не так очевиден, как предсказывают простые модели, и может различаться в зависимости от сценария развития события и топологии магнитного поля. Мы представляем результаты исследования события, произошедшего 10 апреля 2019 года около 8 UT. Несмотря на слабый класс события в мягком рентгене (A5 по GOES), во время этого события были зарегистрированы радиовсплески III типа на радиогелиографе LOw Frequency ARray (LOFAR, 20-80 МГц) и одновременно всплески на Сибирском Радиогелиографе 48 (SRG 48) в диапазоне 4-8 ГГц. Анализ изображений, полученных во время события, показал, что микроволновый источник, находящийся в активной области 12738, связан с источниками метрового излучения всплесков III типа. Также вблизи микроволнового источника в полосах крайнего ультрафиолета по данным SDO/AIA наблюдалось эруптивное событие (предположительно, джет). Показано, что временные профили метрового, микроволнового излучения коррелируют с такими параметрами динамики джета как скорость и ускорение. Обсуждаются варианты сценария события, объясняющие роль эруптивного события в генерации метрового и микроволнового излучений.

СЛАБАЯ СОЛНЕЧНАЯ ВСПЫШКА 3 ИЮНЯ 2021 ГОДА В МИКРОВОЛНОВОМ И МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

Шамсутдинова Ю.Н., Кашапова Л.К., Zhang J., Жданов Д.А., Reid H.A.S., Мышьяков И.И.

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

Мы представляем результаты исследования события, которое произошло около 01:36 UT 3 июня 2021 года. Несмотря на слабый класс солнечной вспышки (B1), она была зафиксирована одновременно в метровом радиодиапазоне спектрографами сети E-Callisto в диапазоне 15-87 МГц, спектрографом YAMAGAWA 70-9000 МГц, в микроволновом диапазоне Сибирским Радиогелиографом (СРГ) 3-6 ГГц и Бадарским широкополосным микроволновым спектрополяриметром (БШМС) 4-8 ГГц, а также FERMI/GBM в диапазоне энергий выше 25 кэВ.

Сравнительный анализ динамических спектров в метровом и микроволновом диапазонах показал, что событие состоит из серии радиовсплесков III типа и J типа. В то время как в микроволновом и рентгеновском диапазонах наблюдался только один всплеск. Спектральные свойства микроволнового и рентгеновского излучения указывают на наличие ускоренных электронов в данном событии.

Проведен анализ топологии вспышки с использованием наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (КУФ) SDO/AIA и восстановлением структуры магнитного поля на основе данных SDO/HMI. Наиболее вероятно, что событие являлось круговой вспышкой, в которой наблюдались микроволновые источники, связанные с круговыми лентами и удаленным источником.

Рассмотрена эволюция всплесков от микроволнового до метрового диапазона от 9 ГГц до 15 МГц. Проанализированы задержки между микроволновым и метровым излучением с использованием фотометрии изображений СРГ и данных спектрополяриметра БШМС. Показано, что разные радиовсплески имеют различные временные задержки относительно микроволнового источника. Анализ скорости дрейфа радиовсплесков подтверждает различие задержек у разных радиовсплесков относительно места первичного энерговыделения в солнечной атмосфере, связывая это с различными энергиями электронов.

Обсуждается модель, объясняющая то, как микроволновый всплеск простой структуры привел к сложному отклику, наблюдаемому в метровом диапазоне.

БЫСТРОЖИВУЩЕЕ СОБЫТИЕ НА ФАЗЕ СПАДА ВСПЫШКИ 22 МАЯ 2021

Мотык И.Д.¹, Сетов А.Г.¹, Шамсутдинова Ю.Н.¹, Кашапова Л.К.¹, Куприянова Е.Г.², Мышьяков И.И.¹, Жданов Д.А.¹

1. ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, ilymotyk@gmail.com

2. ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

22 мая 2021 на фазе спада вспышки класса C6.0 по GOES классификации с максимумом в 06:15:15 UT, Иркутский радар некогерентного рассеяния зафиксировал всплеск на частоте 161 МГц в период 06:16:45 — 06:17:00 UT, мощность потока которого была около 1500 сеп. Согласованность с динамическими спектрами со спектрографов сети e-Callisto в спектральном диапазоне 160-164 МГц подтвердила его солнечную природу. Также, динамические спектры указывали на то, что событие является радио всплеском III типа. Анализ корреляционной кривой Сибирского радиогелиографа (СРГ) на частоте 5.6 ГГц также показал наличие отклика в микроволновом диапазоне во время этого события. Вспышка, во время которой произошло событие была классифицирована как круговая. Такие вспышки отличаются от классических двухленточных вспышек особенной магнитной структурой - магнитный купол, с которым связаны круговые ленты, соединённый петлей с удалённым источником.

Для того чтобы определить месторасположение микроволнового источника были построены радиоизображения по данным СРГ на частоте 5.6 ГГц. Построенный для микроволнового всплеска временной профиль потока согласуется с временными профилями в метровом диапазоне по данным других инструментов, что дополнительно подтвердило правильность локализации источника. Данный источник всплеска располагался рядом с круговой вспышкой, однако не был пространственно связан с ней. Проведенный вейвлет анализ временных профилей события выявил наличие квазипериодических пульсаций с периодом около 4 секунд на частотах 5.6 ГГц и 161 МГц. Обсуждаются сценарии, объясняющие возникновение исследованного события на фазе спада круговой вспышки.

СОВМЕСТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ИНСТРУМЕНТАМИ KONUS-WIND И SOLO/STIX

Лысенко А.Л., Флейшман Г.Д.

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

В феврале 2020 г. на гелиоцентрическую орбиту был запущен аппарат Solar Orbiter (SoLO) с инструментом STIX на борту. Этот эксперимент предоставляет спектры и рентгеновские изображения областей Солнца, скрытых от глаз наблюдателя с Земли. Комбинация данных SoLO/STIX и наземных и околоземных телескопов позволяет, таким образом, проводить регулярные стереоскопические наблюдения Солнца. Инструментом, очень хорошо подходящим для таких совместных наблюдений, является Konus-Wind благодаря нахождению вблизи точки Лагранжа системы Земля-Солнце и отсутствию затенений Землёй. Konus-Wind предоставляет временные профили и спектры в жёстком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах. Совместные наблюдения этих двух инструментов позволяют улучшить понимание процессов ускорения и распространения электронов в солнечных вспышках. В первую очередь такие наблюдения важны для изучения так называемых залимбовых вспышек, основания петель которых располагаются далеко (до 40 градусов) за солнечным лимбом, но при этом корональные источники наблюдаются со стороны Земли в широком диапазоне длин волн от радио до гамма.

АНИЗОТРОПИЯ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Мерзляков В.Л.

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

Изучалось угловое распределение интенсивности излучения солнечной вспышки в мягком рентгеновском диапазоне. Для анализа использовались интегральные величины потока излучения, регистрируемого аппаратом GOES. Анализ проводился на основе зависимости максимального рентгеновского потока от положения вспышки на диске Солнца. Для вспышек энергетического класса X статистически установлено, что величина изучаемого потока имеет минимум при положении вспышки на угловом расстоянии 40° от центра диска. Появление такого минимума объясняется особенностями выхода электронов из зоны ускорения. Эта особенность состоит в том, что имеется значительное количество электронов, которые движутся перпендикулярно вертикальной оси хромосферного источника вспышки. Модельные расчеты показали, что такой «перпендикулярный» поток электронов составляет не менее $2/3$ от величины потока электронов, выходящих в направлении оси хромосферного источника.

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ОЧАГАХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Головко А.А., Салахутдинова И.И.

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

Для анализа динамических процессов в активной области №12673, показавшей высокую вспыхивающую активность 6-10 сентября 2017 г., привлечен метод микроканонического мультифрактального анализа [1-3], позволяющий выявить участки с увеличенной перемежаемостью (УП) рельефа магнитного поля и лучевой скорости в активной области. В этих участках мультифрактальный спектр уширен по сравнению с соседними участками. Коэффициент вариации в них достигает 94%, тогда как для соседних участков – 17%

Выходы новых магнитных потоков диагностируются по возрастанию площади участков УП, сопровождающему увеличению общего беззнакового магнитного потока активной области [3]. В периоды вспышек и быстрого ступенчатого уменьшения магнитного потока со скоростью до 4×10^{18} Мкс/с, обнаружены кратковременно существующие участки УП. Обсуждается соотношение элементов структуры этих участков в распределениях магнитного поля и лучевой скорости.

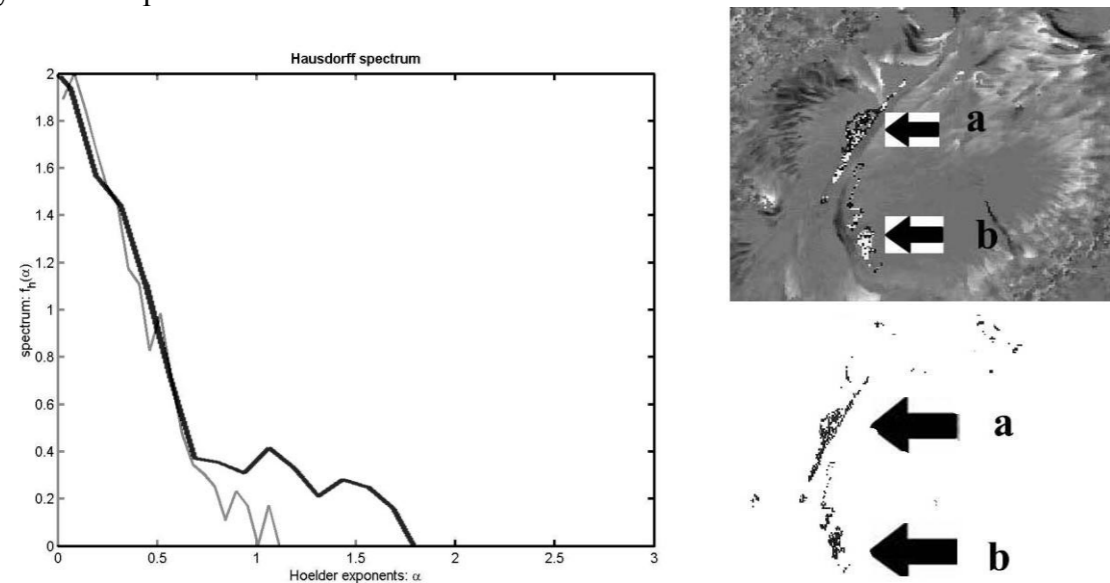


Рис. 1. Левая панель - мультифрактальные спектры особого участка с увеличенной перемежаемостью (жирная линия) и фона (тонкая линия). Уширение спектра дает возможность локализовать эти особые участки на сегментированных изображениях. Правая панель – пример применения метода. Верхняя часть – распределение лучевой скорости по данным SOT Hinode в активной области №12673 во время вспышки балла X1.3, произошедшей 7 сентября 2017 г., нижняя часть – мультифрактальное сегментированное изображение, выделены участки УП в центрах активности **a** и **b**.

1. Макаренко Н.Г., Князева И.С. // Известия вузов. ПНД 2009. Т.17, №5. С. 8.
2. Головко А.А., Салахутдинова И.И. // Астрон. журн. 2015. Т. 92, №8. С. 650.
3. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. // JASTP 2018. V. 179. P. 120-127.

РАСЧЕТ МОДЕЛИ СПОКОЙНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, kupry@asu.cas.cz

Мы представляем наблюдения спокойного протуберанца расположенного на восточном лимбе Солнца. Весь материал был получен авторами 22 октября 2013 г. в 10:39 - 11:07 UT на горизонтальном солнечном телескопе Чешской обсерватории Академии Наук (Ondřejov observatory). Цель работы – получение значений потоков излучения в линиях H CaII, H β , D3, H α и CaIR 8542 Å для спокойного протуберанца и сравнение результатов с расчетными значениями. Выполнены расчёты в линиях водорода, иона CaII и атома гелия с учётом основных процессов, определяющих излучение газа непрозрачного в спектральных линиях. Результаты обсуждаются.

НАБЛЮДЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЭРУПЦИИ ВОЛОКОН

Березин И.А., Тлатов А.Г.

Кисловодская Горная Астрономическая Станция ГАО РАН, Россия, iberalex@ya.ru

Исследования эруптивных волокон и связанных с ними корональных выбросов массы (КВМ) основываются на доплеровских измерениях в хромосферных линиях: H-альфа, Ca II K и других. Такие наблюдения носят эпизодический характер и, как правило, производятся в ограниченной области диска Солнца с помощью фильтров, настроенных на несколько длин волн в ядре и крыльях спектральной линии. Настоящая работа основана на данных спектрографических наблюдений полного диска Солнца в линии H-альфа на Кисловодской Горной Астрономической Станции. Данные получены на патрульном телескопе, ведущем непрерывные наблюдения со временем сканирования солнечного диска порядка одной минуты. По результатам наблюдений были восстановлены мелкомасштабные поля лучевых скоростей нескольких эруптивных волокон, наблюдавшихся в 2021 году. Мы отслеживали скорости волокон на протяжении нескольких дней до эрупции и обнаружили, что активизация волокна начинается за 6-20 часов до эруптивной стадии. Активизация проявляется как рост возмущений в мелкомасштабном поле лучевых скоростей. В дальнейшем это позволит осуществлять прогноз КВМ на патрульных спектрогелиографах с достаточной заблаговременностью. Сама эруптивная фаза длится 1-3 часа и характеризуется ростом скорости по форме близкому к экспоненциальному. Наш анализ показывает рост средних скоростей до ~45-55 км/с, при этом характер ускорения согласуется с более поздними наблюдениями КВМ на коронографе LASCO.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-22-00165.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭРУПЦИЙ

Радивон А.В., Зимовец И.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, radivon.av@phystech.edu

До сих пор точно не установлена связь между эруптивными протуберанцами, корональными выбросами массы (КВМ) и солнечными вспышками. Надежное количественное определение кинематических характеристик эруптивных протуберанцев на Солнце важно для понимания их физики, их связи со вспышками и корональными выбросами массы, что необходимо для изучения и прогнозирования космической погоды. В данной работе был реализован метод численного вычисления производных с применением регуляризации, который берет за основу данные из диаграммы «время-расстояние» и позволяет получить аппроксимацию данных необходимой гладкости, а также минимизировать получаемые ошибки кинематических кривых. Работа метода была исследована при различных наборах данных и размерах изначальных ошибок, отдельно рассмотрено наличие краевых эффектов. Был проведен сравнительный анализ результатов данного метода с результатами [1], [2], [3] и др.

1. Chen, H., Zhang, J., Cheng, X., Ma, S., Yang, S., & Li, T. (2014), *The Astrophysical Journal*, 797, L15.2. Frank A.G., Bugrov S.G., Markov V.S. // *Phys. Lett. A* 2009. V. 373. P. 1460.
2. Qiu, Y., Guo, Y., Ding, M., & Zhong, Z. (2020), *The Astrophysical Journal*, 901, 13.
3. Gou, T., Veronig, A. M., Liu, R., Zhuang, B., Dumbović, M., Podladchikova, T., Reid, H. A. S., Temmer, M., Dissauer, K., Vršnak, B., & Wang, Y. (2020), *The Astrophysical Journal*, 897, L36.

ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАЕКТОРИИ КВМ ПО ДАННЫМ LASCO

Ожередов В.А., Струминский А.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

В докладе будет представлено построение алгоритма аппроксимации траектории корональных выбросов массы (coronal mass ejection, CME) от предполагаемой точки старта до моментов времени, когда CME покидает поле зрения LASCO. Из базы данных LASCO [1] авторы отобрали семнадцать CME, связанных с хорошо известными солнечными вспышками. Данные LASCO по этим CME имеют особенности, которые показывают, что распространенные «наивные» алгоритмы на этих данных скорее всего не работают. Это открывает возможность валидации рассматриваемых в работе подходов. В частности, представляет интерес CME от 6-го сентября 2011-го года: его первое появление в поле зрения LASCO задержано относительно времени старта более чем на 40 мин., а оцененная LASCO скорость в момент первого наблюдения менее 600km/sec. Challenge состоит в том, что экстраполяция траектории в область между точками старта и первого наблюдения «наивными» методами дает стартовое ускорение меньше 1km/sec², которое не представляется разумным. Авторы используют двухэтапный подход: вначале отыскивается момент времени старта CME через появление определенных последовательностей «электромагнитных событий»; затем оптимизируется т.н. мультиполиномиальная модель, элементы которой были заложены в работе [2], которая дает на выходе зависимость координаты CME от времени и как следствие разумные значения ускорения на старте.

1. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/, дата обращения 12.10.2022
2. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю. и др. // Геомаг. и аэр., 2021, т.61, с. 683.

НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

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

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

В данной работе мы исследуем, где происходит нагрев плазмы во время корональных выбросов массы (КВМ). Для этой цели мы использовали данные спектрогелиографа Mg XII, работавшего на спутнике КОРОНАС-Ф. Этот инструмент получал изображения солнечной короны в линии Mg XII 8.42 Å. Данная линия излучает только при температурах более 4 МК, что делает спектрогелиограф удобным прибором для изучения процессов нагрева в короне Солнца.

Проанализировав архив изображений спектрогелиографа Mg XII, полученных с 2001 по 2003 года, мы обнаружили 10 высокотемпературных эруптивных событий. Каждое из событий было ассоциировано с КВМ. Наблюдаемые эруптивные структуры имели температуру более 4 МК и характерный размер порядка 100 Мм. Время жизни структур на изображениях Mg XII лежало в пределах от 10 мин до 2 ч. Интенсивность эруптивных структур составляла 0.8-12 % от интенсивности соответствующих вспышек.

Основываясь на форме эруптивных структур, мы разделили их на три группы: петлеобразные, слоеобразные, и облакообразные. Мы интерпретировали петлеобразные структуры как горячие эруптивные магнитные жгуты, а слоеобразные структуры как горячую плазму, которая окружает токовый слой. Основываясь на имеющихся данных, мы не можем однозначно определить природу облакообразных структур. Их появление на изображениях Mg XII может быть объяснено проекционными эффектами, нагревом за счет ударной волны или мелкомасштабного пересоединения внутри объема КВМ.

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

ВОЗБУЖДЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В СОБЫТИЯХ БЕЗ КВМ

В.И. Киселёв, В.В. Гречнев, А.М. Уралов, И.И. Мышьяков

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

Пересмотрены четыре солнечных события, предыдущие исследования которых привели авторов к выводам о разных механизмах возбуждения ударных волн. В двух событиях возбуждение ударной волны связывалось с импульсом давления вспышечной плазмы. В третьем событии авторы предположили возбуждение волны петлёй, выпрямившейся после магнитного пересоединения. Ещё одно событие было связано с вероятным псевдо-КВМ.

Установлено, что все события произошли в конфигурациях с корональной нулевой точкой, а выяснение фактического сценария возбуждения ударных волн осложнялось наблюдательными трудностями. Радиовсплески II типа, наблюдавшиеся в четырёх событиях, а также возмущения в крайнем ультрафиолете (EUV-волны) в трёх событиях указывают на наличие ударных волн, тогда как корональных выбросов массы (КВМ) обнаружено не было.

Пересмотр этих событий согласовал их наблюдения с импульсно-поршневым возбуждением ударных волн эруптивными структурами. Ударная волна в конфигурации с корональной нулевой точкой возбуждается эрупцией магнитного жгута – компактного волокна, преобразующегося в струю при прохождении её окрестности. Эрупции волокон без КВМ в таких конфигурациях представляют собой отдельную категорию событий, ответственных за некоторые из наблюдаемых ударных волн. Анализ событий, измерения ударных волн и обсуждение результатов выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 21-72-00039 (В.И. Киселёв). Обработка данных, обзор сценариев возбуждения ударных волн, расчёт корональных магнитных конфигураций (В.В. Гречнев, А.М. Уралов, И.И. Мышьяков) выполнены при поддержке Минобрнауки России.

ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ДИММИНГОВ В ТЕЧЕНИЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Вахрушева А.А.¹, Шугай Ю.С.², Капорцева К.Б.², Калегаяев В.В.², Еремеев В. Е.²

¹ Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,

vakhr.anna@gmail.com

² НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

Корональные выбросы масс (КВМ) могут являться источниками сильных геомагнитных возмущений и моделирование их параметров на околоземной орбите является одной из важных задач в области солнечно-земных связей. В основном для анализа параметров КВМ в солнечной короне используют наблюдения с коронографов. Параметры КВМ, получаемые по изображениям с коронографов, являются проекциями, и определить точные параметры, а также направление движения не всегда возможно, не имея стерео-наблюдений. С КВМ можно связать такое явление в солнечной короне, как корональный димминг — краткосрочное понижение интенсивности части изображения Солнца в жёстком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском излучении.

В работе Dissauer et al., 2019 исследована связь параметров диммингов и КВМ (между максимальной скоростью КВМ и скоростью изменения площади димминга, средней интенсивностью димминга, скоростью изменения интенсивности), а найденные корреляции около 0.6 – 0.7, предполагают, что параметры диммингов, сопоставляемых с КВМ, можно использовать для уточнения направления движения и, возможно, скорости КВМ для моделирования их прохождения в гелиосфере до околоземной орбиты.

Мы провели исследования параметров диммингов за 24 солнечный цикл, используя базу данных Solar Demon (<https://www.sidc.be/solardemon/>), в которой содержатся данные по вспышкам и диммингам с 2010 года до настоящего времени; детектирование и обработка происходит по изображениям диска Солнца с SDO/AIA в длине волны 211 Å для диммингов и в длине волны 94 Å для вспышек. Параметры диммингов были рассчитаны по выборке за 2010-2018 гг. Гистограмма распределения средней широты диммингов показывает, что максимумы частоты событий приходятся на широты Солнца около ± 20 градусов. 51% диммингов ассоциированы со вспышками. Достаточное количество (25%) событий происходит над лимбом. В максимуме солнечной активности наблюдается гораздо больше диммингов, чем в минимуме. В течение цикла значения интенсивности, площади, и их производные, в среднем сначала растут, потом, к минимуму активности, падают; в максимуме активности значительно сильнее разброс этих параметров.

Наблюдается корреляция между центральным углом димминга и центральным углом КВМ – коэффициент корреляции около 0.9. Наверное, наш алгоритм отбора даёт хорошие корреляции между углами, и это может быть использовано для расчёта скорректированной скорости. Мы не выявили параметров диммингов из базы данных Solar Demon, которые имеют значимую корреляцию со скоростью КВМ из базы данных Cactus и на данном этапе работы могут быть использованы для моделирования КВМ.

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

1. Dissauer K., Veronig A.M., Temmer M., Podladchikova T. // The Astrophysical Journal 2019 V. 874 P. 123

ВРЕМЕННОЙ МАСШТАБ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Чариков Ю.Е., Шувалова В.И., Складорова Е.М., Шабалин А.Н.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, Y.Charikov@yandex.ru
ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Жесткое рентгеновское (ЖР) и гамма излучение, регистрируемое в солнечных вспышках, косвенно подтверждают наличие электронов, ускоренных до энергий сотни кэВ и выше. Однако, несмотря на обилие наблюдений до настоящего времени не удается строго определить модель ускорительного процесса. Подобная неопределенность связана с трансформацией функции распределения электронов, как в околоземном пространстве, так и в магнитоактивной плазме в короне – хромосфере Солнца. Современный подход в определении модели ускорения базируется с одной стороны на теоретических разработках (модели токового слоя и пересоединения, например), а с другой на моделировании процессов переноса и ускорения ускоренных электронов в плазме короны и хромосферы активной области, сопровождающихся генерацией электромагнитного излучения, характеристики которого должны удовлетворять наблюдаемым значениям.

В данной работе основное внимание уделяется временным характеристикам процесса ускорения электронов в солнечных вспышках. Для решения подобного вопроса будем использовать наблюдения в ЖР излучении с энергией выше 10 кэВ. Анализ ЖР излучения, зарегистрированного на спутниках YОНКОH, CGRO/BATSE, Fermi в ряде солнечных событий, обнаруживает сверхтонкую временную структуру – спайки длительностью сотни миллисекунд. В ходе подобного анализа делались попытки определить пространственную локализацию источников спайков, и в частности, их обнаружение в верхних, корональных частях вспышечных магнитных петель. Для этого привлекались результаты наблюдений на спутниках YОНКОH и RHESSI лимбовых событий. Критерий определения рентгеновского спайка – превышение скорости счета уровня 3σ не менее, чем в трех временных бинах, каждый длительностью 16, 64, 128 мс в разных экспериментах. В качестве основного вывода, по результатам анализа нескольких событий, следует утверждение, что подобные спайки ЖР излучения генерируются, но практически только в основаниях магнитных петель.

Из модельных представлений кинетики переноса ускоренных электронов в плазме с заданными параметрами следует, что если концентрация плазмы в корональной части вспышечной петли превышает значение $\sim 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$, то генерация ЖР спайков возможна также и в вершине вспышечных петель при условии подобной временной структуры ускоренных электронов в момент их инжекции. Моделирование кинетики ускоренных электронов и сравнение ЖР излучения с наблюдениями позволяет сделать вывод о реализации миллисекундных процессов ускорения электронов в солнечных вспышках и, косвенно, определить концентрацию плазмы в корональной части вспышки.

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЕСТКИХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ В МОДЕЛИ ВСПЫШКИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ТОКОВЫМ СЛОЕМ

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

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, Shabalin.FTI@yandex.ru

В стандартной модели вспышки CSHKP (Carmichael-Sturrock-Hirayama-Kopp-Pneuman) предполагается, что первичное ускорение заряженных частиц происходит в области каспа и токового слоя в корональной части вспышечных магнитных структур над замкнутой структурой магнитных петель. Выброс бесстолкновительной плазмы из области магнитного пересоединения сопровождается релаксацией первоначально вытянутой в направлении токового слоя магнитной структуры к замкнутой конфигурации, близкой к дипольной. Релаксирующие таким образом магнитные петли претерпевают продольно поперечное сокращение, что, в свою очередь приводит к дополнительному ускорению электронов – бетатронному и ускорению Ферми первого рода. Подобная структура магнитного поля влечет за собой появление пространственных и временных особенностей в поведении жестких рентгеновских (ЖР) и радио- источников излучения.

В работе для вспышек SOL2013-05-13T02:12 и SOL2013-05-13T16:04 проведен анализ изменения высоты коронального ЖР источника. На начальной стадии ЖР потока во вспышках обнаружено отсутствие повышения высоты источника, в некоторые периоды понижение, что не объясняется в рамках стандартной модели вспышки. В основной фазе вспышки наблюдается ожидаемое в рамках стандартной модели повышение ЖР источника. Также наблюдается разделение ЖР источников по высоте в зависимости от энергии – источники на больших энергиях оказываются выше. Кроме этого, на начальной стадии обнаружена отрицательная корреляция проекционной площади ЖР источника в короне и ЖР потока. Анализ динамики показателя спектра ЖР излучения выявил субминутные и минутные паттерны Soft-Hard-Soft. Анализ спектров временных задержек выявил не характерный для оснований петли растущий спектр временных задержек в событии SOL2013-05-13T16:04. В обоих событиях спектр временных задержек в корональном источнике в некоторые фазы вспышки оказывался спадающим, хотя с точки зрения стандартных представлений о распространении ускоренных электронов, в вершине вспышечных петель ожидается растущий спектр временных задержек.

Для интерпретации обнаруженных явлений были рассчитаны функции распределения электронов в рамках решения нестационарного релятивистского кинетического уравнения, в котором помимо кулоновской диффузии и магнитного отражения учитывалась динамика магнитных полей в процессе их релаксации, бетатронное и Ферми ускорение первого рода (так называемая модель коллапсирующих ловушек). Показано, что антикорреляция площади ЖР источников и потока вызвана изменением сечения вспышечных петель вследствие сохранения магнитного потока, в результате чего при релаксации магнитного поля сечение петли уменьшается, а концентрация плазмы возрастает. Soft-Hard-Soft паттерны объясняются моделью в которой происходит последовательная релаксация одиночных вспышечных петель. Находит свое объяснение в рамках рассчитанной модели и растущий спектр временных задержек в основаниях магнитной петли, который вызван преимущественно крайне высоким пробочным отношением релаксирующей петли. В целом показано, что многие особенности в пространственном и временном поведении ЖР источников могут быть объяснены в рамках модели коллапсирующих ловушек.

УСКОРЕНИЕ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛЕ НА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ: РЕЖИМ СОГЛАСОВАННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Филатов Л.В.¹, Мельников В.Ф.²

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

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

Вистлеры (свисты) могут играть важную роль в кинетике нетепловых электронов во вспышечных петлях. Это относится как к процессам рассеяния электронов по питч-углам, так и к процессам их стохастического ускорения на турбулентности вистлеров. В работе (Filatov & Melnikov, Ge&Ae 2022) мы рассмотрели задачу о доускорении инжектированных нетепловых электронов при их резонансном взаимодействии с вистлерами, источником которых являются возмущения магнитного поля петли, возникающие при первичном нестационарном энерговыделении. Спектр турбулентности при этом был задан и неизменен во времени. Естественный вопрос об изменении спектра из-за генерации или затухания вистлеров при взаимодействии с электронами не рассматривался в силу несогласованности задачи. Однако, динамика спектра турбулентности имеет первостепенное значение для рассеяния и ускорения электронов в петле.

В настоящей работе рассматривается согласованная задача о взаимодействии вистлеров и энергичных электронов. Это позволяет исследовать не только процессы рассеяния и ускорения электронов, но так же генерацию и затухание самой вистлеровской турбулентности. Стохастического доускорение инжектированных нетепловых электронов учитывается путем введения соответствующих диффузионных членов в нестационарное кинетическое уравнение Фоккера-Планка. В рамках модели неоднородной магнитной ловушки с заданной импульсной инжекцией нетепловых электронов показано, что наиболее эффективно доускорение происходит на энергиях $E > 300$ кэВ. Энергетический спектр при этом существенно уплощается во всех частях вспышечной петли. Определены свойства динамики распределений электронов по энергии, питч-углу и положению в петле на фазах роста и спада инжекции нетепловых электронов.

ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О РАЗВИТИИ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЫ ЭРУПТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

В.Г.Курт¹, Б.Ю.Юшков¹, В.И.Галкин^{2,1}

¹ НИИЯФ МГУ, Россия, vgk@srd.sinp.msu.ru; ² Физический ф-т МГУ, Россия

До сих пор неясно, каким образом процесс пересоединения в импульсной фазе солнечной вспышки приводит к эффективному ускорению электронов до ультрарелятивистских энергий вплоть до 100-200 МэВ, а протонов - до энергий в несколько сотен МэВ. Исследование изменений формы спектра излучения, прямое сопоставление интервалов времени таких изменений с моментами изменения скорости пересоединения магнитного потока и с изменениями глобальной структуры магнитного поля вспышки позволяет если и не дать исчерпывающий ответ, то пролить свет на этот вопрос.

Нетепловые электроны генерируют тормозное жесткое рентгеновское и гамма-излучение с энергиями вплоть до энергии самих электронов. Ускоренные протоны/ионы при их взаимодействии с веществом генерируют узкие гамма-линии в области энергий 0.5-7 МэВ и гамма-излучение с широким плато в области энергий 30-100 МэВ, возникающее в результате распада нейтральных и заряженных пионов. В общем случае спектр солнечной вспышки в интервале энергий 20 кэВ-100 МэВ представляет собой совокупность вышеназванных компонентов.

В данной работе мы исследовали временное поведение высокоэнергичного гамма-излучения и его спектрального состава в импульсной фазе нескольких вспышек, для которых имеются данные о скорости пересоединения магнитного потока и/или другие важные параметры, такие, как электрическое поле, место ускорения. Такие события единичны, и, априори, полученные результаты не могут претендовать на безоговорочную общность.

Во вспышках 26-03-1991 г. и 28-10-2003 г., ускорение электронов до ультрарелятивистских энергий произошло на небольшой высоте в самом начале импульсной фазы вспышки. Во вспышке 25-08-2001 ускорение электронов до энергий ≥ 70 МэВ произошло в интервале времени основного энерговыделения. Возможно, высокая эффективность этого процесса обусловлена сильным электрическим полем со значениями ≥ 40 В см⁻¹.

В шести событиях с регистрацией «пионного» гамма-излучения было достоверно показано, что основное энерговыделение и процесс ускорения протонов до энергий в несколько сотен МэВ начинаются после максимума скорости пересоединения магнитного потока.

Собрав эти результаты вместе, мы показываем, что изменения эффективности ускорения частиц происходит во время существенного изменения скорости пересоединения магнитного потока. Мы заключаем, что наблюдаемое запаздывание максимума энерговыделения по сравнению с временем максимума скорости пересоединения магнитного потока является существенной характеристикой вспышки, ассоциированной с корональным выбросом массы.

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 25 АВГУСТА 2001 ГОДА С ПРОЦЕССАМИ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ.

Б.Ю.Юшков¹, В.Г.Курт¹, В.И.Галкин^{2,1}

1 НИИЯФ МГУ, Россия, clef@srd.sinp.msu.ru; 2 Физический ф-т МГУ, Россия

Ускорение заряженных частиц и нагрев плазмы в солнечной вспышке являются результатом выделения энергии, вызванной процессом магнитного пересоединения. Чтобы найти связь между этими процессами, мы исследовали импульсную фазу эруптивной вспышки (X5.3) 25 августа 2001 года. Процессы ускорения частиц высоких энергий были исследованы на основе измерений КОРОНАС-Ф/СОНГ в диапазоне энергий 0.15–100 МэВ. Эти данные были дополнены результатами измерений GOES, Yohkoh и Konus-Wind. Высокая степень согласия между данными, полученными с помощью разных детекторов в широком диапазоне энергий, доказывает, что измеренные профили излучения действительно отражают процесс развития вспышки, который происходил в виде последовательности импульсов ускорения длительностью 2-3 минуты. На основе данных о пересоединенном магнитном потоке, полученных Гречневым с соавторами, мы вычислили скорость изменения магнитного потока $d\phi/dt$. Максимум производной мягкого рентгеновского излучения dI_{SXR}/dt , которая рассматривается как «прокси» временного поведения энерговыделения вспышки, запаздывает по отношению к максимуму $d\phi/dt$ приблизительно на одну минуту, что соответствует ранее полученным оценкам для нескольких эруптивных событий. Максимумы жесткого рентгеновского и гамма-излучения совпадают с максимумом dI_{SXR}/dt . По данным КОРОНАС-Ф/СОНГ восстановлены последовательные спектры гамма-излучения вспышки. Гамма-излучение с широким плато в области энергий 30-100 МэВ, возникающее в результате распада нейтральных и заряженных пионов, появляется в спектре излучения непосредственно после максимума скорости изменения магнитного потока $d\phi/dt$. Регистрация «пионного» гамма-излучения представляет собой неоспоримое доказательство ускорения протонов до энергий в несколько сотен МэВ.

ТЕМП УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И РЕГИСТРАЦИЯ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ >100 МэВ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ

Струминский А.Б.¹, Григорьева И.Ю.², Логачев Ю.И.³, Садовский А.М.¹

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия astruminsky@gmail.com

² ГАОРАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

Время ускорения электронов и протонов из состояния покоя до одинаковых скоростей различается m_p/m_e раз. Поэтому, если время ускорения солнечных электронов до энергии $E \sim 100$ кэВ составляет от десятков до сотен миллисекунд, то время ускорения солнечных протонов (СП) до $E \sim 200$ МэВ будет от десятков до сотен секунд. В таком случае разброс времени первого прихода на орбиту Земли СП с $E > 100$ МэВ будет зависеть от темпа ускорения электронов (10 МэВ/с и 1 МэВ/с). При длине распространения 1.3 а.е. разброс будет ~ 10 мин, и можно говорить о «раннем» или «позднем» приходе СП.

Рассматривается время первого прихода СП в 17-ти событиях, в которых детектором ACS SPI были зарегистрированы солнечное жесткое рентгеновское (HXR) излучение с $E > 100$ кэВ и последующее протонное возрастание с $E > 100$ МэВ. В 15-ти событиях из 17-ти детектор PAMELA регистрировал СП с $E > 100$ МэВ, в 14-ти из 17-ти телескоп FermiLAT регистрировал солнечное γ -излучение с $E > 100$ МэВ. Шесть из 17-ти сопровождалось наземным возрастанием интенсивности космических лучей (GLE).

Первый приход СП на орбиту Земли определялся в каждом событии по значимому «протонному» превышению над фоном ACS SPI во время или после HXR всплеска. Все события рассматривались относительно выбранного нами нулевого времени родительских вспышек (за 0 мин принято начало радиоизлучения с наибольшей зарегистрированной частотой Radio Solar Telescope Network). «Ранний» приход протонов на орбиту Земли ($< +20$ мин), соответствующий «быстрому» ускорению электронов (10 МэВ/с), наблюдался в 6 событиях (5 из них GLE). «Поздний» приход протонов ($> +20$ мин), соответствующий «медленному» ускорению электронов (1 МэВ/с), наблюдался в 8 событиях (1 из них GLE). В 3-х событиях распространение коронального выброса массы ухудшало магнитное соединение источника с наблюдателем, что приводило к «задержанному» приходу протонов ($> +30$ мин).

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

О НЕОБХОДИМЫХ И ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК

Григорьева И.Ю.¹, Струминский А.Б.²

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия iruna.2014.irina@mail.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрен период 02-10 августа 2011 года (начало роста 24-го цикла солнечной активности), в котором было зарегистрировано подряд 2 солнечных протонных события (СПС) согласно критерию каталога СПС (<https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>) и 4 СПС согласно сводной таблице за 24 цикл (<http://swxdev.sinp.msu.ru>). При этом во временных профилях интенсивности протонов (SOHO_ERHIN) видно 5 возрастных, связанных с родительскими солнечными вспышками, а наибольшее 6-ое возрастание (максимум потока протонов за этот период) было вблизи момента SC (внезапное начало магнитной бури) 5-ого августа. Анализ этих пяти родительских вспышек, благоприятно расположенных для наблюдения СПС, показывает, что все они выделены по трем наблюдательным признакам:

- 1) температура вспышечной плазмы T , вычисленная по данным двух каналов детектора GOES мягкого рентгеновского излучения была > 12 МК в течении двух и более минут;
- 2) плотность плазмы соответствовала плазменным частотам < 610 МГц (RSTN);
- 3) ускорение коронального выброса массы со скоростью $V > 618$ км/с (SOHO_LASCO).

Отличительной особенностью вспышек, в которых ускорялись протоны с энергией $E > 300$ МэВ (наблюдения СПС (сводная таблица за 24 цикл) и гамма-излучения с энергией $E > 100$ МэВ (FermiLAT)), был четвертый признак: 4) генерация жесткого рентгеновского излучения с энергией $E > 100$ кэВ (RHESSI, ACSSPI) длительностью > 5 мин. Именно эти два события 4-ого и 9-ого августа 2011 года отвечают критериям согласно каталогу СПС.

По нашему мнению, эти четыре особенности вместе являются необходимыми и достаточными наблюдательными условиями для предсказания в реальном времени наиболее опасных протонных вспышек.

Работа поддержана субсидиями по темам «Многоволновое активное Солнце» (ИЮГ) и «Плазма» (АБС).

ИЗОЛИРОВАННЫЕ СОБЫТИЯ СКЛ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПРИХОДОМ БЫСТРЫХ ШТОРМОВЫХ ЧАСТИЦ (ESP)

Базилевская Г.А.¹, Дайбог Е.И.², Логачев Ю.И.²

¹ФИАН, г. Москва, Россия, bazilevskayaga@lebedev.ru

²НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

По данным Каталогов солнечных протонных событий за 23-й и 24-й циклы солнечной активности [1, 2] выбраны события, не отождествленные с надежным источником частиц, но совпадающие с приходом межпланетных ударных волн. Как правило, это события с малыми потоками протонов, зарегистрированных около Земли. Показано, что источником этих событий могли быть вспышки, сопровождаемые КВМ, произошедшие за десятки часов до начала возрастания потоков частиц на орбите Земли.

1. Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Вашенюк Э.В. и др. // Каталог солнечных протонных событий 23-го цикла солнечной активности (1996 – 2008 гг.). М. 2016. http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/katalog_SPS_23_cikla_SA.pdf. doi: 10.2205/ESDB-SAD
2. Логачёв Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А. и др. // Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009 – 2019 гг.). М.: Мировой центр данных по солнечно-земной физике, 2022. 970 с. doi: 10.2205/ESDB-SAD-008

ОСОБЕННОСТИ ЭРУПТИВНЫХ ВСПЫШЕК РЕНТГЕНОВСКОГО КЛАССА М

Бакунина И.А., Мельников В.Ф., Абрамов-Максимов В.Е.

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

По наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма (17 ГГц), SDO/AIA и SDO/HMI проанализированы активные области, в которых наблюдались вспышки рентгеновского класса М, сопровождавшиеся СМЕ. Результаты нелинейной бессиловой 3D – экстраполяции магнитного поля в корону активной области (GX – simulation) выявили формирование и существование магнитных жгутов, которые наблюдаются в предвспышечной фазе в той области, где будет инициирована вспышка. Там же мы наблюдаем скрещенные КУФ петли и максимум яркости микроволнового излучения. После вспышки происходит кардинальная перестройка магнитных жгутов.

КАТАЛОГ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ВСПЫШЕЧНЫХ СОБЫТИЙ ТЕКУЩЕГО 25 ЦИКЛА В СОВРЕМЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Забаринская Л. П.¹, Ишков В.Н.^{1,2}, Сергеева Н.А.¹

¹ ГЦ РАН, ² ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, vitish@wdcb.ru

В настоящее время экспериментальные данные о солнечной активности находят самое широкое применение в области фундаментальных и прикладных научных исследований – изучении явлений, происходящих на Солнце и в межпланетном пространстве, и их влияния на процессы во внешних и внутренних оболочках Земли. Наиболее ценными являются данные многолетних наблюдений. Мировой центр данных по солнечно-земной физике в Москве обладает представительной коллекцией результатов наблюдений, полученных мировой сетью солнечных обсерваторий и на приборах, установленных на космических аппаратах. Для успешного исследования вспышечной активности и распределения значимых вспышечных событий в активных областях текущего солнечного цикла (СЦ) очень полезно иметь постоянно пополняющийся накопительный каталог значимых солнечных вспышечных событий по данным наблюдений в реальном времени. Каталоги содержат для каждой вспышки временные параметры, рентгеновский и оптический (в Na линии) баллы, интегральный поток рентгеновского излучения, координаты (гелиографическая широта, кэррингтоновская долгота), активную область, в которой произошла вспышка, пиковый радио поток в выбранных частотах, динамические радио всплески, корональный выброс вещества, время и максимальную энергию жёсткого рентгеновского излучения, максимальный поток солнечных протонов и сопутствующие динамические явления в оптическом диапазоне. Такие каталоги были созданы для переходного СЦ23 – http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/FI_XXIII.pdf и первого цикла второй эпохи пониженной СА 24 цикла – http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/FI_XXIV.pdf. Для текущего СЦ25 такой каталог http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/FI_XXV.pdf стал интерактивным. Используя современные методы организации и представления данных, и для удобства работы, он снабжен системой ссылок на активные области, позволяющих переходить к более детальным описаниям активных областей, характеристикам групп пятен, в которых произошло данное вспышечное событие, и места события в соответствующем периоде вспышечного энерговыделения. Форма публикации каталога на сайте Центра является примером применения современного способа организации информации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России.

РОЛЬ СИНХРОТРОННЫХ ПОТЕРЬ В ГЕНЕРАЦИИ СУБ-ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Мельников В.Ф.¹, Филатов Л.В.²

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург,
v.melnikov@gaoran.ru

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

В работе (Fernandes et al., Solar Phys, 2017, V.292, P.21) проведён статистический анализ всех всплесков в диапазоне 200–400 ГГц, наблюдавшихся на бразильском суб-ТГц телескопе SST, и установлено, что в значительной их части (почти 50%), наклон спектра оказался отрицательным. Это свидетельствует о гиросинхротронной природе этих всплесков.

Целью настоящей работы является анализ роли синхротронных потерь релятивистских электронов в формировании частотного спектра синхротронного излучения в солнечных вспышечных петлях в суб-терагерцовом диапазоне. Анализ проводится в достаточно общем виде путём решения кинетического уравнения Фоккера-Планка для получения нестационарных распределений электронов по энергии, питч-углу и положению в магнитной петле. Далее эти распределения используются для расчёта частотных спектров гиросинхротронного излучения в диапазоне 1-1000 ГГц. В результате проведённых расчётов установлено, что при параметрах в радиоисточнике, типичных для солнечных вспышечных петель, синхротронные потери не оказывают существенного влияния на гиросинхротронный спектр наблюдаемого радиоизлучения в суб-ТГц диапазоне. Поэтому в этом диапазоне правомерно использовать те же методы радиодиагностики, что и в микроволновом диапазоне. Таким образом, суб-ТГц наблюдения солнечных вспышек и микровспышек на пущенном недавно в строй интерферометре ALMA открывают богатые возможности для радиодиагностики процессов ускорения и распространения релятивистских электронов в диапазоне энергий от единиц до десятков МэВ, ранее недоступном для прямых наблюдений.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ И ВРЕМЕННЫМИ ПРОФИЛЯМИ СОБЫТИЙ В СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рожкова Д. В., Кашапова Л.К.

ФГБОУ ВО ИГУ, г. Иркутск, Россия, dariarozhkova@icloud.com

Вопрос об источниках ускорения частиц, регистрируемых во время событий в солнечных космических лучах (СКЛ), остается открытым в течение многих десятков лет. Существует две основные модели - ускорение во ВРЕМЯ вспышек в солнечной атмосфере и ускорение на ударных волнах корональных выбросов массы (КВМ). Результаты различных исследований предоставляют экспериментальные и теоретические аргументы как в пользу одной, так и другой модели. Целью данной работы был анализ связи между процессами ускорения во время солнечных вспышек и событиями в СКЛ с помощью моделирования. использовались временные профили жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) и производная мягкого рентгена (эффект Ньюперта). Моделировались временные профили протонов СКЛ в полосе от 10 МэВ и выше, в предположении о том, что частицы получили ускорение только в атмосфере Солнца во время вспышки. Для сравнения с результатов моделирования экспериментальными данным были события в СКЛ, связанные с солнечными вспышками 11 апреля 2004 года и 17 марта 2003 года. Вспышки имели схожие профили в ЖР, но временные профили, связанных с ними событий в СКЛ, различались. Был проведен анализ параметров, которые влияют на форму, продолжительность и на мощность событий в СКЛ. Обсуждается возможность применения полученных результатов для исследования связи между процессами ускорения и энерговыделения в солнечных вспышках и параметрами события в СКЛ.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Шарыкин И.Н.

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

Приводятся результаты статистического анализа различных свойств гелиосейсмически активных солнечных вспышек 24 солнечного цикла до февраля 2014 г. из каталога [1]. Сравниваются две выборки вспышек: с гелиосейсмической активностью в виде «солнцетрясений» и выборка вспышек без фотосферных возмущений. Количественные параметры солнечных вспышек берутся из статистических работ серии «Global Energetics», выполненных Маркусом Ашванденом в 2014-2019 гг. [2-5]. Рассматриваются термодинамические параметры плазмы, излучающей рентгеновское и ультрафиолетовое излучение, параметры ускоренных электронов, количественные характеристики КВМ, различные типы энергий и характерных времен. Показано, что в сравнении с обычными солнечными вспышками гелиосейсмически активные вспышки характеризуются наличием скоростных КВМ, малыми характерными временами развития вспышечного процесса, большими энергиями ускоренных электронов и большей величиной диссипации свободной магнитной энергии.

1. Sharykin I.N., Kosovichev A.G. // *ApJ*, **895**:76 (14pp), 2020 May 20
2. Aschwanden M.J., Xu Ya., Jing Ju // *ApJ*, **797**:50 (35pp), 2014 December 10
3. Aschwanden M.J., Boerner P., Ryan D., et al. // *ApJ*, **802**:53 (20pp), 2015 March 20
4. Aschwanden M.J. // *ApJ*, **831**:105 (34pp), 2016 November 1
5. Aschwanden M.J., Kontar E.P., Jeffrey N.L.S. // *ApJ*, **881**:1 (22pp), 2019 August 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИНАМИКИ ФОТОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФОТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ М3.5 КЛАССА, ПРОИЗОШЕДШЕЙ 22 АВГУСТА 2015 Г.

Шарыкин И.Н.

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

В работе рассматривается гелиосейсмически активная солнечная вспышка М3.5 класса, произошедшая 22 августа 2015 г. Данное событие было выбрано в силу очень мощного «солнцетрясения» и центрального положения на диске Солнца, что очень удобно для анализа динамики магнитного поля по векторным магнитограммам. Основной целью работы является поиск особенностей магнитного поля как во всей вспышечной области, так и в области фотосферных возмущений. Используются данные векторных магнитограмм HMI/SDO, а также фильтрограмм данного прибора с целью найти первоначальные фотосферные возмущения. Показано, что акустические источники и первоначальные возмущения локализованы в области сильных электрических токов и горизонтального магнитного поля вблизи нейтральной линии. В постере приводятся первоначальные результаты анализа наблюдательных данных. Также показано сравнение карт акустических источников и первоначальных возмущений с ультрафиолетовыми и рентгеновскими изображениями.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ, В АВГУСТЕ 2011 ГОДА

Шаховская А.Н., Григорьева И.Ю.

КрАО РАН, пгт. Научный Республика Крым, Россия, anshakh@yandex.ru

Со 2го по 9е августа 2011 в активных областях 11261NOAA и 11263NOAA произошло 7 SXR вспышек класса М и одна класса Х. В результате 02.08.2011, 04.08.2011, 08.08.2011 и 09.08.2011 имели место протонные события различной интенсивности и выбросы корональной массы. В данной работе с помощью наблюдений AIA SDO, RSTN и GOES исследуются эти события. Показано, что в ряде событий имело место несколько неоднократное энерговыделение. Это не согласуется со стандартной моделью солнечной вспышки и требует дополнительных исследований.

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ СЛАБОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 03 ФЕВРАЛЯ 2022 ГОДА

Полухина С.А., Кашапова Л.К.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, s.a.polukhina.astro@gmail.com

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

Мы представляем предварительные результаты исследования эволюции солнечной вспышки класса C1 по GOES, произошедшей 03 февраля 2022 года (SOL2022-02-03T04:21UT) по наблюдениям в микроволновом диапазоне. Данное событие примечательно тем, что его практически не видно на временных профилях в мягком рентгеновском диапазоне, но оно хорошо различимо на корреляционных кривых Сибирского радиогелиографа (СРГ) в микроволновом диапазоне (6-12 ГГц). Структура временного профиля показывает, что оно состояло из нескольких всплесков. Целью исследования было локализовать положение различных всплесков и оценить поток излучения на частоте 5.8 ГГц. Для локализации положения и оценки потока микроволнового излучения всплесков были использованы изображения на частоте 5.8 ГГц, полученные на СРГ. Показано, что все всплески произошли в одном месте с разницей порядка 10 секунд и являются частью одной солнечной вспышки. Поток основного всплеска составил 1 сеп, последующих 0.3 сеп, что ниже границы чувствительности большинства солнечных спектрополяриметров. Обсуждается возможный сценарий и механизмы генерации излучения во данном событии.

СЕКЦИЯ «Солнечный ветер и гелиосфера»

Понедельник, 06.02. 2023 г., комната ЦО (Line 3)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
	<i>10.30 – 11.00</i>	<i>Перерыв на кофе</i>	
Председатели: <u>Ермолаев Ю.И.</u> / <u>Крайнев М.Б.</u>			
1	11.00 – 11.15	Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И.	Моделирование поведения интенсивности ГКЛ в периоды инверсии гелиосферного магнитного поля
2	11.15 – 11.30	Стародубцев С.А., Зверев А.С., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г.	Флуктуации космических лучей и мГД-волны в солнечном ветре
3	11.30 – 11.45	Зельдович М.А., Логачев Ю.И.	Энергетические спектры ионов ^3He , ^4He , C, O, и Fe надтепловых энергий в потоках частиц из долгоживущих корональных дыр
4	11.45 – 12.00	Петухов И.С., Петухова А.С., Петухов С.И., Готовцев С.И.	Особенности динамики параметров среды и плотности космических лучей в сильных форбуш-понижениях, связанных с магнитными облаками
5	12.00 – 12.15	Абунина М.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунин А.А.	Основные характеристики вариаций космических лучей и сопутствующих параметров в магнитных облаках
6	12.15 – 12.30	Калинин М.С., Крайнев М.Б., Luo Xi, Potgieter M.S.	О простой модели влияния коротирующих областей взаимодействия солнечного ветра на долговременные вариации интенсивности ГКЛ
	<i>12.30 – 13.30</i>	<i>Пленарный час</i>	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

	12.30 – 12.45	Открытие конференции	
	12.45 – 13.30	Зеленый Л.М.	Токовые структуры в космической плазме. Путешествие внутрь «сингулярности»
	13.30 – 14.30	Обед	

Среда, 08.02. 2023 г., Конференц-Зал (Line 1)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			Председатель: <u>Ермолаев Ю.И.</u>
1	09.00 – 09.15	Лукманов В.Р.	О корреляции уровня межпланетных мерцаний и скорости солнечного ветра
2	09.15 – 09.30	Думин Ю.В., Лукашенко А.Т., Свирская Л.М.	Об интерпретации антикорреляции температуры и плотности протонов в солнечном ветре
3	09.30 – 09.45	Тлатов А.Г., Березин И.А.	Моделирование магнитного поля внутренней короны в радиально расширяющемся солнечном ветре
4	09.45 – 10.00	Богачёв С.А., Рева А.А., Кириченко А.С., Ульянов А.С., Лобода И.П.	Влияние активных областей на характеристики солнечного ветра в максимуме цикла
5	10.00 – 10.15	Белова Е.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абунин А.А.	Геоэффективность спорадических явлений в 24-м солнечном цикле
6	10.15 – 10.30	Арутюнян С.Н., Кодуков А.В., Субботин М.О., Павлов Д.А.	Прототип службы прогноза спокойного солнечного ветра на основе МГД-моделирования и граничных условий модели WSA

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

	10.30 - 11.00	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Рязанцева М.О.</u>			
7	11.00 –11.15	Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Хохлачев А.А., Рязанцева М.О., Ермолаев М.Ю., Бородкова Н.Л.	Особенности солнечного ветра в эпоху низкой солнечной активности
8	11.15–11.30	Кочаровский Вл.В., Кузнецов А.А., Гарасёв М.А., Нечаев А.А.	Развитие магнитной турбулентности и эстафета мод в анизотропной плазме с каппа-распределениями частиц
9	11.30– 11.45	Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И.	Многоточечный анализ развития турбулентности при входе плазмы в магнитослой
10	11.45 –12.00	Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н.	Анализ спектров флуктуаций величины потока плазмы, и концентрации протонов, и альфа-частиц вблизи межпланетной и околоземной ударных волн солнечного ветра
11	12.00 –12.15	Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Рязанцева М.О., Рахманова Л.С.	Содержание гелия в ICME в 21-24 солнечных циклах
12	12.15 –12.30	Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.	Особенности функций распределения флуктуаций углов направления потока для различных типов солнечного ветра
	12.30 –13.30	Пленарный час.	
	12.30 –13.00	Корольков С.Д., Измоденов В.В.	О механизме нагрева солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях: новое объяснение старым данным Вояджера-2
	13.00 –13.30	Козелов Б.В.	Диагностика свойств ионосферы с помощью оптических измерений в арктическом регионе
	13.30 –14.30	Обед	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Председатель: <u>Измоленов В.В.</u>			
13	14.30 –14.45	Годенко Е.А., Измоленов В.В.	Трёхмерная нестационарная модель распределения межзвездной пыли в гелиосфере: сравнение с данными космического аппарата УЛИСС
14	14.45 –15.00	Перфильева Н.А., Корольков С.Д., Измоленов В.В.	Исследование развития волновых возмущений в области гелиосферного ударного слоя на примере модельной задачи
15	15.00 –15.15	Титова А.В., Измоленов В.В.	Рассеянное солнечное Лайман-альфа излучение как способ исследования межзвездных атомов водорода в гелиосфере
16	15.15 –15.30	Балюкин И.И., Измоленов В.В., Алексашов Д.Б.	Исследование влияния адиабатического нагрева/охлаждения на распределение захваченных протонов и потоки энергичных нейтральных атомов в гелиосфере
17	15.30 –15.45	Измоленов В.В., Алексашов Д.Б.	Влияние теплопроводности на глобальную структуру и течение солнечного ветра во внешней гелиосфере
18	15.45 –16.00	Корольков С.Д., Измоленов В.В.	Исследование неустойчивости трубчатых астросфер/гелиосферы
	16.00 –16.30	<i>Перерыв на кофе</i>	
Председатель: <u>Слемзин В.А.</u>			
19	16.30 –16.45	Лузгин С.Н.	Резонансное световое давление галактического Лайман-альфа фона как механизм диссипации турбулентных движений и нагрева межзвёздного газа в областях HI
20	16.45 –17.00	Кислов Р.А.	Исследование стационарного электрического поля в гелиосфере
21	17.00 –17.15	Горяев Ф.Ф., <i>Слемзин В.А.</i>	О связи ионного состава плазмы в потоках солнечного ветра с параметрами их источников на Солнце
	17.15 -18.30	<i>Постерная сессия</i>	

Постеры :

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

1. Лагойда И.А., Воронов С.А., Михайлов В.В., Дорошева Д.Н.
Изучение Форбуш понижений по данным космофизических экспериментов
2. Бородкова Н.Л., Сапунова О.В., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н.
Анализ динамики цугов колебаний магнитного поля и потока ионов солнечного ветра перед рампом ударной волны
3. Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В.
Магнитные полости в солнечном ветре, их влияние на положение головной околоземной ударной волны и геомагнитную активность
4. Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.
Эмпирическая модель долгопериодных вариаций космических лучей с учетом изменений полярного поля Солнца
5. Кузнецова Т.В.
Связь движения Солнца вокруг центра масс солнечной системы, тренда межпланетного магнитного поля и экстремумов циклов солнечной активности
6. Афанасьев Н.Т., Лукьянцев Д.С., Танаев А.Б.
Рефракционные эффекты залимбовых радиовсплесков в возмущенной солнечной короне
7. Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е.
Изменения жесткостей обрезания космических лучей во время бури 8-11 марта 2012 г в период CAUSES II.
8. Голубчина О.А.
Температурная характеристика нижней границы области формирования солнечного ветра в полярной корональной дыре над северным полюсом Солнца в сантиметровом диапазоне длин волн
9. Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Рязанцева М.О., Ермолаев М.Ю., Хохлачев А.А.
Крупномасштабные явления в 3м году 25 солнечного цикла
10. Куликов С.В., Глазкин Д.В., Добровольский И.А., Заруцкий А.А., Климов С.И., Коренский М.Ю., Петрукович А.А., Рыбьева Н.Е., Савин С.П., Скальский А.А., Стяжкин В.А.
Измерения магнитного поля на лунном орбитальном аппарате
11. Тревес Т.В., Рязанцева М.О., Хабарова О.В., Рахманова Л.С.
Влияние количества токовых слоёв в солнечном ветре на особенности спектра флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

12. Охлопков В.П.

Линейные конфигурации планет Венеры, Земли, Юпитера и солнечная активность

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ В ПЕРИОДЫ ИНВЕРСИИ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И.

ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, mkrainev46@mail.ru

Впервые эффекты 22-летней цикличности солнечных магнитных полей в анизотропии ГКЛ были замечены С. Форбушем в 1967-1969 гг. по изменению времени максимума суточной волны в данных ионизационных камер. В интенсивности же ГКЛ влияние переменной 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). С тех пор проявления в интенсивности ГКЛ 22-летней цикличности ГМП непрерывно исследуются в течение уже 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 характеризующихся общей полярностью A (знак 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 переключение в какой-то момент A с плюса на минус или наоборот, хотя 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, а также модели ГМП для этого периода. Более детально обсуждается и детализируется модель инверсии ГМП, предложенная десять лет назад в группе ФИАН. Приводятся и обсуждаются результаты 2D расчётов интенсивности ГКЛ, использующие эту модель инверсии ГМП, для четырёх последних периодов инверсии.

ФЛУКТУАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И МГД-ВОЛНЫ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

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

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

Хорошо известно, что галактические космические лучи (КЛ), которые являются заряженными частицами, при их распространении в гелиосфере подвержены модуляции со стороны, главным образом, межпланетного магнитного поля (ММП). В результате чего во время крупномасштабных возмущений солнечного ветра (СВ) часто наблюдаются их вариации с периодами от нескольких минут до 2-3 часов, которые называются «флуктуациями КЛ», и которые обычно не наблюдаются. При этом возникает закономерный вопрос: что же приводит к их возникновению, какова природа флуктуаций КЛ? В настоящее время в научной литературе существуют два различных с точки зрения теории механизма модуляции КЛ, которые предполагают, что флуктуации КЛ могут возникать при взаимодействии потока частиц с МГД-турбулентностью СВ, точнее с альфвеновскими и быстрыми магнитозвуковыми волнами [1, 2]. При этом, в первом случае, модуляции подвергается малая (менее 1%) анизотропная составляющая функции распределения КЛ, а во втором – значительно большая по величине (около 99%) ее изотропная составляющая. И в настоящее время есть убедительные доказательства, что флуктуации КЛ имеют магнитозвуковую природу. Именно в этом случае теория корректно описывает наблюдаемую связь между спектрами флуктуации КЛ и ММП. Но в любом случае нужно уметь выделять из данных прямых наблюдений ММП и параметров СВ все три ветки МГД-волн.

Поэтому в данной работе мы рассматриваем некоторые методы для определения вклада в наблюдаемые спектры мощности флуктуаций модуля ММП всех трех ветвей МГД-турбулентности СВ, а именно альфвеновской, быстрой и медленной магнитозвуковых волн на частотах инерционного участка спектра турбулентности $10^{-4} < \nu < 0.1$ Гц. Для этого мы применяем методы спектрального и поляризационного анализа. Основанием для такого подхода служат известные свойства МГД-волн, согласно которым высокая степень когерентности между величиной ММП (B) и скоростью СВ (U) служит свидетельством преобладания в наблюдаемые спектры ММП альфвеновской турбулентности СВ, между B и плотностью СВ (n) — быстрых, а между U и n значительного вклада медленных магнитозвуковых волн. Кроме того, при отсутствии данных измерений параметров СВ для идентификации типа МГД-турбулентности мы используем известные свойства поляризации волн, а именно то, что альфвеновские и магнитозвуковые волны поляризованы в различных, относительно плоскости содержащей средний вектор ММП, плоскостях.

Полученные нами результаты показывают, что при корректном определении спектров трех типов МГД-волн их сумма в пределах ошибок хорошо совпадает с наблюдаемыми спектрами модуля ММП, а небольшая разница может быть отнесена на счет замороженных в плазму статических колебаний и различных разрывов, которые всегда неизбежно присутствуют в СВ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-22-20045.

1. Owens A.J. // J. Geophys. Res. 1974. V.79. P.895-906.
2. Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т.52. С.2361-2363.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ИОНОВ ^3He , ^4He , С, О и Fe НАДТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГИЙ В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ ИЗ ДОЛГОЖИВУЩИХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Зельдович М.А., Логачев Ю.И.

НИИЯФ МГУ, г.Москва, Россия, ms.zeldovich@mail.ru

Изучаются энергетические спектры ионов ^3He , ^4He , С, О и Fe в диапазоне энергий 0.04-2 МэВ/нуклон в потоках частиц из долгоживущих (~30 оборотов Солнца) приэкваториальных корональных дыр на спаде солнечной активности в 23 цикле (2006 - 2009 годы) по информации приборов ULEIS, SWICS и SWEPAM, установленных на к.а. ACE. Получено, что в то время как состав ионов и их интенсивность меняются на всем временном протяжении наблюдения КД в зависимости от скорости солнечного ветра из этой КД, энергетические спектры ионов из КД также показывают различные зависимости от энергии - степенную, экспоненциальную и с изломом - на разных оборотах долгоживущей корональной дыры, что указывает на изменение условий в потоках частиц из КД во время их длительного существования. Предполагаются варианты эволюции параметров КД в процессе ее развития и возможные механизмы ускорения ионов.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ И ПЛОТНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СИЛЬНЫХ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯХ, СВЯЗАННЫХ С МАГНИТНЫМИ ОБЛАКАМИ

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

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

Методом наложения эпох исследованы пространственные распределения параметров солнечного ветра и плотности космических лучей во время сильных форбуш-понижений, связанных с магнитными облаками. Было проанализировано 31 форбуш-понижение с амплитудой $A_{ФП} > 5\%$ из базы данных ИЗМИРАН за 23 и 24 солнечных циклы (1996-2018 гг.). Средняя $A_{ФП} = 6\%$, понижения плотности космических лучей в магнитном облаке и за его пределами близки по величине. В зависимости от динамики плотности космических лучей события разделили на 2 группы, и для каждой в отдельности провели аналогичное исследование. Получено, что 1-ю группу (понижение плотности в магнитном облаке больше, чем за его пределами) составляют самые сильные форбуш-понижения, средняя $A_{ФП} = 7.5\%$, при этом понижение в магнитном облаке составляет 80%, а за его пределами 20% от $A_{ФП}$. Во 2-й группе (понижение в магнитном облаке меньше, чем за его пределами) средняя $A_{ФП} = 4.8\%$, понижение в магнитном облаке — 20%, а за его пределами 80% от $A_{ФП}$. Пространственные распределения параметров солнечного ветра в группах сильно различаются.

Различие возможно объясняется тем, что формирование форбуш-понижений в 1-й и 2-й группах происходит в центральной и периферийной областях возмущений, соответственно. Результаты исследования представляют интерес для определения механизма формирования спорадических форбуш-понижений.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И СОПУТСТВУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ В МАГНИТНЫХ ОБЛАКАХ

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

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

Исследовано поведение основных параметров межпланетной среды, солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитных облаков (МО) мимо Земли. Рассмотрены распределения по времени указанных параметров внутри МО. Проведено сравнение с аналогичными параметрами в межпланетных возмущениях без структуры магнитного облака. Показано, что в межпланетных возмущениях, содержащих МО, экстремальные значения исследуемых параметров геомагнитной активности, космических лучей, межпланетной среды и солнечного ветра регистрируются чаще, чем в событиях без магнитных облаков.

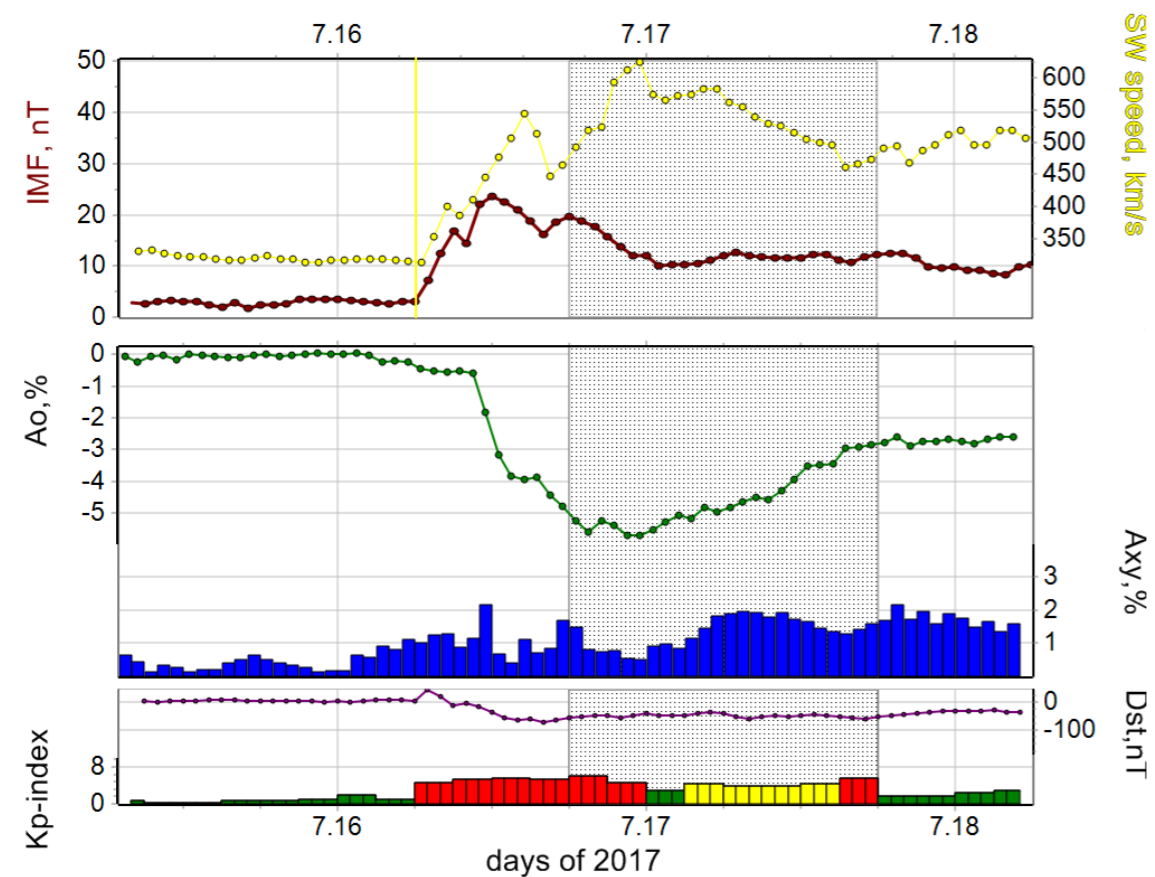


Рисунок. Поведение основных параметров межпланетной среды, солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитного облака мимо Земли 16-17 июля 2017 года.

О ПРОСТОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ КОРОТИРУЮЩИХ ОБЛАСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ

Калинин¹ М.С., Крайнев^{1,2} М.Б., Luo² Xi, Potgieter^{2,3} M.S.

¹Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, Россия, kalininms@lebedev.ru

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

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

Анализ данных космических аппаратов, сканировавших значительные области гелиосферы, а также результатов МГД расчётов указывает на то, что коротирующие области взаимодействия (КОВ) солнечного ветра, практически постоянно присутствующие в низко- и среднеширотной гелиосфере, сильно изменяют крупномасштабные характеристики гелиосферы, важные для долговременных вариаций интенсивности ГКЛ. В частности, эти области усиливают магнитные поля во внутренней ($r < 3-5$ а.е.) и ослабляют их в средней и дальней гелиосфере. Было сделано предположение, что в такой ситуации влияние КОВ должно приводить к увеличению интенсивности ГКЛ во многих областях гелиосферы.

В докладе будут представлены результаты проверки этого предположения, используя численные расчеты интенсивности ГКЛ в простой 2D модели, основанной на МГД-моделировании гелиосферы для кэррингтоновского оборота №2066 (январь-февраль 2008 г.).

О КОРРЕЛЯЦИИ УРОВНЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ И СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Лукманов В.Р.

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

Приведены результаты наблюдений межпланетных мерцаний компактного радиоисточника 3С 48 на фазе спада 24 цикла солнечной активности. Наблюдения проводились на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Проведено сравнение индекса (уровня) мерцаний и скорости солнечного ветра, которая вычислялась по ширине временных спектров мерцаний. Для полной серии наблюдений с 2015 по 2019 г. имеется слабая убывающая зависимость уровня мерцаний от скорости солнечного ветра, но из-за значительного разброса в данных корреляция невелика, в среднем около -0.15. При усреднении по годичным интервалам модуль коэффициента корреляции возрастает почти до 1, причем индекс мерцаний в среднем примерно обратно пропорционален скорости солнечного ветра. Обсуждается возможная связь между пространственно-временной структурой уровня мерцаний и средней концентрацией плазмы солнечного ветра.

ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АНТИКОРРЕЛЯЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ПРОТОНОВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

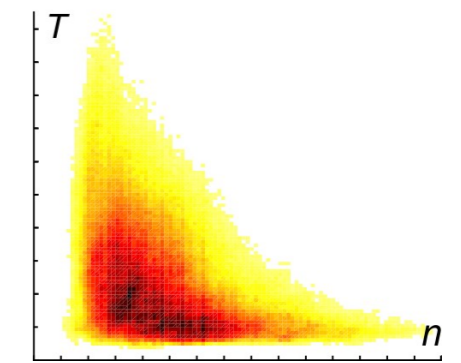
Думин Ю.В.¹, Лукашенко А.Т.², Свирская Л.М.³

¹ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, dumin@yahoo.com

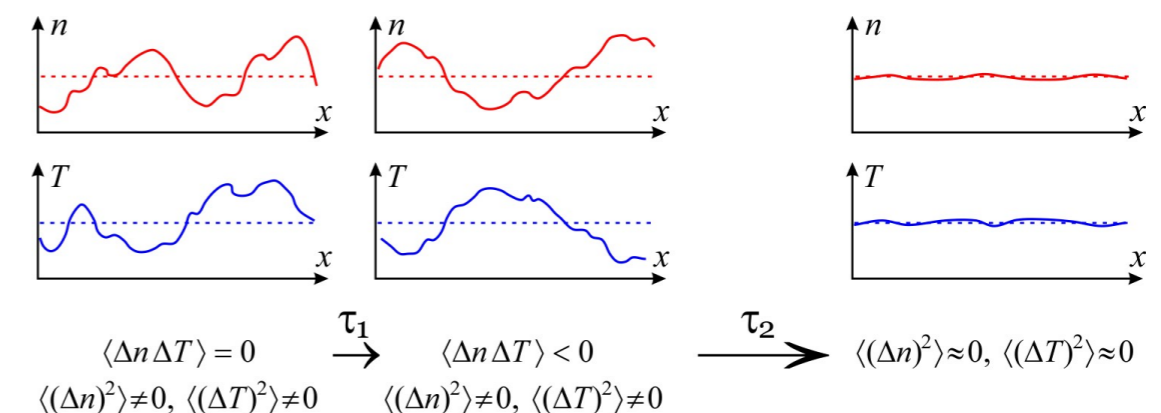
²НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

³ЮУрГУ, ЮУрГГПУ, г. Челябинск, Россия

Одним из хорошо известных свойств солнечного ветра является наличие антикорреляции между температурой протонов T и их плотностью n [1, 2]; см. Рис. 1. К сожалению, хотя этот факт известен уже несколько десятилетий, его теоретическая интерпретация до сих пор вызывает некоторые трудности. Это связано с тем, что описание свойств солнечного ветра обычно производится на основе теории МГД турбулентности в несжимаемой жидкости, а возмущения плотности учитываются затем по теории возмущений. При этом конечный результат такого анализа (возникновение корреляции либо антикорреляции) оказывается существенно зависящим от используемой схемы введения возмущений [3].



Цель настоящей работы – показать, что весьма перспективным подходом к решению этой проблемы из “первых принципов” (т.е., для случая изначально сильно сжимаемой среды) является модель ленгмюровской турбулентности, основанная на математическом формализме спиновых гамильтонианов [4, 5]. Универсальным предсказанием такой модели являются именно антикоррелированные распределения n и T (см. Рис. 2), которые формируются на масштабе времени $\tau_1 \sim 1/\nu_{pl}$ и сохраняются в течение времени $\tau_2 \sim \Delta l n^{1/3}/\nu_{pl}$ (где ν_{pl} – плазменная частота, а Δl – пространственный масштаб неоднородности). Таким образом получается, что при типичных параметрах солнечного ветра вышеупомянутые антикорреляции возникают практически мгновенно (за сотые и тысячные доли секунды) и выживают в течение многих дней или даже десятков дней [6].



1. Borovsky J.E. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. A05104.
2. Веселовский И.С., Лукашенко А.Т., Капорцева К.Б. // Ядерн. физ. 2018. Т. 81. С. 663.
3. Zank G.P., Matthaeus W.H., Klein L.W. // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 1239.
4. Casetti L., Gupta S. // Eur. Phys. J. B 2014. V. 87. P. 91.
5. Teles T.N. et al. // Phys. Rev. E 2015. V. 92. P. 020101(R).
6. Думин Ю.В., Лукашенко А.Т., Свирская Л.М. // Вестник МГУ: Сер. 3 2023 (в печати).

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРЕННЕЙ КОРОНЫ В РАДИАЛЬНО РАСШИРЯЮЩЕМСЯ СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Тлатов А.Г., Березин И.А.

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

Магнитное поле в межпланетной среде формируется под действием источников магнитного поля на фотосфере Солнца и токов в расширяющейся атмосфере Солнца и солнечном ветре. В свою очередь, поток плазмы изменяет конфигурацию силовых линий магнитного поля. Задача определения параметров магнитного поля около Солнца является, таким образом, трехмерной задачей взаимодействия магнитного поля и плазмы солнечного ветра.

В данной работе мы приводим аналитические выражения для расчета полного вектора магнитного поля \mathbf{B} для радиально расширяющегося потока солнечного ветра конечной электрической проводимостью. Параметры солнечного ветра задаются в виде безразмерного магнитного числа Рейнольдса Rem задаваемого в виде произвольной функции от радиуса: $Rem = f(r)$. Решение для компонент магнитного поля получено в виде разложения по сферическим функциям и радиальной функции, зависящей от расстояния от Солнца. Задание радиальной функции для Rem дает большую свободу и может учесть различия формирования коронального магнитного поля на различных фазах цикла активности. Представленное решение по требуемым вычислительным ресурсам сопоставимо с расчетами методами PFSS. Это позволяет использовать данное решение для оценки параметров солнечного ветра в схеме WSA.

Приводятся примеры расчетов конфигурации магнитных полей для солнечной короны во время солнечного затмения 21.08.2017 года.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01021032422589-5, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 23-22-00165.

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МАКСИМУМЕ ЦИКЛА

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

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com

Солнечный ветер (СВ) является существенно неоднородным по температуре и скорости. Причиной этой неоднородности является сложная структура короны, которая состоит из двух основных типов объектов – корональных дыр (КД), представляющих собой области с открытым магнитным полем, и закрытых магнитных структур (петель), присутствующих, в частности, в активных областях (АО).

Хотя источником СВ традиционно считаются КД, широко обсуждается возможность формирования СВ также в закрытых магнитных структурах, в особенности в АО. Предполагается, что с АО может быть связана медленная компонента СВ. С целью получить дополнительные аргументы за или против такого предположения, мы изучили 3-летний период высокой активности Солнца с 2000 по 2002 год. Так как СВ с наибольшей вероятностью достигает Земли при формировании вблизи центрального солнечного меридиана (ЦМ), мы отдельно изучили периоды, когда при формировании СВ на ЦМ присутствовали АО (около 40% времени), и периоды, когда АО отсутствовали (60% времени).

По нашим результатам, скорость СВ, формирующегося в присутствии АО на ЦМ, в среднем, на 1 % ниже, чем скорость СВ, сформированного в отсутствие АО (434.06 км/с против 438.09 км/с при погрешности измерений около 0.37 км/с). Для температуры СВ соответствующая разница составила около 6 % (94600 К против 100500 К при погрешности измерений около 340 К).

Хотя измеренная нами разница в параметрах СВ в присутствии и в отсутствие АО невелика, мы полагаем, что фактическое влияние АО является более значимым, но не может быть точно измерено из-за сложной структуры магнитного поля Солнца, приводящей к отклонению места формирования СВ от ЦМ. Дополнительную погрешность вносит неопределенность времени транзита СВ до Земли.

В целом, полученный результат подтверждает влияние АО на характеристики СВ, а также характер этого влияния – понижение скорости и температуры СВ, формирующегося в АО, по сравнению с компонентой СВ, формирующейся в корональных дырах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 21-72-10157).

ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОРАДИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В 24-М СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

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

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

Обсуждены особенности 24 цикла, проявившиеся в вариациях космических лучей, характеристиках солнечных вспышек и протонных событий, а также уровне геомагнитной активности. Показано, что по числу солнечных пятен и других проявлений солнечной активности 24 цикл оказался самым скромным среди последних 8 циклов (рис.1) и, вероятно, за последние 100 лет наблюдений. Описано значительное снижение геоэффективности различных солнечных событий, проявившееся в меньшем количестве и в меньших величинах зарегистрированных на Земле Форбуш-эффектов (для частиц с жесткостью 10 ГВ), возрастных потока протонов разных энергий и магнитосферных электронов, а также геомагнитных бурь.

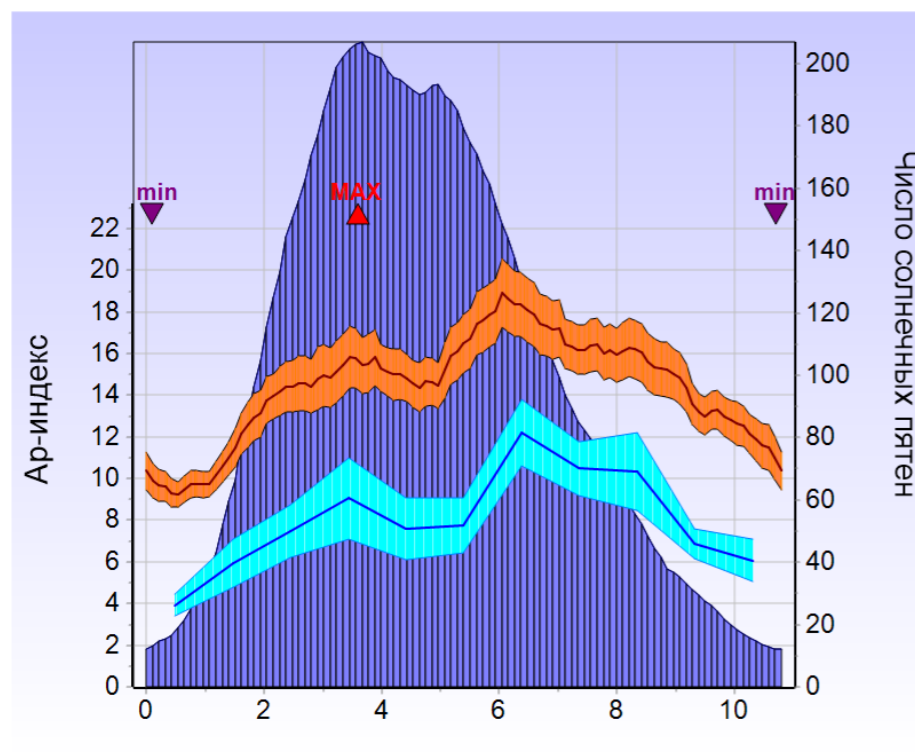


Рис.1. Среднесуточные значения Ар-индекса геомагнитной активности на фоне среднесуточных значений числа солнечных пятен типичного 11-летнего цикла солнечной активности (18-23 цикла, усредненные по фазам). Оранжевая кривая обозначает среднесуточные значения Ар, усредненные за 18-23 цикла, голубая кривая – то же за 24 цикл (с 27-дневным скользящим усреднением). На горизонтальной шкале порядковые номера годов солнечного цикла.

ПРОТОТИП СЛУЖБЫ ПРОГНОЗА СПОКОЙНОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОСНОВЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ МОДЕЛИ WSA

Арутюнян С. Н., Кодуков А. В., Субботин М. О., Павлов Д. А.

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

dapavlov@etu.ru

Создан прототип службы МГД-моделирования спокойного солнечного ветра и прогнозирования скорости и плотности частиц солнечного ветра вблизи Земли, аналогичной службам NOAA [1], ESA [2] и ГАС ГАО РАН [3] (в последней используется кинетическая модель распространения частиц [4]). Служба состоит из МГД-симулятора, обработчика результатов симуляции и веб-интерфейса [5]. МГД-симулятор основан на пакете PLUTO [6]. Граничные условия модели (плотность, радиальная скорость, радиальное магнитное поле, температура) на расстоянии 0.1 а. е. от начала координат получают регулярно из соответствующей службы NOAA, в которой они рассчитаны по модели WSA на основании магнитограмм сети GONG. В симуляторе был использован метод уменьшения полной вариации с численной схемой Лакса-Фридриха (Total Variation Diminishing Lax–Friedrichs, TVDLF). Симуляции проводились на равномерной сетке в диапазоне 0.1 – 1.7 а.е. по расстоянию (512 элементов), $-60 - +60^\circ$ по широте (60 элементов), $0 - 360^\circ$ по долготе (180 элементов). Получено убедительное визуальное совпадение результатов симуляций с прогнозом службы NOAA.

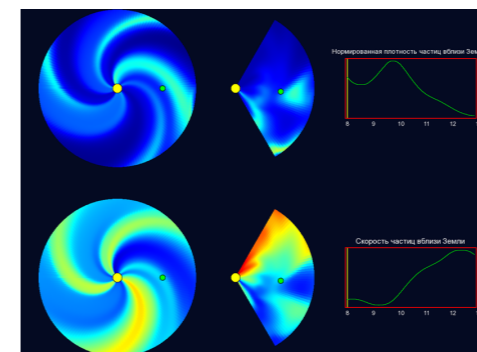


Рис. 1. Карты плотности частиц, нормированной на квадрат расстояния, и скорости (плоскость XY системы координат HEEQ) на 8.01.2003, на сайте прототипа службы МГД-моделирования.

Исследование Д. А. Павлова выполнено в Санкт-Петербургском международном математическом институте имени Леонарда Эйлера при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075–15–2022–287 от 06.04.2022).

1. <https://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction>
2. <https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather>
3. <http://solarstation.ru/sun-service/forecast>
4. Berezin, I.; Tlatov, A. Coronal Field Geometry and Solar Wind Speed // *Universe* 2022 V. 464(8), p. 646. doi:10.3390/universe8120646
5. <http://solarwind.entroforce.ru/>
6. Mignone, A. PLUTO: A Numerical Code for Computational Astrophysics // *The Astrophysical Journal Supplement Series* 2007 V. 170(1), pp. 228–242. doi:10.1086/513316.

ОСОБЕННОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЭПОХУ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

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

Как было показано ранее [1], снижение солнечной активности в минимуме между 22 и 23 солнечных циклов (СЦ) сопровождалось снижением на 20-40% средних параметров плазмы солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля в 23 и 24 СЦ. Причем это снижение наблюдалось в средних параметрах, как для всех типов течений солнечного ветра, так и на всех фазах 23 и 24 солнечных циклов. С началом периода низкой солнечной активности количество всех типов возмущенных событий в межпланетной среде значительно уменьшилось. Особенно сильно упало число событий, связанных с СМЕ (Ejecta, MC и Sheath). Это сопровождалось значительным уменьшением общего числа магнитных бурь, но при этом увеличилась относительная доля магнитных бурь, инициированных CIR [2]. Кроме того, произошло изменение характера взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой из-за уменьшения плотности, температуры и ММП солнечного ветра, в частности, из-за того, что по сравнению с 21-22 СЦ солнечный ветер в целом стал более сверхзвуковым и более сверх-альвеновским, а внешняя часть магнитосферы стала больше по размерам и менее плотной.

На основе измерений базы OMNI за период 1976–2019 гг. с использованием двойного метода наложенных эпох проводилось сравнение временных профилей параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для эпохи высокой солнечной активности 21–22 СЦ и эпохи низкой активности 23–24 СЦ [3]. Были получены следующие результаты. (1) Анализ не показал статистически значимого изменения длительности водителя в эпоху минимума. (2) Временные профили всех параметров для всех типов СВ в эпоху низкой активности имеют тот же вид, что и в эпоху высокой активности, но располагаются при более низких значениях параметров. (3) в событиях CIR долготный угол потока солнечного ветра имеет характерную S-образную форму; но в эпоху низкой активности она изменяется в большем диапазоне, чем в предыдущую эпоху.

В заключение приводятся предварительные данные о поведении параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на фазе роста нового 25 СЦ (2020-2022гг.).

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант 22-12-00227.

1. Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A. et al. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2021, <https://doi.org/10.1029/2021JA029618>

2. Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A.; Yermolaev, M.Y. // *Universe* 2022, 8, 495. <https://doi.org/10.3390/universe8100495>

3. Yermolaev, Y.I.; Lodkina, I.G.; Khokhlachev, A.A. et al. // *Universe* 2022, 8, 472. <https://doi.org/10.3390/universe8090472>

РАЗВИТИЕ МАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ЭСТАФЕТА МОД В АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАЗМЕ С КАППА-РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ ЧАСТИЦ

Кочаровский Вл.В., Кузнецов А.А., Гарасёв М.А., Нечаев А.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru

Доклад посвящен проблеме эстафетного нарастания и последующего затухания различных пространственных гармоник (мод) магнитной турбулентности в процессе развития вейбелевской неустойчивости, обусловленной анизотропией распределения частиц по скоростям в бесстолкновительной плазме. В качестве исходных рассмотрены различные анизотропные каппа-распределения частиц, которые наблюдаются и/или ожидаются для космической и лазерной плазмы, в том числе для солнечного ветра, активных областей корон звёзд и бесстолкновительных ударных волн.

Проведены расчеты эволюции магнитной турбулентности и насыщающего магнитного поля с использованием оригинальной квазилинейной программе 2D2V моделирования нелинейного развития пространственных гармоник вейбелевской ТМ-неустойчивости с волновыми векторами, которые лежали в плоскости расчёта, включающей ось анизотропии с максимальной эффективной температурой частиц. Изучены зависимость насыщающего магнитного поля и характер эстафеты мод от небольших значений степени начальной анизотропии распределения частиц для различных бикаппа-распределений и проакт-бикаппа-распределений с различными значениями параметра каппа. Проанализированы, в частности, особенности развития вейбелевской неустойчивости при нулевой начальной анизотропии распределения частиц по скоростям.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС (проект № 20-1-1-37-1).

МНОГОТОЧЕЧНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ВХОДЕ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОСЛОЙ

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

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

Магнитослой служит важным элементом солнечно-земных связей, располагаясь непосредственно перед магнитосферой. Турбулентность – одно из важных свойств плазмы солнечного ветра, и ее характеристики также могут изменяться при входе плазмы в магнитослой. Недавние экспериментальные исследования продемонстрировали, что свойства турбулентного каскада изменяются при перемещении плазмы относительно границ магнитослоя, а также при изменении свойств набегающего потока солнечного ветра.

В настоящей работе анализировались Фурье-спектры флуктуаций модуля магнитного поля или потока ионов в диапазоне частот 0.001-8 Гц, полученные одновременно в трех точках околоземного пространства – в точке Лагранжа L1, в подсолнечной области магнитослоя и на флангах. Рассматриваемый диапазон частот характеризуется переходом от МГД масштабов к кинетическим, сопровождающимся изломом спектра. Использовались данные спутников Спектр-Р, WIND, Themis, Cluster; анализ проводился только для случаев квази перпендикулярной головной ударной волны.

Показано, что для спокойного солнечного ветра влияние головной ударной волны на свойства турбулентного каскада наблюдается только в ограниченной области вблизи ударной волны, тогда как для возмущенных типов солнечного ветра, таких как межпланетные проявления корональных выбросов массы или областей сжатия перед высокоскоростными потоками от корональных дыр, изменения в характеристиках турбулентности наблюдаются по всей дневной части магнитослоя. Воздействие головной ударной волны включает в себя перераспределение энергии в каскаде, приводящее к отклонению спектра от Колмогоровского скейлинга на МГД масштабах и его укрупнению на кинетических масштабах. При удалении плазмы от подсолнечной области к флангам происходит восстановление спектров до вида, наблюдаемого в солнечном ветре, для всех случаев, кроме потоков солнечного ветра, характеризующейся высокой степенью компрессии. В этом случае на флангах наблюдается усиление мелкомасштабных флуктуаций, приводящее к нетипично плоским спектрам на кинетических масштабах. Таким образом, продемонстрировано, что параметры солнечного ветра оказывают существенное влияние на глобальное развитие мелкомасштабных процессов за головной ударной волной.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант № 22-12-00227.

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ФЛУКТУАЦИЯ ВЕЛИЧИНЫ ПОТОКА ПЛАЗМЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ПРОТОНОВ И АЛЬФА-ЧАСТИЦ ВБЛИЗИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ И ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНЫХ ВОЛН

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, концентрации протонов и дважды ионизированного гелия (альфа-частиц) вблизи околоземной ударной волны (ОЗУВ) и межпланетных ударных волн (МУВ) по данным прибора БМСВ (Быстрый Монитор Солнечного Ветра). Временное разрешение прибора позволило изучить колебания потока плазмы до частоты 16 Гц и концентрации ионов – до частоты 0,67 Гц.

Для работы были взяты временные периоды измерений, как в спокойном солнечном ветре, так и в возмущенной области – за фронтом МУВ или в переходной области магнитосферы. Длительность периодов колебалась от 9 до 25 минут.

Было показано, что спектры колебаний величины концентрации ионов гелия имеют излом на частотах ниже, чем у протонов, что соответствует теоретическим оценкам. Частота излома в большинстве случаев хорошо совпадает с частотой, соответствующей инерционной длине дважды ионизированного гелия. Частота, определяемая гирорадиусом, в данной работе не рассматривалась ввиду отсутствия данных магнитометра.

Частота излома спектра концентрации ионов гелия чаще всего лежит в диапазоне 0,05 – 0,20 Гц. Лишь в небольшом количестве событий она была выше – обычно в результате высокой концентрации альфа-частиц. Для протонов это величина составила 0,6 – 1,2 Гц, что не позволило во многих случаях сравнить предсказанную частоту с формой спектра ввиду ограничения прибора – 0,67 Гц для концентрации. Вид спектра колебаний относительной концентрации ионов гелия имеет явную схожесть со спектром альфа-частиц и несколько меньшую схожесть со спектром протонов – ввиду их различной мощности. Отмечено, однако, что в случае малой частоты излома на спектре протонов и увеличении абсолютного значения показателя степени за ней – вторая часть спектра протонов будет давать значительный вклад в спектр относительной концентрации ионов гелия. Наклон спектра флуктуаций потока ионов чаще всего близок к наклону спектра протонов, но может иметь и значительные отличия.

СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ В ICME В 21-24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

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

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

Относительное содержание гелия, как и другие параметры солнечного ветра, связано с текущей активностью Солнца и может изменяться в зависимости от конкретного солнечного цикла и его фазы. В работе [1] было показано, что в конце 20 века между 22 и 23 солнечными циклами наблюдается спад солнечной активности, который проявляется, в частности, в уменьшении величин параметров плазмы и межпланетного магнитного поля, в том числе содержания гелия.

В данной работе исследуется влияние этого спада активности на поведение содержания гелия в межпланетных проявлениях корональных выбросов массы ICME. Для этого на основе базы данных OMNI было проведено сравнение зависимостей содержания гелия от других параметров плазмы и магнитного поля в двух периодах - эпохе высокой солнечной активности (21-22 солнечных циклы) и эпохе низкой активности (23-24 циклы). Помимо стандартных параметров солнечного ветра был дополнительно рассмотрен расчётный угол γ , который определяет приближённость точки измерения (т.е. положения космического аппарата) к оси ICME. γ рассчитывался как угол между направлением Солнце-Земля и вектором магнитного поля. Поскольку собственная скорость космического аппарата значительно меньше скорости потока солнечного ветра, вектор скорости аппарата относительно ICME приближённо лежит на одной прямой с направлением движения ICME, а так как солнечный ветер распространяется практически радиально, относительная скорость космического аппарата направлена вдоль линии Солнце-Земля. Когда расстояние между аппаратом и центром ICME достигает минимума, в плоскости поперечного сечения ICME локально векторы относительной скорости космического аппарата и магнитного поля располагаются коллинеарно. Таким образом, при максимальном приближении к оси ICME должны наблюдаться минимальные значения угла γ .

Результаты статистического анализа показывают, что содержание гелия растёт при уменьшении угла γ , т.е. по сравнению с периферийными областями в центре ICME оно принимает более высокие значения. Рост содержания гелия при приближении к центру ICME является ещё одним подтверждением гипотезы о существовании в этой области обогащённого гелием электрического тока, в дополнение к показанной в работе [2] положительной корреляции содержания гелия и величины межпланетного магнитного поля. Подобная зависимость наблюдается для обеих анализируемых в работе эпох солнечной активности.

Сравнение зависимостей относительного содержания гелия от других параметров солнечного ветра в ICME для двух периодов показало, что общий вид зависимостей не изменился при смене эпохи в конце 20 века, при этом средние значения параметров (в том числе содержания гелия) уменьшились [3]. Данный факт указывает на то, что снижение относительного содержания гелия в ICME происходит одновременно с его уменьшением в квазистационарных потоках солнечного ветра.

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. *Хохлачев А.А. и др.* Вариации содержания гелия в межпланетных выбросах корональной массы (ICME). // *Космические исследования.* 2022. Т. **60(2)**. С. 93-98.

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

Особенности функций распределения флуктуаций углов направления потока для различных типов солнечного ветра

Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, mosanas6@yandex.ru

Работа посвящена исследованию флуктуаций углов направления солнечного ветра на разных масштабах в различных крупномасштабных типах течения солнечного ветра. Рассматриваются широтный θ и долготный ϕ углы направления потока, вычисленные из компонент скорости по данным прибора 3DP космического аппарата WIND. В работе анализируются особенности формы функции плотности распределения флуктуаций углов для масштабов от нескольких секунд до десятков часов (соответствующих пространственным масштабам от 10^3 до 10^7-10^8 км) и степень их отличия от нормальной функции распределения. Широкий диапазон рассматриваемых масштабов флуктуаций охватывает процессы в плазме солнечного ветра от локальных до глобальных, связанных с крупномасштабными явлениями на Солнце. В качестве меры отклонения от Гауссовского распределения используется величина эксцесса — момент 4-го порядка. Анализируется зависимость величины эксцесса от масштаба флуктуаций и проводится сравнение этих зависимостей для разных типов солнечного ветра (до масштабов ~ 1 ч). Для привязки данных к типам солнечного ветра привлекается каталог крупномасштабных явлений <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> [Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000, *Космические исследования*, 2009, т. 47, № 2, с. 81–94]. По результатам анализа вида функций распределения показано, что для малых масштабов наблюдаются значительные отличия от нормальной функции распределения, которые нивелируются с увеличением масштаба до десятков часов. Подобная зависимость является признаком высокого уровня перемежаемости флуктуаций углов, т.е. отражает их неравномерность в пространстве: области, для которых характерны большие амплитуды флуктуаций, чередуются с относительно спокойными областями. Подобные зависимости наблюдаются почти для всех типов солнечного ветра, однако наиболее высокие значения эксцесса на малых масштабах (и соответственно наиболее высокий уровень перемежаемости флуктуаций анализируемых углов) наблюдается для типов ветра Ejecta и Sheath, а минимальный — для типов ветра Rare и Fast (для флуктуаций широтного угла) и типов HCS и Fast (для флуктуаций долготного угла).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 22-12-00227.

ТРЕХМЕРНАЯ НЕСТАЦИОНАРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ: СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА УЛИСС.

Годенко Е.А.^{1,2,3}, **Измоденов В.В.**^{1,2,3}

¹ ИПМех РАН, г. Москва, Россия, eg24@yandex.ru

² ИКИ РАН, г. Москва, Россия

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

Солнце движется относительно локальной межзвездной среды со скоростью ~ 26.4 км/сек. В результате взаимодействия плазмы солнечного ветра и частично-ионизированной плазмы локальной межзвездной среды образуется структура из двух ударных волн и тангенциального разрыва между ними, которая называется гелиосферным ударным слоем. В межзвездной среде, помимо плазменной и нейтральной компонент, присутствует также пылевая компонента, частицы которой проникают внутрь гелиосферы (область распространения солнечного ветра), что впервые было экспериментально обнаружено по измерениям космического аппарата (КА) Улисс [1]. Особенность КА Улисс по отношению к исследованию межзвездной пыли заключалась в том, что орбита, по которому он двигался, была практически перпендикулярна плоскости эклиптики, что позволило установить межзвездное происхождение некоторых из пойманных частиц. Всего на КА Улисс было зафиксировано приблизительно 600 частиц межзвездной пыли. Анализ полученных данных с помощью численного моделирования оставил несколько вопросов: в частности, недостаток частиц пыли малых размеров в данных, а также то, что измеряемые потоки до 2003 года могут быть воспроизведены только с помощью моделирования распределения крупных частиц (> 0.2 мкм), а после 2005 года – наоборот, с помощью частиц малых размеров [2]. Причина может заключаться в том, что в численной модели, которая использовалась для анализа, не учитывалось влияние гелиосферного ударного слоя на траектории пылинок, хотя известно, что при прохождении этой области некоторые частицы межзвездной пыли испытывают фильтрацию [3], и, соответственно, не достигают малых гелиоцентрических расстояний. Цель данной работы – построение трехмерной нестационарной модели распределения межзвездной пыли, в которой учитывается влияние гелиосферного ударного слоя на траектории пылинок, а также применение построенной модели для анализа данных КА Улисс.

Для описания распределения межзвездной пыли используется кинетический подход, который состоит в решении кинетического уравнения с помощью метода Монте-Карло. Частицы межзвездной пыли начинают свое движение из области невозмущенной локальной межзвездной среды. Динамику движения пылинок в гелиосфере и ее окрестностях определяют три силы: сила гравитационного притяжения к Солнцу, сила радиационного давления, а также электромагнитная сила. Гелиосферное магнитное поле содержит поверхность разрыва своей полярности – гелиосферный токовый слой, форма которого зависит от фазы солнечного цикла. Мы проводим моделирование потоков межзвездной пыли в области, которая содержит траекторию КА Улисс, для частиц разных размеров.

[1] Grun E., Zook H. A., Baguhl M. et al., 1993, Nature, V. **362**, 428

[2] Sterken V.J., Strub P., Kruger H., von Steiger R., Frisch P., 2015, ApJ, V. **812**, 141

[3] Slavin J.D., Frisch P.C., Muller H.-R. et al., 2012, ApJ, V. **760**, 46

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕЛИОСФЕРНОГО УДАРНОГО СЛОЯ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

Перфильева Н.А., Корольков С.Д., Измоденов В.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ИКИ РАН, г. Москва, Россия;
nelli12_48@mail.ru

Рассматривается задача об эволюции флуктуаций солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях и в области гелиосферного ударного слоя. В работе Korolkov et al. (2022) исследовался вопрос о влиянии временных флуктуаций солнечного ветра на его параметры во внешней гелиосфере, вплоть до гелиосферной ударной волны. Была построена модель в которой в качестве граничных условий на орбите Земли использовались измерения параметров солнечного ветра с высоким временным разрешением. В рамках построенной модели удалось объяснить увеличение температуры солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях. Интересным представляется вопрос о том, как временные колебания параметров солнечного ветра на 1 а.е. эволюционируют в области гелиосферного ударного слоя между гелиосферной ударной волной и головной ударной волной межзвездной среды.

Так как задача о распространении мелкомасштабных колебаний в реальной трехмерной постановке является ресурсоемкой с вычислительной точки зрения, в настоящей работе мы рассматриваем решение модельной задачи о распространении возмущений в прямолинейной трубке ограниченной двумя поршнями, которые имитируют ударные волны. Внутри трубки находится подвижной перегородка (контактная поверхность), которая имитирует гелиопаузу. Слева и справа от перегородки находятся два покоящихся газа с различными значениями плотности. Левый поршень приводится в движение под действием возмущений задаваемого на нем давления. Эти возмущения и имитируют возмущения параметров солнечного ветра. Изменения давления приводят в движение поршень, а за ним газ и правый поршень. Давление на правом поршне полагаем постоянным.

В работе представлены результаты численных расчетов эволюции флуктуаций в расчетной области между двумя поршнями со временем для разных параметров возмущений давления на левом поршне (гелиосферной ударной волны). Исследуется генерация ударных волн в расчетной области в зависимости от амплитуды и периода флуктуаций, а также взаимодействие этих волн между собой, с подвижной перегородкой и правым и левым поршнями. Исследуется разложение полученного решения в ряд Фурье в некоторых характерных точках внутри трубки.

В дальнейшем решение задачи будет обобщено на более реальную осесимметричную или трехмерную геометрию.

1. Korolkov S.D., Izmodenov, V. V., // Astron. Astrophys. 2022, 667, id.L5, DOI:[10.1051/0004-6361/202244523](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202244523)

РАССЕЯННОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЕ КАК СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ

Титова А.В., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, avtitova_1@edu.hse.ru

Межзвездная среда, сквозь которую движется Солнечная система, состоит преимущественно из нейтральных атомов водорода. Эти атомы имеют длину свободного пробега, сравнимую с характерным размером гелиосферного ударного слоя, и поэтому могут проникать внутрь гелиосферы [1]. В ударном слое атомы водорода могут взаимодействовать с протонами посредством процесса перезарядки. В результате свойства атома изменяются и будут зависеть от параметров протона. Детектирование подобных частиц помогло бы получить новую информацию не только о межзвездной среде, но и о структуре и характеристиках гелиосферного ударного слоя. Однако прямые измерения межзвездных атомов водорода в гелиосфере затруднены вследствие их небольшой энергии. Но определить распределения атомов можно косвенно. Исходящие из Солнца Лайман-альфа фотоны (длина волны ~121.56 нм) рассеиваются на заполняющих межпланетное пространство межзвездных атомах водорода. При этом спектр рассеянного Лайман-альфа излучения будет зависеть от проекции функции распределения атомов на луч зрения. Таким образом, с помощью анализа спектра излучения можно получить информацию о свойствах межзвездных атомов водорода.

На данный момент имеется огромное количество наблюдательных данных — спектров для различных положений наблюдателя и лучей зрения, полученных на аппаратах HST и MAVEN. Главным же источником информации является прибор SWAN на борту SOHO. С его помощью можно получать полные карты неба в суммарной интенсивности излучения с периодичностью в 2-3 дня. Разработка математической модели, которая хорошо описывала бы существующие данные, является не до конца решенной задачей.

Доклад посвящен моделированию распределения межзвездных атомов водорода и последующему исследованию влияния параметров солнечного ветра и эффектов ударного слоя на спектр рассеянного Лайман-альфа излучения. Для достижения поставленной цели решалось стационарное кинетическое уравнение Больцмана. Граничное условие было поставлено с учетом эффектов гелиосферного ударного слоя. Далее на основе полученной функции распределения были рассчитаны спектры и его моменты (суммарная интенсивность, доплеровский сдвиг, ширина линии) в приближении self-absorption [2]. Результаты были получены для различных параметров солнечного ветра и сравнены с наблюдательными данными [3].

1. Izmodenov, V. V. 2000, *Ap&SS*, 274, 55
2. J.L. Bertaux, R. Lallement, V.G. Kurt, E.N. Mironova, 1985, *Astron. Astrophys.* 150(1), 1–20
3. Quémerais E., Lallement R., Bertaux J. L., Koutroumpa D., Clarke J., Kyrölä E., Schmidt W., 2006, *A&A*, 455, 1135

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АДИАБАТИЧЕСКОГО НАГРЕВА/ОХЛАЖДЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАХВАЧЕННЫХ ПРОТОНОВ И ПОТОКИ ЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Балиюкин И.И., Измоленов В.В., Алексашов Д.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, igor.baliukin@gmail.com

Проведено исследование влияния адиабатического нагрева/охлаждения, вызванного сжатием/расширением потока солнечной плазмы, на распределение захваченных протонов во внутреннем ударном слое (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой), а также на потоки энергичных нейтральных атомов (ЭНА). С использованием модели [1, 2] были рассчитаны профили функции распределения захваченных протонов по скоростям для различных положений во внутреннем ударном слое. Было показано, что адиабатический нагрев проявляется в уширении функции распределения захваченных протонов, и что влияние исследуемого процесса наиболее сильно заметно в хвостовой области гелиосферы, в то время как в головной области эффект менее выражен. Поскольку популяция захваченных протонов является родительской по отношению к компоненте энергичных нейтральных атомов, исследуемый процесс также оказывает существенное влияние на величины потоков ЭНА из внутреннего ударного слоя, которое также было детально исследовано. Показано, что процесс адиабатического нагрева/охлаждения приводит к увеличению потоков ЭНА. Адиабатический нагрев частично объясняет существующую количественную разницу между данными наблюдений прибора IBEX-Hi (0.3–6 кэВ) на борту космического аппарата Interstellar Boundary Explorer (IBEX) и результатами численных расчетов. Таким образом, корректный анализ данных наблюдений потоков ЭНА возможен только при помощи модели, которая учитывает процесс адиабатического нагрева/охлаждения.

1. Baliukin I.I., Izmodenov V.V., Alexashov D.B. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2020. V. **499** Issue 1 P. 441–454.

2. Baliukin I.I., Izmodenov V.V., Alexashov D.B. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2022. V. **509** Issue 4 P. 5437–5453.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ГЛОБАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ И ТЕЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВО ВНЕШНЕЙ ГЕЛИОСФЕРЕ

Измоленов В.В., Алексашов Д.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, izmod@iki.rssi.ru; МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ИПМех РАН, г. Москва, Россия

Космические аппараты «Вояджер-1» и «Вояджер-2» пересекли гелиопаузу на расстояниях ~122 а.е. и ~119 а.е. в 2012 и в 2018 г., соответственно. Это оказалось довольно неожиданно, поскольку толщины внутренней части гелиосферного ударного слоя (то есть области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой), полученные по существовавшим в то время моделям глобальной гелиосферы, были значительно (на 20-40 а.е.) больше толщины определяемой по пересечениям Вояджеров. До настоящего времени проблема толщины гелиосферного ударного слоя до конца не решена. В 2014 году в работе Izmodenov et al. (2014) было предложено, что влияние электронной теплопроводности (которое в моделях не учитывалось) может привести к уменьшению толщины ударного слоя. Значительность эффекта было продемонстрировано на примере упрощенной модели изотермической плазмы.

В докладе будут представлены первые результаты трехмерной кинетической-МГД модели глобальной гелиосферы, в которой учтен эффект электронной теплопроводности, которая действует вдоль силовых линий магнитного поля. В зависимости от локальных параметров плазмы в модели используются как классические и насыщенные тепловые потоки.

Показано, что эффекты теплопроводности существенны. Толщина внутренней гелиосферы уменьшается. Это желаемый эффект, поскольку он помогает согласовать толщину, полученную в модели, с данными «Вояджеров». Другими эффектами являются сильное понижение температуры плазмы в гелиосферном ударном слое в направлении к гелиопаузе и повышение температуры плазмы в сверхзвуковом солнечном ветре перед гелиосферной ударной волной.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-12-00383.

1. Izmodenov, V. V., Alexashov, D. B., Ruderman, M. S. // *Astrophys. J. Lett.* 2014, 795, 1, L7

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТРУБЧАТЫХ АСТРОСФЕР/ ГЕЛИОСФЕРЫ

Корольков С.Д., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия

В настоящее время активно ведутся научные споры о форме гелиосферы. В классическом представлении гелиосфера имеет форму параболоида, однако, под действием магнитного поля звезды форма может иметь вид трубы. Солнечное магнитное поле достаточно слабое, а скорость Солнца в межзвездной среде достаточно высока, что указывает, скорее, на классическую форму гелиопаузы. Однако для медленных звезд с сильным собственным магнитным полем трубчатая форма наиболее вероятна.

В данной работе мы исследуем неустойчивость трубчатой астросферы в задаче о взаимодействии гиперзвукового намагниченного звездного ветра с покоящейся межзвездной средой (Рис. 1). Нами обнаружена классическая неустойчивость Кельвина-Гельмгольца на тангенциальном разрыве, а также неустойчивость потока звездного ветра за ударной волной, приводящая к колебаниям струи (градиентная неустойчивость).

Исследование проводится в рамках подхода идеальной МГД. Проведены расчёты в 2Д и 3Д случае с высоким сеточным разрешением. Проведён линейный анализ полученных неустойчивостей.

Исследование устойчивости трубчатой формы актуально и необходимо, так как неустойчивость может повлиять на изменение формы астросферы и переходу к её классическому варианту (параболоиду), что может поставить под сомнение существование трубчатых астросфер даже для медленно движущихся звезд.

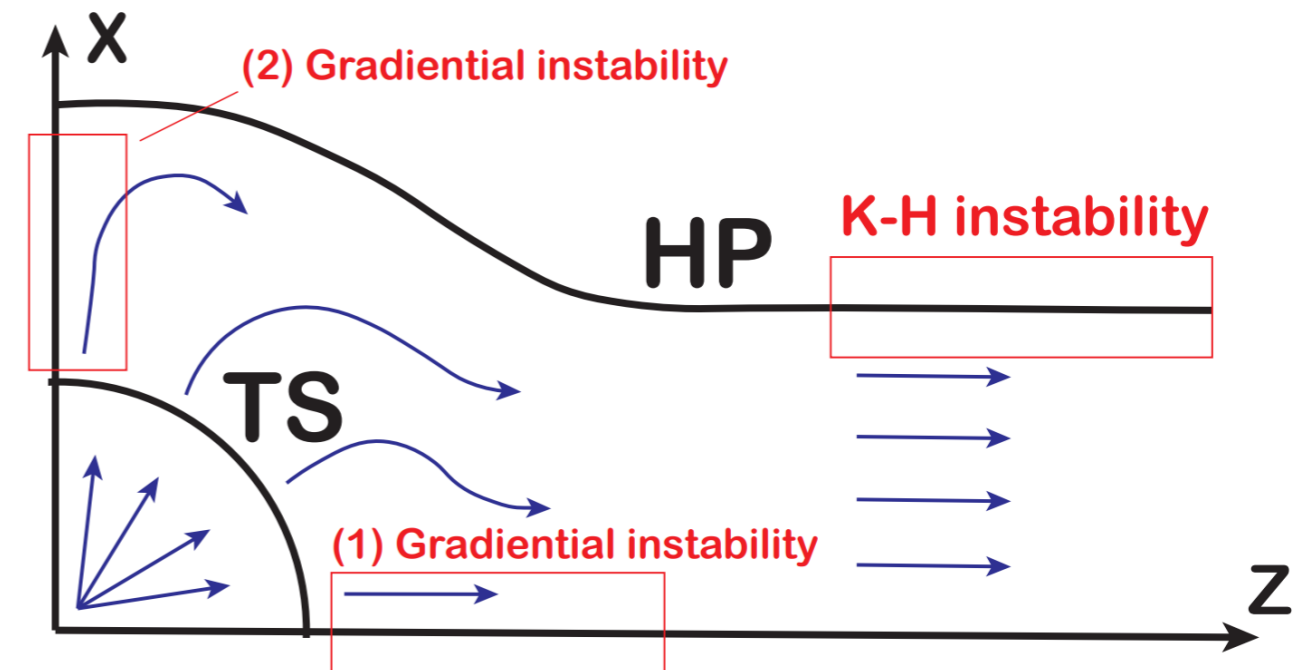


Рис 1. Схематичное представление возможных неустойчивостей течения в трубчатой астросфере.

РЕЗОНАНСНОЕ СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ЛАЙМАН-АЛЬФА ФОНА КАК МЕХАНИЗМ ДИССИПАЦИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ И НАГРЕВА МЕЖЗВЁЗДНОГО ГАЗА В ОБЛАСТЯХ HI

Лузгин С.Н.

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

Показано, что учёт эффектов отдачи при рассеянии атомами водорода в областях межзвёздного газа HI фотонов галактического Лайман-альфа фона приводит к появлению силы вязкого трения атомов о фон. Эта сила приводит как к диссипации турбулентных движений в газе, так и к охлаждению газа; флуктуации же силы светового давления всегда нагревают газ. В результате световое давление Лайман-альфа фона нагревает газ, эффективно преобразовывая энергию его турбулентных движений в тепловую энергию его атомов.

Рассматривается только межоблачный газ ($n \approx 0,2 \text{ см}^{-3}$, $T \approx 8000 \text{ K}$), проблема нагрева газа в облаках сложнее и может быть предметом дальнейших исследований.

Недавно были опубликованы результаты измерений яркости галактического Лайман-альфа фона в окрестности Солнца с помощью спектрографа Alice на зонде New Horizons: $43 \pm 3 \text{ Рл}$ [1]. Была также обнаружена изотропность фона. Форма спектра фона не могла быть измерена, даже для его ширины имеются только теоретические оценки $\approx 4 \text{ \AA}$.

Используя эти значения и считая форму спектра более-менее прямоугольной, можно вычислить скорость нагрева межоблачного газа (в расчёте на один атом) флуктуациями силы светового давления $\approx 1 \cdot 10^{-26} \text{ эрг/с}$. Скорость охлаждения межоблачного газа (не силой светового давления, за счёт других механизмов) давно рассчитана и (также в расчёте на один атом) оценивается в $0,8 \cdot 10^{-26} \text{ эрг/с}$ [2]. Из сравнения этих результатов можно было бы заключить, что фотоны галактического фона Лайман-альфа могут отвечать за нагрев межоблачного газа, расходуя свою собственную энергию. Простые энергетические расчёты показывают, что это совершенно невозможно. Возникшее противоречие разрешается, если учесть, что в стационарных условиях форма спектра Лайман-альфа фона вблизи резонансной частоты ω_0 будет иметь вид функции Планка в приближении Вина и иметь наклон $\sim 1 - \mu(\omega - \omega_0)$, $\mu = \hbar / (k_B T)$ [3]. «Красных» фотонов будет больше, чем «фиолетовых» и, как результат, появляется пропорциональная скорости атомов сила светового давления, которая будет отбирать у атомов ровно столько энергии, сколько её добавляют атомам флуктуации силы. Движение атома в среде Лайман-альфа фона будет подобно движению броуновской частицы. Если учитывать только эффекты светового давления, то функция распределения атомов по скоростям будет удовлетворять уравнению Фоккера-Планка.

В межоблачном газе присутствуют явно выраженные турбулентные потоки, скорость которых, по оценкам, близка к тепловой скорости атомов [4]. Как результат, наклон спектра Лайман-альфа фона μ будет где-то два раза меньше. Соответственно, сила светового давления будет отбирать у атомов приблизительно в два раза меньше тепловой энергии. В итоге, световое давление галактического фона Лайман-альфа будет нагревать атомы газа со скоростью $\approx 0,5 \cdot 10^{-26} \text{ эрг/с}$, отбирая эту энергию от турбулентных движений. Рассмотренный механизм нагрева межоблачного газа может оказаться основным и даже полностью объяснить наблюдаемую температуру газа.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Кислов^{1,2} Р.А.

¹ Ariel University, Ariel, Israel

² ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

В идеально проводящей плазме солнечного ветра электрический потенциал сохраняется вдоль линий магнитного поля. Обычно считается, что потенциал поддерживается за счёт движения плазмы в магнитном поле — течения солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца, и за счёт вращения солнечной атмосферы на малых расстояниях. Последнее, однако, не полностью согласуется с наблюдениями. Было проанализировано соотношение модулей электрических полей, вычисленных с учётом униполярного эффекта на Солнце, и на основе данных Ulysses за 1994-2008 годы. Обнаружено, что униполярный эффект недостаточен для поддержания электрического потенциала вблизи Солнца, столь же высокого, как в солнечном ветре. Это указывает на наличие неизвестных источников электрического поля между Солнцем и орбитой Ulysses. Различия между теоретическими и наблюдательными оценками электрического поля особенно велики на высоких широтах, что может быть связано с существованием полярных токовых слоёв и эффектами на границах полярных корональных дыр.

1. Gladstone G.R. et al. // Astron. J. 2021. V. 162. P. 241.
2. Dalgarno A., McCray R.A. // Ann. Rev. Astron. Astroph. 1972. V. 10. P. 375.
3. Field G.B. // Ap.J. 1959. V. 129. P. 551.
4. Stanimirović S., Zweibel E.G. // Ann. Rev. Astron. Astroph. 2018. V. 56. P. 489.

О СВЯЗИ ИОННОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ В ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПАРАМЕТРАМИ ИХ ИСТОЧНИКОВ НА СОЛНЦЕ

Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, goryaev_farid@mail.ru

Основные типы потоков солнечного ветра (СВ) классифицируются по свойствам их источников на Солнце: (1) медленный СВ из стримеров, (2) высокоскоростные потоки СВ из корональных дыр (КД), (3) транзитные события, связанные с корональными выбросами массы (КВМ) и их проявлениями в виде межпланетных КВМ (МКВМ). Ионный состав плазмы СВ, наблюдаемый в гелиосфере, является одной из основных характеристик, обеспечивающих ценную информацию о формировании потоков СВ, процессах ускорения и нагрева плазмы, а также для идентификации источников СВ на Солнце. Это связано с тем, что ионный состав плазмы СВ при прохождении через корону эволюционирует и в конце концов «замораживается» на расстояниях порядка нескольких солнечных радиусов от поверхности Солнца из-за быстрого падения плотности, оставаясь далее практически неизменным в гелиосфере. Ионный состав разных элементов «замораживается» на разных расстояниях от Солнца из-за зависимости скоростей рекомбинации и ионизации от номера элемента Z . Так, например, ионный состав легких элементов, таких как С и О, «замораживается» на расстояниях порядка одного солнечного радиуса, тогда как для элементов со средним Z типа Fe замораживание происходит на расстояниях 4-5 солнечных радиусов. Моделирование ионного состава плазмы СВ и сравнение с измерениями дает возможность по зарядовому состоянию СВ получать информацию о физических условиях в его источнике и солнечной короне [1-5]. В настоящей работе рассматриваются возможности анализа ионного состояния плазмы СВ по среднему заряду ионов, параметрам распределений ионов по заряду и отношениям количеств ионов с разным зарядом.

Среди элементов, преобладающих в плазме СВ, железо является наиболее подходящим для характеристики физических условий в корональных источниках, поскольку значительное число ионов Fe разных стадий ионизации перекрывает практически весь диапазон корональных температур от спокойных областей до вспышек. В настоящей работе представлены результаты исследования распределений ионов Fe для разных типов СВ с помощью данных приборов, установленного на борту космических аппаратов STEREO и ACE. Также представлены результаты моделирования и расчетов распределений ионов Fe для ряда событий, связанных с КВМ и их сравнение с данными наблюдений соответствующих МКВМ событий. Изложенные результаты отражены в статьях [1-5].

1. Rodkin D., Goryaev F., Pagano P., et al. // Sol. Phys. 2017. V. **292**. P. 90.
2. Grechnev V.V., et al. // Sol. Phys. 2019. V. **294**. P. 139.
3. Goryaev F., Slemzin V., Rodkin D. // ApJ. Lett. 2020. V. **905**. L17.
4. Slemzin V.A., Goryaev F.F., Rodkin D.G. // ApJ. 2022. V. **929**. P. 146.
5. Goryaev F., Slemzin V., et al. // Cosmic Res. 2023. V. **61**. P. 8.

ИЗУЧЕНИЕ ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Лагойда И.А., Воронов С.А., Михайлов В.В., Дорошева Д.Н.

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, IALagoida@mephi.ru

Форбуш понижения (ФП) проявляются в виде резких уменьшений регистрируемой интенсивности космических лучей (КЛ) на Земле и в межпланетном пространстве. Вот уже несколько десятков лет данный эффект активно изучается научным сообществом. Значительная доля исследований ФП выполнена с использованием научной аппаратуры, установленной на поверхности Земли. Данная аппаратура регистрирует вторичную компоненту КЛ, образовавшуюся после взаимодействия первичных КЛ с земной атмосферой. На сегодняшний день, остаются практически неизученными зависимости различных характеристик ФП от жесткости частиц КЛ. Более того, получение таких зависимостей с помощью наземной аппаратуры является затруднительным, особенно для низкоэнергетической компоненты КЛ (~ 1 ГВ). Изучение поведения потоков КЛ во время ФП с помощью аппаратуры, установленной на космических спутниках, до недавнего времени было ограничено возможностями интегральных счетчиков частиц КЛ. В июне 2006 года, на орбиту Земли был запущен спектрометр PAMELA (PAMELA - Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) [1], позволяющий регистрировать потоки различных частиц КЛ в диапазоне энергий от нескольких сотен МэВ до нескольких сотен ГэВ. Затем, в мае 2011 года был запущен Магнитный альфа-спектрометр (AMS - Alpha Magnetic Spectrometer), позволяющий производить регистрацию потоков частиц КЛ до энергий в несколько ТэВ, с непревзойденной точностью на уровне 1% [2].

В данной работе для изучения ФП используются потоки космических протонов и ядер гелия, зарегистрированные спектрометрами PAMELA и AMS в течении 23 и 24 циклов солнечной активности. Каждое событие ФП было связано с корональным выбросом массы (КВМ) из атмосферы Солнца, наблюдаемым коронографом SOHO (SOHO - Solar and Heliospheric Observatory) [3]. Структуры КВМ ответственные за формирование наблюдаемых ФП, в окрестности Земли, были изучены с помощью базы данных OMNI [4]. Всего было отобрано более десяти событий ФП, для которых получены зависимости амплитуд и времен восстановления от жесткости частиц КЛ в интервале от нескольких сотен МэВ, до нескольких десятков ГэВ. Изучены особенности поведения фаз восстановления ФП и их корреляции с различными характеристиками КВМ в окрестности Земли.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные проблемы космических лучей и темная материя» № 0723-2020-0040 и Российского научного фонда (РНФ), проект № 20-72-10170.

1. Picozza P. et al. // Astroparticle physics 2007. V. 27(4). P. 296.
2. Ting S. // Nuclear Physics B-Proceedings Supplements 2013. V. 243. P. 12.
3. Domingo V., Fleck B., Poland A. I. // Solar Physics 1995. V. 162(1). P. 1.
3. Alterman B. L. // Research Notes of the AAS 2022. V. 6(6). P. 135.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЦУГОВ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКА ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПЕРЕД РАМПОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

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

Институт космических исследований РАН, borodkova_nl@cosmos.ru

По данным плазменного спектрометра БМСВ, измеряющего 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. Было показано существование последовательностей цугов колебаний, как потока ионов, так и магнитного поля, возникающих перед рампом и являющимися низкочастотными (~0,5-4 Гц) магнитозвуковыми свистовыми волнами, распространяющимися под углами от 20 до 40 градусов относительно направления магнитного поля. Особое внимание было уделено цугам колебаний потока ионов и магнитного поля, сгенерированным разными участками рампа ударной волны. На основании анализа трех событий показано, что углы распространения цугов колебаний магнитного поля от разных участков рампа различаются, что связано с нестационарностью и реформацией фронта ударной волны.

Получено, что длина волны колебаний потока ионов и магнитного поля, в отдельных случаях, уменьшалась в цуге колебаний, ближайшем к рампу и возрастал угол между направлением движения цуга и вектором магнитного поля.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00365.

МАГНИТНЫЕ ПОЛОСТИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОЛОЖЕНИЕ ГОЛОВНОЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ГЕОМАГНИТНУЮ АКТИВНОСТЬ

Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В.

Байкальский государственный университет, pekines_41@mail.ru

На основании детального исследования спорадического потока солнечного ветра (СВ), зарегистрированного на 1а.е. 15-16.12.2013, а также 13 отобранных спорадических потоков СВ за период 1996-2015 гг. внутри структуры ICME (Interplanetary Coronal Mass Ejection) выделена область, называемая “магнитная полость” (“magnetic cavity”). Она характеризуется и определяется по высокой степени антикорреляции концентрации плазмы N и модуля ММП В. На ее передней границе резко падает N и возрастает В, а на задней границе наоборот – резко растет N и падает В. Внутри полости, длительность которой может быть в интервале $\approx 1-30$ часов N и В мало меняются. По данным измерений на спутниках TNE и TNV, расположенных соответственно в дневной и ночной магнитосфере показано, что воздействие полости на головную околоземную ударную волну (ГОУВ) приводит к резкому падению модуля геомагнитного поля по продолжительности соответствующего длительности магнитной полости, к резкому смещению ГОУВ в сторону Солнца и прекращению геомагнитных пульсаций в плазменном слое хвоста магнитосферы.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛЯРНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Янке В.Г. , Белов А.В. , Гущина Р.Т. 

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

Для описания и объяснения долгопериодных вариаций космических лучей в 1976-2021 гг. используется многопараметрическая модель, объединяющая несколько солнечных индексов (величины среднего и полярного магнитного поля Солнца, наклон гелиосферного токового слоя, количество и скорость СМЕ, площадь низкоширотных корональных дыр). С помощью этих индексов моделируются вариации космических лучей с жесткостью 5, 10 и 20 ГВ, полученные на основе данных мировой сети нейтронных мониторов. Различные варианты модели, рассчитанные для разных циклов солнечной активности и магнитных циклов, позволяют изучать изменения вкладов различных солнечных индексов в модуляцию космических лучей, в частности, вклада полярного магнитного поля, величина которого существенно снизилась в 23-24 циклах.

Показано, что в последний период влияние полярного магнитного поля на вариации космических лучей значительно уменьшилось, причём это связано не только с уменьшением напряжённости поля, но и со снижением его эффективности. Полученные результаты, свидетельствуют о том, что на модуляцию космических лучей влияет не только полярность общего магнитного поля Солнца, но и величина полярного поля.

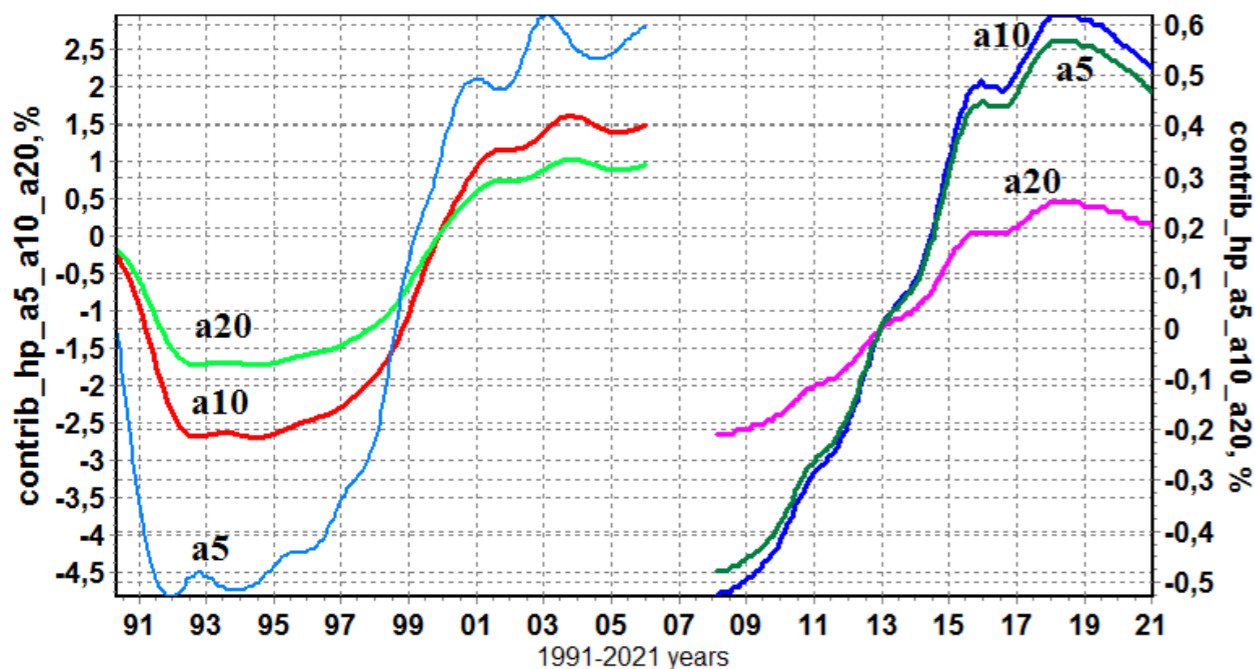


Рис.1. Вклад полярного магнитного поля в различных солнечных циклах.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf; благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ "Российская национальная сеть станций космических лучей" (Сеть СКЛ)» <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>.

СВЯЗЬ ДВИЖЕНИЯ СОЛНЦА ВОКРУГ ЦЕНТРА МАСС СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ, ТРЕНДА МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭКСТРЕМУМОВ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Начиная с пионерского исследования [1] многочисленные работы показывают, что изменение движения Солнца вокруг центра масс солнечной системы имеют среднюю периодичность 178.7 – 178.77 лет. В настоящем исследовании показано, что экстремумы (минимумы, максимумы и окончания) солнечных циклов (SC) 3 и 19 с самыми большими максимумами 264 и 285 соответственно с 1755 года (по версии ISN 2.0 [2]) разделены периодами (179.5 ± 0.7) лет. Показано, что минимумы самых мощных циклов SC3 и S19 разделены периодом 178.8 л, связанным с движением солнца вокруг центра масс солнечной системы.

Рассмотрен прогноз [1], полагающий что в ~1990 году будет минимум солнечной активности, так как солнце начнет ретроградное движение; предыдущая аналогичная ситуация была в ~1811 г. Показано, что вблизи прогнозируемых лет оказался минимум SC6 в июле 1810 года (в минимуме Дальтона) и максимум SC22 в ноябре 1989, разделенные периодом 179.4 лет. Прогноз [1] не оправдался, так как вместо минимума оказался максимум SC22. Показано, что полученный период 179.4 лет включает 5 периодов соединения Сатурн - Нептун $(179.4/35.87=5.0)$.

Ранее на основе спектра модуля межпланетного магнитного поля (ММП) мы показали, что временная вариация тренда, описываемого синусоидой с средним периодом 198 лет и наибольшей амплитудой в спектре, имела сглаженный максимум в 1989-1991 гг [3]. Период 198.6 лет включает 10 периодов соединений Юпитера с Сатурном 19.86 лет, а известный период 178.74 лет [1] 9 этих соединений. Именно в максимуме 198-летних колебаний модуля ММП в марте 1989 года произошла известная сильнейшая геомагнитная буря с начала космической эры (с 1957 года). Максимальной интенсивности буря достигла 13 марта, когда суточный планетарный индекс возмущенности Ар достиг третьего по величине значения за всё время наблюдений с 1932 года [4].

Проведенное исследование солнечных циклов на основе последней версии [2] вместе с компонентами спектра модуля ММП [3], полученного на основе измерений ММП космическими аппаратами на 1 АЕ, позволяет сделать вывод, что динамические силы, воздействующие на солнце движением планет, являются одной из важных причин солнечной активности, изменений в солнечном ветре и геомагнитных бурь. При этом следует помнить, что при определении положения планет солнце и планеты считаются точечными массами, не учитываются их диаметры и внутренняя природа.

1. Jose, P.D. // *Astronomical Journal* 1965. V. 70. P. 193.
2. List of solar cycles: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles
3. Kuznetsova T.V., Tsurulnik, L.B. // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 254.
4. Кузнецова Т.В. // *Астрономия - 2018. Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы 2018*, Т. 2. С. 122. DOI: 10.31361/eaas.2018-2.031. http://www.sai.msu.ru/EAAS/rus/confs/EAAS_XIII/vv2.pdf

РЕФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ЗАЛИМБОВЫХ РАДИОВСПЛЕСКОВ В ВОЗМУЩЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Афанасьев Н.Т., Лукьянцев Д.С., Танаев А.Б.

ИГУ, г. Иркутск, Россия, spacemaklay@gmail.com

Как известно [1], на динамическом спектре солнечного декаметрового радиоизлучения могут существовать отсечки на низких и высоких частотах. При наземных наблюдениях присутствие низкочастотных отсечек в этих радиовсплесках типично и их обычно связывают с отражающими свойствами ионосферной плазмы. В то же время высокочастотная отсечка необычна и регистрировалась при наблюдениях декаметрового радиоизлучения в возмущенных гелиофизических условиях [2]. Сравнение данных измерений в наземных пунктах и на борту космических аппаратов показало, что в возмущенных условиях источник радиовсплесков находился в залимбовой области для наблюдателя, расположенного на поверхности Земли. Было высказано предположение, что наземные наблюдения декаметровых радиовсплесков с обратной стороны Солнца стали возможными вследствие влияния коронального выброса массы (КВМ), находящегося в активной области вблизи лимба Солнца. С помощью простых модельных представлений среды и кусочно-линейной аппроксимации траектории луча была сделана оценка влияния КВМ на распространение радиоизлучения из залимбовой области [3].

В настоящей работе исследованы рефракционные эффекты залимбовых декаметровых радиовсплесков при распространении в солнечной короне с крупномасштабными неоднородностями электронной плотности. На основе расширенной системы лучевых дифференциальных уравнений проведено математическое моделирование рефракционного ослабления потока энергии и траекторных характеристик залимбовых декаметровых радиовсплесков в возмущенной солнечной короне для различных координат космических аппаратов, наземных приемников и солнечных радиоисточников. Расчеты показали, что в корональной плазме в присутствии крупномасштабных неоднородностей с обедненной и обогащенной электронной плотностью формируется траекторная картина с существенно разной степенью рефракционного ослабления потока энергии всплеска. Крупномасштабное возмущение, расположенное на пути радиовсплеска, препятствует свободному выходу радиоизлучения из короны во внешнее пространство. Излучение из источника в некотором секторе углов распространяется между крупномасштабным возмущением и глубинным уровнем короны как в некотором рефракционном волноводе. В определенных условиях излучение, вышедшее из волновода, может попасть на Землю. Этот эффект не соответствует теории распространения радиоволн в сферически симметричной солнечной короне, электронная концентрация которой уменьшается с увеличением расстояния от фотосферы. Радиоволны декаметрового диапазона не проходят через солнечный лимб до наблюдателя, т.к. задолго до этого момента они должны отразиться от данной среды. В качестве плазменных возмущений в работе рассмотрены различные модели крупномасштабных корональных образований с обогащенной и обедненной электронной концентрацией. Сделана оценка рефракционного ослабления потока энергии залимбовых декаметровых радиовсплесков при различных параметрах неоднородностей короны

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (тема государственного задания FZZE-2020-0024, соглашение № 075-15-2021-675), Гранта ИГУ №091-22-307.

1. Zeleny L.M. and Veselovsky I.S. Plasma heliogeophysics. Moscow . 2008. V. I. 672 p.
2. Brazhenko A.I. et al. // Radio Astronomy and Astrophysics. 2015. V.20, №1. P.10.
3. Stanislavsky A.A. // Radio Astronomy and Astrophysics. 2016. V.21, №1. P.3.

ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТЕЙ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ БУРИ 8-11 МАРТА 2012 Г В ПЕРИОД CAUSES II.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е.

СПбФИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru

Жесткости геомагнитного обрезания космических лучей (КЛ) являются основным фактором, регулирующим приход частиц КЛ в данную точку на земной поверхности или внутри магнитосферы. Для изучения связи жесткостей обрезания и параметров околоземного пространства выбрана магнитная буря 8–11 марта 2012 г. во время интервала CAUSES-II, рекомендованного SCOSTEP для детальных исследований солнечно-земных связей.

Динамическое взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с магнитосферными полями и токами приводит к изменению порогов (ΔR), особенно сильному во время магнитных бурь.

Знание широтных зависимостей ΔR от параметров СВ и магнитосферы может прояснить некоторые черты взаимодействия системы СВ — магнитосфера и сопутствующие геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений [1]. Кроме теоретического значения, это важно для обеспечения безопасности экипажа и пассажиров космических полетов, а также высокоширотной и высотной авиации. Учет последствий плохой космической погоды становится еще более актуальным в свете современной тенденции развивать орбитальные скоростные межконтинентальные перелеты между любыми точками на Земле.

Методы: R рассчитаны 2 способами: (1) $R_{эф}$, методом прослеживания траекторий частиц космических лучей в модельном магнитном поле магнитосферы TS01 [2] и (2) $R_{свс}$ методом [3] спектрографической глобальной съемки на основе наблюдательных данных мировой сети нейтронных мониторов.

ΔR определялись как разности между значениями жесткостей, рассчитанными для каждого часа в период бури, и жесткостями в спокойный период ΔR вычислялись для станций КЛ, которые в спокойное время охватывают большую полосу жесткостей обрезания от 11 до 2 ГВ: ESOI, Алматы, Рим, Иркутск, Москва и Кингстон.

Рассчитаны корреляции вариаций жесткостей геомагнитного обрезания с Dst - и Kp -индексами геомагнитной активности, параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) во время трех фаз магнитной бури.

Анализ показал, что наибольшая связь жесткости обрезания для бури 8–11 марта 2012 г. прослеживается с Dst индексом геомагнитной активности, что свидетельствует об определяющем вкладе кольцевого тока в транспорт КЛ. Кроме того, найдена существенная связь с параметрами электромагнитного поля (с южной компонентой межпланетного магнитного поля V_z и азимутальной компонентой электрического поля E_y). Динамические параметры солнечного ветра практически не контролируют вариации жесткостей обрезания КЛ.

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.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ПОЛЯРНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЕ НАД СЕВЕРНЫМ ПОЛЮСОМ СОЛНЦА В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Голубчина О.А.

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории, СПб Ф САО РАН, golubchina_olga@mail.ru

Наблюдение солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопе РАТАН-600 позволило определить распределение яркостной температуры радиоизлучения Солнца в области полярной корональной дыры (КД) над северным полюсом Солнца в широком диапазоне сантиметровых длин волн (1.03 – 30.7) см [1]. Минимальная яркостная температура (0° , К) радиоизлучения Солнца в области полярной корональной дыры зарегистрирована на расстоянии $\sim (1.01 \times 10^6)$ км от центра оптического диска Солнца [2]. Учитывая, что размер магнитосферы Земли со стороны Солнца составляет $\sim 12 R_z$ ($\sim 0.08 \times 10^6$) км (радиус Земли: $R_z = 6371$ км), а расстояние от Земли до Солнца вблизи перигелия (29.03.2006 г.) составляет $\sim (140 \times 10^6)$ км, становится ясным, что, солнечный ветер, который может проникать в каспы магнитосферы Земли может быть обусловлен высокоэнергичными частицами радиоизлучения Солнца в области полярной КД, распространяющимися вдоль магнитных силовых линий полярной КД только вблизи солнечного диска на расстоянии $< 1.2 R_c$ (радиус Солнца $R_c = 6.96 \times 10^5$ км).

1. Golubchina O.A., Korzhavin A.N., Tokhchukova S., 2011. *Astrophys. Bull.*, vol. 66, no. 4, pp. 488–495.
2. Golubchina O.A., 2021. *Astron. Rep.*, vol. 65, no. 4, pp. 322–330.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В 3м ГОДУ 25 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

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

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

Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра, расположенный на сайте <http://www.iki.rssi.ru/omni/>, продолжает свое развитие и дополнение результатами идентификации различных типов солнечного ветра по мере поступлений новых данных в базе OMNI (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni).

В 2022 году идентифицировано:

- 20 магнитных бурь (среднее значение Dst индекса = -65,6 нТл),
- 32 межпланетных проявлений выброса корональной массы (ICME), из которых 10 магнитных облаков и 22 Ejecta,
- 20 областей сжатия Sheath,
- 36 областей сжатия перед быстрыми потоками CIR.

Анализ событий 3го года 25 солнечного цикла показывает, что в начале текущего цикла наблюдается динамика солнечного ветра аналогичная соответствующему периоду предыдущего цикла и, как следствие, близкая динамика магнитосферных возмущений.

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

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЛУННОМ ОРБИТАЛЬНОМ АППАРАТЕ

¹Куликов С.В., ¹Глазкин Д.В., ¹Добровольский И.А., ²Заруцкий А.А., ¹Климов С.И.,
²Коренский М.Ю., ¹Петрукович А.А., ¹Рыбьева Н.Е., ¹Савин С.П., ¹Скальский А.А.,
²Стяжкин В.А.

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kulikov@rx24.ru

²ЦФП ИОФ РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

Луна представляет собой интересный пример взаимодействия межпланетной среды с безатмосферным небесным телом, имеющим на поверхности области аномальной намагниченности.

В работе представлен обзор имеющихся к настоящему времени данных о структуре области взаимодействия солнечного ветра с Луной.

Исходя из уже имеющихся представлений о физических процессах в окололунном пространстве, сформулированы требования к магнитным измерениям на борту орбитального аппарата. В качестве их приоритетных задач рассмотрены:

- формирование над областями аномальной намагниченности «мини» - магнитосфер с образованиям структур подобных ударной волне;
- физические процессы на ночной стороне Луны, в ее шлейфе.

Представлен прибор ЛПМС-ЛГ, входящий в состав комплекса научной аппаратуры лунного орбитального аппарата, его характеристики, предполагаемые моды работы на орбитах вокруг Луны, средства и методики его наземной отработки.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТОКОВЫХ СЛОЁВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ МОДУЛЯ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

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

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия, tomtemper17@gmail.com

² ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия

Токовые слои в солнечном ветре — это вид разрывов, представляющих собой тонкие листы электрического тока в космической плазме, при пересечении которых изменяется направление магнитного поля Солнца. Количество токовых слоёв в единицу времени может варьироваться в десятки-сотни раз в зависимости от таких факторов, как приход турбулентных потоков, связанных с областями перемешивания разноскоростных потоков солнечного ветра и корональными выбросами масс, или изменениями одного или нескольких параметров влияющих на сумму кинетической и тепловой энергий солнечного ветра, которая определяет количество токовых слоёв в день (Khabarova et al., JGR 2021). В рамках данной работы продолжается изучение факторов влияющих на количество токовых слоёв в единицу времени путём анализа связи между спектром флуктуаций модуля межпланетного магнитного поля, параметрами плазмы и количеством токовых слоёв. Для сравнения использованы данные со спутника WIND за 22-23 апреля 2012 года, когда аппарат зарегистрировал приход коронального выброса массы (ICME). Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 22-12-00227

ЛИНЕЙНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ПЛАНЕТ ВЕНЕРЫ, ЗЕМЛИ, ЮПИТЕРА И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Охлопков В.П.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ovpetrovich@yandex.ru

В данной работе проведен расчет линейных конфигураций планет Венеры, Земли и Юпитера. Для каждого момента времени (использовались гелиоцентрические долготы планет) рассчитывались средние разности долгот (СРД) для пар планет: Венера-Земля, Венера-Юпитер, Земля-Юпитер. Выбирались моменты времени, когда СРД были минимальны и планеты находились на одной линии с Солнцем. По минимальным отклонениям планет от линии, проходящей через них и Солнце при расположении планет по одну сторону от Солнца (планеты находятся в соединении), а также при расположении планет по разные стороны от Солнца и на одной линии с ним, разработан индекс (JEV, по первым буквам латинских названий планет), описывающий 11-летнюю периодичность. Линейные конфигурации планет Венеры, Земли и Юпитера имеют 11-летнюю периодичность. Аналогично были обработаны и другие планеты, оказывающие заметное гравитационное влияние на Солнце. Только для трех названных здесь планет, оказывающих самое большое гравитационное воздействие на Солнце, выявляется 11-летняя периодичность.

Планетный индекс JEV рассчитан с 1000 года по настоящее время, и проведено его сопоставление с солнечной активностью. Для периода с 1000 по 1699 гг использован ряд солнечной активности Шове, а с 1700 года использованы числа Вольфа. Хотя данные по солнечной активности до 1700 года получены косвенным путем, наблюдается полное соответствие числа циклов как в индексе JEV, так и в солнечной активности. Основная по амплитуде периодичность в них совпадает и равна 11.07 лет.

Совпадение длительностей периодичностей в планетном индексе и в солнечной активности за 1000-летний интервал времени не является случайным и может свидетельствовать о связи этих процессов.

1. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2014. № 3. С. 50 (Okhlopkov V.P. // Moscow University Physics Bulletin. 2014. V. 69. No. 3. P. 257)
2. Охлопков В.П. // Вестник Московского университета, Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 4. С. 92. (Okhlopkov V.P. // Moscow University Physics Bulletin. 2016. V. 71. No. 4. P. 440.)
3. Охлопков В.П. // Геомагнетизм и аэрономия, издательство Наука (М.). 2020. том 60. № 3. С. 393-403 DOI: 10.31857/S0016794020030141 (Okhlopkov V.P. // Geomagnetism and Aeronomy, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation). 2020. V. 60. № 3. P. 381-390)

СЕКЦИЯ «Магнитосфера»

Понедельник , 06.02. 2023 г., комната ЦО (Line 3)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			<u>Председатель: Шевелев М..</u>
1	17.15 – 07.30	Ковалев И.И., Олемской С.В., Сдобнов В.Е.	Мониторинг параметров магнитосферы по эффектам в космических лучах в августе 2018 года
2	17.30 – 17.45	Сухарева Н.А., Антонов Ю.В., Захаров В.И.	Суперстатистика, энтропийные функционалы и информационное различие временных рядов спутникового мониторинга
3	17.45 – 18.00	Парамоник И.П., Дивин А.В., Шайхисламов И.Ф., Семенов В.С.	2D PIC-моделирование диамагнитной полости при суб-альвеновском расширении двухкомпонентной смеси ионов
4	18.00 – 18.30	<i>Постерная сессия</i>	

Постерные доклады

1. Иванова А.Р., Калегает В.В. , Груздов Д.С. , Власова Н.А. , Базилевская Г.А. , Махмутов В.С.

Структура высыпаний релятивистских электронов из внешнего радиационного пояса Земли во время магнитной бури 1-5 февраля 2015 года

2. Жукова Е.И.

Исследование процессов ускорения и переноса частиц космической плазмы в нелинейных магнитоплазменных системах

3. Михайлов В.В., Сладная В.Ю.

Спектр вариаций лучей в 2011-2019 гг по данным магнитного спектрометра *ams-02* на борту МКС

4. Р.А. Ковражкин, А.Л. Глазунов, Г.А. Владимирова

Формирование полярной границы авроральной магнитосферы при различных состояниях плазменного слоя

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

5. Груздов Д.С., Калегаев В.В., Иванова А.Р., Власова Н.А., Базилевская Г.А., Махмутов В.С.

Динамика внешнего радиационного пояса Земли во время магнитной бури 1-5 февраля 2015 года

6. Попова Т.А., Яхнина Т.А., Демехов А.Г.

Статистический анализ высыпаний релятивистских электронов в окрестности обсерватории Ловозеро по данным спутников NOAA POES

7. Найко Д.Ю., Овчинников И.Л., Антонова Е.Е.

Пространственное распределение коэффициента турбулентной диффузии в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли

по данным MMS и его зависимость от межпланетного магнитного поля

8. Смирнова Н.Ф., Станев Г.

Характерные особенности плотности электронов в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2-3 ге

по измерениям потенциала спутника интербол-2

Вторник, 07.02. 2023 г., комната 202 (Line 2)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			Председатель: <u>Калегаев В.В.</u>
1	09.00 – 09.15	Лукин А.С., Guo Z., Lin Yu, Артемьев А.В., Петрукович А.А.	Взаимодействие магнитопаузы и разрывов солнечного ветра: магнитное пересоединение
2	09.15 – 09.30	Зотов О.Д., Клайн Б.И.	Связь динамики магнитосферы с турбулентностью солнечного ветра
3	09.30 – 09.45	Сергеев В.А., Yang J.	Инъекции энергичных электронов по материалам численного RCM моделирования плазменных струй
4	09.45 – 10.00	Дмитриев А.В.	Атмосферные эффекты плазменных струй в магнитослое
5	10.00 – 10.15	Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Антонова Е.Е., Шиокава К., Миоши Е.	Исследование ускорения электронов до релятивистских энергий во время магнитных бурь и без них по данным спутников ARASE, GOES

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

6	10.15 – 10.30	Власова Н.А., Калегаев В.В., Капорцева К.Б, Мягкова И.Н., Шугай Ю.С.	О согласованной динамике геомагнитного поля и потоков релятивистских электронов в области геостационарной орбиты
	10.30 – 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
Председатель: Григоренко Е.Е.			
7	11.00 – 11.15	Мягкова И.Н., Миронова И.А.	Резкое сокращение числа экстремальных магнитных бурь в 24 и в текущем 25 циклах солнечной активности - случайность или закономерность?
8	11.15 – 11.30	Калегаев В.В., Власова Н.А., Иванова А.Р., Груздов Д.С., Базилевская Г.А., Махмутов В.С.	Пространственно-временная структура высыпаний энергичных электронов во время магнитной бури 1-6 февраля 2015 года
9	11.30 – 11.45	Антонова Е.Е., Сотников Н.В., Кирпичев И.П., Рязанцева М.О., Овчинников И.Л., Степанова М.В., Pinto V., Espinoza С.М., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Пулинец М.С., Найко Д.Ю.	Механизмы падения и возрастания потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и предсказание динамики пояса во время магнитной бури
10	11.45 – 12.00	Козелов Б.В., Белов А.А., Климов П.А., Мурашов А.С., Сараев Р.Е., Сигаева К.Ф., Шаракин С.А., Трофимов Д.А., Щелканов К.Д.	Стереометрические измерения пульсирующих полярных сияний системой камер и изображающих фотометров на Кольском полуострове
11	12.00 – 12.15	Марчук Р.А., Мишин В.В., Клибанова Ю.Ю., Михалев А.В., Пенских Ю.В.	Динамика продольных токов, широкополосных пульсаций и свечения ночной атмосферы на средних широтах во время пилообразных событий
12	12.15 – 12.30	Алексеев И.И., Лаврухин А.С., Невский Д.В.	Модель экваториального плазменного диска Юпитера

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

	12.30 – 13.30	Пленарный час	
	12.30 – 13.00	Gan Weiqun “ASO-S: the preliminary performance in the orbit”	
	13.00 – 13.30	Богачёв С.А., Леденцов Л.С. «Памяти Бориса Всеволодовича Сомова»	
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: <u>Козелов Б.В.</u>			
13	14.30 – 14.45	Лаврухин А.С., Невский Д.В., Алексеев И.И.	Вариации магнитосферы Меркурия
14	14.45 – 15.00	Шайхисламов И. Ф., Руменских М. С., Березуцкий А. Г., Мирошниченко И. Б., Ходаченко М. Л.	Моделирование и исследование атмосферы горячих экзопланет и космической среды вокруг них по данным транзитных наблюдений
15	15.00 – 15.15	Руменских М. С., Чичинин А.И., Шепелин А.В., Кислов Р.А., Шайхисламов И.Ф.	Атомное выстраивание и магнитные поля экзопланет
16	15.15 – 15.30	Анфиногентов С.А., Рубцов А.В.	Существуют ли магнитоплазменные петли в магнитосфере Земли?
17	15.30 – 15.45	Рубцов А.В., Nose M.	Определение положения плазмопаузы через альфвеновскую скорость
18	15.45 – 16.00	Котова Г.А., Безруких В.В., Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Чернышов А.А.	Регулярные неоднородности плотности в пограничном слое плазмосферы
	16.00 – 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Пилипенко В.А.</u>			
19	16.30 – 16.45	Кирпичев И.П., Антонова Е.Е.	Плато плазменного давления в магнитосфере Земли. Устойчивость и двумерное распределение

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

20	16.45 – 17.00	Овчинников И.Л., Найко Д.Ю., Антонова Е.Е.	Спектры флуктуаций электрического и магнитного полей в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным MMS
21	17.00 – 17.15	Антонов Ю.В., Сухарева Н.А., Захаров В.И.	Отображения класса Козна данных мониторинга магнитосферы и ионосферы
22	17.15 – 17.30	Савин С.П., Ляхов В. , Нецадим В.М., Зеленый Л.М., Nemecsek Z., Safrankova J., Wang C., Климов С.И., Скальский С.А.	О роли резонансных 3х-волновых каскадов и квазицифровых импульсов в бесстолкновительном взаимодействии потока солнечного ветра с магнитосферой
23	17.30 – 17.45	Халипов В., Сайбек Д., Котова Г., Степанов А., Леонович А.	Исследования субавроральной магнитосферы с помощью геофизических спутников и методом коротковолновой радиолокации
	17.45. – 18.30	Постерная сессия	

Постерные доклады

1. Марчук Р.А., Потапов А.С., Мишин В.В.
Излучение красных спрайтов в диапазоне геомагнитных пульсаций
2. Громова Л.И. , Клейменова Н.Г., Громов С.В., Дэспирак И.В., Любчич А.А., Малышева Л.М.
Сравнение пространственных особенностей интенсивной суббури и суперсуббури по анализу отдельных событий
3. Любчич А.А., Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Малышева Л.М., Ролдугин А.В.
Полярные суббури над Шпицбергенем: анализ отдельных событий
4. Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Ефимов М.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Трушин П.А., Шайхисламов И.Ф.
Исследование холловских магнитных полей при разлете квази-сферического облака плазмы в лабораторных экспериментах
5. Макаров Г.А. Баишев Д.Г.
Магнитные изолированные суббури по данным измерений в тикси в период минимальной солнечной активности
6. Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любчич А.А., Громова Л.И., Сецко П.В.
Суперсуббури в небуревых условиях: анализ отдельных событий
7. Смолин С.В. Моделирование динамики индекса анизотропии питч-углового распределения протонов в магнитосфере земли

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

8. Беленькая Е.С. Роль магнитодиска юпитера в переносе вращения от планеты к магнитопаузе в зависимости от ММП

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ ПО ЭФФЕКТАМ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ В АВГУСТЕ 2018 ГОДА

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

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

По данным наземных измерений космических лучей на мировой сети нейтронных мониторов с привлечением данных комплекса мюонных телескопов в Якутске и мюонного годоскопа УРАГАН (Москва) без исправления их на температурный эффект модифицированным методом спектрографической глобальной съемки (СГС) [1] в период геомагнитных возмущений в августе 2018 года произведено разделение вариаций космических лучей на составляющие межпланетного, магнитосферного и атмосферного происхождения. Получены временные ходы первичных частиц разных жесткостей, питч-угловой анизотропии космических лучей, ориентации ММП, приведены изменения жесткости геомагнитного обрезания в Иркутске и среднемассовой температуры атмосферы в пунктах наблюдений заряженных компонент.

На основе полученных данных по изменениям планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания в рамках простейшей осесимметричной модели ограниченной магнитосферы [2] рассчитаны некоторые параметры магнитосферных токовых систем, а именно, радиус кольцевого тока (r_c), тока на магнитопаузе (r_m) и Dst-индекс.

1. Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2022. V. 235. 105887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887>.
2. Кичигин Г.Н., Сдобнов В.Е. Жесткости геомагнитного обрезания космических лучей в модели ограниченной магнитосферы с кольцевым током // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 57. № 2. С. 149–153. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017020043>

СУПЕРСТАТИСТИКА, ЭНТРОПИЙНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЫ И ИНФОРМАЦИОННОЕ РАЗЛИЧИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Сухарева Н.А., Антонов Ю.В., Захаров В.И.

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

Предложенный в начале 2000-х годов суперстатистический подход к описанию неэкстенсивной физической системы основан на её "расщеплении" на компоненты, каждая из которых обладает собственной шкалой времени, квазистационарным энергетическим распределением и соответствующей собственной температурой. Типичные примеры подобных систем – среды, в которых присутствуют градиенты температур и конвективных потоков, создаваемые солнечной радиацией, выбросами масс вещества, магнитодинамическими процессами, т.е. гидросфера, атмосфера [1-3], магнитосфера, гелиосфера. Фактически суперстатистический подход следует рассматривать как эмпирическую реализацию метода описания неэкстенсивных систем. Основа метода состоит в переопределении структуры фазового пространства с включением мультифрактальности и дробной размерности, которые делают некорректным предположение Больцмана-Гиббса о равной доступности всех элементарных ячеек фазового пространства. Изменение топологии фазового пространства сопровождается изменением уравнений состояния анализируемой системы и модификацией уравнений процесса. Весь спектр возникающих процессов можно в первом приближении свести к "деформации" экстенсивных и интенсивных параметров, и прежде всего энтропии физической системы как параметра структуры.

Основная задача работы – на примере данных спутникового геофизического мониторинга количественно определить q-деформацию уравнения состояния и уравнения процесса, контролировать перестройку структуры системы со временем, согласование статистической перестройки однокомпонентных и многокомпонентных параметров. В работе анализ статистических моделей самоорганизации и необратимости неэкстенсивных систем проводится на основе модели вероятностного деформированного фазового q-пространства. Для каждого типа энтропийных функционалов вводится согласованное информационное различие, характеризующее дальноедействие в системе и глубину памяти. Энтропия и парное ей информационное различие может быть интерпретированы как действительная и мнимая части комплексной энтропии [4]. Эволюция суперстатистических, энтропийных и информационных параметров нами исследовалась для временных рядов, получаемых из базы OMNIWeb [5]. Особое внимание уделено обсуждению различных представлений большой статистической суммы и использованию базовых и эскортных распределений в процессе нормировки вычисляемых информационно-статистических характеристик.

Работа выполнена в рамках Государственного задания 115041410195 «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве», а также по программе развития НОШ МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

[1] «Discrimination information for intensity distributions of a collimated wave beam», Blank Arkadiy, Suhareva Natalia, Tsyganov Mikhail, *Chaos, Solitons and Fractals*, Pergamon Press Ltd. (United Kingdom), том 152

[2] «Q-parametric estimations for the turbulent characteristics of a thermodynamically inhomogeneous non-stationary optical path», Blank A.V., Suhareva N.A., Tsyganov M.V. *Proceedings of SPIE* -, том 11560, с. 1156011-1-1156011-12

[3] «Superstatistics models for the free space optical path», Blank A.V., Suhareva N.A., Tsyganov M.V., *Proceedings of SPIE* -, том 11560, с. 1156012-1-1156012-9

[4] Zaripov, R.G. Representations of a Group of Difference Information Functions in Extended Parastatistics of Nonextensive Systems. *Russ Phys J* **65**, 1072–1080 (2022).

[5] https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/om_filt_min.html

2D PIC-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАМАГНИТНОЙ ПОЛОСТИ ПРИ СУБ-АЛЬВЕНОВСКОМ РАСШИРЕНИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ ИОНОВ

Парамоник И.П.^{1,2}, Дивин А.В.¹, Шайхисламов И.Ф.², Семенов В.С.¹

¹ СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, igorparamonik@gmail.com

² ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Процесс сферически симметричного разлета плазмы из точечного (или относительно небольшого) источника во внешнее магнитное поле наблюдается во многих различных астрофизических явлениях в космической плазме. Примерами таких событий, происходящих в широком диапазоне масштабов, могут служить взрывы сверхновых, выбросы корональной массы, активные эксперименты в магнитосфере Земли (AMPTE, CRRES), испарение частиц межпланетной пыли при столкновении с космическими аппаратами и другие. Расширяясь, плазма вытесняет окружающее магнитное поле и образует диамагнитную полость (или каверну). Прямые наблюдения и исследования таких объектов в космосе затруднены, поэтому лабораторные эксперименты и численное моделирование служат важными инструментами для их изучения последние четыре десятка лет [1].

Особое внимание в исследованиях уделяется роли мелкомасштабных кинетических процессов, связанных с образованием и эволюцией диамагнитных полостей в случае слабо замагниченных ионов, когда гирорадиус частиц расширяющегося облака сравним или превышает размеры каверны [2]. Эксперименты по расширению квази-сферического облака лазерной плазмы, полученного облучением C₂H₄-мишени импульсом CO₂-лазера по 4-х лучевой схеме, на установке КИ-1 (ИЛФ, Новосибирск) в таком режиме демонстрируют аномально быстрое проникновение магнитного поля внутрь полости вместе с генерацией азимутальных холловских полей [3].

Мы представляем результаты двумерного моделирования расширения облака плазмы, содержащей ионы водорода H⁺ и более тяжелые частицы (C⁺, C⁴⁺), с использованием параллельного кинетического кода iPIC3D. Параметры расчетов близки к экспериментам на установке КИ-1. Моделирование воспроизводит такие наблюдаемые особенности, как образование каверны и поперечного диамагнитного тока, развитие желобковой неустойчивости на границе полости, бутылкообразную форму облака с формированием двух джетов вдоль линий магнитного поля. Расчет показывает, что динамика каверны существенным образом зависит от химического состава плазмы: более легкий H⁺ быстрее заполняет полость и желобки, а тяжелый C⁺ увеличивает их размер, дольше сохраняя радиальную скорость. Отличие в движении H⁺ и C⁺ генерирует ионный эффект Холла.

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., Antonov, V. M., Boyarintsev, E. L., Melekhov, A. V., Posukh, V. G., Shaikhislamov, I. F., et al. (2006). *Plasma Phys. Repts.* 32, 183–204.
3. Zakharov Y. P. et al. // *Quantum Electronics*. – 2022. – Т. 52. – №. 2. – С. 155.

СТРУКТУРА ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 1-5 ФЕВРАЛЯ 2015 ГОДА

А.Р. Иванова^{1,2}, В.В. Калегаев^{2,1}, Д.С. Груздов^{1,2}, Н.А. Власова², Г.А. Базилевская³, В.С. Махмутов³

1 Физ. фак МГУ, 2 НИИЯФ МГУ, 3 ФИАН, г. Москва, Россия,, ivanova.ar20@physics.msu.ru

Определение роли высыпаний потоков электронов из магнитосферы в атмосферу – один из ключевых моментов для решения глобальной проблемы динамики внешнего радиационного пояса. Высыпания электронов обычно наблюдаются во время геомагнитных возмущений как результат ускорения и рассеяния захваченных частиц в последующим попаданием их в конус потерь (см., например, [1]). Процессы ускорения и рассеяния электронов могут быть связаны с развитием волновой активности в магнитосфере (см., например, [2]). Настоящая работа является продолжением исследований с акцентом на изучение спектральных особенностей потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли и динамики потоков во время слабой геомагнитной бури ($|Dst|_{\max}=46$ нТл) 1-5 февраля 2015 года. В ходе серии баллонных экспериментов в Мурманской области ($L=5.5$), проведенных сотрудниками ФИАН (см., например, [3, 4]), 02.02.2015 было обнаружено высыпание потока электронов ВРПЗ с энергией более 100 кэВ. Дальнейшие исследования были проведены по изучению пространственно-временной структуры высыпаний энергичных электронов во время геомагнитной бури 01-06.02.2015, но уже по данным измерений нескольких полярных спутников: Метеор-М2, POES-18 и POES-19 [5]. В данной работе исследовались спектральные особенности потоков энергичных электронов, высыпающихся из внешнего радиационного пояса Земли в верхнюю атмосферу. Работа была выполнена на основе экспериментальных данных о потоках электронов с энергиями $>0,1$, $>0,3$ и >2 МэВ, полученных с полярного спутника Метеор-М2. Два ортогонально-направленных детектора спутника позволяют в высокоширотной части орбиты разделить потоки захваченных и высыпающихся частиц. Изотропизация потоков энергичных электронов интерпретировалась как высыпания. Показано, что наиболее сильные высыпания наблюдаются во время главной фазы бури и в начале фазы восстановления, когда происходит длительная интенсивная суббуревая активность. Было получено, что во время главной фазы бури наблюдается движение области высыпаний внутрь, а начиная с конца главной фазы бури, появляется четко выраженная тенденция к перемещению областей изотропизации за пределы внешнего радиационного пояса Земли. Также по мере развития бури наблюдалось ужесточение спектров высыпающихся частиц.

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

1. Yakhnina, T.A., Yakhnin, A.G., and Semenova, N.V., // *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, 2015*, pp. 75–78.
2. Lazutin, L. L., Dmitriev A. V, and Suvorova A. V. // *Solar-Terrestrial Physics*, 2018, V. 4, No. 1, P.59–71. DOI:10.12737/stp-41201805
3. Makhmutov, V.S., Bazilevskaya, G.A., Stozhkov, Yu.I., et al. // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, 2016, vol. 149, pp. 258–276.
4. Bazilevskaya, G.A., Kalinin, M.S., Krainev, M.B., et al. // *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Fiz.*, 2017, Vol. 81, No. 2, P. 235–238.
5. Kugusheva, A.D., Kalegaev, V.V., Vlasova, N.A., Petrov, K.A., Bazilevskaya, G.A., and Makhmutov, V.S. // *Cosmic Research*, 2021, Vol. 59, No. 6, P. 445–454.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ

Жукова Е.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, jookove@mail.ru

Работа посвящена исследованию ускорения солнечного ветра в токовом слое магнитосферы Земли. Построена численная модель, учитывающая различные сценарии ускорения плазмы [1-4]. Модель позволяет оценивать эффективность ускорения заряженных частиц (электронов, ионов водорода, гелия и кислорода) в процессах: (А) диполизации; (В) прохождения в среде с турбулентностью; (С) прохождения множественных диполяризационных фронтов; (D) комбинированных механизмов: (А) и (С) с добавлением (D) плазменной турбулентности. Показано, что на разных временных масштабах сценарии (А) - (D) способствуют различному ускорению популяций частиц. Показано, что ионы O^+ эффективно ускоряются за счет механизма (А); ионы H^+ и He^+ (и в некоторой степени e^-) более эффективно ускоряются в процессе (С), чем в (В). Установлено, что e^- могут быть значительно ускорены в процессе (D). Обсуждаются формы энергетических спектров.

Разработана модель, позволяющая оценивать ускорение ионов H^+ , He^+ , O^+ , Na^+ , S^+ в токовом слое магнитосферы Меркурия. Результаты показывают, что все виды заряженных частиц эффективно ускоряются в процессе (В) до энергий 100-200 кэВ. Прирост энергии ионов в процессе (С) на 10% выше, чем во втором случае. Формы модельных энергетических спектров согласуются с полученными экспериментальными спектрами. Роль данных механизмов более важна вблизи Меркурия по сравнению с плазменными процессами в токовом слое Земли.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-02-00957 и 17-02-01328, РНФ № 14-12-00824.

1. Жукова Е.И., Малова Х.В., Попов В.Ю., Григоренко Е.Е., Петрукович А.А., Зеленый Л.М. // Космические исследования 2017. Т. 55. С. 429.
2. Zhukova E.I., Malova H.V., Grigorenko E.E., Popov V.Yu., Petrukovich A.A., Delcourt D. C., Kronberg E.A., Daly P.W., Zelenyi L.M. // Ann. Geophysics 2018. V. 61. P. 1.
3. Parkhomenko E.I., Malova H.V., Popov V.Yu., Grigorenko E.E., Petrukovich A.A., Kronberg E.A., Zelenyi L.M. // Cosmic Res. 2018. V. 56. P. 465.
4. Parkhomenko E.I., Malova H.V., Grigorenko E.E., Popov V.Yu., Petrukovich A.A., Delcourt D. C., Kronberg E. A., Daly P. W., Zelenyi L.M. // Phys. Plasmas 2018. V. 26. P. 42901.

СПЕКТР ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 2011-2019 ГГ ПО ДАННЫМ МАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА AMS-02 НА БОРТУ МКС

Михайлов В.В., Слостная В.Ю.

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, vmikhajlov@mephi.ru

С середины прошлого века вариации космических лучей изучаются по данным наземной сети нейтронных мониторов. Для определения энергетического спектра космических лучей по на границе магнитосферы требуется знание формы спектра вариаций, который в работе [1] был экспериментально определен на основе измерений потоков частиц

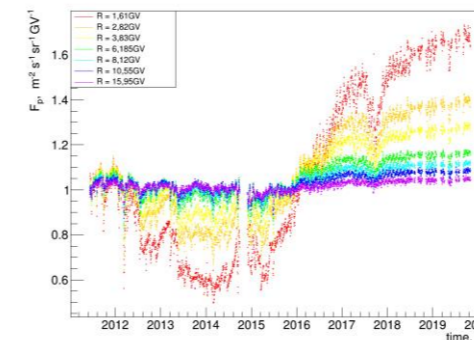


Рис.1 Нормированные на май 2011г. спектры протонов в различных диапазонах жесткостей

до жесткостей 60 ГВ за пределами атмосферы с помощью магнитного спектрометра AMS-02 в 2011-2017гг на МКС. В настоящей работе для определения спектра вариаций потоков протонов использованы недавно опубликованные суточные данные AMS-02 [2], полученные в период с 05/2011 по 10/2019. На рис. 1 показаны нормированные спектры протонов в различных диапазонах жесткостей. Спектр вариаций [1] рассматривается как изменение спектра частиц $J(R)$ относительно базового момента времени $J_B(R)$:

$$\frac{\delta J}{J} = \frac{J - J_B}{J_B} \quad (1)$$

За базовый период взяты пять оборотов Бартельса в период минимальной солнечной активности. Для аппроксимации спектра вариаций ν были использована

формула Ellisona-Ramaty, предложенная для этих целей в работе [1]:

$$\nu = aR^{-\gamma} \exp(-R/R_0) \quad (2)$$

где a – амплитуда,

R – жёсткость, γ и R_0 – параметры, а также формулы из работы [3]. Пример аппроксимации суточных спектров показан на рис.2. Новые прецизионные данные позволяют более детально изучить временную динамику спектра вариаций.

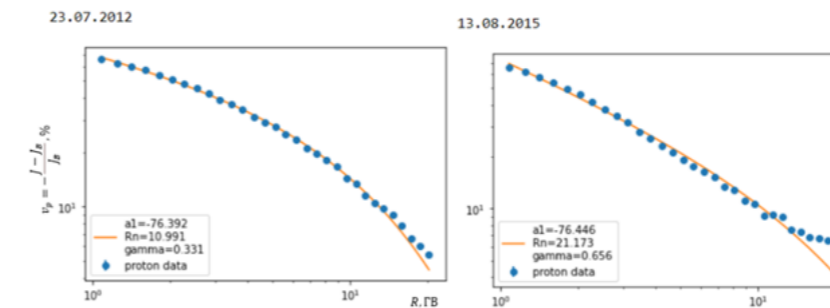


Рис.2 Оценка суточных спектров вариации протонов для периода отрицательной полярности (слева) и положительной полярности (справа) межпланетного поля.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные проблемы космических лучей и тёмная материя» №0723-2020-0040.

- 1.В. Г. Янке, А. В. Белов, Н. С. Шлык и др. //КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2021, том 59, № 6, с. 454–459
2. [AMS collaboration] //Physical Review Letters, 2021 Vol. 127, No. 27
3. 4. Liu, Z., Wang, L., Wimmer-Schweingruber, R. F. et al. //Journal of Geophysical Research:, 2020, 125, e2020JA028702

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯРНОЙ ГРАНИЦЫ АВРОРАЛЬНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ

Р.А. Ковражкин, А.Л. Глазунов, Г.А. Владимирова

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

В работе представлены результаты анализа характеристик высокоскоростных потоков электронов и протонов в ночном секторе авроральной области, высыпаящихся из плазменного слоя в магнитно-спокойные периоды и в ходе развития суббурь. Исследования проведены на основе базы данных спутника ИНТЕРБОЛ-2 на геоцентрических расстояниях $3-4 R_E$, где R_E – радиус Земли. Функция распределения частиц плазменного слоя не испытывает существенной модификации на таких высотах, поэтому по структурам частиц можно изучать процессы в самом слое. При дальнейшем движении по силовым линиям эти частицы высыпаются в авроральной зоне. Анализ показал, что средняя энергия электронов вблизи полярной границы авроральной магнитосферы составляет 0.3-1.0 кэВ в магнитно-спокойные периоды и резко возрастает до 5.0-8.0 кэВ в ходе развития суббурь. В первом случае такие энергии характерны для пограничного плазменного слоя, а во втором случае для центрального плазменного слоя. В пользу того, что в суббурю характерны высыпания из центрального плазменного слоя может свидетельствовать формирование на полярной границе мощных потоков восходящих ионов ионосферного происхождения. Они возникают при взаимодействии «волна-частица» на ионно-циклотронных частотах, кроме того, такие ионы могут ускоряться электрическими полями. Анализ характеристик протонов показал, что образование энергодисперсионной картины частиц по широте на полярной границе авроральной области указывает, что такие потоки существуют на замкнутых силовых линиях в хвосте магнитосферы (в области сепаратрисы) и затем распространяются до высот спутника. При дрейфе низкоэнергичные ионы проводят больше времени в поле конвекции, чем высокоэнергичные, поэтому они отклоняются на более низкие широты. Оценки, полученные как непосредственно из картины дисперсии ионов, так и из моделей магнитосферы, показывают, что полярная граница центрального плазменного слоя находится на расстояниях $R \sim 8-15 R_E$. Таким образом, динамические процессы в период суббурь происходят в области замкнутых силовых линий достаточно близко к Земле. Исследования характеристик электронных и ионных популяций в авроральной магнитосфере приводят к заключению, что в магнитно-спокойные периоды времени источниками высыпаний частиц в ночную авроральную зону являются и пограничный, и центральный плазменные слои.

ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 1-5 ФЕВРАЛЯ 2015 ГОДА

Д.С. Груздов^{1,2}, В.В. Калегаев^{2,1}, А.Р. Иванова^{1,2}, Н.А. Власова², Г.А. Базилевская³, В.С. Махмутов³

1 Физ. фак МГУ, 2 НИИЯФ МГУ, 3 ФИАН, г. Москва, Россия, gruzdov.ds20@physics.msu.ru

Внешний электронный радиационный пояс является одним из наиболее динамичных образований магнитосферы Земли. Наиболее значительные изменения внешнего электронного радиационного пояса наблюдаются во время геомагнитных бурь, 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 суббуревой и волновой активностью в магнитосфере.

В работе исследовалась динамика внешнего радиационного пояса Земли во время слабой геомагнитной бури ($|Dst|_{\max}=46$ нТл) 1-5 февраля 2015 года. Использовались экспериментальные данные о потоках электронов с энергиями $>0,1$, $>0,3$ и >2 МэВ, полученных с полярного спутника Метеор-М2 и экваториальных спутников Van Allen Probes. Проведен сравнительный анализ динамики максимальных потоков захваченных электронов, измеренных на высоких широтах и вблизи геомагнитного экватора, в сердцевине внешнего радиационного пояса Земли. Получено, что спектры потоков электронов близки по форме. Обнаружено, что во время главной фазы бури происходят интенсивные высыпания электронов, которые не приводят к уменьшению потоков электронов в максимуме пояса. Во время поздней фазы восстановления поток электронов с энергией $E > 2$ МэВ увеличился примерно на порядок, в то время как потоки электронов с $E > 0,1$ и $E > 0,3$ МэВ не изменились. Сопоставление данных измерений полярного спутника Метеор-М2 и экваториальных спутников Van Allen Probes демонстрирует роль неадиабатических процессов ускорения и рассеяния частиц в динамике внешнего радиационного пояса.

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

1. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. Москва: Наука, 1968.
2. Тверская Л.В. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26. С. 864.
3. Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2021. Т. 61. № 3. С. 316-326.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫСЫПАНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОБСЕРВАТОРИИ ЛОВОЗЕРО ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ NOAA POES

Попова Т.А.¹, Яхнина Т.А.¹, Демехов А.Г.^{1,2}

ИПГИ, г. Анапты, Россия, tarkada@yandex.ru

ЗИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Исследованы статистические свойства высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) с энергиями > 800 кэВ, зарегистрированных в течение 2017 года спутниками NOAA/POES в окрестности меридиана обс. Ловозеро. Для анализа выбраны пролеты спутников в интервале геомагнитных долгот 75 градусов с центром на долготе обс. Ловозеро, включая и пролеты в сопряженной области Южного полушария. По отобранным событиям составлен каталог ВРЭ и проведена их классификация на основе работ [1, 2]. Выделенные три группы событий имеют качественные различия по своим характеристикам. События первой группы обусловлены рассеянием частиц в области вытянутых силовых линий магнитного поля в ночной магнитосфере и всегда наблюдаются на ночной стороне, характерной особенностью событий этой группы является смещение энергичных электронов и границы изотропии к полюсу при уменьшении энергии частиц. Ко второй группе ВРЭ относятся события, в которых одновременно с ВРЭ наблюдаются высыпания энергичных (> 30 кэВ) электронов, также имеющих четкий широтный максимум в потоках высыпающихся частиц, события этой группы можно наблюдать практически во всех секторах MLT с максимальной вероятностью в предполуночном секторе. Измерения наземной обс. Ловозеро показывают, что эти две группы событий наблюдаются во время пульсаций PiB и интенсивных PiC. Третью группу составляют ВРЭ, коррелирующие с высыпанием протонов кольцевого тока, что обусловлено взаимодействием релятивистских электронов с электромагнитными ионно-циклотронными волнами, которые и наблюдаются на Земле в виде пульсаций диапазона Pc1. Высыпания этой группы почти во всех случаях коррелируют с высыпаниями энергичных электронов.

В работе приведены первые результаты статистического анализа событий: их пространственного распределения и зависимости от геомагнитных условий.

Работа поддержана грантом РФФ № 22-62-00048.

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>

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ MMS И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Найко Д.Ю.^{1,2*}, Овчинников И.Л.¹, Антонова Е.Е.^{1,3}

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

³Институт Космических Исследований РАН

* daniilnaiko@mail.ru

Представлены результаты предварительного анализа распределения коэффициентов вихревой диффузии в зависимости от координат 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⁻¹. Локализация спутников внутри плазменного слоя фиксировалась по концентрации и температуре ионов плазмы по данным тех же приборов и значению плазменного параметра β , для расчета которого использовалось магнитное поле по данным приборов FGM.

Подтверждены результаты, полученные в [1] при аналогичном анализе данных миссии THEMIS. Проведен анализ зависимости коэффициента турбулентной диффузии от межпланетного магнитного поля по данным OMNI. Показано, что при южной ориентации межпланетного магнитного поля значение коэффициентов турбулентной диффузии в несколько раз больше, чем при северной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00076.

1. Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A., Antonova E.E. // J. Geophys. Res. 2011, V. 116, A00I24.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ МАГНИТОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ 2-3 R_E ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПОТЕНЦИАЛА СПУТНИКА *ИНТЕРБОЛ-2*

Н.Ф. Смирнова¹, Г. Станев²

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nsmirnova@romance.iki.rssi.ru

²ИКИТ БАН, г. София, Болгария, gstanev@space.bas.bg

Если потенциал космического аппарата положительный относительно потенциала плазмы, то в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании плотности электронов. А. Педерсен и его коллеги предложили определять концентрацию окружающей плазмы в магнитосфере на основе измерений потенциала датчиками электрических полей на *ISEE-1* и других спутниках [1]. А. Педерсен предложил эмпирическую модель между плотностью фототока и величиной потенциала спутника:

$J_{ph}(V) = J_{ph0}[\exp(-V/2) + 0.0375\exp(-V/7.5)]$, если $V > 0$, J_{ph0} - плотность фототока насыщения, в этой работе $80 \mu A \cdot m^{-2}$. В подобных моделях плотность фототока насыщения имеет конкретное значение, поэтому проводятся калибровки концентрации электронов с учетом измерений другими приборами. Аппаратура спутника *ИНТЕРБОЛ-2* позволяет определить плотность J_{ph0} на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [2]. Используется тот факт, что зонд КМ-7 защищен экраном от УФ излучения, а зонды ИЭСП-2 нет. Для определения плотности электронов по измерениям потенциала *ИНТЕРБОЛ-2* можно использовать простую модель: $J_{ph}(V) = J_{ph0}\exp(-V/2.1)$. Это объясняется тем, что когда величина потенциала спутника менее 10 В и плотность электронов выше 1 см^{-3} , то основное значение имеют фотоэлектроны, генерируемые солнечной радиацией Lyman alpha. Эта методика подробно изложена в [3].

Плотность фотоэлектронного тока и концентрация электронов определялась на основе результатов измерений потенциала спутника *ИНТЕРБОЛ-2* с октября 1996 г. по март 1998 г. в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2–3 R_E . Этот период характеризуется низкой солнечной активностью: излучение в Lyman alpha за это время увеличилось только на 10 %. Потенциал измерялся прибором ИЭСП-2 с частотой опроса 400 мс, цикл работы КМ-7 составлял 5.12 с, поэтому плотность фототока и концентрация электронов определялись с интервалом 5.12 с. Плотность фототока насыщения находилась, как правило, в диапазоне 18–36 $\mu A \cdot m^{-2}$. Так как зонд прибора КМ-7 без фототока (закрыт экраном), то совпадение вариаций (U_{sp} - разность потенциала между корпусом спутника и зондом) $U_{sp}/ИЭСП-2$ и $U_{sp}/КМ-7$ показывает, что прибор ИЭСП-2 функционирует с корректным током смещения, ~80% этих корректных измерений проводились на высотах от 16000 км до высоты апогея (19211 км). Потенциал спутника *ИНТЕРБОЛ-2*, как правило, 2-5 В. Концентрация электронов в полярной шапке составляла, в основном, 1-10 см^{-3} , в более спокойные периоды выше, до 15 см^{-3} , в авроральной области 10-40 см^{-3} . Основные выводы о характере распределения плотности электронов согласуются с анализом данных спутника Polar [4].

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 КМ-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* // Принята к публикации в *Космич. исслед.* 2023. №2.

4. Laakso H., Opgenoorth H., Wyganth J., et al. Electron Density Distribution in the Magnetosphere // *ESA SP-415*. 1997. P.53-58.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МАГНИТОПАУЗЫ И РАЗРЫВОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА: МАГНИТНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ

Лукин А.С.^{1,2}, Guo Z.^{3,4}, Lin Yu⁴, Артемьев А.В.^{5,1}, Петрукович А.А.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, as.lukin.phys@gmail.com

²НИУ ВШЭ, Факультет физики, г. Москва, Россия

³School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing, China

⁴Physics Department, Auburn University, Auburn, AL, USA

⁵Department of Earth, Planetary, and Space Sciences and Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, CA, USA

Магнитное пересоединение — один из наиболее универсальных процессов в космической плазме, ответственный за ускорение заряженных частиц, перемешивание и нагрев плазменных популяций. В нашей работе рассматривается процесс пересоединения, обусловленный взаимодействием двух разрывов: вращательного разрыва солнечного ветра и тангенциального разрыва на границе магнитосферы Земли, магнитопаузе. Сравнение наблюдений нескольких космических аппаратов с результатами глобального гибридного моделирования и показывает, что взаимодействие разрывов солнечного ветра и магнитопаузы может оказаться триггером процессов пересоединения и перемешивания плазменных популяций солнечного ветра и магнитосферы вблизи магнитопаузы. Поскольку высокоамплитудные разрывы часто наблюдаются в солнечном ветре и теоретически предсказаны для различных звездных ветров, результаты, полученные в рамках данной работы, могут иметь широкое применение за пределами тематики магнитосферной физики.

СВЯЗЬ ДИНАМИКИ МАГНИТОСФЕРЫ С ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Зотов О.Д., Клайн Б.И.

ИФЗ РАН, ГО "БОРОК" ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, ozotov@inbox.ru

Исследована зависимость динамики Dst-индекса магнитосферы Земли от уровня турбулентности плазмы солнечного ветра, который контролируется параметром $\beta = NkT/(B^2/8\pi)$ (β - отношение плазменного давления к магнитному, N – плотность, T – температура протонов плазмы, B – величина межпланетного магнитного поля, k - постоянная Больцмана). Максимальный уровень турбулентности достигается при значении $\beta \sim 1$.

Анализировались часовые значения β и Dst-индекса (база данных OMNI, <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/omniweb>, 1964-2018 г.г) Для анализа использован метод наложения эпох. В качестве репера выбрано время начала интервала, длительностью 3÷5 часов, на котором параметр β принимает определенное значение. Интервал для анализа ± 100 часов относительно времени репера.

По результатам анализа построены годографы зависимости Dst от β . Показано, что динамика активности магнитосферы Земли в окрестности выбранного реперного значения β характеризуется явлением гистерезиса. Площадь гистерезиса зависит от уровня турбулентности солнечного ветра.

Предполагается, что турбулентность плазмы солнечного ветра, характеризуемая величиной параметра β в значительной степени определяет динамику активности магнитосферы Земли.

ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО МАТЕРИАЛАМ ЧИСЛЕННОГО RCM МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ

Сергеев В.А.¹, Yang J.²

1-Санкт-Петербургский госуниверситет, г. С-Петербург, Россия, victor@geo.phys.spbu.ru

2- Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China

Наиболее вероятным механизмом спорадических инъекций энергичных электронов (ЭЭ) во внутреннюю магнитосферу считаются локализованные плазменные струи (BBF), генерируемые спорадическим локальным магнитным пересоединением в токовом слое хвоста и характеризующиеся пониженной величиной энтропии плазменной трубки ($\rho V^{5/3}$). Детали процесса инъекции и торможения струй и генерации дрейфующего облака инжектированных ЭЭ малоизучены, поскольку требуют самосогласованных расчетов с высоким разрешением в сильно меняющейся конфигурации при явном учете дрейфов.

Мы используем недавнюю версию RCM-I модели, в которой плазменная струя инициализировалась кратковременной эвакуацией (до 90% на 5мин) содержимого локализованной (2-3Re поперек хвоста на границе расчета, $\sim 20Re$ в хвосте) плазменной трубки, самосогласованная эволюция которой вскоре приводила к инъекции струи. При кратковременной инъекции, стартуя с реалистичного распределения плазмы, в результате ускорения потоки электронов 50-100 кэВ резко усиливаются достигая в пике 10^5 ($\text{cm}^2 \text{ s sr keV}^{-1}$) в локальной области на расстоянии 6-7 Re, запуская азимутально дрейфующее облако ЭЭ. Соответственно, в проекции на ионосферу в течение 1-2 минут нарастает высыпание электронов. Симуляция показывает, что граница инъекции ЭЭ примерно совпадает с фронтом диполизации и соответствующими плазменными вариациями, однако в финальной стадии инъекции (в нашем случае при фронте развивающемся на $r < 6Re$) энергичные электроны не поставляются во фронтальную часть из-за отсечки магнитным дрейфом. Последующий восточный дрейф электронного облака формирует динамичную область высыпаний серпообразной формы с пиком интенсивности в утреннем секторе и провалом в вечернем секторе, в согласии с известными наблюдениями.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант 22-27-00169) и Министерства науки и высшего образования (грант 075-15-2021-583).

АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В МАГНИТОСЛОЕ

Дмитриев А.В.^{1,2}

1. Department of Space Science and Engineering, National Central University, Jhongli 32001, Taiwan, dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw

2. НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Сообщается об эффектах в верхней высокоширотной атмосфере, связанных с взаимодействием быстрых потоков плазмы магнитослоя, так называемых джетов, с дневной магнитопаузой. Джеты наблюдались миссией THEMIS в дневной магнитосфере в спокойный 12 июля 2009 г. Было установлено, что взаимодействие джетов сопровождалось сильным локализованным сжатием магнитосферы и проникновением сверхтепловой плазмы магнитослоя внутрь дневной магнитосферы. Сжатие вызвало магнитные вариации с амплитудой до 100 нТл, наблюдаемые наземными магнитными сетями SuperMAG и CARISMA. Магнитные вариации также были видны в геомагнитных индексах Dst и AE. Джеты также привели к интенсивному выпадению сверхтепловых ионов с энергией до 10 кэВ и энергичных электронов с энергией >30 кэВ, наблюдаемых низковысотными спутниками NOAA/POES в широком долготном диапазоне. Высыпания вызвали усиление ионизации с амплитудой ~1 TECU (~30% в относительных единицах) и усиление слоев ионосферы E и F1, которые наблюдались в миссии FORMOSAT-3/COSMIC. Повышенная ионизация в верхних слоях атмосферы может повлиять на радиосвязь и навигацию на высоких широтах. Эти результаты также дают новое представление о вкладе магнитосферного воздействия в изменчивость высокоширотной ионосферы.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТКИХ ЭНЕРГИЙ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ И БЕЗ НИХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ ARASE, GOES

Белаховский В.Б.¹, Пилипенко В.А.², Антонова Е.Е.^{3,4}, Шиокава К.⁵, Миоши Е.⁵

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт физики Земли РАН, г. Москва

³ – Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва

⁴ – Институт космических исследований РАН, г. Москва

⁵ – Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония

В работе исследован вклад различных механизмов (УНЧ, ОНЧ, бетатронный механизм) в ускорение электронов до релятивистских энергий во внешнем радиационном поясе Земли. Регистрация потоков заряженных частиц осуществлялась по данным японского спутника Arase (ERG) и геостационарных спутников GOES. Для характеристики ОНЧ волновой активности в магнитосфере использован инструмент PWE со спутника Arase. Использован УНЧ (ULF) индекс, разработанный в ИФЗ РАН, для характеристики УНЧ волновой активности магнитосферы в Pc5 диапазоне.

Рассмотрены наиболее сильные магнитные бури в период работы спутника Arase (27-29 мая 2017, 7-10 сентября 2017, 25-28 августа 2018), а также интервалы с высокой скоростью солнечного ветра до или после этих магнитных бурь.

Анализ показывает, что во время магнитных бурь максимум интенсивности потоков смещается на более низкие L-оболочки по сравнению с интервалами без магнитных бурь. При этом общая величина потоков релятивистских электронов во время магнитных бурь (со средней скоростью солнечного ветра) больше, чем для интервалов без магнитных бурь с высокой скоростью солнечного ветра.

Рост потоков релятивистских электронов на 1.5-2 порядка происходит через 1-3 дня после роста УНЧ индекса, роста мощности ОНЧ излучений. Анализ показывает, что рост ОНЧ и УНЧ волновой активности происходит примерно в одно время и совпадает с ростом суббуревой активности, характеризуемой AE индексом. Поэтому разделить по времени вклад УНЧ и ОНЧ механизмов ускорения достаточно не просто. Данные механизмы могут действовать на первом этапе ускорения. На фазе восстановления магнитных бурь может действовать дополнительный бетатронный механизм ускорения [1], связанный с инжекцией электронов в область магнитного поля, ослабленного кольцевым током, и их последующего ускорения при восстановлении магнитного поля.

1. Tverskaya L.V. Dynamics of energetic electrons in the radiation belts, in: "Radiation Belts: Models and Standards". Geophysical Monograph 97. AGU. p.183. 1996.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018 (Белаховский В.Б.).

О СОГЛАСОВАННОЙ ДИНАМИКЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ОБЛАСТИ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Н.А. Власова¹, В.В. Калегаев^{1,2}, К.Б. Капорцева^{1,2}, И.Н. Мягкова¹, Ю.С. Шугай¹

1 НИИЯФ МГУ, 2 Физ. фак. МГУ, г. Москва, Россия, nav19iv@gmail.com

Радиационные пояса Земли – структурное образование в магнитосфере, существующее благодаря наличию геомагнитного поля, обеспечивающего захват заряженных энергичных частиц. Сама магнитосфера – динамичная структура, формирующаяся под воздействием межпланетной среды: солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. В то же время, реакция магнитосферы на внешнее воздействие не однозначна и в значительной степени определяется предысторией, характеризующей внутреннее состояние магнитосферы. Динамика радиационных поясов Земли зависит от солнечной активности и от фазы солнечного цикла. На фазе спада цикла солнечной активности наблюдаемые вариации потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, как правило, связаны с геомагнитными возмущениями, развивающимися под воздействием высокоскоростных потоков солнечного ветра. Временной интервал с 16.10.2016 по 16.02.2017 приходится на позднюю фазу спада 24 цикла солнечной активности (2019 год – последний год цикла) и интересен тем, что в этот период наблюдались эволюция нескольких корональных дыр, корональные выбросы массы и развитие спорадических явлений в межпланетной среде, явившихся причиной высокоскоростных потоков солнечного ветра. Ответной реакцией магнитосферы на воздействие межпланетной среды стала последовательность геомагнитных возмущений, приведших к вариациям потоков электронов, в частности, на геостационарной орбите. Очевидная корреляция динамики скорости солнечного ветра, величины геомагнитного поля и интенсивности потока электронов на геостационарной орбите свидетельствует о жесткой причинно-следственной связи процессов, а также об их повторяемости. Результаты проведенного исследования показывают, что приход высокоскоростных потоков солнечного ветра является «триггерным механизмом», запускающим развитие геомагнитных возмущений. В период с 16.10.2016 по 16.02.2017, на протяжении четырех полных солнечных оборотов, зарегистрирован приход девяти высокоскоростных потоков солнечного ветра, вызвавших магнитные бури разной мощности. На главной фазе каждой бури наблюдается резкое уменьшение магнитного поля во внутренней магнитосфере, что приводит к падению потока электронов внешнего радиационного пояса, главным образом, вследствие расширения дрейфовых оболочек магнитосферы. Сравнительный анализ временных профилей потоков электронов и величины радиальной компоненты магнитного поля на геостационарной орбите показывает, что главным фактором, определяющим динамику потоков релятивистских электронов в области геостационарной орбиты, является вариация магнитосферы, как целого, то есть изменение не только величины геомагнитного поля, но и структуры его силовых линий.

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

Вернов С.Н., Кузнецов С.Н., Логачев Ю.И. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8. С. 401.

Тверская Л.В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. С. 864.

Тверской Б.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. С. 29.

РЕЗКОЕ СОКРАЩЕНИЕ ЧИСЛА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ В 24 И В ТЕКУЩЕМ 25 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ – СЛУЧАЙНОСТЬ ИЛИ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ?

И.Н. Мягкова¹, И.А. Миронова²

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

2 СПбГУ г Санкт-Петербург, Россия

При оценке частоты возникновения экстремальных магнитных бурь за последние восемь завершённых циклов солнечной активности (СА) – с 17 по 24 цикл, выяснилось, что начиная с 24 цикла СА количество экстремальных резко упало.

Для данной работы использовались данные, полученные в обсерватории Потсдама (Германия). Всего за рассмотренный период было выделено 265 бурь. Для бурь, которые наблюдались в течение одной длинной серии, в общем случае, использовался следующий критерий – если между измерениями с амплитудой $K_p=8$ - наблюдалось $K_p=3$ и ниже, то бури фиксировались как две разные бури, поскольку был заявлен отбор магнитных бурь, а не возмущенных периодов. Для отдельных хорошо изученных периодов, таких, например, как бури 28-31 октября 2003 года события рассматривались в соответствии с литературными данными.

Столь низкое граничное значение – 8- , было установлено потому, что при выборе в качестве граничного значения амплитуды $K_p=8$ экстремальных бурь в 24 цикле мы имели бы всего три бури с $K_p=8$ и выше. Проверка предположения, что эффект сильного снижения числа экстремальных бурь может быть случайным - за счет значительного числа бурь с $K_p=8$ - (7.667), показала, что это не так, и при включении в рассмотрение таких бурь для 24 цикла их число увеличивается всего с 3 до 7 за весь 24 цикл СА. Для сравнения, добавление в статистику бурь с $K_p=8$ - для 20 цикла увеличивает число экстремальных событий с 21 до 31, а для 22 цикла - с 20 до 32.

Естественно, возник вопрос – что явилось причиной такого радикального снижения экстремальных магнитных бурь. Отобранные бури были просуммированы с интервалом один год, и каждому году сопоставлен номер года в цикле СА и среднегодовое число солнечных пятен по данным Бельгийской королевской обсерватории Брюсселя (Бельгия). Сопоставление числа солнечных пятен и количества экстремальных бурь показало, что действительно, в 24 цикле СА число солнечных пятен было примерно вдвое ниже, чем в 22 цикле, и примерно втрое ниже по сравнению с 22 циклом. Таким образом, если ориентироваться только на 24 цикл СА, то снижение числа экстремальных бурь можно объяснить снижением активности Солнца.

Другой вопрос, который возникает: 24 цикл был аномальным или мы вошли в эпоху пониженной СА? В текущем 25-м цикле СА, в котором на данный момент прошло три года, среднегодовое число солнечных пятен также как и 24 цикле в полтора – два с половиной раза меньше, чем в предыдущих семи циклах СА, хотя немного выше, чем в 24 цикле СА. При этом экстремальная буря с $K_p=8$ - в текущем 25 цикле СА на начало 2023 года наблюдалась только одна - в ноябре 2021 года. Эти данные говорят о том, что наступила эпоха низкой солнечной активности, но более точно на данный вопрос можно будет ответить в ближайшие год-два.

Работа выполнена при поддержке РФФ проекта № 20-67-46016.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 1-6 ФЕВРАЛЯ 2015 ГОДА

Калегаев В.В.^{2,1}, Власова Н.А.^{2,1}, Иванова А.Р.^{1,2}, Груздов Д.С.^{1,2}, Базилевская Г.А.³, Махмутов В.С.³

1 Физ. фак МГУ, 2 НИИЯФ МГУ, 3 ФИАН, Москва, Россия,

klg@decl.sinp.msu.ru

Магнитные бури часто сопровождаются интенсивными высыпаниями энергичных электронов из внешнего радиационного пояса в атмосферу Земли. Это явление может быть зарегистрировано низкоорбитальными полярными спутниками по характерным вариациям потоков частиц. Баллонные эксперименты на высотах 20-30 км также позволяют обнаруживать по рентгеновскому тормозному излучению вторжения энергичных электронов. Одновременные наблюдения высыпаний энергичных электронов на разных высотах позволяют лучше понять физические механизмы этого явления, установить магнитосферные источники высыпаний и их связь с параметрами солнечного ветра и уровнем геомагнитной активности.

Интенсивные высыпания во время геомагнитного возмущения 01/02/15 - 06/02/15 исследовались на основе анализа данных измерений потоков электронов на спутниках Meteor M2, POES-18 и POES-19, расположенных на разных MLT, а также, данных измерений спутников Van Allen probes. Соотношение между величинами потоков электронов, измеренных вертикальным и горизонтальным спутниковыми детекторами, использовалось для идентификации высыпаний частиц, соответствующих событию, зарегистрированному 02.02.15 в ходе аэростатного эксперимента. Высыпания были обнаружены на L-оболочках с 4 по 7 как в северном полушарии, так и в южном, в магнито- сопряженной области. Для каждого события была определена область в магнитосфере, ответственная за рассеяние электронов и их вторжение в атмосферу Земли. Было показано, что в максимуме бури и во время ранней фазы восстановления высыпания были связаны с интенсивным взаимодействием волна-частица, в приэкваториальной области в широком диапазоне MLT и L. Были определены спектральные характеристики потоков высыпающихся и захваченных частиц и пространственные изменения области генерации высыпаний на протяжении всей магнитной бури 01/02/15 - 06/02/15.

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

МЕХАНИЗМЫ ПАДЕНИЯ И ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА И ПРЕДСКАЗАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЯСА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

Антонова Е.Е.^{1,2}, Сотников Н.В.¹, Кирпичев И.П.², Рязанцева М.О.², Овчинников И.Л.¹, Степанова М.В.³, Pinto V.³, Espinoza С.М.³, Воробьев В.Г.⁴, Ягодкина О.И.⁴, Пулинец М.С.¹, Найко Д.Ю.¹

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, elizaveta.antonova@gmail.com

²Институт Космических Исследований РАН

³University of Santiago de Chile

⁴Полярный Геофизический институт

Проблема возрастания потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса (ВРП) относится к основным нерешенным проблемам физики магнитосферы входящим в число основных задач по предсказанию Космической погоды. Потоки ВРП нарастают после примерно половины магнитных бурь. Быстрые возрастания потоков фиксируются во время больших магнитосферных суббурь. Рассмотрены причины, не позволяющие описывать процессы падений и возрастаний потоков ВРП используя наиболее популярные так называемые «квазилинейные» модели. К основным причинам отнесены рассмотрение взаимодействия с хоровыми волнами в качестве основного механизма ускорения релятивистских электронов и неадекватный учет адиабатического эффекта. Проведен анализ возможности предсказания характеристик ВРП на фазе восстановления магнитной бури и после бури. Анализ изменений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля позволяет с хорошей точностью предсказывать изменения Dst/SYM-H вариации. Соотношение Тверской дает возможность определять положение формирующегося во время фазы восстановления бури максимума ВРП. Показано, что возрастание потоков релятивистских электронов можно предсказать восстанавливая локализацию и интенсивность суббурь в период фазы восстановления бури. Обсуждены результаты работ, восстанавливающих существовавшие ранее подходы к описанию ВРП и выделению роли авроральных процессов в его динамике.

СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ СИСТЕМОЙ КАМЕР И ИЗОБРАЖАЮЩИХ ФОТОМЕТРОВ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Б.В. Козелов¹, А.А. Белов^{2,3}, П.А. Климов², А.С. Мурашов², Р.Е. Сараев^{2,3}, К.Ф. Сигаева^{2,3}, С.А. Шаракин², Д.А. Трофимов^{2,3}, К.Д. Щелканов^{2,3}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт», 183010 Россия, г. Мурманск, ул. Халтурина, 15, boris.kozelov@gmail.com

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1(2).

³Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1(2).

На базе высокоширотных полигонов Верхнетуломский и Ловозеро Полярного геофизического института на Кольском полуострове создается система для стереоскопических наблюдений пульсирующих полярных сияний с использованием высокочувствительных изображающих фотометров на основе многоанодных фотоэлектронных умножителей. Фотометры представляют собой два линзовых телескопа с площадью входного окна более 20 см² и матрицей МАФЭУ, расположенной в фокальной плоскости. Первый фотометр, установленный в обсерватории Верхнетуломский направлен в магнитный зенит и работает с сентября 2021 года. Вторым, планируемый к установке в 2023 году в Ловозеро будет обеспечивать обзор того же объема атмосферы в диапазоне высот 50 – 100 км с пространственным разрешением около 2 км. Высокое временное разрешение фотометров (от 2,5 мкс) и пространственное разрешение позволят производить измерения тонкой временной структуры и высотного распределения излучения пульсирующих сияний, что дает возможность оценить максимальные энергии электронов, ответственных за возникновение данного типа сияний. Фотометры дополняют уже существующую систему камер всего неба ПГИ.

Данная система может быть использована для изучения других атмосферных явлений: метеоров, транзиентных световых явлений и пр. с высоким временным разрешением и высокой чувствительностью в режиме непрерывного мониторинга. В докладе приводится описание аппаратуры, примеры измерений за первый и второй сезоны работы.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00010 (<https://rscf.ru/project/22-62-00010/>).

ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ, ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ И СВЕЧЕНИЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ВО ВРЕМЯ ПИЛООБРАЗНЫХ СОБЫТИЙ

Марчук Р.А.¹, Мишин В.В.¹, Клибанова Ю. Ю.², Михалев А. В.¹, Пенских Ю.В.

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского», Иркутск, Россия

Представленная работа проводит анализ поведения продольных токов, широкополосных геомагнитных пульсаций и свечений ночной атмосферы во время сильных магнитосферных бурь 06.11.2000 и 04.10.2000 по данным наблюдений среднеширотных геомагнитных и оптических обсерваторий ИСЗФ Иркутск (Патроны), Монды и Торы, а также мировой сети наземных магнитометров, а также параметров плазмы солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП).

В каждой из анализируемых бурь наблюдались пилообразные суббуревые события (ПСС) во время длительных интервалов установившегося сильного южного ММП. В каждом ПСС зарегистрирована серия из 5–8 квазипериодических суббурь. В начале каждой из них наблюдался цуг геомагнитных пульсаций типа PiB (пример: рис. 1), инъекции энергичных частиц на геосинхронной орбите и свечениями ночного неба. Мы обсуждаем возможные механизмы развития периодических суббуревых активизаций и связанных с ними всплесков пульсаций и свечения ночного неба.

Также в работе рассматривается роль удаленности по широте южной границы овала продольных токов и полярных сияний от обсерваторий, и влияние локализации по долготе области фокусов вихрей ПТ и максимума западного электроджета на спад амплитуды геомагнитных пульсаций и возможность их наблюдения на станциях ИСЗФ вблизи Иркутска.

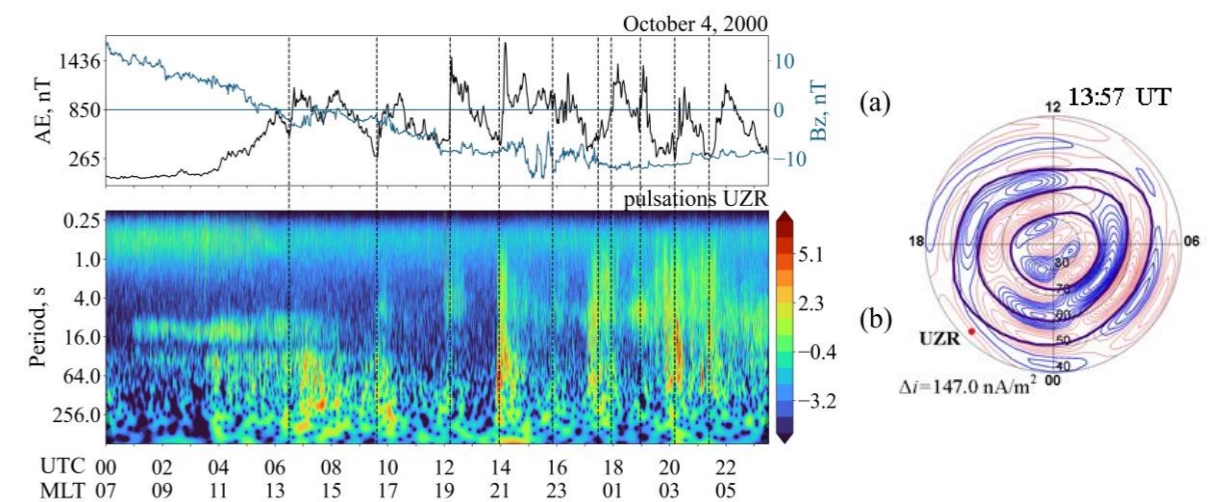


Рис. 1. Магнитосферная буря 4 октября 2000 года. (а) Индекс геомагнитной активности AE и Bz компонента ММП (синяя линия); (б) динамический спектр геомагнитных пульсаций; Справа: карта продольных токов. Жирные синие линии: границы зон FAC R0, R1 и R2; красный круг показывает положение обсерватории Узур (UZR) в дипольных геомагнитных координатах (41.93°), MLT.

МОДЕЛЬ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДИСКА ЮПИТЕРА

Алексеев И.И., Лаврухин А.С., Невский Д.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, iialexeev@mail.ru

За время работы КА Juno на орбите спутника Юпитера была получена обширная информация о структуре магнитного и электрического полей и о потоках плазмы и энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера - самом протяженном объекте в Солнечной системе, если не считать саму гелиосферу. Ключевым элементом магнитосферы Юпитера, определяющим ее размеры, является экваториальный токовый диск, сформированный плазмой, в том числе, выброшенной вулканами Ио, увлекаемой в совместное вращение с планетой, вращающейся в 2.4 раза быстрее Земли. Рассмотрены процессы, приводящие к формированию экваториального плазменного диска в магнитосфере Юпитера, к ускорению частиц до МэВ-ных энергий в авроральной зоне.

При построении численной модели будет учитываться процесс ионизации нейтралов, выброшенных из недр одного из Галлиевых спутников Юпитера - Ио. Эти ионы (в основном, ионы кислорода и серы) впоследствии вовлекаются в совместное вращение с планетой с формированием экваториального плазменного диска в средней магнитосфере за альфвеновским радиусом (на расстоянии около 20 радиусов Юпитера, R_J), вплоть до магнитопаузы в дневной магнитосфере. В итоге, суммарное магнитное поле у магнитопаузы оказывается почти на порядок больше, чем в случае чисто дипольной магнитосферы. Уменьшая широтную компоненту магнитосферного поля внутри диска, магнитодиск препятствует замыканию силовых линий магнитного потока северного полушария через экватор с южным полушарием и сохраняет примерно постоянным (не зависящим от расстояния до Юпитера, r) магнитный поток через северное или южное полушарие. В результате радиальная компонента суммы диполя и экваториального диска убывает как r^{-2} .

Проскальзывание отстающей от твердотельного вращения магнитосферной плазмы относительно ионосферного уровня приводит к генерации токовой системы, напоминающей альфвеновскую систему в гелиосфере, которая создает азимутальное магнитное поле, убывающее с расстоянием ещё медленнее - как r^{-1} .

Реализована интерактивную модель, стартующая с расчетов профилей плотности ионов и возникающих в магнитосфере токов по численным траекториям пробных частиц в начальном модельном магнитном поле. Конечной целью является построение после некоторого числа итераций таких профилей падающих на слой частиц, которые создадут ток, формирующий исходное модельное поле. Другими словами, частицы, двигающиеся в модельном магнитном поле, сформируют ток, равный ротору модельного поля или отличающийся от него максимум на заранее оговоренную допустимую ошибку.

Модель должна учитывать полученные в ходе миссии Juno данные о магнитном поле и потоках частиц, а также соответствовать наблюдаемому ионному и зарядовому составу магнитосферной плазмы и относительной распространенности энергичных частиц. Она должна численно оценить относительный вклад ионосферной плазмы, ионосферной и проникающей плазмы солнечного ветра в различных областях магнитосферы, обозначить каналы проникновения и циркуляцию частиц, их ускорение и потери.

Мы будем использовать модель продольных токов, в которой изгиб силовых линий относительно меридиональной плоскости наблюдается вне области твердотельного вращения магнитосферной плазмы, внутри этой области и азимутальная компонента магнитного поля, и продольные токи отсутствуют. Для упрощения расчетов мы будем предполагать, что продольные токи концентрируются в бесконечно тонкий поверхностный (конический на высотах ионосферы) токовый слой, расположенный на силовых линиях, разграничивающих дипольные и вытянутые в хвост силовые линии. Возвратный продольный ток, обеспечивающий непрерывность трехмерной токовой системы, тоже считаем двумерным и расположенным на силовых линиях, соединяющих внешний край диска и ионосферу.

Формула для ЭДС униполярного генератора: $\Delta\Phi = \frac{B_0 \cdot a^2 \cdot \Omega}{2}$ связывает разность потенциалов между полюсом и экватором с магнитным потоком внутри шара, B_0 , с его радиусом, a , и с угловой скоростью вращения вокруг своей оси, Ω . В нашем случае для $B_0 = 0.42 \cdot 10^6$ нТл, $a = R_J = 7.14 \cdot 10^7$ м, и $\Omega = 1.7 \cdot 10^{-4}$ сек⁻¹, $\Delta\Phi = 330$ МВ. ЭДС определяет характерную энергию ускоренных частиц, которые могут генерироваться в системе Юпитера за счет проскальзывания магнитосферного экваториального диска относительно планетарного диполя. А полный ток в альфвеновской системе будет определяться проинтегрированной по высоте Педерсеновской проводимостью ионосферы, которую можно оценить как 0.1 Ом^{-1} . Отсюда получим полный ток в Альфвеновской системе 33 МА, в согласии с имеющимися оценками.

Работа выполнена в рамках г/б темы № 122072700028-3, при частичной поддержке гранта Минобрнауки РФ № 075-15-2021-949, Соглашение № 13.2251.21.0019.

ВАРИАЦИИ МАГНИТОСФЕРЫ МЕРКУРИЯ

Лаврухин А.С.^{1,2}, Невский Д.В.^{1,2}, Алексеев И.И.¹

1. НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, lavrukhin@physics.msu.ru

2. Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия

Используя данные магнитометра КА MESSENGER, описывающие точки пересечения магнитопаузы и головной ударной волны магнитосферы Меркурия [1], мы рассчитали параметры параболоидов вращения, аппроксимирующих данные точки. На основе параметров параболоидов для каждой точки пересечения были рассчитаны соответствующие расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы и головной ударной волны.

Были получены зависимости расстояний до подсолнечной точки головной ударной волны и магнитопаузы от положения Меркурия на орбите вокруг Солнца. Эти профили согласуются с уменьшением динамического давления плазмы солнечного ветра и величины межпланетного магнитного поля с увеличением гелиоцентрического расстояния. Были исследованы вариации межпланетного магнитного поля и магнитного поля в переходном слое магнитосферы планеты. Были получены средняя толщина переходного слоя и величина скачка магнитного поля на головной ударной волне во время перехода из области межпланетного магнитного поля в область переходного слоя магнитосферы.

Работа выполнена в рамках проекта № 21-52-12025 Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

1. Philpott L.C., et al. // J. of Geophys. Res.: Space Phys. 2020. V. **125** (5). e2019JA027544.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ И КОСМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ВОКРУГ НИХ ПО ДАННЫМ ТРАНЗИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Шайхисламов¹ И. Ф., Руменских¹ М. С., Березуцкий¹ А. Г., Мирошниченко¹ И. Б.,
Ходаченко² М. Л.

¹Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия, ildars@ngs.ru

²Институт космических исследований Австрийской академии наук, Грац, Австрия

Горячие экзопланеты, вращающиеся экстремально близко вокруг родительской звезды, выбрасывают в окружающее космическое пространство вещество своих верхних атмосфер в виде сверх-звукового газодинамического ветра. Оно было обнаружено у ряда горячих Юпитеров и теплых Нептунов по наблюдениям транзитного поглощения в ВУФ-линиях таких элементов, как Н, С, О, Mg, Si, а также в инфракрасных линиях HI и HeI. Планетарный ветер обусловлен таким важным фактором космической погоды, как интенсивность ионизирующего излучения. Многокомпонентный и частично ионизированный атмосферный материал вступает в непосредственное взаимодействие с другим важным фактором космической погоды – окружающей плазмой Звездного Ветра. Это взаимодействие принципиально отличается от процессов в разреженных планетарных экзосферах Солнечной системы. Истечение атмосфер горячих экзопланет — сложное явление, и количественная интерпретация данных наблюдений требует численного моделирования. Сравнение данных спектральных наблюдений транзитных поглощений конкретных экзопланет с трехмерным моделированием позволяет сделать важные выводы как об атмосфере экзопланеты, так и о параметрах плазмы звездного ветра.

Используя самосогласованный глобальный 3D МГД многожидкостный код [1], мы смоделировали несколько горячих Юпитеров и теплых Нептунов, для которых были сделаны транзитные наблюдения с различным спектральным разрешением – HD209458b, HD189733b, Wasp107b, Wasp80b, GJ436b, GJ3470b, TOI421b&c, PiMenC [2, 3]. Для двух из них (GJ436b, GJ3470b) моделирование показывает, что наблюдаемое сильное поглощение в линии Ly α можно объяснить только взаимодействием планетарного истечения с ЗВ, имеющим параметры, сопоставимые с Солнечным Ветром. Моделирование HD189733b [3] подтверждает, что изменчивость наблюдений можно объяснить изменчивостью условий космической погоды. Транзитные поглощения в линиях HI, OI, CII, HeI, измеренные для HD209458b, позволили оценить верхний предел возможного магнитного поля этой планеты [1]. Для двойной планетной системы TOI421 мы предсказали [2] сильное поглощение в линии Ly α в голубом крыле линии и относительно слабое поглощение в линии метастабильного гелия. Эти исследования различных систем дают основания для общих выводов о том, насколько разнообразной может быть космическая погода вокруг других звезд и какие наблюдения необходимы для оценки ее параметров.

Исследования поддержаны проектом 075-15-2020-780 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и проектом 0243-2021-0003 государственного задания.

[1] Khodachenko M. L., Shaikhislamov I. F., Lammer et al. // MNRAS 2021. 507(3). 3626.

[2] Berezutsky A. G., Shaikhislamov I. F., Rumenskikh M. S., et al. // MNRAS. 2022. stac1633.

[3] Rumenskikh M. S., Shaikhislamov I. F., Khodachenko M. L., et al. // ApJ. 2022. 927(2). 238.

АТОМНОЕ ВЫСТРАИВАНИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

Руменских М. С.¹, Чичинин А.И.², Шепелин А.В.¹, Кислов Р.А.³, Шайхисламов И.Ф.¹

¹Институт лазерной физики СО РАН

²Институт химической кинетики и горения

³ИЗМИРАН, Москва

Со времен потрясающего воображение открытия - планеты за пределами Солнечной системы - было обнаружено несколько тысяч экзопланет, причем порядка 50% из них методом транзитной фотометрии. Помимо самого факта наличия экзопланет в звездной системе, этот метод может предоставить обширную информацию о составе и плотности атмосфер экзопланет путем сканирования поглощения излучения при транзите планеты перед диском звезды вблизи различных спектральных линий, соответствующих переходам между квантовыми состояниями различных атомов и молекул. Кроме того, некоторые аспекты взаимодействия планетарного вещества с магнитным полем, а также со звездным ветром имеют четкие наблюдательные проявления.

Формирование и эволюция планетарных плазмосфер и наблюдательные проявления транзитных поглощений экзопланет значительно подвержены воздействию собственного магнитного поля планеты. Корректное решение обратной задачи нахождения параметров космической погоды в окрестности горячих экзопланет путем интерпретации транзитных поглощений затруднительно без знания наличия или отсутствия собственного магнитного поля планеты, поскольку верхние слои атмосфер горячих экзопланет представлены плазмой. Единственный существующий прямой метод определения МП экзопланет, основанный на наблюдении радиоэмиссии за счет прецессии электронов в магнитном поле планеты, труднореализуем в силу ряда причин^{5,6}. На данный момент радиоизлучение наблюдалось только для одной экзопланеты⁷ — τ Boo b, несмотря на предсказанную эффективность этого метода^{8,9}.

В настоящей работе предложен новый подход к определению магнитных полей экзопланет. Он основан на эффекте атомного выстраивания при взаимодействии атомов и ионов атмосфер экзопланет, находящихся в магнитном поле, с излучением родительских звезд. Проведенные соответствующие оценки показали, что эффект может быть детектирован существующими спектрографами и спектрополяриметрами.

Работа выполнена в рамках государственного задания №0243-2021-0003, при поддержке программы 10 «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» Национального центра физики и математики.

1. Newman C. E. et al. Winds measured by the Rover Environmental Monitoring Station (REMS) during the Mars Science Laboratory (MSL) rover's Bagnold Dunes Campaign and comparison with numerical modeling using MarsWRF // *Icarus*. – 2017. – Т. 291. – С. 203-231.
2. Hourdin F., Forget F., Talagrand O. The sensitivity of the Martian surface pressure and atmospheric mass budget to various parameters: A comparison between numerical simulations and Viking observations // *Journal of Geophysical Research: Planets*. – 1995. – Т. 100. – №. E3. – С. 5501-5523.
3. Kallio E., Luhmann J. G., Lyon J. G. Magnetic field near Venus: A comparison between Pioneer Venus Orbiter magnetic field observations and an MHD simulation // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1998. – Т. 103. – №. A3. – С. 4723-4737.
4. Nettelmann N. et al. Jupiter models with improved ab initio hydrogen equation of state (H-REOS. 2) // *The Astrophysical Journal*. – 2012. – Т. 750. – №. 1. – С. 52.
5. Vidotto A. A., Feeney N., Groh J. H. Can we detect aurora in exoplanets orbiting M dwarfs? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – Т. 488. – №. 1. – С. 633-644.
6. Erkaev N. V. et al. Can radio emission escape from the magnetosphere of ν Andromedae b—a new method to constrain the minimum mass of Hot Jupiters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2022. – Т. 512. – №. 4. – С. 4869-4876.
7. Turner J. D. et al. The search for radio emission from the exoplanetary systems 55 Cancri, ν Andromedae, and τ Boötis using LOFAR beam-formed observations // *Astronomy & Astrophysics*. – 2021. – Т. 645. – С. A59.
8. Zarka P. Plasma interactions of exoplanets with their parent star and associated radio emissions // *Planetary and Space Science*. – 2007. – Т. 55. – №. 5. – С. 598-617.
9. Lynch C. R. et al. The detectability of radio emission from exoplanets // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2018. – Т. 478. – №. 2. – С. 1763-1775.

СУЩЕСТВУЮТ ЛИ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫЕ ПЕТЛИ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ?

Анфиногентов С.А., Рубцов А.В.

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

Распределение плотности внутри магнитосферы и в ее внутренней части, плазмосфере, всегда представляло интерес для исследования, однако возможности дистанционного зондирования или *in situ* измерений на спутниках имели заметные ограничения по пространственному разрешению и выделение каких-либо выраженных тонкоструктурных элементов было затруднительно. Однако, изображения плазмосферы Земли, полученные инструментом EUV космического аппарата IMAGE (IMAGE/EUV) в линии 304 Å, показали наличие большого количества разнообразных плазменных структур внутри нее. Помимо уже известных ранее плазмосферных плюмов были обнаружены «плечи» (shoulders), зазубрины (Crenulation) и выемки (Notches) на внешней границе плазмосферы, а также радиально вытянутые включения пониженной плотности внутри плазмосферы (Fingers, Channels). Появление и развитие этих структур чаще всего связано с геомагнитными возмущениями, такими как магнитные бури.

Многие ключевые характеристики магнитосферы Земли (значение плазменного параметра β , характерные размеры и скорости, структура магнитного поля) близки к соответствующим параметрам корональной части солнечных активных областей. Как известно, плазма солнечной короны сильно структурирована, а основными структурными элементами в ней являются магнитоплазменные петли (корональные петли). Они представляют собой тонкие магнитные трубки, заполненные веществом, температура и плотность которого существенно отличается от фоновых значений. По нашему мнению, аналогичные структуры могут существовать и в магнитосфере Земли.

Основной целью данной работы стал поиск свидетельств существования магнитоплазменных петель в плазмосфере Земли на ее изображениях, полученных инструментом IMAGE/EUV на длине волны 304 Å. Нам удалось обнаружить несколько случаев, когда на изображениях четко видны тонкие вытянутые неоднородности петлеобразной формы, которые мы интерпретируем, как плазмосферные петли. Отметим также, что в то время, когда аппарат IMAGE находится над полюсом Земли, на изображениях плазмосферы часто видны тонкие вытянутые в радиальном направлении структуры. По нашему мнению, эти объекты также могут соответствовать магнитоплазменным петлям, которые при наблюдении со стороны полюса проецируются на плоскость изображения, как радиально-ориентированные линейчатые структуры.

Таким образом, проанализировав изображения плазмосферы Земли, полученные инструментом IMAGE/EUV, мы обнаружили явные свидетельства существования плазмосферных неоднородностей в виде тонких магнитоплазменных петель, вытянутых вдоль магнитного поля. Резкие перепады плотности на границах таких неоднородностей приводят к соответствующим перепадам альфвеновской скорости, а значит плазмосферные петли могут служить волноводами и локальными резонаторами для магнитогидродинамических (МГД) волн. Наличие таких резонаторов должно учитываться как при развитии теории МГД волн в магнитосфере Земли, так и при интерпретации наблюдений геомагнитных пульсаций. В частности, для описания волновых явлений в петельных структурах плазмосферы Земли может быть адаптирована теория МГД волн в корональных петлях на Солнце.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ № 21-72-10139.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМОПАУЗЫ ЧЕРЕЗ АЛЬФВЕНОВСКУЮ СКОРОСТЬ

Рубцов А.В.¹, Nosé M.²

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru

²Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan

В работе приведена статистика распределения положения плазмопаузы, набранная по данным спутника Arase с марта 2017 по декабрь 2020 г. Для определения положения плазмопаузы использовалось классическое определение: падение концентрации электронов в 5 раз или больше на расстоянии в 0,5 R_E. Для этого определения использовались данные о концентрации электронов, вычисленной по частоте верхнегибридного резонанса на инструменте HFA. Кроме того, большой наклон орбиты спутника Arase, до 40°, показал необходимость приводить результаты измерений к величине в области магнитного экватора. В результате, из 6933 пролётов спутника от и к Земле было обнаружено 3516 пересечений плазмопаузы (~51%) со средним значением её положения $L_{pp} = 5,1 \pm 1,1$.

В то же время, в ходе исследования распределений УНЧ-волн в диапазонах Pc4 и Pc5 в магнитосфере, было обнаружено, что максимум частоты появления волн относительно L_{pp} отстоит на ~1 R_E, хотя ранее предполагалось, что именно плазмопауза выступает в роли резонатора и области генерации УНЧ-волн. Поскольку большинство УНЧ-волн диапазонов Pc4 и Pc5 описываются как альфвеновские волны и их собственная частота пропорциональна альфвеновской скорости, которая обратно пропорциональна плотности частиц, то мы предположили, что обнаруженный сдвиг может быть вызван влиянием примеси тяжелых ионов. Тяжелые ионы, сконцентрированные в узкой области на некотором расстоянии от Земли, могут приводить к смещению распределения плотности ионов относительно распределения концентрации электронов. Примером такой ситуации является кислородный тор — область повышенного содержания ионов кислорода в магнитосфере, опоясывающая Землю в виде тора и возникающая на фазе восстановления магнитной бури.

В данной работе, мы использовали приближения полностью протонной плазмы и квазинейтральности для вычисления альфвеновской скорости, чтобы вывести численное значение порога для определения положения плазмопаузы с не меньшей точностью, чем по данным электронной концентрации. Таким образом, мы получили, что увеличение альфвеновской скорости в 1,65 раза или больше на расстоянии в 0,5 R_E соответствует классическому определению плазмопаузы. Было обнаружено, что этот порог пропорционален $L^{1/3}$. Полученные результаты помогут в будущем определять положение плазмопаузы с учётом тяжелых ионов при вычислении альфвеновской скорости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10139. Авторы благодарны программе SCOSTEP Visiting Scholar и Центру совместных международных исследований Института исследований околоземного космического пространства Нагойского университета. Авторы благодарят руководителей инструментов MGF, HFA и PWE на спутнике Arase Аяко Мацуоку, Ёшия Касахару, Ацуши Кумамото и Фуминори Цучия, а также руководителя миссии Arase Ику Шинохару и ведущего учёного миссии Arase Ёшидзуми Миёши за предоставленные данные спутника Arase.

РЕГУЛЯРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛОТНОСТИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Котова Г.А., Безруких В.В., Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Чернышов А.А.

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

По измерениям тепловой плазмы на спутниках МАГИОН-5 и ИНТЕРБОЛ-1 в пограничном слое плазмосферы выделены повторяющиеся подобные изменения плотности протонов в зависимости от L – оболочки. Такие вариации плотности имеют следующие характерные особенности: (а) изменения плотности происходят достаточно резко и на профиле плотности – зависимости плотности от L или от λ - имеют пилообразный характер, плотность протонов меняется в 2-8 раз от максимума к минимуму вариаций; (б) характерный размер вариаций в радиальном направлении в плоскости геомагнитного экватора $\sim 0.15 R_E$ или ~ 1000 км; (в) пилообразные изменения плотности протонов в пограничном слое плазмосферы могут охватывать не менее 90° по долготе; (г) регулярные вариации плотности плазмы наблюдались на геомагнитных широтах до 30° , причем эта широта ограничена орбитами спутников, данные которых использовались для анализа. Пилообразные вариации плотности тепловой плазмы, по-видимому, относятся к пространственным структурам, эволюционирующим, но сохраняющимся в пограничном слое плазмосферы, по крайней мере, в течение суток. Неоднородности плазмы наблюдались при достаточно спокойной или немного возмущенной геомагнитной обстановке. Рассмотренные неоднородности, вероятно, являются следствием перестановочной или квазиперестановочной неустойчивости, развивающейся в пограничном слое плазмосферы.

ПЛАТО ПЛАЗМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ. УСТОЙЧИВОСТЬ И ДВУМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Кирпичев И.П.¹, Антонова Е.Е.^{2,1}

¹ *ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва, ikir@iki.rssi.ru*

² *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

Рассмотрен ход радиального распределения давления плазмы, магнитного поля и плазменного параметра в ночном секторе магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 7 до $12 R_E$, полученный с использованием измерений миссии THEMIS. Проведен анализ результатов измерений на спутниках THEMIS-D и -A в феврале 2009 г., когда спутники находились вблизи экваториальной плоскости. Выделены интервалы времени, когда плазменное давление фактически не изменялось при изменении расстояния до Земли. Показано, что профили с плато давления могут устойчиво существовать в течение суток, разрушаются в период возмущения и восстанавливаются после разрушения. Обсуждается роль плато давления в формировании структуры магнитосферных токовых систем. В первом приближении получена двумерная картина распределения областей плато в плоскости геомагнитного экватора.

СПЕКТРЫ ФЛУКТУАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ MMS

Овчинников И.Л.^{1*}, Найко Д.Ю.^{1,2}, Антонова Е.Е.^{1,3}

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

³Институт Космических Исследований РАН

* ilya@psn.ru

Представлены результаты анализа характеристик спектров турбулентных флуктуаций электрического и магнитного полей в плазменном слое магнитосферы Земли с использованием находящихся в открытом доступе данных Magnetospheric Multiscale (MMS) mission. Используются данные измерений электрического поля приборами EDP с временным разрешением 32 c^{-1} и магнитного поля приборами FGM с временным разрешением 16 c^{-1} . Локализация спутников внутри плазменного слоя фиксировалась по концентрации и температуре ионов плазмы получаемым по данным приборов FPI/DIS. Проведен предварительный анализ формы спектров флуктуаций в частотном диапазоне от 10^{-3} Гц. Формы спектров аппроксимировались степенными зависимостями. Показано, что на частоте около 3 Гц, как правило, наблюдаются изломы спектров электрического поля. При этом, изменение наклона спектра зависит от уровня флуктуаций. При $E_{\{x,y,z\} \text{ rms}} < 0.15 \text{ мВ/м}$ наблюдается уменьшение абсолютной величины наклона спектра, а при $E_{\{x,y,z\} \text{ rms}} > 0.15 \text{ мВ/м}$ увеличение абсолютной величины наклона. Уменьшение абсолютной величины наклона регистрируется в 15% случаев, увеличение в 72% случаев.

Спектры флуктуаций магнитного поля также имеют излом на частоте ~ 3 Гц, однако показатели наклонов отличаются от показателей наклонов спектров электрического поля, излом выражен слабее. Наблюдается также корреляция изменения величины излома спектра с уровнем флуктуаций x - и y -компонент магнитного поля (но не его z -компоненты): абсолютная величина наклона спектра увеличивается при $B_{\{x,y\} \text{ rms}} < 0.25 \text{ нТ}$, и уменьшается при $B_{\{x,y\} \text{ rms}} > 0.25 \text{ нТ}$. Выделены события, при которых наблюдаются несовпадения наклонов спектров электрического и магнитного полей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00076.

ОТОБРАЖЕНИЯ КЛАССА КОЭНА ДАННЫХ МОНИТОРИНГА МАГНИТОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

Антонов Ю.В., Сухарева Н.А. Захаров В.И.

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

Нелинейные преобразования класса Коэна [1], применяемые для анализа широкополосных нестационарных сигналов, позволяют в ряде случаев достигать сверхразрешения в интерпретации динамического частотного спектра и соблюдения ряда принципиальных инвариантов в процессе обработки регистрируемых временных рядов. Например, известно и широко используется преобразование Вигнера-Вилли, относящееся к упомянутому классу, инвариантное к трансляциям сигнальной последовательности во временной и частотной областях, сохранению профиля маргинальных распределений, стабильности вторых центральных статистических моментов для частотных и временных распределений. Основная сложность интерпретации подобных отображений связана с динамической кросс интерференцией компонент сигнала [2, 3].

В представленной работе методы нелинейных отображений сигналов применены к анализу данных спутникового мониторинга. Основная задача такой постановки – определить число управляющих динамикой системы параметров и их проявления в наблюдаемых сигналах. Для тестового исследования создаваемой методики выбраны временные ряды геомагнитных индексов SYM-H, ASY-H, SYM-D, ASY-D, а также временные ряды для компонент вектора индукции магнитного поля, регистрируемые аппаратом WIND. Выборки данных относятся к 2001 году, представлены времячастотные карты в интервалах спокойного магнитного поля, суббурь и магнитных бурь. В качестве опорных отображений использованы спектрограммы и энергограммы исходных временных рядов. Специальное внимание уделяется обработке временных рядов с интервальными и локальными потерями элементов временного ряда, резкими изменениями уровня разрывов.

Для типичного сигнала, получаемого при регистрации компонент магнитного поля как средствами орбитальной группировки, так и наземными станциями, выделены следующие виды особенностей, – импульс конечной ширины и дельта-импульс, скачки амплитуды, фазы и частоты, скачки производной мгновенных значений указанных параметров. Рассмотрена структура времячастотных карт Пейджа и Маргинау-Хилла для сигналов с разрывами. Помимо задач времячастотного спектрального анализа представлен ряд результатов эмпирического определения кинетики сложности исследуемой физической системы на основе значения энтропии Реньи [4] вычисляемых 2D распределений динамической спектральной плотности.

Работа выполнена в рамках Государственного задания 115041410195 «Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве», а также по программе развития НОШ МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

[1] Boashash B. Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference. – Academic press, 2015.

[2] Jiang L. et al. Kernel Learning for High-Resolution Time-Frequency Distribution //arXiv preprint arXiv:2007.00322. – 2020.

[3] Arsenyan T. I. et al. Cohen class time-frequency mapping in the analysis of the non-stationary parameters of a wave gaussian beam at the atmospheric path output //24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – SPIE, 2018. – Т. 10833. – С. 575-586.

[4] Tsallis C., Borges E. P. Time evolution of nonadditive entropies: The logistic map //arXiv preprint arXiv:2211.03261. – 2022.

О РОЛИ РЕЗОНАНСНЫХ 3x-ВОЛНОВЫХ КАСКАДОВ И КВАЗИЦИФРОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В БЕСТОЛКНОВИТЕЛЬНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАГНИТОСФЕРОЙ

Савин С. П. ^{a*}, Ляхов В. В. ^b, Нецадим В.М. ^b, Зеленый Л. М. ^a, Nemecek Z. ^c, Safrankova J. ^c, Wang C. ^d, Климов С. И. ^a, Скальский С. А. ^a

^aИКИ РАН, 117997 Москва, РФ* (e-mail: ssavin@iki.rssi.ru)

^bDTO "Institute of Ionosphere", 050020, Almaty, Kazakhstan,

^cCharles University, 1636 Prague, Czech Republic

^dNational Space Science Center, NÀS, Beijing, China

Обнаружены плазменные резонансы в диапазоне 0.02-10 мГц и аномальный перенос наружу и внутрь магнитосферы и получены новые свидетельства взаимодействия ударной волны с магнитосферой посредством струй с большим динамическим давлением и импульсов вектора Пойнтинга, близких к дельта-функциям. Эти взаимодействия приводят к созданию глобальной резонансной системы с обратной связью, которая и модулирует передачу энергии из солнечного ветра внутрь магнитосферы. Продемонстрированы 3x-волновые нелинейные каскады с накачкой на резонансных частотах ударной волны и магнитопаузы, связанные с необычным уровнем би-когерентности, позволяют объяснить и поддержать предлагаемые новые – существенно нелинейные – механизмы взаимодействия плазменных потоков с препятствиями и нелинейной связи резонансов в различных средах. Мы демонстрируем, как резонансы магнитопаузы регистрируются сначала внутри магнитосферы и в ионосфере прежде, чем в магнитослое в 48% случаев тем, что волны распространяются быстрее внутрь, чем наружу магнитосферы. В остальных 52% случаев – это резонансы ударной волны, распространяющиеся в магнитослое от Солнца.

Мы опираемся на статью в «Письма в ЖЭТФ» и 3 статьи в «ЖЭТФ» и исследуем механизм взаимодействия бесстолкновительных плазменных потоков с магнитными барьерами, включая нагрев плазмы у внешней границы каспа.

ИССЛЕДОВАНИЯ СУБАВРОРАЛЬНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ И МЕТОДОМ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

В. Халипов¹, Д. Сайбек², Г. Котова¹, А. Степанов³, А. Леонович⁴

¹ ИКИ РАН, г. Москва, khalipov@iki.rssi.ru; ² NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA

³ ИКФИА СО РАН, г. Якутск; ⁴ ИСЗФ СО РАН

В самом начале 70-х годов метод регистрации наклонно-отраженных сигналов от ионосферы в коротко-волновом диапазоне стал развиваться в ИКФИА на станциях Якутск (L=3), Жиганск (L=4) и Тикси (L=5.6). В это же время проводились прямые (in situ) измерения тепловой и энергичной плазмы на спутниках ОРЕОЛ-1 – 3, осуществлялись измерения кольцевого тока на спутнике АМРТЕ/ССЕ, плазменные измерения на спутниках серии DMSP и на высокоапогейных спутниках. По имеющимся данным выявлены характерные особенности развития поляризованного джета (ПД).

1. По наземным ионозондовым измерениям на станции Якутск в течение нескольких лет установлено, что ПД в околополночном секторе возникает в области разрыва Харанга на взрывной фазе суббури. Это свидетельствует о том, что механизмом развития ПД является генератор напряжения в приэкваториальной области магнитосферы.
2. По измерениям на долготной цепочке станций Магадан (L=2.9, λ=158°), Якутск (L=3, λ=130°), Подкаменная Тунгуска (L=3, λ=90°) установлено, что источник, ответственный за формирование ПД перемещается с востока на запад со скоростью 3 часа MLT за час UT, что соответствует дрейфу ионов кольцевого тока с энергией 25 кэВ.
3. По ионозондовым наблюдениям обнаружен максимум регистрации ПД в 18 часов MLT, соответствующий максимуму регистрации «носовых» явлений энергичных ионов кольцевого тока.
4. По многочисленным сопоставлениям измерений энергичных ионов кольцевого тока на спутнике АМРТЕ/ССЕ с синхронной регистрацией ПД на сети ионосферных станций установлено, что ПД развивается на внутренней границе кольцевого тока.
5. По наблюдениям на спутниках DMSP обнаружено, что над полосой ПД формируется восходящий поток ионов со скоростью до 1 – 1.5 км/с. Синхронные измерения на спутниках ИНТЕРБОЛ-1 и МАГИОН-5 в плазмосфере на тех же L-оболочках показывают возрастание концентрации холодных ионов. Это и есть проявление ПД в плазмосфере.

На основе анализа данных измерений концентрации (N_e) и температуры (T_e) электронов прибором IZOPROB на спутнике ОРЕОЛ-3 за 2.5 года работы получено:

- a) Узкие - 2-3 градуса по широте - структуры повышенной T_e до 2500-3500 К располагаются в таком же узком и глубоком провале N_e . Они образуются при развитии суббури. Измерения со спутников DMSP показывают, что эти структуры наблюдаются в полосе ПД и примыкают с экваториальной стороны к диффузной авроральной зоне.
- b) Наземные интерферометрические измерения показывают, что в полосе ПД и сопутствующей красной дуги температура нейтральной атмосферы повышена до 1200-1400К относительно среднего уровня ~1000 К, который наблюдается в невозмущенные дни месяца.
- c) По измерениям на спутниках Ореол-3, ИНТЕРКОСМОС-25, NORSAT-1 во время импульсов магнитного поля солнечного ветра на фазе внезапного начала магнитной бури (sc) регистрировались чрезвычайно высокие значения электронной температуры до 8000-10000К.
- d) По измерениям на спутнике DE-2 над красной дугой были обнаружены направленные вниз потоки электронов с энергией 1-9 эВ и скоростью 274 км/с, которая близка к альвеновской скорости. Ионов кольцевого тока не обнаружено по измерениям на спутнике DE-1 на высоте 1.5 R_E (R_E – радиус Земли). Именно такой сценарий и следует из разработанной В. Мазуром и А. Леоновичем последовательной теории кинетических альвеновских волн на L – оболочках ионосферного резонатора вблизи плазмопаузы.

ИЗЛУЧЕНИЕ КРАСНЫХ СПРАЙТОВ В ДИАПАЗОНЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Марчук Р.А., Потапов А.С., Мишин В.В.

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

В работе проводится анализ импульсных сигналов, синхронно возникающих в данных геомагнитных пульсаций, на широкой сети станций: Института Солнечно-Земной физики (станции Исток, Монды, Узур) и канадской сети CARISMA [1] (станция Ministik Lake).

Используя данные статей [2, 3], показано, что источником обнаруженных пульсаций являются красные спрайты, на примере зарегистрированных в Северном Китае (см рис. 1) и Южной Африке.

Применив метод Short Time Average over Long Time Average (STA/LTA) для данных станций Исток и Монды, было выделено свыше 400 тыс. случаев возникновения синхронных импульсных возмущений. По полученным результатам был проведен морфологический анализ. Также с помощью wavelet анализа было определено, что частотные максимумы обнаруженных импульсов находятся в районе гармоник Шумановского резонанса (8 Гц, 14 Гц, 20 Гц и т.д.), что может говорить о взаимосвязи Шумановского резонатора и импульсов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00280.

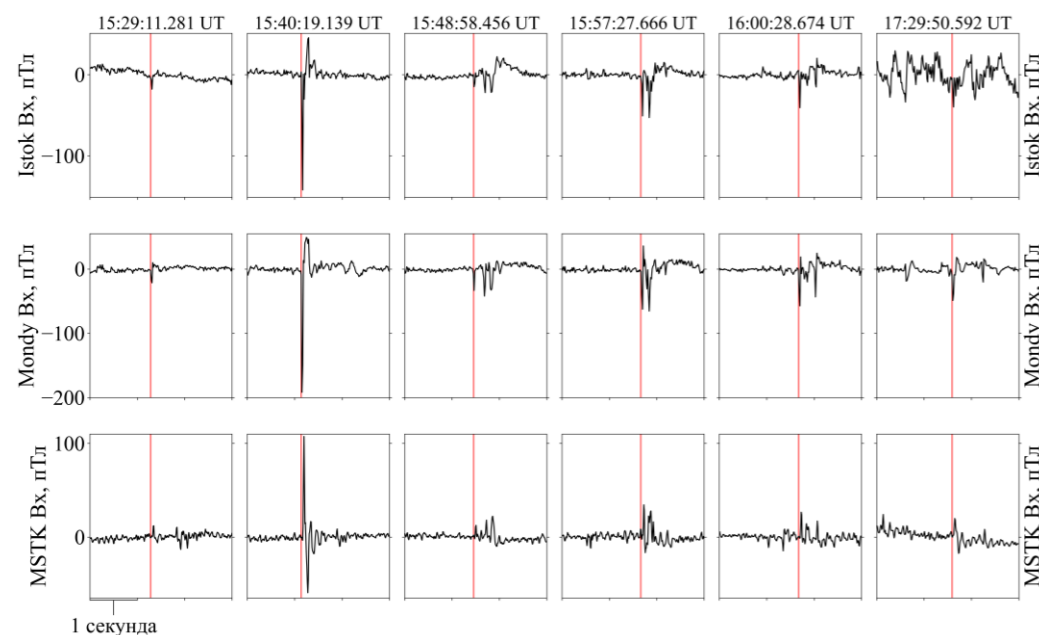


Рис. 1. Импульсные возмущения в данных геомагнитных пульсаций, возникающие на станциях Исток, Монды и MSTK вслед за образованием спрайтов (вертикальные красные линии) по наблюдениям в Северном Китае

1. Mann I. R., Milling D.K., Rae I.J., Ozeke L.G., Kale A., Kale Z.C., et al. The upgraded CARISMA magnetometer array in the THEMIS era, Space Sci. Rev. 2008. Vol.141, pp. 413–451. DOI: 10.1007/s11214-008-9457-6.
2. Wang Y., Lu G., Ming M., Zhang H., Fan Y., Liu G., et al. Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China, Earth and Planetary Physics. 2019. Vol. 3, pp. 111–125. DOI: 10.26464/epp2019015.
3. Mashao, D.C., Kosch, M.J., Füllekrug, M., Mlynarczyk, J., Lightning parameters of sprites and diameter of halos over South Africa, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics (2022). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105957>.

СРАВНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНТЕНСИВНОЙ СУББУРИ И СУПЕРСУББУРИ ПО АНАЛИЗУ ОТДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Дэспирак И.В., Громов С.В., Любич А.А., Малышева Л.М.

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

Пространственное развитие интенсивной суббури ($SML \sim -1300$ нТл) 20 апреля 2020 г. исследовалось в сравнении с развитием суперсуббури 28 мая 2011 г. ($SML \sim -2600$ нТл). Оба события наблюдались примерно в одном и том же долготном секторе и развивались на фоне магнитных бурь, во время которых условия в ММП были близкими (Bz от -12 до -15 нТл, $V \sim 380$ (20.04.2020) и ~ 500 км/с (28.05.2011), $P_{sw} \sim 2-4$ нПа). По картам распределения векторов магнитного поля и продольных токов, построенных на основе магнитных наблюдениях спутников на высотах ~ 780 км (проект AMPERE), показано, что общее долготное распределение ионосферных токов в обоих событиях было схожим. Наблюдалось усиление интенсивности восточного электроджета и его пространственное расширение. Но в отличие от суббури во время суперсуббури интенсификация как восточного, так и западного, электроджетов была более значительной и отмечалась до более низких широт. Кроме того, суперсуббуря сопровождалась появлением очень интенсивных продольных токов в околополуденном секторе, при этом в предполуденном секторе наблюдался четко выраженный разрыв Харанга и сложная картина магнитных возмущений в приполярных широтах. Карты ионосферной конвекции показывают, что во время суббури усилилась интенсивность вечернего (отрицательного) вихря конвекции, а во время суперсуббури – утреннего (положительного). Сравнение глобального крупномасштабного пространственного распределения возмущений во время интенсивной суббури и суперсуббури показывает сходство их общих характеристик, однако возмущения во время суперсуббури были интенсивнее и наблюдались до более низких широт. Можно предположить, что это связано со значительным усилением продольных токов, причина которого требует дополнительного глубокого исследования.

ПОЛЯРНЫЕ СУББУРИ НАД ШПИЦБЕРГЕНОМ: АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Любич А.А.¹, Дэспирак И.В.¹, Клейменова Н.Г.², Громова Л.И.³, Малышева Л.М.², Ролдугин А.В.¹

¹ПГИ, г. Анатиты, Россия, lubchich@pgia.ru

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

На основе наземных данных сетей магнитометров SuperMAG и IMAGE, данных индукционного магнитометра и камеры всего неба в обсерватории Баренцбург, а также данных системы спутников проекта AMPERE выполнен пространственно-временной анализ развития нескольких полярных суббурь, наблюдавшихся над Шпицбергом в зимние сезоны 2010-2012 гг. Мы сравнили полярные суббури, наблюдавшиеся на широтах выше 70° геомагнитной широты, с магнитными данными субавроральных станций IMAGE, расположенных на том же меридиане. Установлено, что большинство рассматриваемых полярных суббурь сопровождалось хорошо выраженными среднеширотными положительными магнитными бухтами с амплитудами ~15-40 нТл в X-компоненте геомагнитного поля. Эти положительные магнитные бухты обычно интерпретируются как свидетельство развития токового клина суббури (Substorm current wedge- SCW). Таким образом, это позволяет сделать вывод о расположении источника полярных суббурь на замкнутых силовых линиях магнитного поля.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХОЛЛОВСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗЛЁТЕ КВАЗИ-СФЕРИЧЕСКОГО ОБЛАКА ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Ефимов М.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Трушин П.А., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov2013@yandex.ru

На установке КИ-1 [1] ИЛФ СО РАН в 2021 году было впервые создано симметричное, сферическое облако лазерной плазмы с помощью облучения шарообразной полиэтиленовой мишени четырьмя лазерными лучами для моделирования околоземных плазменных выбросов [2]. Масштабы сферического плазменного облака >10 см впервые позволили экспериментально проверить выдвинутую ранее гипотезу о генерации в расширяющемся облаке плазмы азимутальных полей за счет Холловского члена в уравнении магнитной индукции, и переноса основного магнитного поля соответствующими Холловскими токами.

Ранее, в работе, выполненной на установке LAPD [3], уже демонстрировались измерения магнитной компоненты, соответствующей Холловской, но анализа ее роли сделано не было.

В результате эксперимента, проведенного на КИ-1, были получены данные, свидетельствующие о формировании азимутальных магнитных полей на фазе схлапывания диамагнитной каверны. Также было построено пространственное распределение азимутальных полей во внешних магнитных полях противоположного направления. Это позволило определить, что Холловские поля образуются в масштабах, не превышающих масштабы диамагнитной каверны, и имеют квадрупольную структуру относительно мишени.

Как и предполагалось, Холловские поля имеют противоположные направления относительно экваториальной плоскости ХУ. Инвертирование внешнего магнитного поля продемонстрировало, что на фазе коллапса каверны азимутальное поле создается именно Холловским полем, направление которого не зависит от направления внешнего поля.

Таким образом, проведенный эксперимент позволил измерить Холловские поля и задать вектор дальнейших лабораторных исследований. Последующая работа будет направлена на изучение влияния плотности ионов лазерной плазмы на образование азимутальных полей в экспериментальном эксперименте с помощью облучения мишеней разного диаметра.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0243-2021-0003, при поддержке программы 10 «Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика» Национального Центра Физики и Математики, а также проекта РФФИ № 23-22-00386.

1. Yu.P. Zakharov, A.M. Orishich, A.G. Ponomarenko, Inst. of Pure and Appl // *Mechanics, Novosibirsk*, (1988).

2. Y.P. Zakharov, V.A. Terekhin, I.F. Shaikhislamov, V.G. Posukh, P.A. Trushin, A.A. Chibranov, A.G. Berezutskii, M.S. Rumenskikh, M.A. Efimov, *Quantum Electronics*, **52**, №2, p.155, (2022).

3. A. Collette, W. Gekelman, *Physical review letters*, **105**, №19, p.195003, (2010).

МАГНИТНЫЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ СУББУРИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ТИКСИ В ПЕРИОД МИНИМАЛЬНОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Макаров Г.А. Баишев Д.Г.

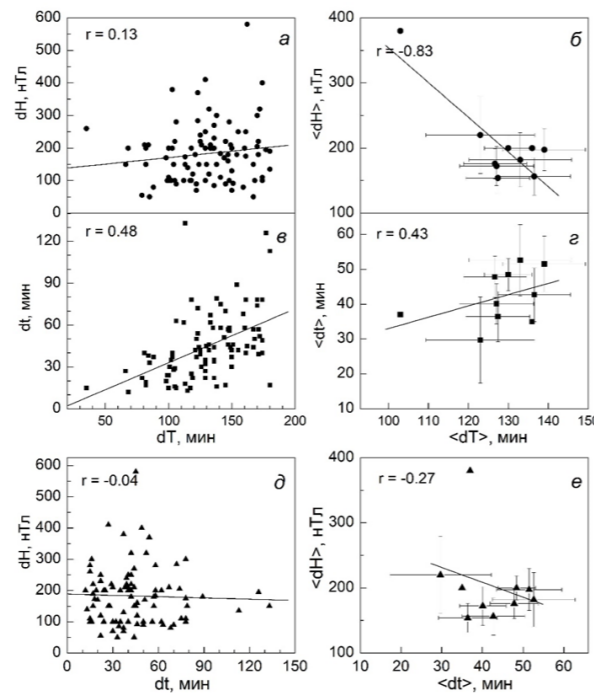
ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru

По данным о горизонтальной составляющей геомагнитного поля H в Тикси составлен Каталог изолированных суббурь в период слабой и минимальной солнечной активности в 2016-2020 гг. В него включено 91 событие. Регистрация магнитных вариаций осуществлялась посредством феррозондового магнитометра MAGDAS-9.

В этот период изменения числа изолированных суббурь в Тикси и числа солнечных пятен хорошо аппроксимируются квадратичными функциями с минимумами в конце 2017 г. и в середине 2019 г. соответственно. В течение года появление изолированных суббурь преобладает в периоды солнцестояний. В суточном ходе изолированные суббури чаще возникают в полуночные часы по местному времени. Амплитуда понижения dH в течение изолированных суббурь, длительность таких суббурь dT , длительность главной фазы суббурь dt не проявляют заметной зависимости от времени появления рассматриваемых суббурь, однако по данным о средних в часовых диапазонах значениях параметров суббурь обнаружено, что в полуночном секторе по сравнению с утренним сектором амплитуда понижения H -составляющей магнитного поля больше, а длительность суббурь и длительность главной фазы суббурь меньше. Кроме того, по осредненным данным выявлены следующие закономерности (см. рисунок): а) чем короче длительность изолированных суббурь, тем больше амплитуда понижения H -составляющей магнитного поля; б) длительность главной фазы суббурь прямо пропорциональна длительности изолированной суббури.

Анализ ситуации в солнечном ветре показал, что, как и следовало ожидать, межпланетными условиями возникновения изолированных суббурь были резкий поворот межпланетного магнитного поля на юг, повышение скорости солнечного ветра, резкая смена направления азимутального межпланетного электрического поля с отрицательного на положительное. Временной интервал между началом изменений межпланетных параметров и началом в среднем составляет ~ 65 мин.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1).



Зависимости амплитуды понижения горизонтальной составляющей магнитного поля dH (а) и длительности главной фазы суббурь dt (с) от длительности суббурь dT , dH от dt (е), а также связи между средними в часовых диапазонах значениями этих параметров суббурь: $\langle dH \rangle$ от $\langle dT \rangle$ (б), $\langle dt \rangle$ от $\langle dT \rangle$ (д) и $\langle dH \rangle$ от $\langle dt \rangle$ (ф); показаны среднеквадратичные отклонения средних; r – коэффициенты корреляции между данными и их линейными аппроксимациями

СУПЕРСУББУРИ В НЕБУРЕВЫХ УСЛОВИЯХ: АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Дэспирак И.В.¹, Клейменова Н.Г.², Любич А.А.¹, Громова Л.И.³, Сецко П.В.¹

¹ ПГИ, г. Анапты, Россия, despirak@gmail.com

² ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³ ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

На основе данных глобальных сетей магнитометров (SuperMAG, IMAGE) и системы спутников связи AMPERE проанализировано несколько случаев наблюдения суперсуббурь (supersubstorms-SSS) ($SML < -2000$ нТл) в условиях отсутствия магнитной бури. Отметим, что ранее предполагалось, что суперсуббури, в основном, должны быть связаны с магнитными бурями. С помощью карт векторов магнитного поля, полученных на сети SuperMAG, и карт сферического гармонического анализа распределения магнитных векторов в ионосфере и продольных токов, полученных по данным спутников системы AMPERE, показано, что ионосферные токи, как и для событий SSS во время магнитных бурь, развивались также в глобальном масштабе, и что некоторые особенности развития электроджетов характерны и для небуревых событий SSS. А именно - глобальное развитие западного электроджета от вечернего сектора до дневного. В вечернем секторе наблюдалось также сильное развитие восточного электроджета с максимумом ~ 18 MLT, что может быть связано с формированием дополнительного токового клина суббури в этой области, где было зарегистрировано появление интенсивного дополнительного вытекающего тока. Кроме того, развитие суперсуббурь сопровождалось появлением больших положительных бухт на средних геомагнитных широтах, что отразилось в импульсах МРВ-индекса.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 20-55-18003_Болг_а) и ННФБ (проект КП-06-Россия / 15).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИНДЕКСА АНИЗОТРОПИИ ПИТЧ-УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОНОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, smolinsv@inbox.ru

В последние годы внимание к исследованию анизотропии питч-углового распределения заряженных частиц значительно возросло. Поэтому для исследования динамики индекса анизотропии питч-углового распределения протонов используется двумерная феноменологическая модель кольцевого тока PheMRC 2-D (two-dimensional Phenomenological Model of the Ring Current) [1], которая включает радиальную и питч-угловую диффузии с учетом потерь вследствие взаимодействий волна-частица. Экспериментальные данные собраны на спутнике Polar/MICS во время магнитной бури 21-22 октября 1999 г. Решая нестационарное двумерное уравнение питч-угловой и радиальной диффузий, численно определялся индекс анизотропии питч-углового распределения протонов (или показатель питч-углового распределения протонов) для питч-угла 90 градусов во время магнитной бури, когда Кр-индекс геомагнитной активности изменялся от 2 в начале бури до 7+ в конце бури. Получена зависимость перпендикулярного индекса анизотропии питч-углового распределения протонов с энергией $E = 90$ кэВ в разные моменты времени от параметра МакИлвейна L ($2.26 < L < 6.6$). Определено на количественном уровне для магнитной бури 21-22 октября 1999 г., когда и где на ночной стороне магнитосферы Земли ($MLT = 23:00$) с увеличением Кр-индекса геомагнитной активности имеется переход от нормальных (блиноподобных) питч-угловых распределений протонов к бабочкоподобным питч-угловым распределениям. Что позволило определить однозначно и точно динамику перпендикулярного индекса анизотропии питч-углового распределения протонов в данном конкретном случае. Показано, что с увеличением Кр-индекса геомагнитной активности граница изотропного питч-углового распределения протонов приближается к Земле, достигая $L \approx 3.6$ при $Kp = 7+$.

1. Smolin S.V. Two-dimensional phenomenological model of ring current dynamics in the Earth's magnetosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. Vol. 59, no. 1, 27-34, 2019.
DOI: 10.1134/S0016793218040175

РОЛЬ МАГНИТОДИСКА ЮПИТЕРА В ПЕРЕНОСЕ ВРАЩЕНИЯ ОТ ПЛАНЕТЫ К МАГНИТОПАУЗЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ММП

Беленькая Е.С.

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) 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2. elena.belenkaya.msu@gmail.com

Рассматривается роль магнитодиска Юпитера в процессе передачи углового момента от планеты к магнитопаузе при разных ориентациях межпланетного магнитного поля (ММП). В зависимости от направления ММП меняется структура магнитного поля магнитосферы. При этом кардинально меняется геометрия областей открытых силовых линий, связывающих планету с межпланетным пространством. В частности, пучки открытых силовых линий могут пересекать или не пересекать магнитодиск в зависимости от направления магнитного поля солнечного ветра. В магнитодиске происходит эффективное торможение плазмы, что затрудняет перенос вращения на магнитопаузу в тех ее областях, которые пронизаны открытыми силовыми линиями, прошедшими через магнитодиск. Перенос вращения до магнитопаузы – необходимое условие работы механизма динамо на границе магнитосферы быстро вращающейся магнитной планеты [1].

Работа выполнена при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-949.

1. Belenkaya E.S. // *Fluids* 2022. V. 7. 60. <https://doi.org/10.3390/fluids7020060>

СЕКЦИЯ «Ионосфера»

Понедельник, 06.02. 2023 г., комната 202 (Line 2)_____

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
Председатель: <u>Лукьянова Р.Ю./Чугунин Д.В</u>			
1	09.00 – 09.15	Деминов М.Г., Деминова Г.Ф.	Зависимость локального индекса годовой асимметрии для NmF2 от местного времени
2	09.15 –09.30	Шубин В.Н., Абунин А.А., Крашенинников И.В.	Эффективность краткосрочного прогноза FOF2 и HMF2 на ст. Москва (ИЗМИРАН)
3	09.30 – 09.45	Васильев А.Е.	Новый алгоритм томографии ионосферы - Кассиопея. Первые результаты сравнения с ионозондами
4	09.45 – 10.00	Дмитриев А.В., Yu-Chi Chang, Chia-Hsien Lin, Mon-Chai Hsieh, Hao-Wei Hsu, Yu-Ciang Lin, Merlin M. Mendoza, Guan-Han Huang, Lung-Chih Tsai, Yung-Hui Li, Enkhtuya Tsogtbaatar	Современные возможности сверточных нейронных сетей по идентификации сигнала в ионосфере
5	10.00 – 10.15	Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г., Ясюкевич А.С., Черниговская М.А., Белюченко К.В.	Ионосферные эффекты геомагнитной бури в марте 2015 года с различными моментами начала
6	10.15 –10.30	Останин П.А.	Вариационная ассимиляция данных о полном электронном содержании для трёхмерной диффузионной модели ионосферы
	10.30 – 11.00	Перерыв на кофе	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Председатель: Чернышов А.А./Могилевский М.М..			
7	11.00 – 11.15	Поклад Ю.В., Ачкасов Н.С., Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ряховский И.А.	Перестройка системы токов в ионосфере при извержении вулкана HUNGA TONGA–HUNGA HA'APAI
8	11.15 –11.30	Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Ряховский И.А.	Распространение ионосферных и электромагнитных возмущений, вызванных извержение вулкана Тонга в 2022 г.
9	11.30 –11.45	Сорокин В.М., Яценко А.К.	Физический механизм воздействия сейсмических процессов на ионосферу
10	11.45 – 12.00	Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г.	Оценка ионизации нижней ионосферы во время солнечных вспышек X класса по данным ОНЧ наблюдений
11	12.00 – 12.15	Захаров В.И., Сигачев П.К.	Тропосферные возмущения тропических и внетропических циклонов и их проявления в ионосфере Земли.
12	12.15 –12.30	Козловский А.	Эффекты пульсирующей авроры в полярном мезосферном летнем эхе
	12.30 – 13.30	Пленарный час	
	12.30 – 12.45	Открытие конференции	
	12.45 – 13.30	Зеленый Л.М.	Токовые структуры в космической плазме. Путешествие внутрь «сингулярности»
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: Клименко М.В./Чугунин Д.В.			
13	14.30 – 14.45	Белаховский В.Б., Джин Я., Милош В., Будников П.А., Гомонов А.Д., Пильгаев С.В., Ролдугин А.В.	Влияние ионосферных возмущений на сцинтилляции GPS/ГЛОНАСС сигналов на авроральных широтах

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

14	14.45 – 15.00	Сурков В.В.	Ионосферный отклик на вертикальный акустический резонанс между поверхностью Земли и термосферой
15	15.00 – 15.15	Антоненко О.В., Кириллов А.С.	Исследование собственного излучения ночной атмосферы планет земной группы – полос Герцберга I
16	15.15 – 15.30	Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.	Свечение полос 5,3 мкм и 2,7 мкм окиси азота в средней атмосфере Земли во время события GLE 20.01.2005 г
17	15:30 – 15.45	Куприянов А.О., Петрукович А.А., Мёрзлый А.М., Никифоров О.В., Сахаров Я.А., Чернышов А.А., Янаков А.Т., Замогильный Д.	Излучение высокоширотных ионосферных сцинтилляций с применением мультисистемного спутникового оборудования
18	15.45 – 16.00	Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е., Жемяков И.Н.	Особенности развития и релаксации искусственных возмущений в межслоевой E-F впадине при работе стенда СУРА
	16.00 – 16.30	<i>Перерыв на кофе</i>	
Председатель: <u>Лукьянова Р.Ю/Чернышов А.А.</u>			
19	16.30 – 16.45	Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Борисова Т.Д., Егоров И.М., Загорский Г.А.	Явления в высокоширотной F-области ионосферы при воздействии мощными КВ радиоволнами на частотах выше критической частоты слоя F2
20	16.45 – 17.00	Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С.	Особенности возбуждения плазменных волн мощными КВ радиоволнами на частотах вблизи гирогармоник электронов и критической частоты слоя F2

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

21	17.00 – 17.15	Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М. Загорский Г.А.	Характеристики искусственного радиоизлучения ионосферы в зависимости от эффективной мощности излучения нагревного стенда EISCAT/Heating
22	17.15 – 17.30	Чернышов А.А., Козелов Б.В., Могилевский М.М.	Применение q-статистики к пульсирующим полярным сияниям
	17.45 – 18.30	Постерная сессия	

Постерная сессия

1. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Калинина Е.Е., Жемяков И.Н.

Спорадический слой E и искусственные периодические неоднородности в D-области ионосферы

2. Крашенинников И.В., Шубин В.Н.

Особенности проявления крупномасштабных авроральных неоднородностей в данных радиозондирования ионосферы (трансавроральная радиотрасса)

3. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В.

Распространение сигналов рсдн-20 в области высоких широт во время сре событий

4. Сысоев В.С., Кузнецов Ю.А., Наумова М.Ю., Орлов А.И., Сухаревский Д.И., Лепехин Н.М., Швец Н.Н., Басов Е.В.

Измерения радиоизлучения положительного стримерного разряда в лабораторных условиях

5. Петрова И.А., Гуцин М.Е., Зудин И.Ю., Стриковский А.В., Коробков С.В., Катков А.Н., Кочедыков В.В.

Анализ динамических свойств плазменной турбулентности, возбуждаемой импульсной высокочастотной накачкой в большом столбе лабораторной замагниченной плазмы

6. Куликов Ю.Н., Кириллов А.С.

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

Моделирование сумеречного и ночного излучения инфракрасной атмосферной и атмосферной систем полос молекулярного кислорода в верхней атмосфере земли

7. Кириллов А.С.

Исследование кинетики триплетных электронно-возбужденных состояний молекулярного азота в средней атмосфере титана

8. Полянская Е.А., Пилипенко В.А., Коркина Г.М., Соловьева М.С.

Мониторинг воздействия рентгеновских и гамма-вспышек на ионосферу с помощью системы СДВ радиопросвечивания на Камчатке

9. Павлов А.В., Павлова Н.М.

Влияние вариаций солнечной активности на изменчивость NmF2 средних широт в геомагнито-спокойных условиях над Москвой по данным наземного ионозонда.

10. Павлов А.В., Павлова Н.М.

Сравнение измеренной приборами спутника OGO-4 и вычисленной интенсивности ночного рассеянного излучения атмосферы в линии Лайман альфа.

11. Павлов А.В., Павлова Н.М.

Суточные вариации статистических характеристик изменчивости NmF2, измеренной ионозондом над Москвой в геомагнито-спокойных условиях при низкой солнечной активности.

12. Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загретдинов Р.В.

Исследование влияния солнечных вспышек на региональную возмущенность ионосферы земли по данным сети ГНСС-станций, расположенных в европейской части РФ

13. Когогин Д.А., Соколов А.В.

Результаты эксплуатации прототипа гнсс приемника на базе отладочной платы SIMPLERTK2B с модулем U-BLOX ZED-F9P

14. Потапов А.С., Гульельми А.В., Клайн Б.И.

К вопросу о спектре унч колебаний ионосферы в диапазоне Pc1

15. Морозова Т.И., Попель С.И.

Модуляционная неустойчивость ленгмюровских волн в пылевой плазме хвостов метеороидов

16. Морозова Т.И., Попель С.И.

Нижнегибридные волны в хвостах метеороидов

17. Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

Отклик ионосферы двух полушарий на возмущение 25-26 августа 2018

18. Высикайло Ф.И.

Точки, линии и 4D структуры кумуляции и либрации высикайло-лагранжа-эйлера в ионосфере земли

19. Когогин Д. А., Емельянов В. В., Максимов Д. С., Насыров И. А., Белецкий А. Б., Шиндин А. В., Грач С. М., Загретдинов Р. В.

Результаты современного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и двумерных карта вариации полного электронного содержания в период работы УНУ Стенд СУРА в 2021-2022 гг..

Среда, 08.02. 2023 г., комната 202 (Line2)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
Председатель: <u>Чугунин Д.В./Лукьянова Р.Ю.</u>			
1	09.00 – 09.15	Красовский В.Л.	Ядра уравнения Больцмана для модели столкновений упругих сфер в задачах физической кинетики
2	09.15 – 09.30	Шепелин А.В., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф.	Моделирование кинетики электронных столкновений в атмосферах экзопланет

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

3	09.30 – 09.45	Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В.	Определение эффективной частоты столкновения электронов в области E и D ионосферы высоких широт по данным анализа радиозатменных измерений
4	09.45 – 10.00	Синевиц А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Милох В.Я., Могилевский М.М.	Внутренняя структура поляризационного джета: Стратифицированный поляризационный джет
5	10.00 – 10.15	Степанов А.Е., Халипов В.Л., Кобякова С.Е., Данилов С.И	Квази-синхронные измерения поляризационного джета наземными и спутниковыми методами
6	10.15 – 10.30	Халипов В.Л.	Характеристики среднеширотных и субавроральных красных дуг свечения атмосферы
	10.30 – 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
Председатель: Белаховский В.Б./Чернышов А.А.			
7	11.00 – 11.15	Гущин М.Е., Вершинин И.М., Гойхман М.Б., Громов А.В., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Лоскутов К.Н., Палицин А.В., Стриковский А.В.	Лабораторное моделирование активных экспериментов в ионосфере и верхней атмосфере Земли на крупномасштабном стенде "КРОТ" с использованием источников мощного импульсного ВЧ и СВЧ излучения: результаты 2021 и 2022 года
8	11.15 – 11.30	Вершинин И.М., Гойхман М.Б., Громов А.В., Гущин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Лоскутов К.Н., Николенко А.С., Палицин А.В., Стриковский А.В.	Лабораторное моделирование эффектов при распространении мощных сверхкоротких электромагнитных импульсов в верхней атмосфере и ионосфере

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

9	11.30 – 11.45	Крашенинников И.В., Выборнов Ф.И., Шиндин А.В., Урядов В.П., Гущин М.Е., Бовин Л.Б., Вертоградов Г.Г., Колчев А.А., Зыков Е.Ю., Шумаев В.В., Чернов Г.А., Кириллов И.М., Дорошенко В.Ю.	Радиозондирование искусственно возмущенной области ионосферы с пространственно разнесенным приемом
10	11.45 – 12.00	Ященко А.К., Сорокин В.М., Новиков В.А.	Анализ распространения электромагнитного сигнала от излучающего диполя установки ЭРГУ-600
11	12.00 – 12.15	Лукьянова Р.Ю.	Влияние продольных токов на Ионосферные неоднородности: сопряженные наблюдения низкоорбитальных полярных спутников Swarm и радара EISCAT ESR
	12.30 – 13.30	Пленарный час	
	12.30 – 13.00	Измоденов В.	
	13.00 – 13.30	Козелов Б.В.	Диагностика свойств ионосферы с помощью оптических измерений в арктическом регионе
	13.30 – 14.30	Обед	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ЗАВИСИМОСТЬ ЛОКАЛЬНОГО ИНДЕКСА ГОДОВОЙ АСИММЕТРИИ ДЛЯ $NmF2$ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ

Деминов М.Г., Деминова Г.Ф.

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

Годовая асимметрия (годовая аномалия) – это ионосферные явления, в которых глобально усредненная концентрация электронов в январе больше, чем в июле. Она обусловлена эллиптичностью орбиты Земли относительно Солнца: в начале января Земля максимально приближена к Солнцу. Тем не менее, далеко не все закономерности годовой асимметрии надежно установлены и тем более поняты. Один из способов исследования локальных свойств годовой асимметрии основан на анализе данных пар ионосферных станций в сопряженных областях Северного и Южного полушарий. Анализ одной пары таких станций дает знания о локальных свойствах годовой асимметрии, например, на средних широтах.

На основе данных медиан концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ пары ионосферных станций Боулдер–Хобарт за 1963–2013 гг. проведен анализ зависимости локального индекса годовой асимметрии R от местного времени и солнечной активности, где индекс R – отношение январь/июль суммарной концентрации $NmF2$ (для этой пары станций) в фиксированное местное время. В качестве индикатора солнечной активности для медианы $NmF2$ использован индекс F – среднее за 81 день значение потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, которое центрировано на середину данного месяца. Получено, что в зависимости индекса R от местного времени LT преобладает полусуточная мода с максимумами вблизи полудня и полуночи и минимумами утром и вечером. Самые низкие значения $R = 1$ наблюдаются при низкой солнечной активности в узком интервале местного времени: 19.0–19.5 LT . Годовая асимметрия в медиане $NmF2$ существует ($R > 1$) для всех остальных часов местного времени при любом уровне солнечной активности. Высокие значения индекса R в полдень и полночь, в основном, обусловлены относительно высокими значениями $NmF2$ в январе в Северном полушарии (местной зимой, Боулдер) в полдень и в Южном полушарии (местным летом, Хобарт) в полночь.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-72-10023.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА f_oF2 И $hmF2$ НА СТ. МОСКВА (ИЗМИРАН)

Шубин В.Н., Абунин А.А., Крашенинников И.В.

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

Использование в качестве входных параметров модели GDMF2 [1] интегральных индексов солнечной и геомагнитной активности, которые учитывают предысторию их изменения, позволяют осуществлять краткосрочный прогноз электронной концентрации и высоту максимума $F2$ -слоя ионосферы. При этом продолжительность прогноза критической частоты (f_oF2) и высоты максимума ($hmF2$) $F2$ -слоя ионосферы определяется прогнозом солнечных и геомагнитных индексов.

В данной работе представлены результаты краткосрочного (1–3 дня) прогноза f_oF2 и $hmF2$, а также его сравнения с данными f_oF2 и $hmF2$ ионосферной станции Москва (ИЗМИРАН).

1. Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты $F2$ -слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019. DOI: 10.1134/S0016794019040151.

НОВЫЙ АЛГОРИТМ ТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ - КАССИОПЕЯ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ С ИОНОЗОНДАМИ

Васильев А.Е.

ФГБУ «ИПП», г. Москва, Россия, a.vasilev@space-weather.ru

С 2008 года в России была развёрнута сеть высокоорбитальной радиотомографии ионосферы, в составе которой помимо измерительной аппаратуры был запущен сервер обработки с алгоритмом томографии, разработанным МГУ. К настоящему времени алгоритм технически устарел, языки программирования развились на новый уровень, стали широко применяться протоколы реального времени.

Проанализировано решение проблемы аппаратных задержек DCB (Differential Code Biases) методом, принятым в мировой практике по открытым публикациям [1], выделены методические недостатки зарубежного алгоритма.

В рамках инициативной разработки ФГБУ «ИПП» создано новое программное обеспечение - «Кассиопея», свободное от лишних научных предположений и ограничений. «Кассиопея» запускалась на модельном распределении, а также на реальных данных российской и международной сетей. Алгоритм прошёл первые проверки путём сравнения данных с моделью ионосферы SIMP-2 (ФГБУ «ИПП»), дополненной оперативными данными ионозондов российской и международной сетей.

Результаты проверки показали, что «Кассиопея» может быть использована для получения ТЕС/ПЭС и DCB с высокой оперативностью и точностью. Детальность результатов позволяет видеть эффект двойного дневного максимума (Double Diurnal Maxima, DDM) [2] по спутникам ГЛОНАСС/GPS, обнаруженный ранее по геостационарным спутникам Beidou/COMPASS китайскими учёными в азиатском регионе согласно их открытой публикации. Точность и оперативность получения аппаратных поправок DCB «Кассиопеи» может превосходить открытые данные алгоритма мировой практики. «Кассиопея» позволяет импортозаместить зарубежные результаты DCB спутников аналогичными с высокой точностью, потребляя данные только сети приёмников ГНСС в России.

В дальнейшем предполагается усовершенствовать и развить новый алгоритм, провести больше видов сравнений и статистических оценок.

Работа выполнена без финансовой поддержки сторонних организаций.

1. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations // *Journal of Geodesy*. 2016. V. 90. Issue 3. P. 209-228.

2. Wang R., Chen P., Yao Y., An Z., Wang Z. Research on the ionospheric diurnal Double-Maxima patterns in Asia-Australian area based on the VTEC observations of BDS geostationary satellites // *Advances in Space Research*. 2022. V. 69, Issue 10. , P. 3705-3716.

СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ СИГНАЛА В ИОНОСФЕРЕ

Дмитриев А.В.^{1,2}, Yu-Chi Chang¹, Chia-Hsien Lin¹, Mon-Chai Hsieh¹, Hao-Wei Hsu¹, Yu-Ciang Lin¹, Merlin M. Mendoza¹, Guan-Han Huang¹, Lung-Chih Tsai¹, Yung-Hui Li¹ and Enkhtuya Tsogtbaatar¹

¹National Central University, Jhongli 32001, Taiwan, dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw

²НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Идентификация различных ионосферных слоев и сигналов обычно требует медленных и сложных ручных процедур. В этой работе мы создаем и обучаем пять моделей сверточной нейронной сети (CNN): DeepLab, полностью сверточная DenseNet24 (FC-DenseNet24), преобразование глубокого водораздела (DWT), Mask R-CNN и UNet сеть пространственного внимания (SA-UNet) для восстановления ионограмм [1-4]. Производительность моделей оценивается критерием пересечение версус объединение (IoU). Мы проанализировали вручную 6131 ионограмму, полученную с низкоширотного ионозонда на Тайване. Эти ионограммы загрязнены сильным квазистатическим шумом со средним отношением сигнал/шум (SNR), равным 1,4. Применяя пять моделей к этим зашумленным ионограммам, мы показываем, что модели могут восстанавливать полезные сигналы с $\text{IoU} > 0,6$. Самая высокая точность достигается сетью SA-UNet. Для сигналов с менее чем 15% выборок в наборе данных они могут быть восстановлены Mask R-CNN с невысокой точностью ($\text{IoU} > 0,2$). В дополнение к количеству выборок мы идентифицируем и исследуем влияние трех факторов на точность восстановления различных моделей: (1) SNR, (2) форма сигнала, (3) перекрытие сигналов. Наши результаты показывают, что FC-DenseNet24, DWT, Mask R-CNN и SA-UNet способны идентифицировать сигналы от очень зашумленных ионограмм ($\text{SNR} < 1,4$), перекрывающиеся сигналы могут быть хорошо идентифицированы DWT, Mask R-CNN и SA-UNet. Более вытянутые сигналы лучше идентифицируются всеми моделями.

1. Mendoza, M.M.; Chang, Y.-C.; Dmitriev, A.V.; Lin, C.-H.; Tsai, L.-C.; Li, Y.-H.; Hsieh, M.-C.; Hsu, H.-W.; Huang, G.-H.; Lin, Y.-C.; et al. (2021), Recovery of Ionospheric Signals Using Fully Convolutional DenseNet and Its Challenges. *Sensors* 2021, 21, 6482. <https://doi.org/10.3390/s21196482>
2. Chang, Y.-C., C.-H. Lin, A. V. Dmitriev, M.-C. Hsieh, H.-W. Hsu, Y.-C. Lin, M. M. Mendoza, G.-H. Huang, L.-C. Tsai, Y.-H. Li, and E. Tsogtbaatar (2022), State-of-the-Art Capability of Convolutional Neural Networks to Distinguish the Signal in the Ionosphere, *Sensors* 2022, 22(7), 2758; <https://doi.org/10.3390/s22072758>
3. Huang, G.-H., Dmitriev, A. V., Lin, C.-H., Chang, Y.-C., Hsieh, M.-C., Tsogtbaatar, E., et al. (2022). The development of Spatial Attention U-Net for the recovery of ionospheric measurements and extraction of ionospheric parameters. *Radio Science*, 57, e2022RS007471. <https://doi.org/10.1029/2022RS007471>
4. Hsieh, M.-C.; Huang, G.-H.; Dmitriev, A.V.; Lin, C.-H. (2022), Deep Learning Application for Classification of Ionospheric Height Profiles Measured by Radio Occultation Technique. *Remote Sens.* 2022, 14, 4521. <https://doi.org/10.3390/rs14184521>

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2015 ГОДА С РАЗЛИЧНЫМИ МОМЕНТАМИ НАЧАЛА

Клименко М.В. 1, Клименко В.В. 1, Ратовский К.Г. 2, Ясюкевич А.С. 2, Черниговская М.А. 2, Белюченко К.В. 3

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

2 ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

3 БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия

Интерпретация ионосферных возмущений в периоды геомагнитных бурь является наиболее важным и сложным вопросом современной физики ионосферы [1]. Для корректного решения этого вопроса необходимо использовать как доступный набор данных наблюдений параметров термосферы и ионосферы, так и результаты численных моделей верхней атмосферы Земли. В этом докладе мы представляем краткий обзор исследований, выполненных совместно в КФ ИЗМИРАН и ИСЗФ СО РАН, отклика верхней атмосферы на геомагнитную бурю в марте 2015 года [2-4]. Одним из интересных явлений выявленных нами 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. 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. Используя глобальную самосогласованную модель термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП), мы провели дополнительные расчеты геомагнитных бурь идентичной рассматриваемой, но со смещением по времени UT на 6, 12 и 18 часов. Были рассмотрены основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании ионосферных эффектов на разных фазах развития геомагнитной бури. Показано, что интенсивность и широтный охват ионосферных эффектов последствия зависят от долготы.

Численные расчеты и их анализ проводился при финансовой поддержке гранта РФФИ №21-17-00208. Анализ данных наблюдений осуществлен при финансовой поддержке гранта РФФИ №23-27-00213.

1. Данилов А.Д. // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5. С. 1–33.
2. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomono A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 78-92.
3. Klimenko M.V., Zakharenkova I.E., Klimenko V.V., Lukianova R.Y., Cherniak I.V. // Space Weather. 2019. V. 17. P. 1073–1089.
4. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Vasiliev R.V., Klimenko V.V., Podlesnyi A.V. // Adv. Space Res. 2021. V. 67. P. 122-132.

ВАРИАЦИОННАЯ АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ О ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ ДЛЯ ТРЁХМЕРНОЙ ДИФФУЗИОННОЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ

Останин П.А.

МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, ostanin.pavel@phystech.edu

Работа посвящена задаче восстановления поля электронной концентрации в разработанной в ИВМ РАН модели F слоя ионосферы Земли по данным наблюдений в виде интегралов от электронной концентрации вдоль набора прямолинейных траекторий.

Модель F слоя ионосферы построена на основных стандартных предположениях относительно этой области ([1]). В данной работе рассматривается упрощённая версия модели, не включающая трёхмерный перенос нейтральным ветром. Уравнение модели может быть решено по на различных долготах по отдельности, и поэтому оно рассматривается в тонком сферическом слое $\Omega = \{(z, \varphi) | z_b \leq z \leq z_t, -90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ\}$. Уравнение описывает процессы амбиполярной диффузии и плазмохимии и имеет вид

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \nabla(K \nabla(\cdot)) - \frac{\partial}{\partial z}(u \cdot (\cdot)) - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi}(v \cos \varphi \cdot (\cdot)) + k \right) n = P_0 + U, \\ n|_{z=0} = n_0, \left(K_1^2 \frac{\partial n}{\partial z} - K_1 K_2 \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial n}{\partial \varphi} - un \right) \Big|_{z=z_b, z=z_t} = 0, \end{cases}$$

где n – электронная концентрация, t – время, $K = \begin{pmatrix} K_1^2 & -K_1 K_2 \\ -K_1 K_2 & K_2^2 \end{pmatrix}$ – симметричная

матрица эффективных диффузионных коэффициентов, z, φ – высота и широта, P – функция фотоионизации, k – функция рекомбинации, U – управление, u и v – скорости вдоль координатных направлений, a – радиус Земли. В задаче ассимиляции данных требуется найти n и U , удовлетворяющие уравнению, а также условиям наблюдения: заданы интегралы от n по прямолинейным отрезкам, вообще говоря, не лежащим на одной долготе:

$$\int_{\Omega_k} n(z, \varphi, \lambda, t) d\Omega = Tec_k(t), k = \overline{1, N}.$$

Важная особенность задачи состоит в том, что диффузия идёт строго вдоль магнитных силовых линий: это обстоятельство может быть выражено интегральным соотношением

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{\phi, z} n^2 d\Omega = - \iint_{\phi, z} \left(K_1 \frac{\partial n}{\partial z} - K_2 \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial n}{\partial \varphi} \right)^2 d\Omega,$$

которым обладает уравнение в отсутствие правой части и при однородных краевых условиях. В работе [2] построены абсолютно устойчивые разностные схемы, на разностном уровне обладающие аналогом этого соотношения.

С помощью теории некорректных задач построен итерационный алгоритм для решения регуляризованной задачи. На каждом его шаге решается система прямых и сопряжённых уравнений, для аппроксимации которых используются предложенные в [2] разностные схемы. На основе тестовых экспериментов показано, что предложенный алгоритм позволяет достаточно точно восстановить возмущенное тестовое решение, если максимум возмущения коррелирует с максимумом электронной концентрации.

1. Кулямин Д. В., Останин П. А., Дымников В. П. Моделирование F слоя земной ионосферы. Решение уравнений амбиполярной диффузии // Матем. моделирование 2019 Т. 31 С. 57.

2. Ostanin P. A. On the approximation of the diffusion operator in the ionosphere model with conserving the direction of geomagnetic field // RJNAMM 2022 V. 37 P. 25.

ПЕРЕСТРОЙКА СИСТЕМЫ ТОКОВ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА HUNGA TONGA–HUNGA HA'APAI.

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

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

Извержение подводного вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай (20°34'12.00"Ю, 175°22'48.00"З) началось 20 декабря 2021 года. Наиболее сильный выброс наблюдался 15 января 2022 года в 04:14:45 UT. По-видимому, это было самым крупным извержением вулкана в этом столетии. Извержение вызвало цунами, гигантскую локальную молниевую активность и генерацию мощных атмосферных волн, зарегистрированных на всей планете. В различных источниках энергетика взрыва оценивается до 100 мегатон. Высота вулканического облака достигала 55 км.

Грозовые разряды являются основным источником накачки Шумановского резонатора (ШР). Их количество, энергетика и локализация влияют на его параметры, такие как амплитуда электромагнитного сигнала и резонансная частота. На записях амплитуд ШР зарегистрированных в ГФО «Михнево» присутствуют локальные максимумы, которые не коррелируют с грозовой активностью. Это может свидетельствовать о возникновении разрядов с большим токовым моментом. Известно, что разряды уходящие в ионосферу (типа эльфов и спрайтов) обладают большей энергетикой. В данном случае могли возникнуть разряды между вулканическим облаком, достигшим высот 40-55 км и ионосферой.

В обсерваториях Апия и Гонолулу были отмечены вариации магнитного поля, промодулированные частотой 3.8 мГц. Эта частота характерна для акустических колебаний Брента-Вайселя на высотах 110-120 км. Известно, что ионосферные токи могут модулироваться акустическими возмущениями за счет изменения проводимости среды. Можно предположить, что ионосферный ток, текущий над обсерваториями Апия и Гонолулу был промодулирован акустическими колебаниями на высоте 110-120 км над районом извержения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ТОНГА В 2022 Г.

Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Ряховский И.А.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, boris.gavrilov34@gmail.com

Извержение подводного вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 года сопровождалось сильнейшим выбросом в атмосферу продуктов вулканической деятельности, вызвавшим цунами, рекордную по количеству, частоте следования и энергии молниевую активность и генерацию глобальных атмосферных и ионосферных волн различного типа.

Генерация волн Лэмба и акустико-гравитационных волн (АГВ) должна была вызвать изменения электронной концентрации в нижней ионосфере, проводимости в области протекания ионосферных токов, изменение их величины и ориентации и соответствующие вариации геомагнитного поля на поверхности Земли. Появление столь мощного источника грозовой активности должно было также привести к существенным изменениям параметров Шумановского резонатора (ШР).

Для анализа геомагнитных возмущений, вызванных извержением вулкана Тонга, использовались данные сети Intermagnet и среднеширотной геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», в которой в непрерывном режиме ведется широкополосная регистрация вариаций электромагнитных полей.

Комплексный анализ полученных данных позволил выявить геомагнитные вариации, связанные с распространением разного типа атмосферно-ионосферных волн, вызванных извержением. Удалось выявить и идентифицировать возмущения геомагнитного поля, вызванные возбуждением ШР, распространением волны Лэмба и АГВ в диапазоне расстояний от нескольких сот до 15 тысяч км от источника.

Был обнаружен рост амплитуды сигналов на частотах основных мод ШР, коррелирующей с частотой и энергией молниевых разрядов, вызванных извержением.

Регистрация в одном измерительном пункте (ГФО «Михнево») возмущений ШР и вариаций геомагнитного поля, вызванных распространением глобальных ионосферных волн, позволила получить независимую информацию по скорости их распространения и времени генерации в источнике.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6.

Gavrilov, B. G., Poklad, Y. V., Ryakhovsky, I. A., Ermak, V. M., Achkasov, N. S., Kozakova, E. N. (2022). Global electromagnetic disturbances caused by the eruption of the Tonga volcano on 15 January 2022. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD037411. <https://doi.org/10.1029/2022JD037411>

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ИОНОСФЕРУ

Сорокин В.М., Яценко А.К.

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

Усиление сейсмической активности приводит к увеличению электрического поля, которое наблюдается в ионосфере над эпицентром землетрясения за несколько дней до главного толчка. Приведен обзор опубликованных спутниковых данных регистрации квазистатического электрического поля над районами подготовки землетрясения. В этом же районе могут формироваться флуктуации плотности плазмы, электромагнитные эмиссии КНЧ/УНЧ диапазонах, а также возмущение ионосферы, которое регистрируется в виде изменения полного электронного содержания (ПЭС). Наблюдения свидетельствуют о том, в возмущенном регионе возможен рост ПЭС, его уменьшение или совместно то и другое изменение. Численное моделирование показало, что наблюдаемые изменения ПЭС возможны в том случае, если электрическое поле в ионосфере достигает величины порядка $(1 \div 10) \text{ мВ / м}$ на стадии подготовки землетрясения. При этом, отсутствуют заметные изменения вертикальной компоненты электрического поля на поверхности Земли в сейсмическом регионе в течение времени формирования возмущения ПЭС в ионосфере. Такие изменения электрического поля в системе атмосфера – ионосфера возможны в результате возмущения электрического тока в глобальной цепи при инъекции 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. Возникновение ЭДС запускает механизм передачи сейсмической активности в ионосферу. Появление добавочного электрического поля E в ионосфере приводит к переносу плазмы в результате $E \times B$ дрейфа над зоной подготовки будущего землетрясения. Вызванный этим дополнительным полем дрейф плазмы должен (может) создавать как области пониженного ПЭС (вынос плазмы) так и повышенного ПЭС (накопление плазмы). Появление электрического поля в ионосфере приводит не только к дрейфу плазмы в F слое. Увеличение электрического тока в ионосфере сопровождается ее нагревом. Тепловой поток исходящий от проводящего E слоя достигает значений $q = (10^{-4} \div 10^{-3}) \text{ Вт/м}^2$. Поток тепла, возникающий в результате поглощения солнечного излучения составляет примерно $q = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$. Следовательно, тепло, выделенное электрическим током в ионосфере над зоной подготовки землетрясения, составляет значительную часть общего теплового баланса ионосферы. Увеличение потока тепла, выделившегося в E слое ионосферы приводит к нагреву F слоя и росту его температуры. Это увеличивает масштабы высотного распределения ионосферных компонент и, следовательно, высотного профиля слоя F2, что приводит к пространственному распределению возмущения ПЭС одного знака. Нагрев ионосферы при появлении в ней электрического поля величиной $E \sim 6 \text{ мВ/м}$ приводит к относительному изменению ПЭС на такую же величину, что и дрейф плазмы в этом поле. Суммарное пространственное распределение ПЭС возникает в результате действия этих двух факторов и его характер зависит от соотношения между ними. Проведенные расчеты показали, что увеличение концентрации аэрозолей у поверхности Земли в несколько раз приводит к относительному изменению ПЭС на десятки процентов. Для интерпретации ряда особенностей поведения ПЭС накануне землетрясения необходимо учитывать обе возможности формирования возмущения ПЭС, влияющие на его пространственное распределение.

ОЦЕНКА ИОНИЗАЦИИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X КЛАССА ПО ДАННЫМ ОНЧ НАБЛЮДЕНИЙ

Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г.

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

Исследование параметров электромагнитного излучения ОНЧ диапазона является эффективным инструментом для оценки состояния и динамики нижней ионосферы в спокойных и возмущенных условиях. Используемые в работе экспериментальные наблюдения на двухчастотной трассе GQD/GBZ – ГФО Михнево и модель Уайта-Фергюсона позволили оценить динамику $Ne(h,t)$ в нижней ионосфере во время двух солнечных вспышек X 2.2 и X 1.5, произошедших 10.06.2014 г. [1] Использование данных измерения потока рентгеновского излучения спутником GOES в спектральных диапазонах 0.05 – 0.4 нм и 0.1 – 0.8 нм позволило оценить яркостную температуру источника (в предположении абсолютно черного тела) и динамику потоков рентгеновского излучения в более жестких спектральных диапазонах для этих двух вспышек.

Было показано, что если длительность переднего фронта существенно меньше характерного времени рекомбинации в нижней ионосфере, динамика профиля электронной концентрации на фронте вспышки будет линейно зависеть от потока рентгеновского излучения. Комплексный анализ динамики $Ne(h,t)$, рассчитанной по модели Уайта - Фергюсона, и потоков рентгеновского излучения в различных диапазонах длин волн позволил оценить значения коэффициентов скоростей ионизации и определить спектральные диапазоны излучения, оказавшие наибольшее влияние на динамику электронной концентрации на различных высотах нижней ионосферы для вспышек X 2.2 и X 1.5 10.06.2014 г.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 22-77-00051

1. Gavrilov, B.G., Poklad, Y.V., Ryakhovsky, I.A., Ermak, V.M. Dependence of D-Region Perturbations of the Midlatitude Ionosphere on the Spectral Composition of the X-Ray Radiation of Solar Flares According to Experimental Data // Geomagnetism and Aeronomythis. V. 62 (1-2). P. 98–103. 2022.

ТРОПОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ И ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.

Захаров В. И.^{1,2,3} Сигачев П.К.^{1,3}

1 МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия, zvi_555@list.ru

2 Институт Физики Атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

3 Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Вопрос передачи энергии в системе геосфер (земля – океан – атмосфера) является, пожалуй, главным вопросом геофизики последних десятилетий, без решения которого невозможно моделирование процессов, необходимых для краткосрочного прогноза состояния погоды и долгосрочного анализа. Для изучения механизмов взаимодействий в системе геосфер используют крупные события в качестве маркеров, так, к естественным процессам-маркерам относятся циклоны.

Известны два класса циклонов – тропический и внетропический. Тропические циклоны (системы погоды низкого давления или циклоны с теплым ядром) возникают только над океанами при температуре поверхностного слоя воды свыше 27⁰С в области действия экваториальных ветров (пассатов, муссов). Тропический циклон имеет вид плоской спирали и представляет собой систему сильных ветров, дующих вокруг безветренного центра, называемого “глазом”, причем распределения практически одинаковых температур, давления, скорости ветра и характеристик облачности расположены вокруг его глаза концентрически. При приближении к глазу скорость ветра может достигать сотни м/сек. Механизмы образования тропического циклона принципиально отличаются от механизма внетропических циклонов, которые как правило возникают и развиваются в умеренных и полярных широтах, причем эти циклоны характеризуются термической асимметрией как причиной возникновения градиентов давления и движения воздушных масс. Как правило, внетропические циклоны имеют большие размеры и возникают почти на порядок чаще тропических, причем не только над водой, а скорости ветров в них меньше тропических в несколько раз. Движение воздушных масс и дополнительная их турбулизация из-за взаимодействия с рельефом могут приводить к возникновению акустико-гравитационных волн в обоих случаях.

Целью настоящих исследований является применение методик, развитых для поиска акустического отклика от циклона в ионосфере по данным зондовых измерений электронной концентрации спутниками системы SWARM в области Дальнего Востока для упрощения задачи (генерация структуры над океаном) на нескольких примерах крупных циклонов и антициклонов 2014-2020.г.г Рассмотрены проблемы выделения, акустических возмущений на ионосферных высотах, соответствующие возмущениям в озоновом слое (тропосфера). Обсуждается ряд методических вопросов - роль экваториальной аномалии для тропических циклонов, разные эффективности выделения откликов циклона и антициклона.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-00182) и НОШ МГУ «Фундаментальные и прикладные проблемы физики космоса». Использованное в работе ПО по анализу данных SWARM создано в рамках ГосЗадания МГУ им. М.В. Ломоносова по теме 01200408544.

1. Zakharov V.I., Pilipenko V.A., et al // Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 5. N. 2. P. 101-108, DOI: 10.12737/stp-52201914
2. Zakharov V. I., Sigachev P.K. //Adv.Space Res. 2022. V. 69. N 11. P.132-141. doi: 10.1016/j.asr.2021.09.025
3. Шалимов С. Л., Захаров В. И., М. С. Соловьева и др // Геомагнетизм и Аэронавигация, 2023, Т. 63, № 1, с. 1–11. doi 10.31857/S0016794022600442

ЭФФЕКТЫ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ АВРОРЫ В ПОЛЯРНОМ МЕЗОСФЕРНОМ ЛЕТНЕМ ЭХО

Козловский, А.

akozlovsky58@gmail.com

По данным метеорологического радара, работающего в авроральной зоне (67° с.ш.), обнаружен особый тип полярного мезосферного летнего эха (ПМЛЭ), мощность которого пульсирует на частоте порядка нескольких Гц. Такие эхо были классифицированы как пульсирующие ПМЛЭ [1]. Эти эхо наблюдались в конце июня – июле в утреннем секторе (4-12 MLT) во время геомагнитных бурь. Они получены из узкого диапазона высот около 82 км, что соответствует высоте серебристых облаков, где существуют частицы льда радиусом около 50 нм. Во время пульсирующих ПМЛЭ ионозонд показал плотность электронов порядка $3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ на высоте 82 км, а также повышенная ионизация D-области проявлялась в поглощении космического радиоизлучения. Мы предполагаем, что мощность ПМЛЭ модулируется всплесками высыпаний электронов, соответствующих внутренней модуляции пульсирующей авроры в несколько Гц. Во время короткого высыпания электронов с энергией 50-100 кэВ дополнительные электроны могут прилипать к частицам льда из-за присутствия гипертепловых электронов. Это приводит к увеличению мощности ПМЛЭ. После прекращения высыпания происходит деионизация ледяных частиц с характерным временем около 0,2 с за счет рекомбинации с ионами.

1. Kozlovsky, A., Shalimov, S., Lester, M., Belova, E. // JGR 2021. V. 126. P. e2020JA028855.

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СЦИНТИЛЛЯЦИИ GPS/ ГЛОНАСС СИГНАЛОВ НА АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

Белаховский В.Б.¹, Джин Я.², Милош В.², Будников П.А.³, Гомонов А.Д.¹,
Пильгаев С.В.¹, Ролдугин А.В.¹

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Университет Осло, Осло, Норвегия

³ – Quantectum, Швейцария

E-mail: belakhov@mail.ru

В работе [Belakhovsky et al, 2021] мы исследовали влияние полярных ионосферных возмущений на сцинтилляции GPS сигналов с использованием наблюдений на архипелаге Шпицберген. Было проведено сравнение воздействия высыпаний в области каспа, суббуриных высыпаний, “патчей” полярной шапки на сцинтилляции GPS сигналов. Архипелаг Шпицберген в различные моменты времени располагается в области каспа, в области аврорального овала, полярной шапки. В данной работе мы проводим аналогичный анализ для экваториальной части аврорального овала с использованием геофизических наблюдений в Скандинавии и на Кольском полуострове. Данные регионы актуальны для исследования космической погоды, поскольку они более населены, чем арх. Шпицберген. Используются данные GPS приемника NovAtel на станции Шиботн (Skibotn, Норвегия) и ГНСС приемника Septentrio PolaRx5 (под управлением ФГБУ "ИПГ"), размещенного на здании ПГИ в г. Апатиты. Были проанализированы данные наблюдений за 2018-2021 года. Для регистрации ионосферных возмущений использованы данные радаров VHF, UHF EISCAT в Тромсе. Оптические наблюдения полярных сияний в эмиссиях 557.7, 630.0 нм также использованы для регистрации различных ионосферных возмущений.

Проведено сравнение воздействия суббурь, SSC событий, дневных геомагнитных возмущений на сцинтилляции GPS/ГЛОНАСС сигналов. Анализ показывает, что в большинстве случаев заметный рост фазовых сцинтилляций ($\sigma_f > 1$) происходит во время ночных или вечерних суббурь, сопровождающихся отрицательными магнитными бурями. Но во время магнитных бурь положительные бурты в магнитном поле, вызванные усилением восточного электроджета, приводят к вполне сопоставимому росту фазовых сцинтилляций. Сильные фазовые сцинтилляции связаны с появлением дуг полярных сияний, ориентированных в восточно-западном направлении.

Сравнение фазовых GPS сцинтилляций по данным приемника на станции Skibotn с данными радара EISCAT показывает, что основной вклад в рост сцинтилляций вносят возмущения в E-слое ионосферы. Возмущения в F-слое ионосферы не вносят заметного вклада в фазовые сцинтилляции. Не обнаружено роста амплитудных GPS сцинтилляций во время рассмотренных событий.

- Vladimir B. Belakhovsky, Yaqi Jin, and Wojciech J. Miloch. Influence of different types of ionospheric disturbances on GPS signals at polar latitudes // Ann. Geophys., 39, 687–700, 2021. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-687-2021>.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018.

ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК НА ВЕРТИКАЛЬНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ И ТЕРМОСФЕРОЙ

Сурков В.В.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, surkovvdim@yandex.ru

При сильных землетрясениях и извержениях вулканов могут возникать низкочастотные акусто-гравитационные волны (АГВ). Проникновение АГВ из атмосферы в нижнюю ионосферу приводит к возмущениям ионосферной плазмы, генерации токов и геомагнитным возмущениям (ГМВ). Такие явления неоднократно наблюдались как с помощью глобальных навигационных спутниковых систем, так и во время наземных измерений [1]. В частности, после Суматрского землетрясения 2004 года, вулканического извержения Hunga Tonga-Hunga Ha'apai в 2022 г. и ряда других катастрофических явлений наблюдались геомагнитные пульсации с характерной частотой 3,5-3,7 мГц на расстояниях порядка 1000 км от эпицентра события. Предполагается, что один из возможных физических механизмов данного явления связан с влиянием на ионосферу вертикального акустического резонанса между поверхностью земли и термосферой, который возбуждается поднимающейся вверх АГВ, генерируемой смещениями земной поверхности [2].

В данной работе, разработана двумерная аналитическая модель ионосферного отклика на низкочастотный акустический резонанс между поверхностью земли и термосферой. Вначале в рамках плоско-слоистой модели атмосферы и ионосферы рассматривается распространение гармонической АГВ, вызываемой вибрациями поверхности земли. Высота отражающего атмосферного слоя подбирается таким образом, чтобы частота основной моды акустического резонанса была близка к частотам 3,5-3,7 мГц, наблюдаемым на эксперименте. Исследованы дисперсионное уравнение и горизонтальная групповая скорость волны при акустическом резонансе.

В этом частотном интервале атмосферу следует считать проводящей, поскольку ток проводимости больше тока смещения, уже начиная с высот около 10 км. Решение, описывающее распространение АГВ, используется в дальнейшем для расчёта токов и электромагнитных возмущений в атмосфере и E-слое ионосферы, который рассматривается в приближении тонкого слоя с наклонным геомагнитным полем.

Анализ решения задачи показывает, что в спектре электромагнитных полей содержится полюс или резкий максимум (при учёте поглощения энергии АГВ), на частоте, отвечающей акустическому резонансу. Для численных оценок использовались данные о наземных измерениях вариаций атмосферного давления во время акустического атмосферного резонанса, вызванного землетрясением Iwate-Miyagi Nairiku ($M = 7.2$), произошедшего в 2008 г. в Японии [Iyemori et al., 2013]. Расчёты, основанные на этих данных, показали, что спектральная амплитуда мощности ГМВ на земле составит порядка 2–12 нТл²/Гц в зависимости от горизонтального волнового числа АГВ, что согласуется с данными наземных измерений, полученных во время этого землетрясения. Из расчётов также следует, что при пересечении E-слоя ионосферы горизонтальный волновой вектор ГМВ постепенно поворачивается на 90°, причём спектральная амплитуда мощности ГМВ в ионосфере может быть на много порядков больше, чем на земле. Этот факт позволяет допустить, что ионосферные возмущения, вызванные АГВ, могут быть зафиксированы в магнитно-сопряжённой области ионосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 22-17-00125.

1. Шалимов С.Л. и др. // Физика Земли. 2019. № 1. С. 199-213.
2. Matsumura M. et al. // Data Sci. J. 2009. V. 8. P. S68-S77.
3. Iyemori T. et al. // Earth Planets Space. 2013. V. 65. P. 901-909.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ – ПОЛОС ГЕРЦБЕРГА I

Антоненко О.В., Кириллов А.С.

ПГИ, г. Анатиты, Россия, antonenko@pgia.ru

Исследования планет земной группы связаны с проблемами самого высокого научного приоритета, включая изменения условий обитания на нашей планете и происхождение жизни. Последние 15-20 лет особенно большое внимание уделяется исследованиям Марса. Важная роль летучих компонентов - особенно воды - и серьезные свидетельства об изменениях климата привлекают особое внимание исследователей.

Дистанционные исследования атмосферы, в частности спектроскопия, открывает широкие возможности для исследования. Высокое спектральное разрешение дает возможность даже с Земли наблюдать планетные линии на фоне земных за счет доплеровского смещения, позволяя измерять малые атмосферные составляющие планет и их изотопный состав. Однако, наземным наблюдениям присущи определенные ограничения: измерения в районе сильных земных полос поглощения ультрафиолета озоном невозможны, лишь в отдельных случаях можно получить широтный профиль, ориентируя щель спектрометра вдоль экватора планеты.

Поэтому, спектрометрические измерения с межпланетных космических аппаратов имеют большое значение для планетных исследований. Особое значение для исследования малых составляющих и изотопного состава атмосфер планет имеют измерения с космических аппаратов с высоким спектральным разрешением.

Для исследований атмосферы Земли приоритетом являются, несомненно, наземные наблюдения, т.к. космические наблюдения, которые проводятся со спутников, будут лишь плохо дополнять наблюдения со станций Земли. Наземные наблюдения могут быть дополнены космическими только экспериментами, работающими в режиме моментального снимка с использованием высокопроизводительного оборудования в течение ограниченного времени полета. Единственная космическая платформа, в настоящее время способная поддерживать такие эксперименты, это космический шаттл, или космическая транспортная система (STS). При том, что полет шаттла короткий, обычно всего 7-12 дней, скорость передачи данных высокая. Наблюдения также могут периодически повторяться при прохождении по орбите над многими наземными станциями.

В настоящей работе используются экспериментальные данные о характерных концентрациях O на основании характеристик свечения атомарного кислорода на Земле и на Марсе. В настоящей работе обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения возбужденного молекулярного кислорода с экспериментальными данными по ночному свечению молекулярного кислорода, полученными с космического шаттла.

Представлены рассчитанные сезонные высотные распределения объёмной интенсивности свечения молекулярного кислорода в полосах Герцберга I в диапазоне длин волн 255 – 365 нм в ночной атмосфере Земли в экваториальной области и на средних широтах (55.7° N), в ночной атмосфере Марса также в экваториальной области и на широтах (65°N, 82°N). Полученные значения объёмной интенсивности демонстрируют, что наибольшие сезонные вариации должны наблюдаться на Земле на высотах $\approx 87 - 97$ км, на Марсе - на высотах $\approx 55 - 65$ км. Также приведены результаты расчетов интегральной светимости, при этом при пересчете значений объёмной интенсивности излучения в значения интегральной светимости используется приближение оптически тонкого слоя. Показано, что на Марсе так же, как и на Земле, заметно усиление свечения в осенний период по сравнению с летним.

СВЕЧЕНИЕ ПОЛОС 5,3 МКМ И 2,7 МКМ ОКИСИ АЗОТА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ GLE 20.01.2005 Г.

Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.

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

Солнечные протоны играют важную роль в атмосфере Земли. Частицы обычно характеризуются мягкими энергетическими спектрами (энергии порядка нескольких сотен МэВ), но иногда наблюдаются релятивистские энергетические протоны. Они обнаруживаются наземными нейтронными мониторами, размещенными в полярных областях, как Ground Level Enhancements (GLE). Использование данных сети нейтронных мониторов позволяет определять спектры высокоэнергетических протонов, выбрасываемых в атмосферу Земли. Высыпания высокоэнергичных частиц вызывает увеличение нечетных азота NOx и нечетного водорода HOx на высотах высокоширотной атмосферы за счет каскада процессов диссоциации, ионизации и рекомбинации.

Рассмотрены механизмы образования колебательно-возбужденных молекул NO и N₂ на высотах средней атмосферы Земли при высыпании высокоэнергетических протонов. Расчеты сделаны для события GLE69 (20.01.2005). Основные результаты этих расчетов состоят в следующем.

1. Моделирование колебательных населенностей N₂(X¹Σ_g⁺, v=2-30) во время события GLE69 на высотах средней атмосферы показало вклад различных механизмов образования колебательно-возбужденных молекул азота N₂(X¹Σ_g⁺, v>0). Во-первых, возбуждение вторичными электронами является основным для всех колебательных уровней v=1-10 основного состояния молекулы. Во-вторых, получено, что внутримолекулярный процесс переноса электронной энергии в столкновениях N₂(A³Σ_u⁺, v=0-5)+N₂ доминирует при колебательном возбуждении высоких колебательных уровней v=20-30 основного состояния.
2. Исследование колебательных населенностей NO(X²Π, v=1-20) во время события GLE69 на высотах средней атмосферы показало, что химическая реакция метастабильного атомарного азота N(²D) с молекулярным кислородом O₂ является основным механизмом образования колебательно-возбужденных молекул окиси азота NO(X²Π, v>0) и излучения 5,3 мкм и 2,7 мкм инфракрасных полос NO на высотах потери энергии высыпавшихся протонов. Показано, что относительный вклад VV'-процесса может быть значительно увеличен и сравним с вкладом химического процесса в тех случаях, когда концентрации окиси азота [NO] возрастают до значений порядка концентраций молекулярного азота [N₂] в атмосферной смеси газов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018) «Потоки высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве, и их воздействие на атмосферу Арктики»

ИЗУЧЕНИЕ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ СЦИНЦИЛЯЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИСИСТЕМНОГО СПУТНИКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Куприянов А.О.¹, Петрукович А.А.², Мёрзлый А.М.^{2,3}, Никифоров О.В.², Сахаров Я.А.⁴, Чернышов А.А.², Янаков А.Т.² Замогильный Д.¹

¹ МИИГАИК, г. Москва, Россия, aoku28@gmail.com;

² ФГБУН Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия;

³ Совет РАН по космосу, г. Москва, Россия;

⁴ ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия.

Оперативный мониторинг параметров ионосферы и авроральных явлений в арктической зоне является на данный момент актуальной задачей. Это связано, в первую очередь, с влиянием полярной ионосферы на функционирование средств связи, навигации и радиолокации. Возникающие магнито-ионосферные возмущения в арктической зоне приводят к изменению условий распространения радиоволн различного диапазона. Повышение точностных характеристик радиотехнических средств различного назначения требует достоверного знания параметров среды распространения для разработки мер компенсации или уменьшения влияния возмущений полярной ионосферы.

В докладе рассматриваются проблемы и возможные решения создания, организации, обработки и анализа данных ионосферных станций для исследования полного электронного содержания и ионосферных сцинтилляций в том числе в арктической зоне. В частности, рассматриваются вопросы разработки методики оценки и прогноза геофизических параметров и разработки аппаратно-программного комплекса для транс ионосферного-магнитосферного зондирования, организации постоянно действующей станции мониторинга ионосферы на базе АПК ГНСС в МИИГАИК и ИКИ с общим сервером для взаимодействия со станцией на ЗФИ в том числе ежедневная оперативная оценка и прогноз параметров.

Кроме того, рассматриваются альтернативные и вспомогательные методы мониторинга и прогнозирования ионосферы в том числе с применением современных ионосферных моделей и машинного обучения.

Часть результатов основаны на совместной комплексной арктической экспедиции (КЭ «Арктика-21»). Этап проведен на острове Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа (далее - ЗФИ) на станции «Омега» Национального парка «Русская Арктика» (далее НПРА). Первый этап КЭ «Арктика-21» выполнялся в рамках комплексной экспедиции.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МЕЖСЛОЕВОЙ E-F ВПАДИНЕ ПРИ РАБОТЕ СТЕНДА СУРА

Бахметьева Н.В.¹, Григорьев Г.И.¹, Калинина Е.Е.¹, Жемяков И.Н.^{1,2}

¹ НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

² ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлены результаты исследований межслоевой E-F впадины (долины) в ионосфере Земли методом резонансного рассеяния пробных радиоволн искусственными периодическими неоднородностями (ИПН) ионосферной плазмы, создаваемыми при воздействии на ионосферу мощным высокочастотным радиоизлучением [1]. Формирование ИПН это одно из нагревных явлений, возникающих при искусственном воздействии на ионосферу. Межслоевая впадина представляет собой область высот, концентрация электронов в которой меньше концентрации в максимуме E-слоя, вследствие чего долина недоступна исследованию методом вертикального зондирования. Она может обеспечивать дальнее и сверхдальнее распространение КВ радиоволн в волноводном E-F канале [2]. Метод ИПН позволил измерить высотный профиль электронной концентрации в диапазоне высот 80–180 км, включающий межслоевую впадину [1], в результате чего в ней обнаружены дополнительные слои. Выяснилось, что долина представляет собой нестабильную область, что выражается в значительных вариациях ее ширины (интервала высот), глубины (электронной концентрации) и высот верхней и нижней границ. В 2021–2022 гг. проведены новые эксперименты на среднеширотном стенде СУРА (56,15N°; 46,11°E) по диагностике ионосферы методом ИПН. Передатчики стенда излучали в зенит мощную необыкновенную (обыкновенную) радиоволну частотой 4,3 МГц в квазинепрерывном режиме с эффективной мощностью 100–120 МВт и периодом 15 с, что позволило исследовать процессы в ионосфере как во время развития ИПН, так и при их релаксации по окончании нагрева [3]. В монографии [1] показано, что в F-слое ионосферы причиной образования неоднородностей является стрикционная сила, а в E-слое они создаются под действием избыточного давления электронной компоненты плазмы, нагретой в пучностях мощной стоячей волны. На основе анализа высотно-временных характеристик сигналов, рассеянных ИПН, получены новые данные о развитии искусственного возмущения ионосферы. Сигналы, рассеянные неоднородностями, регистрировались при воздействии на ионосферу радиоволнами обеих поляризаций. Во многих сеансах на стадии развития ИПН рассеянные сигналы занимали весь интервал высот от D-области до F-слоя. Выяснилось, что при развитии ИПН рассеянные сигналы в межслоевой впадине ослабевают в диапазоне высот 130–180 км, а на некоторой высоте иногда пропадают совсем в зависимости от состояния невозмущенной ионосферы и высотного профиля электронной концентрации. Можно полагать, что в этом диапазоне высот происходит смена механизма образования ИПН. По времени релаксации неоднородностей определены профили температуры нейтральной компоненты на высотах 90–130 км, исследованы их временные вариации, найдены параметры атмосферных волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 20-17-00050.

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. 156 с.

2. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн. – М. Наука. 1979. 246 с.

3. Н.В. Бахметьева, Е.Н. Сергеев, С.М. Грач, Г.Р. Виноградов // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, (Нижний Новгород, 12–27 мая 2022 г.) – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2022. С. 134.

ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ 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

Представлены результаты экспериментальных исследований явлений в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) поляризации на частотах нагрева f_H , существенно превышающих критическую частоту слоя F2 ($f_H - foF2 = 0.9-1.1$ МГц). Результаты базируются на данных экспериментов, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6°N, 19.2°E). В период экспериментов мощная КВ радиоволна О-поляризации излучалась на частотах 6.77 или 7.953 МГц в направлении магнитного зенита с максимальной эффективной мощностью излучения 350 - 550 МВт. В качестве диагностических средств использовались следующие: EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (931 МГц), пространственно совмещенный с КВ нагревным стендом в Тромсе; когерентный КВ радар CUTLASS в Ханкасалми (Финляндия); аппаратура для регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения, установленная вблизи г. С.-Петербург на удалении ~ 1200 км от нагревного стеда.

Впервые обнаружено, что при О-нагреве высокоширотной F-области ионосферы на частотах, превышающих foF2 на 0.9 – 1.1 МГц, происходит образование дактов повышенной электронной плотности N_e , генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) и узкополосного (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ). Детально исследованы характеристики и эволюция во времени дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ.

Выполнено сравнение характеристик дактов N_e , МИИН и спектральной структуры УИРИ при альтернативном О-/X- нагреве в магнитный зенит на частотах, существенно превышающих критическую частоту слоя F2. Установлено, что в целом их поведение имеет одинаковый характер, однако эволюция развития и интенсивности рассмотренных явлений отличаются при О- и X-нагреве. Обсуждаются возможные механизмы генерации явлений при О-нагреве на частотах, значительно превышающих foF2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17- 00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НА ЧАСТОТАХ ВБЛИЗИ ГИРОГАРМОНИК ЭЛЕКТРОНОВ И КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С.

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, 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 обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (X-мода) поляризации при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения, P_{eff} . Эксперименты выполнялись 20 октября 2012 г. на частоте накачки $f_H = 7953$ кГц, расположенной ниже критической частоты слоя F2 $f_H < foF2$, ($f_H/foF2 \sim 0.89 - 0.94$) и ниже частоты giroгармоник электронов $f_H \leq 6f_{ce}$ на 160 - 210 кГц и 26 февраля 2013 г., $f_H = 7100$ кГц – вблизи f_oF2 , $f_H \sim f_oF2$ ($f_H/foF2 \sim 1$), и выше частоты giroгармоник электронов $f_H > 5f_{ce}$ на 240 -340 кГц (f_{ce} - giroчастота электронов). Диагностика эффектов модификации ионосферы проводилась EISCAT радаром некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц, расположенным рядом с нагревным стендом. Луч радара был совмещен с направлением излучения мощной КВ радиоволны и ориентирован вдоль силовой линии магнитного поля Земли. Данные измерений радара НР продемонстрировали возбуждение спектральных максимумов HFIL в низкочастотном и – HFPL в высокочастотном спектральных диапазонах измерений в периоды нагревных циклов. Определены условия генерации и пороговые (минимальные) значения электрического поля волны накачки в ионосфере E_{ionPL} , необходимые для генерации HFPL, и E_{ionIL} для возбуждения HFIL в условиях $f_H \sim f_oF2$ и $f_H < f_oF2$ для О- и X- нагрева с учетом неотклоняющего поглощения на пути распространения волны накачки.

В экспериментах с использованием волны накачки X- мода регистрировался эффект возрастания плотности электронов N_e на сотни километров F области. Подобный эффект для О- нагрева наблюдался в условиях $f_H \sim f_oF2$ и $f_H > nf_{ce}$.

Возбуждение HFPL регистрировалось на высотах в ионосфере, где выполняется условие $f_H \approx f_{PL}$, f_{PL} - ленгмюровская частота ионосферы. Значение f_{PL} определяется температурой электронов и ионизацией ионосферы как фоновой, так и дополнительной, вызванной воздействием волны накачки в циклах О- или X- нагрева.

Непрерывное возбуждение HFPL в условиях $f_H \sim f_oF2$ и $f_H < f_oF2$ при О- нагреве наблюдалось при более низких значениях напряженности волны накачки $E_{ionPL} \sim 0.42 - 0.57$ В/м, чем теоретические значения порога возбуждения нерезонансным механизмом $E_{HPM} \sim 0.70 - 0.80$ В/м. При X- нагреве значения составили $E_{ionPL} \sim 0.13 - 0.34$ В/м. При О- нагреве только в условиях $f_H \sim f_oF2$ проявился эффект возбуждения спектральных максимумов S_{PL} на частотах, смещенных от f_H в сторону увеличения частоты на (200 – 400) кГц.

Отмечалось, характерное поведение высоты возбуждения HFPL, h_{PL} , при увеличении мощности излучения P_{eff} в цикле: для О- нагрева и условиях $f_H \sim f_oF2$ и $f_H \geq 5f_{ce}$ наблюдалось снижение h_{PL} на 15 км от первоначальной высоты регистрации; для X- нагрева, в циклах нагрева если $f_H < f_oF2$, регистрировался рост h_{PL} на ~10 км.

Усиленные нагревом HFIL наблюдались при более высоких значениях E_{ionIL} , чем E_{ionPL} , на высотах близких h_{PL} с точностью шага измерений радара НР (3км).

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭФФЕКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕВНОГО СТЕНДА EISCAT/HEATING

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М. Загорский Г.А.

АНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, askalishin@aari.ru

Экспериментальные работы на нагревных стендах EISCAT/Heating и HAARP продемонстрировали возможность генерации различных спектральных компонент узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в диапазоне частот порядка ± 1 кГц относительно частоты волны накачки.

На стенде HAARP узкополосные компоненты ИРИ наблюдались только в непосредственной близости от нагревного стенда и исключительно при О-нагреве [1]. Проведенные эксперименты на стенде EISCAT/Heating показали, что мощная КВ волна Х-поляризации способна возбуждать интенсивное узкополосное искусственное радиоизлучение, которое регистрируется на большом удалении от нагревного стенда (на расстоянии порядка 1200 км) [2].

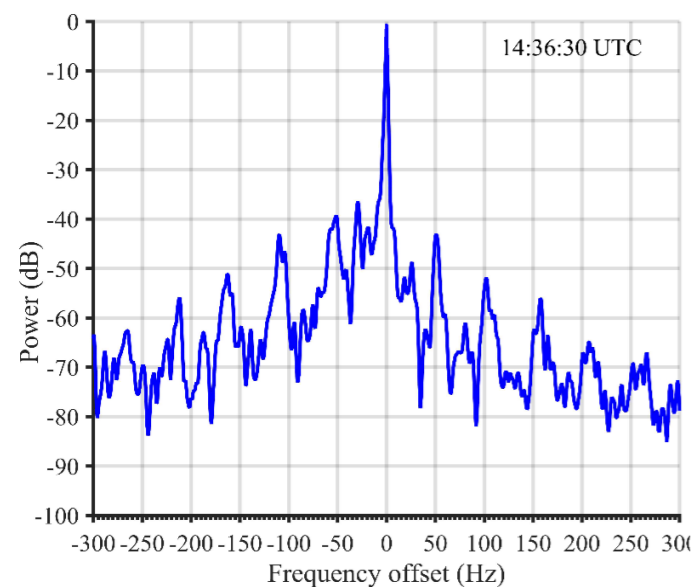


Рис. 1. Спектр УИРИ зарегистрированного 26 октября 2021г при излучении комплекса EISCAT/Heating на частоте 5,423 МГц в магнитный зенит. Эффективная мощность излучения 355 МВт, X-мода поляризации.

В работе рассмотрены пороговые мощности возбуждения УИРИ, возбуждаемого волной накачки необыкновенной (Х-мода) поляризации. Результаты были получены в сериях экспериментов на стенде EISCAT/Heating при частотах излучения 5,423 МГц, ниже критической частоты F2-области ионосферы. Волна накачки излучались вдоль магнитного поля с эффективной излучаемой мощностью от 55 до 360 МВт. Дискретные спектральные компоненты УИРИ регистрировались на научно-исследовательской станции под Санкт-Петербургом на расстоянии 1200 км от нагревательного комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-17-00020, <https://rscf.ru/project/22-17-00020/>

1. Bernhardt P. A., Selcher C. A., Lehmborg R. H., Rodriguez S. P., Thomason J. F., Groves K. M., et al. Stimulated Brillouin Scatter in a magnetized ionospheric plasma. – Physics Review Letters, 2010, 104, 165004; DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.165004.
2. 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.

ПРИМЕНЕНИЕ Q-СТАТИСТИКИ К ПУЛЬСИРУЮЩИМ ПОЛЯРНЫМ СИЯНИЯМ

Чернышов А.А.¹, Козелов Б.В.², Могилевский М.М.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, achernyshov@iki.rssi.ru

²ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия

Классическая экстенсивная термодинамика и статистика Больцмана-Гиббса представляет собой мощный инструмент, когда микроскопические взаимодействия и эффекты "памяти" незначительны, а среда представляет собой евклидово пространственно-временное, непрерывное и дифференцируемое множество. Однако зачастую мы имеем дело с системами, где происходят пространственные или временные взаимодействия и которые фактически развиваются в неевклидовом, например, (мульти)фрактальном пространственно-времени, что делает их поведение неэкстенсивным. Основные теоремы классической статистики Максвелла-Больцмана допускают обобщения в рамках неэкстенсивной статистики (иногда называемой в виде q-статистики или статистики Тцаллиса, где параметр q характеризует степень неэкстенсивности системы). В данной работе впервые применяется q-экспоненциальное распределение для пульсирующих полярных сияний. Проведено сопоставление и динамика параметра q с коэффициентом пологости (эксцесс), а также со спектральным индексом, характеризующий пространственные неоднородности аврорального свечения. Показано, что полярные сияния проявляют свойства неэкстенсивности и q-статистика может быть использована для анализа явлений в высокоширотной ионосфере. Работа ААЧ поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис».

СПОРАДИЧЕСКИЙ СЛОЙ E И ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Бахметьева Н.В.¹, Григорьев Г.И.¹, Калинина Е.Е.¹, Жемяков И.Н.^{1,2}

¹НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе приведены результаты экспериментально-теоретических исследований явлений, связанных с существованием в E-области ионосферы слоя повышенной ионизации – спорадического слоя E (E_s). Исследования основаны на диагностике нижней ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы (ИПН), создаваемых в поле стоячей волны, образующейся при отражении от ионосферы мощного высокочастотного радиоизлучения [1]. Эксперименты выполнены в 2007–2022 гг. на среднеширотном нагревном стенде СУРА (56.1°N, 46.11°E). Использование метода резонансного рассеяния пробных радиоволн на ИПН позволяет обнаруживать очень слабые спорадические слои, недоступные регистрации ионозондами. В исследованиях спорадического слоя E основное внимание было уделено трем направлениям. Первое: измерение скорости вертикального движения плазмы, которая на указанных высотах совпадает со скоростью нейтральной компоненты, исследование влияния вертикального переноса на образование и динамику спорадических слоев. Второе: определение на основе измерений амплитуды и фазы рассеянного сигнала характеристик слоя E_s – электронной концентрации, относительных концентраций положительных атомарных металлических и молекулярных «атмосферных» ионов, массы или сорта преобладающих металлических ионов, образующих слой, оценка эффективного коэффициента рекомбинации на высотах слоя E_s . Третье: влияние интенсивного спорадического слоя E на образование ИПН в D-области ионосферы. По результатам экспериментов получен большой объем данных о высотно-временных вариациях скорости вертикального движения плазмы, которые использованы для расчетов характеристик среднеширотного спорадического слоя E: относительного содержания метеорных и атмосферных ионов, эффективного коэффициента рекомбинации. Анализ высотной зависимости времени релаксации рассеянного сигнала показал, что на высотах слоя E_s на графике появляются локальные максимумы, в которых время релаксации значительно возрастает. Причинами этого роста являются превышение электронной концентрации в слое E_s над фоновой концентрацией E-области и существование в слое долгоживущих атомарных металлических ионов, в том числе тяжелых, с массами, значительно превышающими массы основных молекулярных атмосферных ионов. Так как релаксация периодических неоднородностей в E-области обусловлена амбиполярной диффузией [1], то время релаксации ИПН пропорционально произведению массы ионов на частоту соударений ионов с нейтральными молекулами, что позволило оценить массу или тип преобладающих ионов в слое E_s . Получено, что в большинстве наблюдений такими ионами могли быть ионы железа и кальция. Экспериментально показано, что экранирующий слой E_s способствует образованию ИПН в D-области, при этом обнаруживается «расслоение» рассеянного сигнала, выраженное в высотном профиле его амплитуды, зависящем от электронной концентрации. Это означает расслоение реального профиля электронной концентрации D-области. Экранирующий слой E_s позволяет с высокой точностью определить высоту нижней границы области, обогащенной атомарным кислородом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 20-17-00050.

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. 156 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ (ТРАНСАВРОРАЛЬНАЯ РАДИОТРАССА)

Крашенинников И.В., Шубин В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, 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 – односкачкового 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].

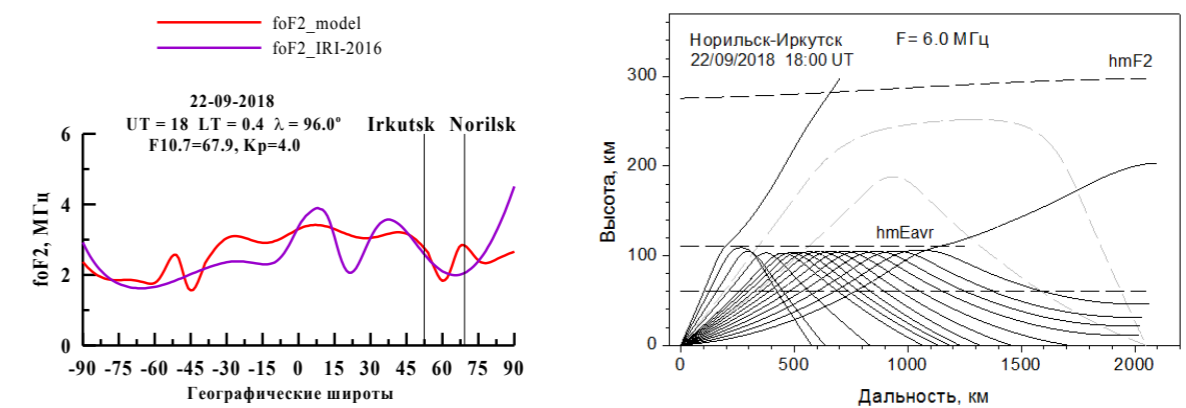


Рис. 1 Положение ГИП и аврорального овала на радиотрассе Норильск - Иркутск во время ионосферной бури небольшой интенсивности 22.09.2018 18:00 UT (левая панель) и блокировка прохождения моды 1F2 авроральным E-слоем (правая панель).

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.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ РСДН-20 В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ШИРОТ ВО ВРЕМЯ SPE СОБЫТИЙ

Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В.

ПГИ, г. Анапты, Россия, akhmetov@pgia.ru

Диапазон ОНЧ составляющий 3 – 30 кГц хорошо подходит для задач исследования состояния ионосферы по причине сильного влияния верхней границы волновода Земля – ионосфера на амплитуду и фазу регистрируемых сигналов [1-2]. Для таких исследований крайне важно понимать взаимосвязи между вариациями сигнала и вызывающими их изменениями в ионосфере.

В представленной работе методами вычислительного эксперимента исследованы амплитудные и фазовые характеристики сигналов ОНЧ антропогенного происхождения во время солнечных протонных событий. Источник сигналов представлял собой модельный вариант задания пакета сигналов на частотах системы дальней навигации РСДН-20 (11905, 12679, 14881 Гц). Основная задача исследования — изучить влияние изменений профиля концентрации электронов в высокоширотной области ионосферы, вызванных вторжением высокоэнергетических солнечных протонов, на амплитудные и фазовые характеристики сигналов на некоторых частотах диапазона ОНЧ. В работе рассмотрены события 30 октября 2003 года и 23 января 2012 года. Для события 30 октября 2003 года с целью выявления зависимости амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 проведено 5 вычислительных экспериментов. Два для спокойных условий – 31 октября в 04:00 UTC и в 12:00 UTC. Два для возмущенных условий – 30 октября в тоже время. И один дополнительный эксперимент с профилями ионосферных параметров, полученных по модели GDMI (Global Dynamic Model of Ionosphere), для 31 октября в 12 UTC. Данное событие выбрано как пограничное между GLE (Ground Level Enhancement) и спокойными условиями. Для события SPE 23 января 2012 года проведено 4 вычислительных эксперимента: два для спокойных условий 22 января (в 03:00 и в 11:00 UTC) и два для возмущенных условий 23 января (в 03:00 и в 11:00 UTC). Профили концентрации электронов строились с использованием данных радара некогерентного рассеяния VHF EISCAT, расположенного в городе Тромсе, Норвегия. Частоты столкновений в вычислительных экспериментах рассчитывались с использованием модели NRLMSISE, а геомагнитное поле задавалось при помощи международной модели геомагнитного поля Земли IGRF 13-ой генерации. В результате обработки данных вычислительных экспериментов показано, что в условиях SPE событий наблюдаются в основном амплитудные искажения ОНЧ сигналов. При этом влияние протонных событий сильнее сказывается в дневное время. Существует частотная зависимость влияния высыпаний высокоэнергетических протонов на амплитуду сигналов РСДН-20. Сигналы меньшей частоты реагируют на такие события сильнее. Фазы сигналов РСДН-20 менее подвержены влиянию слабых SPE. На частоте 14881 Гц при незначительном, менее порядка, увеличении концентрации электронов в D и E слоях ионосферы наблюдается незначительное снижение фазовой задержки. Исследовано влияние нижней границы волновода Земля-ионосфера в случаях распространения сигналов РСДН-20 над поверхностью суши и океана во время SPE события.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018), <https://rscf.ru/project/18-77-10018/>. (Ахметов О.И., Белаховский В.Б.)

1. Inan U. S., Cummer S. A., and Marshall R. A., // J. Geophys. Res. Space Phys. 2010. vol. 115. A00E36.

2. Dowden R. L. and Adams C. D. D. // J. Geophys. Res. Space Phys., 1989, vol. 94, pp. 497–503.

ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Сысоев В.С., Кузнецов Ю.А., Наумова М.Ю., Орлов А.И., Сухаревский Д.И., Лепехин Н.М., Швец Н.Н., Басов Е.В.

РФЯЦ-ВНИИТФ ВНИЦ 900, г. Истра, Московская обл., Россия, v.s.sysoev@vniitf.ru

Радиоизлучение стримерного разряда является актуальным предметом исследований. Связано это с тем, что знание о нем имеет большое как научное значение (физические процессы при возникновении и развитии грозовых процессов, в том числе и лидера молнии), так в практическом плане (молниезащита, грозопеленгация, радиосвязь). Технически измерения такого радиоизлучения в природных условиях (грозовые облака) очень сложны. Поэтому возможность проведения таких исследований в лабораторных условиях предоставляет большие возможности.

Для экспериментов был использован генератор положительных стримерных разрядов (длина стримеров до 15 см), работающий в импульсно-периодическом режиме [1,2]. Такой режим позволял существенно упростить процесс измерения. Исследования проводилось в диапазоне частот 100-4000 МГц. Использовались анализаторы спектра Agilent E4407 В (полоса 9 кГц-26 ГГц), Rigol RSA 5065N (полоса 9 кГц-6,5 ГГц), специальные рупорные антенны. Для синхронных измерений электрических и оптических характеристик стримеров и исследуемого радиоизлучения применялась цифровая техника (осциллограф Tektronix DPO 7104 полоса 1 ГГц), фотоумножители, скоростная оптическая камера.

Получены подробные измерения радиоизлучения положительных стримеров, а также его спектра в данном диапазоне с измерениями электрических и оптических характеристик. Максимальное по мощности радиоизлучение получено в диапазоне 100 – 500 МГц. Зафиксировано также радиоизлучение в диапазоне до 1-4 ГГц. Это согласуется с имеющимися данными [3].

Результаты могут быть полезны при разработке приемной и генерирующей радиотехнической аппаратуры (сотовая, космическая связь, радиолокация) в условиях высокой электрической активности атмосферы (грозовые облака). А также при исследованиях электромагнитных помех от стримерного коронного разряда высоковольтных линий электропередач.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-19-00501,

<https://rscf.ru/project/19-19-00501>

1. Ashmarin G.V., Lelevkin V.M. and Tokarev A.V., Development of a linear corona torch discharge // Plasma Phys. Rep., (2002), vol. 28, no. 10, p. 866.

2. Syssoev V. S., Naumova M. Y., Kuznetsov Y. A. and all. Streamer Discharge Plasma Generator // Inorganic Materials: Applied Research, (2022), Vol. 13, No. 5, P. 1380.

3. Shi F., Liu N., Dwyer, J.R. and Ihaddadene K.M.A., VHF and UHF electromagnetic radiation produced by streamers in lightning // Geophys. Res. Lett., 2019, vol. 46, no. 1, P. 443. <https://doi.org/10.1029/2018GL080309>

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ НАКАЧКОЙ В БОЛЬШОМ СТОЛБЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Петрова И.А., Гущин М.Е., Зудин И.Ю., Стриковский А.В., Коробков С.В., Катков А.Н., Кочедыков В.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, asdrghju1@mail.com

Лабораторное моделирование искусственной ионосферной турбулентности в поле мощных радиоволн, проводимое на специализированных крупномасштабных плазменных установках, является весьма перспективным подходом, который позволяет в деталях исследовать пространственную структуру турбулентности и ее динамические характеристики при контролируемых внешних условиях. В докладе представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных в исследованиях динамики турбулентности, возбуждаемой высокочастотной накачкой в замагниченной плазме, которые проводились на крупномасштабном экспериментальном стенде «Крот». Замагниченная плазма создавалась импульсным индукционным высокочастотным разрядом в аргоне, и распадалась с характерным временем порядка нескольких миллисекунд. В режиме распада плазмы к рамочной антенне подводился импульс ВЧ накачки, которым возбуждалась турбулентность. Параметры турбулентности исследовались зондовыми методами, на основе эффектов самомодуляции волны накачки, а также методом просвечивания турбулентной области плазмы пробными волнами свистового диапазона.

Ранее нами были установлены пространственно-временные характеристики плазменных неоднородностей, образующих турбулентность [1]. Однако использованное временное представление сигналов не дало достаточно подробной картины развития турбулентности, поэтому была поставлена задача о спектральном и корреляционном анализе полученных данных.

Анализом выявлено отсутствие корреляций во временной динамике огибающих пробной волны и волны накачки, однако динамические спектры (спектрограммы) огибающих коррелируют и воспроизводятся от одной реализации к другой. Во многих реализациях отмечаются схожие фрагменты динамических спектров огибающих волн накачки и пробной волны на временах, соответствующих началу развития плазменных неоднородностей. В динамической структуре спектра турбулентности отчетливо выделяются «динамическая» и «квазистационарная» стадии. На начальной, «динамической» стадии развития турбулентности, в процессе формирования крупномасштабной неоднородности с пониженной плотностью плазмы, обнаружено появление узкополосной дискретной составляющей в огибающих сигнала накачки и пробной волны, соответствующей модуляции увеличивающегося периода. Фурье-анализ высокочастотных сигналов при этом указывает на появление в спектре накачки дискретной спектральной составляющей - «синего» сателлита. Обсуждаются возможные механизмы генерации узкополосных сигналов и широкополосного шума в результате взаимодействия волны накачки и пробных волн с нестационарной плазмой в условиях развития турбулентности.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №21-12-00-385).

1. И.Ю. Зудин, М.Е. Гущин, А.В. Стриковский, С.В. Коробков, И.А. Петрова, А.Н. Катков, В.В. Кочедыков // Письма в ЖЭТФ 2022. Т. 116. №1. С. 46

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУМЕРЕЧНОГО И НОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ АТМОСФЕРНОЙ И АТМОСФЕРНОЙ СИСТЕМ ПОЛОС МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Куликов Ю.Н., Кириллов А.С.

Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия, kulikov@pgi.ru

Для исследования механизмов генерации и гашения дневного и сумеречного свечения атмосферной и инфракрасной систем полос молекулярного кислорода O_2^* в области мезосферы и нижней термосферы Земли (50-120 км) построена аэрономическая модель, учитывающая неравновесную химическую кинетику озона, атомарного кислорода и «нечётного» водорода, а также вертикальный массоперенос компонентов за счёт молекулярной и турбулентной диффузии.

С целью верификации построенной модели выполнены расчёты сумеречной вариации зенитной интенсивности ИК-эмиссии в полосе 1.27 мкм O_2 для условий ракетного эксперимента по измерению яркости этой эмиссии, проведённого на заходе Солнца в северной Скандинавии (Кируна, Швеция, 68°N). Солнечный зенитный угол χ во время измерений составлял 94.1°. Расчёты показали, что в дневное время возбуждение $O_2(a^1\Delta_g)$ происходит в основном за счёт поглощения солнечного излучения в континууме Hartley O_3 . На закате Солнца при увеличении χ свыше 90° происходит быстрый рост высоты сумеречной тени и, соответственно, быстрое снижение на порядки величины коэффициента фотодиссоциации озона в континууме Hartley в сумеречной области. Вследствие этого концентрация возбуждённых молекул кислорода начинает быстро убывать. Сравнение результатов расчётов высотных профилей интенсивности эмиссии $O_2(a^1\Delta_g)$ с данными измерений сумеречного свечения верхней атмосферы в полосе 1.27 мкм молекулярного кислорода показало удовлетворительное согласие модели и экспериментальных данных.

Представлена также модель кинетики электронно-возбужденного состояния $b^1\Sigma_g^+$ молекулярного кислорода на высотах нижней термосферы и мезосферы с учетом процессов переноса электронного возбуждения в молекулярных столкновениях. Модель учитывает образование электронно-возбужденного состояния O_2^* при тройных столкновениях, спонтанные излучательные переходы между состояниями, гашение электронного возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях. Рассчитанные на основании теории Розена-Зинера и Ландау-Зинера коэффициенты гашения O_2^* используются при моделировании колебательных населенностей электронно-возбужденных состояний молекулярного кислорода. 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ТРИПЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ТИТАНА

Кириллов А.С.

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

Молекулярный азот N_2 является главным молекулярным газом в атмосферах Титана (спутник Сатурна), Тритона (спутник Нептуна) и Плутона. Вторым по общей концентрации газом в атмосферах упомянутых планет является метан CH_4 . На высотах ниже 400 км основным источником вносимой в атмосферу Титана энергии являются космические лучи. Взаимодействие высокоэнергичных космических лучей с газами атмосферы Титана (N_2 и CH_4) 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.

В настоящем исследовании рассмотрена электронная кинетика триплетных состояний $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$ N_2 в средней атмосфере Титана на высотах 50-250 км при высыпании в атмосферу космических лучей. В расчетах учитываются внутримолекулярные и межмолекулярные переносы энергии электронов при неупругих столкновениях электронно-возбужденного молекулярного азота с молекулами N_2 , CH_4 , CO . При этом рассмотрена температурная зависимость скоростей неупругих взаимодействий с участием электронно-возбужденных молекул азота для $T=120-300$ К.

Приведены рассчитанные концентрации метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-20)$ и электронно-возбужденного $N_2(B^3\Pi_g, v=0-12)$ на высотах 70 и 250 км средней атмосферы Титана. Исследовано взаимодействие электронно-возбужденных молекул N_2 с молекулами углеводородов в средней атмосфере Титана на высотах 50-250 км. Впервые показано доминирование реакций метастабильного молекулярного азота с молекулами углеводородов с образованием радикалов по сравнению с процессами взаимодействия углеводородов с заряженными частицами.

МОНИТОРИНГ ВОЗДЕЙСТВИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ВСПЫШЕК НА ИОНОСФЕРУ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ СДВ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ НА КАМЧАТКЕ

Полянская Е.А.(1), Пилипенко В.А.(1), Коркина Г.М.(2), Соловьева М.С.(1)

(1) ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, polianskaia.ea@phystech.edu

(2) Геофизическая служба РАН, Камчатский филиал, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Геофизический полигон на Камчатке предоставляет широкие возможности для мониторинга электромагнитных и ионосферных явлений на Дальнем Востоке. В данной работе показаны возможности мульти-инструментального наблюдательного комплекса для изучения влияния солнечных рентгеновских вспышек, и даже гамма-вспышек от взрыва сверхновой на нижнюю ионосферу и геомагнитное поле. Рентгеновский и ультрафиолетовый (УФ) потоки измеряются спутниками GOES. Мы использовали данные мониторинга амплитуды/фазы ОНЧ сигналов по нескольким радиотрассам, пересекающим Камчатку и Японию, дополненные геомагнитными наблюдениями в этом регионе. По этим данным были рассмотрены эффекты от солнечных рентгеновских вспышек класса X. Типичный амплитудно-фазовый ОНЧ отклик “повторяет” изменения потока рентгеновского излучения, однако величина отклика зависит от предшествующего уровня ионизации. Геомагнитное поле в некоторых случаях демонстрирует колебательный отклик (с периодом около 4 минут) на импульсный всплеск рентгеновского / УФ излучения, тогда как эти колебания отсутствуют в данных ОНЧ просвечивания волновода Земля-ионосфера. Предположительно за квазипериодический отклик на внезапную ионизацию, вызванную солнечной рентгеновской вспышкой, могут быть ответственны ионосферные сильно затухающие акустико-гравитационные или МГД моды.

9 октября 2022 г. с помощью орбитальных рентгеновских и гамма-телескопов был зарегистрирован самый мощный из когда-либо наблюдаемых взрывов во Вселенной - гамма-всплеск GRB221009A [1-2] на расстоянии 2,4 миллиарда световых лет. Гамма-всплеск GRB221009A был зарегистрирован многими орбитальными рентгеновскими и гамма-телескопами, включая Solar Orbiter детектором STIX [3]. Были проанализированы результаты регистрации ОНЧ сигналов от разных передатчиков, принимаемые приемником геофизического комплекса на Камчатке в г. Петропавловске-Камчатском (РТК). Возмущение наблюдалось на радиотрассы, проходящие через Японию и Юго-Восточную Азию как внезапное уменьшение амплитуды до 7 дБ и резкий скачок фазы сигнала до 20-30 градусов. Проведенные исследования показывают, что нижняя ионосфера (D-слой) представляет собой гигантский детектор для улавливания рентгеновских и гамма-вспышек от астрономических объектов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-17-00125.

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ $NmF2$ СРЕДНИХ ШИРОТ В ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ НАД МОСКВОЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ИОНОЗОНДА

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

Выполнено исследование суточных вариаций статистических характеристик 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 часовых наземных ионозондовых измерений критической частоты слоя $F2$ ионосферы с 1957 г. по 2019 г. над Москвой. В работе вычислялись математическое ожидание $NmF2_E$, наиболее вероятное значение $NmF2_{MP}$, арифметически средняя месячная медиана $NmF2_{MED}$, стандартные отклонения σ_E , σ_{MP} и σ_{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 арифметически среднее значение $NmF2$ обеспечивает наилучшее описание множества измерений $NmF2$ одним единственным статистическим параметром $NmF2$. Использование σ_{MED} и CV_{MED} или σ_{MP} и CV_{MP} вместо σ_E и CV_E приводит к ошибочным выводам об изменчивости $NmF2$. Выполнены расчеты изменения величины коэффициента CV_E при переходе от низкой к средней солнечной активности, определяющее влияние солнечной активности на изменчивость $NmF2$. Показано, что рассматриваемая вариация солнечной активности приводит к увеличению или уменьшению изменчивости $NmF2$ в диапазоне изменения коэффициента CV_E от -8.2% в апреле до 12.2% в сентябре. Найдено, что при возрастании солнечной активности наибольшая продолжительность периодов увеличения и уменьшения изменчивости $NmF2$ реализуется в сентябре и в феврале, соответственно. Продолжительность периодов уменьшения изменчивости $NmF2$ при возрастании солнечной активности наибольшая в зимних условиях и наименьшая в летних условиях в сравнении с каждым из других сезонов года.

СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕННОЙ ПРИБОРАМИ СПУТНИКА ОГО-4 И ВЫЧИСЛЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ НОЧНОГО РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ЛИНИИ ЛАЙМАН АЛЬФА

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

Разработана теоретическая модель расчета интенсивности и потока солнечного излучения Лайман альфа в ночных условиях на высотах атмосферы с учетом многократного рассеяния этого излучения атомарным водородом атмосферы. На высотах более двух радиусов Земли концентрация атомарного водорода вычисляется с помощью эмпирической модели, основанной на согласовании результатов расчетов интенсивности излучения Лайман альфа с результатами измерений этой интенсивности приборами спутников TWINS 1 и 2, а на меньших высотах – по эмпирической модели NRLMSISE-00. Температура нейтральных компонентов атмосферы и концентрация O_2 принимаются по модели NRLMSISE-00 и учитывается поглощение излучения Лайман альфа молекулярным кислородом. Выполнено сравнение результатов измерений интегральной по длине волны интенсивности излучения Лайман альфа приборами спутника ОГО-4 на высоте 650 км в ночных условиях 31 января 1968 г. при высокой солнечной активности с результатами модельных расчетов этой интенсивности. Показано, что уменьшение $[H]$ модели NRLMSISE-00 в 1.2 раза на высотах менее двух радиусов Земли позволяет удовлетворительно согласовать вычисленную и измеренную интенсивность рассматриваемого излучения.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕНЧИВОСТИ $NmF2$, ИЗМЕРЕННОЙ ИОНОЗОНДОМ НАД МОСКВОЙ В 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

Выполнено исследование суточных вариаций статистических характеристик изменчивости электронной концентрации $NmF2$ максимума слоя $F2$ ионосферы для каждого месяца M года в геомагнито-спокойных условиях при низкой солнечной активности по данным часовых ионозондовых измерений критической частоты слоя $F2$ ионосферы с 1957 г. по 2017 г. над Москвой. В работе вычислялись математическое ожидание $NmF2_E$, наиболее вероятное значение $NmF2_{MP}$, арифметически средняя месячная медиана $NmF2_{MED}$, стандартные отклонения σ_E , σ_{MP} и σ_{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. Расчеты показали, что $11.8\% \leq CV_E(UT, M) \leq 43.3\%$, $11.7\% \leq CV_{MED}(UT, M) \leq 59.5\%$, $12.7\% \leq CV_{MP}(UT, M) \leq 74.6\%$ и в преобладающем большинстве случаев значение $CV_E(UT, M)$ меньше коэффициентов $CV_{MED}(UT, M)$ и $CV_{MP}(UT, M)$, где UT – мировое время. В случаях, когда величина $CV_E(UT, M)$ больше, чем значение $CV_{MED}(UT, M)$ или $CV_{MP}(UT, M)$, отличие между коэффициентами $CV_E(UT, M)$ и $CV_{MED}(UT, M)$ или между значениями $CV_E(UT, M)$ и $CV_{MP}(UT, M)$ не значительно в сравнении с их величинами. При изменении UT наименьшие для каждого месяца года значения $CV_E(UT, M)$ находятся в интервале от 11.8% (июль) до 19.4% (декабрь), а наибольшие величины $CV_E(UT, M)$ – между 25.5% (июнь) и 43.3% (декабрь). При этом наименьшие и наибольшие значения этого коэффициента в осенние, зимние и весенние месяцы больше, чем в летние месяцы. Если изменяется месяц года при фиксированном UT , то коэффициент $CV_E(UT, M)$ принимает наименьшее значение в июне, июле, августе и сентябре в зависимости от выбранного UT .

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА РЕГИОНАЛЬНУЮ ВОЗМУЩЕННОСТЬ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ СЕТИ ГНСС-СТАНЦИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РФ

Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загретдинов Р.В.

КФУ, г. Казань, Россия, denis-maksimov16@yandex.ru

Исследования влияния солнечных вспышек на глобальную ионизацию верхней атмосферы Земли методами ГНСС радиозондирования проводятся уже более 30-ти лет. Однако, изучение влияния солнечных вспышек на ионосферу над территорией РФ до недавнего времени не проводилось из-за малой плотности ГНСС станций. Это, в свою очередь, не позволяло достигать приемлемого пространственно-временного разрешения при построении карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС). Начиная с 2015 года наблюдается бурный рост количества ГНСС станций, расположенных в европейской части РФ. Таким образом, стало возможным проведение подобных исследований. В связи с этим были проведены исследования вариаций ПЭС и мощности навигационных сигналов в Приволжском федеральном округе (ПФО РФ) во время мощнейших солнечных вспышек, произошедших в сентябре 2017 года.

Исследования влияния солнечных вспышек и геомагнитных бурь на ионосферную погоду (за период с 5 - 12 сентября 2017 года) производилось путем анализа изменений медианных значений вариаций ПЭС [1] и отношения несущей к шуму над рассматриваемым регионом. Для получения более достоверных результатов при переходе от наклонного ПЭС к вертикальному в расчетах использовались все доступные лучи «спутник-приемник» угол места которых превышал 30° .

Обработка экспериментальных данных позволила выявить практически мгновенное влияние вспышки X-класса 6 сентября на медианную динамику ПЭС, рассчитанную для области $[50^\circ \div 65^\circ \text{ с. ш.}; 35^\circ \div 65^\circ \text{ в. д.}]$ (до 0,6 TECU), когда Солнце прошло Зенит, но еще было видимо для области $40^\circ \div 55^\circ \text{ в. д.}$ (11:55-12:15 UTC). Вместе с тем, было определено, что вспышки, произошедшие после захода Солнца для рассматриваемой области не внесли существенных изменений в фоновые значения ПЭС. Также стоит отметить, что менее интенсивные, но более частые вспышки M- класса с 6-го по 8-ое сентября оказали значимые возмущения в ионосфере, достигавшие значений 0,5 TECU. Выделить влияние магнитных бурь на состояние ионосферы в ПФО РФ не удалось. Кроме этого, существенного снижения мощности сигнала в дни возникновения солнечных вспышек и магнитных бурь выявлено не было.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-72-00043, <https://rscf.ru/project/21-72-00043>.

1. Когогин Д. А., Насыров И. А., Шиндин А.В. и др. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 2. С. 89-104

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТОТИПА ГНСС ПРИЕМНИКА НА БАЗЕ ОТЛАДОЧНОЙ ПЛАТЫ SIMPLERTK2B С МОДУЛЕМ U-BLOX ZED-F9P

Когогин Д.А., Соколов А.В.

КФУ, г. Казань, Россия, artemsokolov2017@mail.ru

В работе представлен обзор приемника на основе модуля u-blox ZED-F9P, разработанного на кафедре радиоэлектроники Института Физики КФУ, а также его сравнение с более дорогими аналогами [1-2]. Качественно исследовано влияние используемого ГНСС приемника на регистрацию полного электронного содержания (ПЭС) и сопутствующих характеристик, с помощью регистрации навигационных сигналов ГНСС – GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. В качестве сравнительной базы были отобраны приемники фирм Trimble и JAVAD, расположенные в Казанской астрономической обсерватории и на кафедре физики атмосферы Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова, соответственно. Основные исследуемые характеристики, полученные на основе двухчастотных фазовых измерений на частотах L1 и L2 - общеизвестные индексы оценки ионосферной активности, такие как вариации относительного наклонного ПЭС (varTEC), среднеквадратическое отклонение наклонного ПЭС в окне 900 секунд (rmsTEC), скорость изменения наклонного ПЭС (ROT), СКО скорости изменения наклонного ПЭС в 15-ти минутном окне (ROTI), СКО производной ПЭС, нормированный на квадрат наклонного фактора (AATR), а также для интерпретации мощностных характеристик сигналов показаны отношения С/Ш группировок спутников на частотах L2.

Результаты показали, что приемник фирмы Trimble доминирует над u-blox ZED-F9P на всех графиках исследуемых ионосферных характеристик, что неслучайно, поскольку он является самым дорогим представителем. Спорные результаты продемонстрировал приемник фирмы JAVAD. Общий уровень мощности навигационных сигналов частот L2 превосходит u-blox ZED-F9P, при записи на одну антенну через сплиттер, но все еще остается на достаточно высоком уровне. Однако, измерения вариации наклонного ПЭС и СКО демонстрируют обратное, что может быть связано, с особенностями конструкции внутренних трактов приемника JAVAD. Медианные уровни рядов остаточных индексов, таких как rmsTEC, ROT, ROTI, полученных по ГНСС измерениям, на приемнике u-blox ZED-F9P ниже, чем на JAVAD TRE_3L, что оказалось неожиданным из-за разных ценовых сегментов рассмотренных приёмников. Однако, стоит заметить, что при длительных ионосферных экспериментах на приемнике u-blox ZED-F9P наблюдаются срывы фаз, что следует иметь ввиду при обработке больших массивов данных. Полученные результаты показывают возможность живой конкуренции между ГНСС модулями из недорогого ценового сегмента с более дорогими по стоимости готовыми решениями, а также целесообразность использования подобных модулей в экспериментах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00043, <https://rscf.ru/project/21-72-00043>. Авторы выражают благодарность доценту кафедры физики атмосферы МГУ им М.В. Ломоносова Падохину Артему Михайловичу за помощь в организации эксперимента с приемником фирмы JAVAD.

1. Sokolov A.V., Kogogin D.A., Maksimov D.S., Nasyrov I.A., Shindin A.V., Zagretdinov R.V. // Conference Proceedings - 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, - RSEMW 2021. - P. 300-303. DOI: 10.1109/RSEMW52378.2021.9494015

2. Kogogin D.A., Nasyrov I.A., Sokolov A.V., Shindin A.V., Ryabov A.V., Maksimov D.S., Zagretdinov R.V. // Journal of Physics: Conference Series. 2021 Russian Open Scientific Conference on Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Wave Propagation and Diffraction, - MPRSRWPD 2021 - 1991 (1). - 012020. - DOI: 10.1088/1742-6596/1991/1/012020

К ВОПРОСУ О СПЕКТРЕ УНЧ КОЛЕБАНИЙ ИОНОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ Pc1

Потапов А.С.¹, Гульельми А.В.², Клайн Б.И.³

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

²ИФЗ РАН, Москва, Россия, guglielmi@mail.ru

³ГО Борок ИФЗ РАН, Борок Ярославской обл., Россия, klb314@mail.ru

Открытые 80 лет назад Ханнесом Альвеном и названные его именем волны являются неотъемлемым атрибутом ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных колебаний космического происхождения. Здесь мы сосредоточили свое внимание на ионосферном альвеновском резонаторе (*Ionospheric Alfvén Resonator*, или сокращенно IAR). В IAR возбуждаются УНЧ колебания в диапазоне Pc1 (0.2–10 Гц). При вычислении спектра колебаний в рамках стандартной модели предполагается, что IAR является автономной динамической системой. В отличие от этого мы рассматриваем IAR как специфическую подсистему общей системы альвеновских колебаний геомагнитных силовых линий. Другими словами, мы исходим из представления о том, что IAR, вообще говоря, не является автономной колебательной системой. Задача о спектре IAR обсуждается в данной работе в рамках общей задачи о спектре МГД колебаний магнитосферы Земли. Сформулирована соответствующая задача Штурма-Лиувилля. Аналитические решения задачи рассмотрены в ВКБ-приближении. Указано на необходимость численного решения задачи о спектре IAR ввиду довольно сложного распределения альвеновской скорости вдоль геомагнитных силовых линий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00280.

МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ВОЛН В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ ХВОСТОВ МЕТЕОРОИДОВ

Морозова Т.И., Попель С.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru

Описан механизм модуляционного взаимодействия ленгмюровских волн в хвостах метеороидов, приводящий к возникновению магнитных полей. Приведены оценки величин этих магнитных полей. Показано, что данные поля по величине совпадают с наблюдаемыми вариациями магнитных полей в атмосфере Земли во время пролетов метеороидов. Показан механизм возникновения низкочастотных электромагнитных волн в результате развития модуляционного взаимодействия ленгмюровских волн, следствием которого может быть возникновение электрофонных шумов во время пролетов метеороидов.

НИЖНЕГИБРИДНЫЕ ВОЛНЫ В ХВОСТАХ МЕТЕОРОИДОВ

Морозова Т.И., Попель С.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru

Исследована возможность генерации нижнегибридных волн в метеороидных хвостах при их взаимодействии с ионосферой Земли. Нижнегибридные волны возбуждаются в результате развития неустойчивости бунемановского типа вследствие движения плазмы хвоста метеороида относительно магнитного поля Земли. Обсуждаются магнито-модуляционные процессы, обусловленные существованием в плазме нижнегибридных волн, в результате развития которых происходит генерация квазистационарных возмущений магнитного поля. Показано, что эти возмущения по порядку величины совпадают с наблюдаемыми магнитными полями, возникающими во время пролетов метеороидов.

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ ДВУХ ПОЛУШАРИЙ НА ВОЗМУЩЕНИЕ 25-26 АВГУСТА 2018

Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

НИИФ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, oamaltseva@sfedu.ru

Исследование реакции ионосферы на возмущения привлекает постоянное внимание ученых. Считается, что нет абсолютно одинаковых магнитных бурь, что оправдывает получение результатов для каждой новой магнитной бури. Однако существуют возмущенные периоды, к изучению которых ученые постоянно возвращаются, например, октябрь 2003, июль и ноябрь 2004, март 2012 и другие. К ним можно отнести и возмущение 25-26 августа 2018. Отличием данной работы можно считать: 1) привлечение к исследованию значений foF2 модели E-CHAIM [1], которая учитывает возмущенные условия с помощью комбинации нескольких индексов геомагнитной активности, 2) определение частот foF2(assim) с помощью ассимиляции полного электронного содержания TEC в модель IRI-Plas [2], 3) оценку долготных вариаций этих параметров во время возмущений 25-26 августа, подтверждающую беспрецедентную асимметрию двух полушарий, отмеченную в работе [3].

Здесь результаты получены для высокоширотных областей северного и южного полушарий. Значения TEC брались из глобальных карт JPL (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>). Критические частоты брались из базы DIDbase (<https://ulcar.uml.edu/DIDBase/>). Значения foF2(E-CHAIM) рассчитывались online на сайте (<https://chain-new.chain-project.net/index.php/e-chaim/e-chaim-web-application>). Различные опции модели IRI-Plas использовались на сайте (<http://www.ionolab.org/index.php?language=en>).

Выводы можно сформулировать следующим образом: 1) показано, что для исследования долготной зависимости критической частоты можно использовать два подхода: модель E-CHAIM (только в северном полушарии) и ассимиляцию экспериментальных TEC(obs) в модель IRI-Plas, которая может использоваться для оценки плазмосферной части (в данном случае ее доля превышала 10-15%), 2) получено, что в северном полушарии возмущение имело положительный характер во второй половине дня 25 августа с наиболее сильным проявлением в американской зоне, 26 августа практически во всем диапазоне долгот отклик носил отрицательный характер. В южном полушарии положительное возмущение доминировало и 26 августа. Формально более сильный отклик в южном полушарии можно объяснить увеличением коэффициентов корреляции с параметрами ММП, СВ, Dst.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание в сфере научной деятельности 2023 г.)

1 Themens, D.R., Jayachandran, P.T., Galkin, I., Hall, C. J. Geophys. Res. Space Physics 2017, 122, 9015 – 9031.

2 Gulyaeva, T.L., Bilitza, D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model. In: New Developments in the Standard Model, NOVA Publisher, 2011.

3 Astafyeva, E., Bagiya, M. S., Förster, M., Nishitani, N. J. Geophys. Res. Space Physics, 2020, 125, e2019JA027261, 1-15.

ТОЧКИ, ЛИНИИ И 4D СТРУКТУРЫ КУМУЛЯЦИИ И ЛИБРАЦИИ ВЫСИКАЙЛО-ЛАГРАНЖА-ЭЙЛЕРА В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Высикайло Ф.И.

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

Процессы обмена энергиями (максвеллизации ФРЭ) в структурах между свободными электронами приводят к: 1) формированию потоков, высоко энергичных электронов, убегающих – диссипирующих из любого плазмоида и его оболочки; 2) зарядке положительным зарядом плазмоида; 3) генерации потока возвращающихся – кумулирующих в плазмод электронно; 4) генерации квазипостоянного эффективного положительного заряда и постоянного электрического поля – E из-за дисбаланса в скоростях, убегающих и прибегающих заряженных частиц. Например, зарядке Солнца и проникновению во всю гелиосферу и ионосферу Земли квазипостоянного профиля $E(R)$, ускоряющего обратные потоки отрицательного заряда к Солнцу во всей гелиосфере и ионосфере Земли; 5) динамической 4D самофокусировке плазмоидов (4D структур кумуляции и либрации для электронов) этими прибегающими в плазмод электронами; 6) выносу массы из плазмоида потоком положительных ионов с меньшей скоростью, чем скорость убегающих и прибегающих электронов; 7) фрактализации процессов диссипации и кумуляции объемного заряда в гелиосфере и формированию между заряженными структурами точек, линий, плоскостей (страт) и других 4D кумулятивно-диссипативных структур (КДС) кумуляции и либрации Высикайло-Лагранжа-Эйлера в гелиосфере и ионосфере Земли. Эти 4D структуры визуализируются в ионосфере Земли и короне Солнца. По сорту ионов в солнечном ветре установлен квазипостоянный **положительный** заряд Солнца в 1 400 Кл [1]. Отрицательный заряд Земли в 500 000 Кл давно установлен. Учет постоянного тока между положительно заряженным Солнцем (аналог анода) и отрицательно заряженной Землей (аналог катода) позволяет объяснить ряд наблюдаемых явлений в ионосфере [2]. Нами создана и верифицирована, имеющимися экспериментами, единая модель положительно заряженной гелиосферы от поверхности положительно заряженного Солнца (от высот 500 км) до расстояний 215 радиусов Солнца, включая ионосферу Земли [1,2]. Основным параметром динамического порядка в ионосферах планет и звездосферах, как и в лабораторной плазме с малым током, является параметр E/N – приведенная к плотности числа частиц – N , на которых происходит рассеивание энергии электронов. Пробойных значений в верхних слоях атмосферы E/N достигает на высотах в 60 км.



Рис. Положительно заряженные кумулятивно-диссипативные структуры в верхних слоях атмосферы: а) общая классификация структур; б) эльф (100 км) и голубой джет (20 км), в) красные спрайты (70 км), г) четочная молния, точки и линии кумуляции (< 10 км).

1. Vysikaylo P.I. Weak Violation of Electroneutrality in the Heliogeospheres: Electroneutrality Disorders // Вестник МГТУ им. Баумана Сер. Естественные науки. 20. № 3. С.89 – 106. <http://vestniken.ru/articles/929/929.pdf>

2. Высикайло Ф.И., Некрасов Г.Ю., Пронин Н.А. Самостоятельный разряд в ионосфере отрицательно заряженной Земли. // Вестник Московского государственного областного университета серия 'Физика-математика' №4, 2018 г. с. 36-53.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ НОЧНОГО НЕБА В ЛИНИИ 630 НМ И ДВУМЕРНЫХ КАРТ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ПЕРИОД РАБОТЫ УНУ СТЕНД СУРА В 2021-2022 ГГ.

Когогин Д. А.¹, Емельянов В. В.¹, Максимов Д. С.¹, Насыров И. А.¹, Белецкий А. Б.², Шиндин А. В.³, Грач С. М.³, Загреддинов Р. В.¹

¹ КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

² ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

В 2021-2022 гг. на стенде «Сура» были проведены серии экспериментов по изучению оптических эффектов, происходящих в ионосфере под действием коротковолнового радиоизлучения. Регистрация оптических эффектов производилась с использованием ПЗС-камеры КЕО Sentinel, установленной на расстоянии около 170 км к востоку от антенной системы стенда «Сура». Помимо оптического свечения в экспериментах наблюдались области подавления фонового свечения. Присутствуют дни, когда области свечения и подавления сменяют друг друга, а также дни, когда области свечения и подавления присутствуют одновременно в течение достаточно длительного времени. Особый интерес представляют эксперименты 6 сентября 2021 года и 31 июля 2022 года, когда эффекты искусственного свечения и эффекты подавления фонового свечения ионосферы наблюдались одновременно в течение достаточно продолжительного времени. Воздействие на ионосферу в обоих экспериментах осуществлялось волной накачки обыкновенной поляризации с периодом 6 минут: 2.5 мин – излучение, 3.5 мин – пауза. Главный лепесток диаграммы направленности стенда «Сура» был ориентирован в направлении магнитного зенита (наклон на юг на 12°). Различия были только в частоте волны накачки: 4300 кГц для эксперимента 06.09.2021 и 4785 кГц для эксперимента 31.07.2022.

Для проведения совместного анализа снимков ночного неба и карт вариаций полного электронного содержания (ПЭС) для каждого оптического изображения строилась соответствующая карта ПЭС, полученная для того же интервала времени наблюдения [1]. Таким образом составлялись пары снимков одной и той же области пространства в проекции на географические координаты. Интенсивность свечения 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.

На основе совместного анализа пространственного положения и поведения во времени возникающих оптических эффектов и ПЭС-карт получено, что как области свечения ионосферы, так и области подавления фонового свечения сопровождаются уменьшением значений ПЭС. 6 сентября 2021 года область свечения возникла на высоте порядка 295 км. 31 июля 2022 года высота области свечения составляла около 315 км. Область подавления в обоих экспериментах была смещена в северном направлении относительно области свечения. Так же замечено, что размеры области подавления примерно в два раза превышают размеры пятна свечения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00043. 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.

ЯДРА УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ МОДЕЛИ СТОЛКНОВЕНИЙ УПРУГИХ СФЕР В ЗАДАЧАХ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

В.Л. Красовский

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

Интегралы столкновений определены в явном виде, как коэффициенты разложения по полиномам Лежандра интеграла Больцмана, при постоянном сечении рассеяния заряженных (нейтральных) частиц малой примеси на атомах газа. В качестве конкретных применений расчетов, обсуждаются возмущение функции распределения электронов (ионов) слабым электрическим полем в слабоионизованной плазме и кинетическое уравнение при наличии малого градиента концентрации нейтральных частиц примеси.

С помощью вычисленных ядер интегрального кинетического уравнения, впервые получено правильное выражение для возмущенной изотропной части электронной функции распределения в пределе слабого постоянного однородного поля, $E \rightarrow 0$, на основе стандартной теории возмущений

$$f = f_M \left\{ 1 + [(e\lambda E/T)^2 / (3\mu)] [\ln(v/v_T) - 1 + (1/2)(\ln 2 + \gamma)] \right\},$$

справедливое в широком диапазоне скоростей $(v/v_T) \gg \mu^{1/2}$, где f_M – максвелловское распределение, $\mu = m/M \ll 1$ – отношение масс электрона и атома, λ – длина свободного пробега электрона, $T = mv_T^2$ – температура плазмы, и $\gamma = 0.577\dots$ – постоянная Эйлера.

При равенстве масс атомов газа и частиц примеси (ионов или нейтральных частиц, $\mu = m/M = 1$) обнаружено довольно удивительное свойство интеграла столкновений, позволяющее свести очень сложное интегральное уравнение Больцмана, в общем случае с пятикратным интегралом, к эквивалентному обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка, которое описывает диффузию частиц примеси в пространстве скоростей. При этом ядро интегрального члена уравнения для изотропной составляющей функции распределения (старшего члена разложения функции распределения по полиномам Лежандра) равно

$$K_0 = I(v) \exp(v^2/2 - A^2/2), A \geq v; K_0 = I(A), A \leq v; I(v) \equiv \int_0^v dt \exp(-t^2/2),$$

где v и A – безразмерные скорости иона после и до столкновения с атомом, соответственно. Для анизотропной добавки к функции распределения соответствующие выражения имеют вид

$$K_1 = g(v) \exp(v^2/2 - A^2/2), A \geq v; K_1 = g(A), A \leq v; g(v) \equiv 2v \exp(-v^2/2) + (v^2 - 2)I(v).$$

Простое дифференцирование интегральных уравнений с этими ядрами и приводит к дифференциальным уравнениям.

Техника упрощения интеграла Больцмана в рамках принятой модели столкновений упругих шариков применима к широкому кругу задач кинетической теории при наличии выделенного в пространстве направления, и особенно полезна в условиях слабой анизотропии функции распределения частиц примеси. Сюда можно отнести расчет коэффициента пространственной диффузии в газовых смесях, определение подвижности и проводимости заряженных частиц в слабоионизованной плазме и близкие задачи.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ В АТМОСФЕРАХ ЭКЗОПЛАНЕТ

Шепелин А.В., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, 4.shepelin@gmail.com

Астрофизика и астрохимия экзопланет — молодая область исследований, существующая чуть больше 30 лет. За это время обнаружено всего около 5000 объектов. Предполагается, что это малое количество даже в рамках Млечного пути. На данный момент, одна из основных задач — поиск новых экземпляров, расширение базы данных. Но конечной целью является понимание их элементного состава, и, потенциально, поиск обитаемых миров. Хотя спектры дают определённое представление о структуре их атмосфер, многие линии значительно искажаются при прохождении межзвездной среды и атмосферы Земли. Интерпретация наблюдений требует учета большого количества факторов и процессов, поэтому, для более точного исследования экзопланет, необходимо использовать компьютерное моделирование.

Атмосферы — сложные объекты, для их моделирования необходимо учитывать множество физических и химических эффектов. Долгое время основной линией для изучения в атмосферах экзопланет была Ly- α . Однако, в 2018 году Oklopčić и Hirata предложили линию метастабильного гелия, которая не обладает искажениями, присущими Ly- α [1]. В 2021 году Borsa и Fossati предложили линию триплета кислорода 777.4 нм с аналогичными преимуществами [2]. Добавление новых линий для рассмотрения в перспективе даёт больше информации. Для их поиска недостаточно использовать предположение о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР), необходимо моделирование неравновесной населенности различных уровней элементов (не-ЛТР). Данная работа сосредоточена на моделировании кинетики атомов и ионов, и выполняется как дополнение к программному коду трёхмерной магнитной гидродинамики [3].

Библиотека разрабатывается на языке программирования C++ (header-only, без внешних зависимостей) с хорошо документированным API, что позволяет использовать её и в других проектах. Разработана спецификация, дающая возможность с помощью файлов формата yaml или json (стандартные форматы сериализации) добавлять информацию о спектрах и элементах. Используется модульная архитектура, позволяющая относительно легко добавлять новые виды квантовых переходов. Пользователь библиотеки работает с абстракцией физических объектов (звёзды, планеты, элементы), взаимодействие между которыми реализовано с помощью шаблона проектирования «наблюдатель» (сигналы и слоты). Написаны привязки для языка программирования Python (pybind11), что расширяет возможности для мгновенной визуализации результатов вычислений в интерпретируемой среде, при этом вычисления происходят со скоростью C++.

На данный момент, в библиотеке имплементированы столкновительные переходы, спонтанная эмиссия и фотовозбуждение. Планируется добавление новых типов переходов. Работа программы тестируется на примере атома кислорода и сравнивается с результатами предыдущих исследований, выполненных для хромосферы Солнца [4].

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки 075-15-2020-780, Государственного задания № 0243-2021-0003.

1. Oklopčić A., and Hirata C.M. // *ApJL* 2018 V. **855**. N. 1. L11.
2. Borsa F., Fossati L., et. al. // *Nature Astronomy* 2021 V **6**. P. 226-231.
3. Shaikhislamov, I. F., M. L. Khodachenko, et. al. // *ApJ* 2014 V. **795**. N. 2.
4. Ситнова Т.М., Машонкина Л.И., Рябчикова Т.А. // *Письма в Астрономический журнал* 2013 Т. **39**. No 2. с. 146–160.

Определение эффективной частоты столкновения электронов в области E и D ионосферы высоких широт по данным анализа радиозатменных измерений

Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com

Столкновения между электронами и нейтральными молекулами представляют особый интерес для физики ионосферы Земли, в частности, для определения ионосферной проводимости и токовых систем в нижней ионосфере планеты, а также для выяснения роли, которую они играют в ослаблении радиоволн, распространяющихся внутри D- и E-областей ионосферы. Эффективную частоту столкновений электронов можно оценить из лабораторных исследований подвижности электронов в атмосферных газах в сочетании с ракетными измерениями температуры и плотности частиц в верхней атмосфере Земли [1], или ее можно определить независимо из анализа радиозатменных данных.

Нами разработан новый метод восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения дециметровых (длина волны ~19 см) радиоволн путем решения обратной задачи радиопросвечивания о поглощении сигнала в D- и E-областях ионосферы Земли [2, 3]. Этот метод является общим и может быть использован для различных диапазонов радиоволн и других сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. По результатам анализа радиозатменных данных *FORMOSAT-3/COSMIC* были определены высотные профили коэффициента поглощения дециметровых (ДМ) радиоволн в ионосфере планеты во время геомагнитной бури 22-23 июня 2015 года. Найдено, что на ионосферных высотах от ~90 до ~100 км максимальная величина коэффициента поглощения дециметровых радиоволн достигала значений $(5.7 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$ дБ/км.

Известно, что величина коэффициента поглощения на данной фиксированной частоте прямо пропорциональна электронной плотности и частоте столкновений электронов с ионами и нейтралами [4]. Используя полученные данные о вертикальных профилях коэффициента поглощения ДМ-радиоволн и электронной плотности, мы из анализа радиозатменных данных *FORMOSAT-3/COSMIC* независимо оценили эффективную частоту столкновений электронов в D- и E-областях ионосферы Земли. Практическая значимость изучения эффективной частоты столкновений электронов и эффектов поглощения радиоволн в D- и E-областях ионосферы планеты связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации. Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

1. Belrose, J.S. The Lower Ionospheric Regions, in *Physics of the Earth's Upper Atmosphere*, Hines, C.O., Paghis, I., Hartz, T.R., Fejer, J.A., Eds., Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1965, pp. 46–72.
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., 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.
4. 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.

ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА: СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ

Синеви́ч А.А.¹, Чернышов А.А.¹, Чугуни́н Д.В.¹, Милох В.Я.², Могилевский М.М.¹

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

²Университет Осло, г.Осло, Норвегия

В субавроральной области вблизи проекции плазмопаузы на высотах F-слоя ионосферы наблюдаются узкие потоки быстрых субавроральных дрейфов ионов, наиболее заметные при геомагнитной активности на фоне крупномасштабной плазменной конвекции, называемые поляризационный джет (ПД) или субавроральный дрейф ионов (Subauroral Ion Drift, SAID). Механизм формирования ПД/SAID, а также структура мелкомасштабных неоднородностей внутри ПД/SAID являются открытыми вопросами. В настоящей работе мы изучаем внутреннюю мелкомасштабную пространственную структуру ПД/SAID, используя данные спутников NorSat-1 и DMSP F-17 и F-18 во время нескольких геомагнитных событий. Показано, что ПД/SAID состоит из нескольких страт поляризационного джета (Polarization Jet Stratum, PJS) электронной плотности и температуры. Обнаружено новое явление, названное стратифицированным субавроральным ионным дрейфом (Stratified Subauroral Ion Drift - SSAID), которое представляет собой ПД/SAID, содержащий мелкомасштабные PJS. Результаты исследования показывают, что SSAID состоят из 2-4 крупных PJS и от нескольких единиц до нескольких десятков мелких PJS. Большие PJS имеют размер 0,2-0,3 широты, а мелкие PJS имеют размер <0,1. Предлагаются физические механизмы возникновения SSAID и PJS. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №23-22-00133).

КВАЗИ-СИНХРОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА НАЗЕМНЫМИ И СПУТНИКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Кобякова С.Е., Данилов С.И.

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

Проанализированы данные одновременных измерений поляризационного джета с наземной станции вертикального радиозондирования Якутск и спутниковых наблюдений узких провалов электронной плотности или быстрых дрейфов ионосферной плазмы на запад со спутников серии DMSP. Для сопоставления наземных и спутниковых измерений было рассмотрено 126 событий поляризационного джета, зарегистрированных с наземной ионосферной станции Якутск, расположенной вблизи 130-го географического меридиана в восточной Сибири на широте 62.2°, и 281 измерение быстрых субавроральных дрейфов ионов со спутников серии DMSP. Интервал времени синхронных наземных и спутниковых наблюдений охватывает период с марта 1989 г. по декабрь 2015 г., т.е. около 26 лет.

Критерии отбора событий для наземных данных – наличие на ионограммах станции зондирования характерных следов отражений F3s [1] и резких срывов критической частоты на суточных f-графиках станции [2]; для спутниковых данных - пик горизонтальной скорости превышает или равно около 1000 м/с; полуширина менее 3°; событие расположено экваториальнее авроральной зоны в раннем-вечернем и вечернем секторах MLT; полярная кромка западных ионных дрейфов совпадает или примыкает к экваториальной границе потоков высыпающихся электронов [3]. Одновременность наблюдений обеспечивается периодом времени примерно ±1.5 часа от времени регистрации признаков поляризационного джета по данным наземной станции ионосферного зондирования или периодом обращения спутников DMSP вокруг Земли.

Проведенный анализ одновременных измерений поляризационного джета показал, что наземные и спутниковые измерения наблюдают один и тот же эффект на границе плазмопаузы, т.е. усиление электрического поля северного направления, которое приводит к узким и быстрым западным дрейфам ионосферной плазмы на субавроральных широтах. На спутниковых данных DMSP они проявляются как резкий рост западной скорости, измеряемый дрейфметрами (1), провал в ионной плотности (2) и потоком высыпающихся мягкоэнергичных электронов и ионов (3) полярнее узкого провала и роста скоростей.

По данным многолетних одновременных спутниковых и наземных измерений показано и подтверждено, что наличие на ионограммах характерных дополнительных следов отражений указывает на присутствие вблизи зенита станции наблюдения узких и быстрых дрейфов ионосферной плазмы или поляризационного джета. Также показано, что квази-мгновенная долготная протяженность поляризационного джета на субавроральных широтах в отдельных случаях может достигать 8 часов или 120 градусов по долготе.

Работа поддержана в рамках выполнения государственного задания - номер государственной регистрации 122011700182-1.

1. Шульгина Н.В. // Авроральные явления 70. Апатиты: КФ АН СССР. 1974. С. 44-46.
2. Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. С.73.
3. He F., Zhang X.-X., Chen B. // J. Geophys. Res. 2014. V. 11. P. 5076.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДНЕШИРОТНЫХ И СУБАВРОРАЛЬНЫХ КРАСНЫХ ДУГ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

В.Л. Халипов

Институт космических исследований РАН, Москва, khalipov@iki.rssi.ru

Красные дуги свечения верхней атмосферы были открыты французским астрономом Daniel Barbier в период МГГ 1957 - 1959 гг. Свечение атмосферы, обнаруженное им в линии 630 нм, было стабильным в течение многих часов и охватывало долготы от горизонта до горизонта. При этом обычные формы полярных сияний наблюдались далеко к северу относительно красных дуг. Были выполнены многочисленные измерения, которые показали, что интенсивность свечения часто составляла 500 – 5000 Рл, но могла достигать десятков килорэлей и максимальная измеренная интенсивность достигала 134 кРл. Свечение зеленой линии атомарного кислорода регистрировалось, но было на два порядка менее интенсивным.

В следующем цикле солнечной активности последовали параллактические и интерферометрические измерения красных дуг, которые показали, что максимум свечения расположен на высоте 450 км, и температура нейтральной атмосферы (T_n) под дугой не изменяется. Измерения на спутникеOGO-4 (Nagy, 1967) не обнаружили электрического поля в полосе красной дуги. Все эти измерения были выполнены на средних широтах и соотнесены с фазой восстановления магнитных бурь большой интенсивности.

В ИКФИА свечение ночного неба на субавроральных широтах исследуется с начала 70-х годов. В работе Надубович и др. (1973) проанализированы параллактические измерения с трех и четырех пунктов сканерных наблюдений и установлено, что высоты максимума свечения с внедренной в них красной дугой составляют 170-180 км. В обсерватории Маймага проводились длительные интерферометрические измерения T_n , комплексные оптические и ионозондовые измерения. Это позволило получить следующие результаты.

а) Красная дуга развивается в полосе поляризованного джета (ПД) и запаздывает на 30-40 мин. относительно момента возникновения ПД. При интенсивности возмущения АЕ~1000 нТ и более оба явления развиваются синхронно.

б) Под дугой T_n увеличивается на 200 -400 К относительно уровня, определенного по невозмущенным дням месяца. Рост температуры запаздывает на 1.5 – 2 часа относительно начала уярчения свечения в дуге (Алексеев, 1984; Халипов и др., 2018).

в) Субавроральные красные дуги развиваются на широте станции Жиганск ($L = 4$) при уровне активности АЕ = 300-350 нТ. При АЕ = 500 нТ они смещаются на широту Якутска ($L = 3$), а при АЕ > 1500 нТ весь сценарий явления перемещается до Москвы ($L = 2.3$).

В детальном исследовании субвизуального фонового свечения атмосферы на субавроральных широтах (Фельдштейн и др., 2012) обоснована точка зрения, что источником свечения красных дуг являются остаточные высыпания электронов из силовых трубок на экваториальной границе электронного плазменного слоя. Дополнительное усиление свечения атомарного кислорода происходит в полосе ПД, где концентрация электронов в области F падает почти на порядок, что резко уменьшает дезактивацию возбужденных атомов кислорода (Халипов, 2018). Также действует фактор фрикционного разогрева среды под воздействием очень сильного электрического поля ПД 30 – 50 мВ/м. Механизм образования классической красной дуги был разработан в статье (J. Cornwall, F. Coroniti, R.Thorne, 1971). Энергичные ионы кольцевого тока в приэкваториальной области магнитосферы возбуждают ионно-циклотронные волны, которые ускоряют электроны среды вследствие действия механизма затухания Ландау. Возникшая популяция сверхтепловых электронов передает энергию в атмосферу, порождая красную дугу. Выяснилось, что этот механизм действительно работает, но наблюдаемая интенсивность ионно-циклотронных гармоник способна создать свечение красной линии интенсивностью 1.5-2.0 кРл.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ИОНОСФЕРЕ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ СТЕНДЕ "КРОТ" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТОЧНИКОВ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ВЧ И СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ 2021 И 2022 ГОДА

Гущин М.Е., Вершинин И.М., Гойхман М.Б., Громов А.В., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Лоскутов К.Н., Палицин А.В., Стриковский А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mguschin@ipfran.ru

Стенд «Крот» является одной из крупнейших плазменных установок России и мира, созданных для лабораторного моделирования физических явлений в космической плазме. Благодаря рекордным размерам вакуумной камеры и фоновой плазмы (объем ионизации может достигать нескольких десятков кубических метров), установка позволяет моделировать процессы распространения электромагнитного излучения и его взаимодействия с плазмой на протяженных трассах. Наряду с плазменной камерой, для моделирования эффектов взаимодействия мощного импульсного излучения с газами и плазмой используется импульсная высоковольтная установка «Синуки» из состава ускорителя «Крот-F». В 2021– 2022 гг. на стенде «Крот» подготовлен и проведен ряд экспериментов, моделирующих отдельные процессы в верхней атмосфере и ионосфере Земли при проведении активных экспериментов с применением мощного электромагнитного излучения.

В условиях, по параметрам подобия близких к реализуемым в нагревных ионосферных экспериментах, выполнены исследования турбулентности замагниченной плазмы, развивающейся в поле мощного высокочастотного импульса. Измерения, выполненные зондами и методами просвечивания модифицированной области плазмы пробными волнами, позволили определить основные характеристики турбулентности, проявляющейся в возбуждении пульсаций плотности уровнем до нескольких процентов, а также продольных электрических токов.

В исследованиях атмосферы и ионосферы значительный интерес представляют эффекты, которые могут возникать при распространении мощных сверхширокополосных (СШП) электромагнитных импульсов (ЭМИ). На стенде «Крот» реализовано несколько редакций эксперимента по взаимодействию мощных наносекундных ЭМИ с газами и плазмой, в том числе – в условиях развития разряда, основанных на применении крупномасштабных передающих линий, обеспечивающих распространение ЭМИ по длинным (5 – 10 м) трассам в форме ТЕМ волны. Одна из них – крупномасштабная («гигантская») коаксиальная линия с плазменным заполнением диаметром 1.5 м и длиной 10 м, другая – крупномасштабная полосковая линия длиной до 5 м. На модифицированной установке «Синуки» проведены первые эксперименты по прохождению через разреженный газ сверхмощных ЭМИ с уровнем напряженности электрического поля до нескольких МВ/м на трассе длиной порядка 5 м. Обсуждаются некоторые перспективы применения ЭМИ в активных экспериментах.

Для реализации режима взаимодействия мощного излучения с плазмой, максимально приближенного к условиям нагревного ионосферного эксперимента, подготовлен модельный лабораторный эксперимент с накачкой в форме СВЧ волнового пучка. Разработаны и изготовлены узлы ввода пучка в камеру стенда «Крот», элементы линии транспортировки и фокусировки пучка. Предложены сценарии экспериментов для различных геометрий взаимодействия волнового пучка с неоднородной замагниченной плазмой.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00385.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНЫХ СВЕРХКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

И.М. Вершинин, М.Б. Гойхман, А.В. Громов, М.Е. Гущин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, К.Н. Лоскутов, А.С. Николенко, А.В. Палицин, А.В. Стриковский

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, i.vershinin@ipfran.ru

Задача генерации и распространения сверхкоротких электромагнитных импульсов (ЭМИ) большой амплитуды в газах и плазме очень важна для создания систем импульсной радиолокации и связи, функционирующих в верхней атмосфере и ионосфере Земли, а также новых средств радиофизической диагностики околоземного пространства [1], [2].

В докладе представлены результаты лабораторного моделирования распространения мощных ЭМИ в различных газах при пониженном давлении в вакуумных камерах большого объема. Эксперименты проводились на стендах «Крот» и «Спрайт» (ИПФ РАН, г. Н. Новгород) при давлениях от 10^{-2} до 100 торр, в качестве газовой среды, кроме воздуха, использовались инертные газы - аргон и гелий, а также пары воды. Для создания условий, приближающих режим лабораторного моделирования к режиму распространения ЭМИ в верхней атмосфере и ионосфере, применяются передающие полосковые линии, в которых мощные ЭМИ с амплитудой напряжения до нескольких десятков киловольт распространяются в ТЕМ моде. Такие передающие системы позволяют ЭМИ распространяться без затухания.

Для проведения экспериментов было изготовлено несколько передающих линий, имеющих различные волновые сопротивления и различные зазоры между проводниками, что позволило проводить эксперименты при существенно различных напряженностях электрического поля в газе. Для стенда «Спрайт» длина линий составляла величину порядка 1 м, а зазоры в линиях варьировались от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Такие линии удобны для наблюдения за формой свечения газа в зависимости от давления. На стенде «Крот» была создана крупномасштабная полосковая линия с зазором между проводниками 6 см, а длиной около 4 м, которая позволила существенно увеличить длину трассы распространения и тем самым усилить влияние эффектов ионизации и ускорения электронов на форму и амплитуду прошедшего импульса.

В ходе экспериментов исследованы эффекты свечения и ионизации газа в поле ЭМИ в зависимости от сорта газа и его давления, а также связанные с ними явления трансформации формы и амплитуды ЭМИ. Измерения проводились как в режиме одиночных ЭМИ, а также в режиме пачек ЭМИ с частотой повторения до нескольких кГц. Установлено, что изменение формы прошедшего импульса соответствует условиям пробоя – возникновения свечения газа в линии. Для имитации условий распространения ЭМИ в атмосфере предложена и реализована методика введения примесей в форме водяных паров за счет сублимации льда, а также напуска дистиллированной воды через нагреваемую форсунку. Показано влияние водяного пара на форму прошедшего импульса в зависимости от давления.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект №075-15-2020-790).

1. Golubev A.I., Sysoeva T.G., Terekhin V.A., Tikhonchuk V.T., Altgilbers L.L. // IEEE Trans. Plasma Sci 2000. V. 28, P. 303-311.
2. Солдатов А.В., Терехин В.А. // Физика плазмы 2016. Т. 42. С. 927–935.

РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННО ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ С ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ

Крашенинников И.В., Выборнов Ф.И., Шиндин А.В., Урядов В.П., Гущин М.Е., Бовин Л.Б., Вертоградов Г.Г., Колчев А.А., Зыков Е.Ю., Шумаев В.В., Чернов Г.А., Кириллов И.М., Дорошенко В.Ю.

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

Нелинейное взаимодействие мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой приводит к генерации широкого спектра плазменных неоднородностей, в частности, а) образование крупномасштабного возмущения, определяемого диаграммой направленности антенн передающего комплекса и б) мелкомасштабного заполнения, как следствие турбулизации электронной компоненты и плазменных неустойчивостей в нагревной области ионосферы [1]. В условиях наличия выделенного направления в пространстве – геомагнитного поля мелкомасштабные неоднородности электронной плотности вытягиваются вдоль магнитного поля [1] и, соответственно, проявление их влияния на проходящие радиоволны приобретает анизотропный характер [2].

В сентябре – ноябре 2022 г. была предпринята серия экспериментов, направленных на исследование пространственного проявления неанізотропности взаимодействия диагностического радиоизлучения коротковолнового диапазона, т.е. в ситуации, когда длина волн сравнима с масштабом неоднородностей возмущенной области (ВО). Облучение области ионосферы, возмущенной мощным вертикальным излучением нагревного стенда «Сура» производилось из пункта Москва (ИЗМИРАН) сканирующим ЛЧМ-сигналом и приемом на сети пунктов, которые можно разделить на две группы: ближняя зона (~ 150 км от стенда: Нижний Новгород (ННГУ НИРФИ), Казань (КФУ), Йошкар-Ола (АО СИТКОМ)) и дальняя (~ 500 – 1000 км: Ростов-на-Дону (ЮФУ), Воронеж (ВГУ, МФТИ) и Приозерск (ФГУП "ГосНИИПП"), Ленинградской области).

В данной работе представлены результаты направленных исследований: а) явления ракурсного (неанізотропного) рассеяния диагностического излучения на мелкомасштабном заполнении ВО и б) радиофизического проявления крупномасштабной локализации ВО. Пример резонансного характера ракурсного рассеяния в дальней зоне приведен на рис.1 при полном отсутствии его регистрации в ближней зоне.

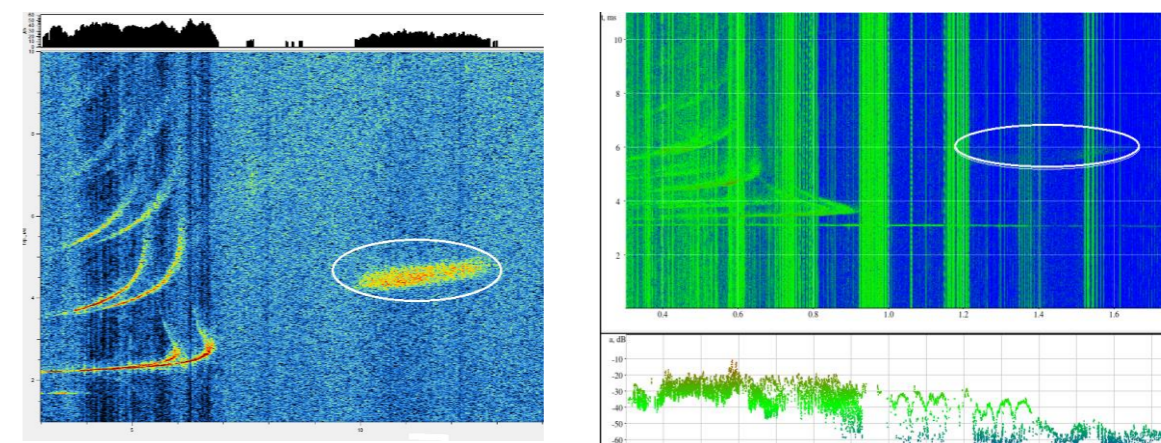


Рис. 1 Регистрация ракурсного рассеяния на индуцированных мелкомасштабных неоднородностях возмущенной области ионосферы 18/11/2022 14:41 UT в пунктах: Воронеж (левая панель) и Ростов-на-Дону (правая панель).

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. Т.177. №11. С.1145-1177. 2007.
2. Андронов И.В. Дифракция высокочастотной электромагнитной волны на вытянутом теле вращения // Радиотехника и электроника. Т.56. №11. С.1336-1342. 2011.

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СИГНАЛА ОТ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ДИПОЛЯ УСТАНОВКИ ЭРГУ-600

Ященко А.К., Сорокин В.М., Новиков В.А.

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

Установка ЭРГУ-600, расположенная в центральной части Бишкекского геодинимического полигона, предназначалась для глубинного зондирования земной коры, а также активных энерговодействий на геодинимическую среду. Она включает в себя генераторную установку, которая осуществляет преобразование электрической энергии первичного источника в последовательность импульсов тока, и нагрузку. В качестве нагрузки используется заземленный диполь-излучатель. Амплитуда импульсов достигает 600 А, а длительность варьируется в пределах 0.1-1000 с.

В работе рассмотрена генерация установкой ЭРГУ-600 электромагнитных возмущений на поверхности Земли и в верхней атмосфере с использованием модели источника и проводимости окружающей среды. В этой модели двухслойная плоскостойкая проводящая среда состоит из земной коры и атмосферы. Проводимость земной коры постоянна, а проводимость атмосферы экспоненциально растет с высотой. Обе проводимости изотропны. Такая модель не учитывает эффекта замагниченности ионосферной плазмы, который начинает влиять на высотах h_m более 70-80 км. Выше этой высоты поперечные компоненты электрического и магнитного полей переносятся вдоль направления геомагнитного поля без изменения. Можно предположить, что данная упрощенная модель описывает распространение электромагнитного возмущения до высоты h_m , а на больших высотах возмущение, по порядку величины, такое же, как и на высоте h_m . В качестве источника возмущения рассматривался горизонтально ориентированный короткий линейный ток, расположенный на поверхности Земли. В рамках данной модели было получено аналитическое решение, описывающее пространственно-временное распределение возмущения электромагнитного поля для монохроматического и произвольного периодического источников.

Результаты расчетов, произведенных как для монохроматического, так и импульсного периодического источников с параметрами, соответствующими установке ЭРГУ-600, показывают, что амплитуда электрического поля на высоте 70 км достигает 10 мкВ/м, а длительность его импульса – около 0.5-1 с. Амплитуда возмущения магнитного поля на поверхности Земли на частоте 1 Гц и расстоянии 5-10 км от источника составляет до 5 нТл. Электрические поля с рассчитанными амплитудами порядка от десятых долей до единиц мкВ/м в УНЧ-диапазоне, генерируемые различными источниками изучались теоретически и регистрировались экспериментально. Таким образом, результаты исследования качественно согласуются с цитированными работами и показывают, что установка ЭРГУ-600 может быть эффективно использована в целях изучения триггерных явлений в сейсмическом регионе.

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ НА ИОНОСФЕРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ: СОПРЯЖЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ ПОЛЯРНЫХ СПУТНИКОВ SWARM И РАДАРА EISCAT ESR

Лукьянова Р.Ю.

ИКИ РАН, Москва, renata@aari.ru

Продольный ток (ПТ) играет основную роль в передаче импульса и энергии между солнечным ветром, магнитосферой и ионосферой. Две основных крупномасштабные системы ПТ расположены на широтах 60-75° MLat: в утреннем секторе ПТ зоны 1 втекают в ионосферу, а расположенные экваториальнее токи зоны 2 вытекают из ионосферы. На вечерней стороне направление токов противоположно. В ионосфере ПТ замыкаются горизонтальными педерсеновскими токами. Область вытекающих из ионосферы ПТ ассоциируется с высыпаниями авроральных электронов. Теоретические оценки показывают, что в этой области электронная плотность (N_e) увеличивается (главным образом, в E-слое), и вся форма высотного профиля N_e изменяется. В области втекающего ПТ происходит локальное уменьшение N_e . Термоэлектрический эффект направленного вверх ПТ состоит в разогреве ионосферных электронов, а ПТ противоположной полярности приводят к локальному охлаждению. Экспериментальное подтверждение теоретических оценок локального изменения N_e и T_e в области ионосферы, занятой ПТ, получено при анализе событий одновременных спутниковых и радарных измерений. Группировка SWARM (высота ~500 км) состоит из трех идентичных спутников, на которых размещена комплексная полезная нагрузка, предназначенная для измерения магнитного поля, а также зонды Ленгмюра и ионные датчики для измерения характеристик процессов, которые могут локально изменять магнитное поле. По магнитным вариациям рассчитываются плотности ПТ над ионосферой. Радар некогерентного рассеяния ESR на Шпицбергене (78°N, 16°E) зондирует ионосферу в диапазоне 100-450 км с разрешением 3 км и временным разрешением 1 минута. События пролетов КА Swarm над работающим в режиме CP (луч вдоль магнитной силовой линии) показали, что ПТ наблюдаемой плотности (порядка единиц $\mu A/m^2$) существенно изменяют профиль N_e в E слое. На ночной стороне направленные вверх ПТ дают увеличение, а втекающие – уменьшение N_e в несколько раз. Поляризационное электрическое поле, возникающее из-за неоднородности плотности в полярной ионосфере, может управлять ПТ ионосферного происхождения.

**СЕКЦИЯ «Воздействие космических факторов на атмосферу
и климат Земли»**

Вторник, 07.02. 2023 г., комната ЦО (Line 3)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			Председатель: <u>Криволицкий А.А.</u>
1	09.00 – 09.15	Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А.	Виртуальная динамическая модель аврорального овала
2	09.15 – 09.30	Миронова И.А., Гранкин Д.В., Миронов А.Д., Розанов Е.В., Махмутов В.С., Базилевская Г.А.	Отклик озона на высыпания энергичных частиц
3	09.30 – 09.45	Ожередов В.А., Бреус Т.К.	Поиск геомагнитно обусловленных ритмов на экстремально длинных временных рядах психодинамики
4	09.45 – 10.00	Костров А.В.	Аномальная погода на Земле и космическая пыль
5	10.00 – 10.15	Левашов Н.Н., Царева О.О., Попов В.Ю.	Исследование доз радиации в атмосфере во время геомагнитной инверсии
6	10.15 – 10.30	Наговицын Ю.А.	Хронология солнечной активности и климат Земли
	10.30 – 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
			Председатель: <u>Председатель</u> Миронова И.А.

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

7	11.00 – 11.15	Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Маурчев Е.А., Миронова И.А.	Развитие метода восстановления энергетических спектров высыпающихся электронов по данным измерений в атмосфере
8	11.15 -11.30	Габис И.П.	Влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) на глобальное распределение общего содержания озона
9	11.30 -11.45	Веретененко С.В., Дмитриев П.Б.	Солнечные циклы в траекториях внетропических циклонов в Северной Атлантике
10	11.45 – 12.00	Караханян А.А., Молодых С.И.	Электрический ионосферный потенциал – альтернативный индикатор солнечного воздействия на нижнюю атмосферу
11	12.00 - 12.15	Новиков В.А., Сорокин В.Н., Яценко А.К., Мушкарев Г.Ю.	Теллурические токи, генерируемые излучением солнечной вспышки: физическая модель, численные оценки
12	12.15 -12.30	Кузнецова Т.В.	Связь длинно-периодных колебаний в солнечном ветре с солнечной активностью и извержением вулканов
	12.30 - 13.30	Пленарный час	
	12.30 -13.00	Gan Weiqun “ASO-S: the preliminary performance in the orbit”	
	13.00-14.30	Богачёв С.А., Леденцов Л.С. «Памяти Бориса Всеволодовича Сомова»	
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: <u>Криволицкий А.А.</u>			
13	14. 30 - 14.45	Мальнева И.В., Черкесов А.А.	Влияние космической погоды на активность опасных природных процессов на Северном Кавказе в 2002 и 2022 г.г.
14	14.45 -15.00	Подгорный А.И., Подгорный И.М., Борисенко А.В.	Конфигурация магнитного поля перед солнечными вспышками и время вспышек над АО 10365
15	15.00 – 15.15	Криволицкий А.А., Банин М.В., Куколева А.А.	Связь нижней ионосферы с циклом активности Солнца. Моделирование с помощью глобальной трехмерной модели

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

16	15.15 – 15.30	Рагульская М. В.	Космическая погода и парадоксы пандемии COVID-19
17	15.30 – 15.45	Высикайло Ф.И.	Импульсно-периодическая модель 4D процессов кумуляции и диссипации энергии в хвосте метеороида
	16.00 – 16.30	Перерыв на кофе	
			Председатель: <u>А.А. Криволицкий</u>
18	16:30 -17:00	Макаренко Н.Г., Волобуев Д.М., Князева И.С., Рыбинцев А.С.	Диагностика солнечно-земных связей: причинность и статистика
	17.00 – 17.30	Постерная сессия	

Постерные доклады

1. Кузнецова Т.В.

Периоды орбитального движения планет в спектрах геомагнитного поля и солнечной активности

2. Гонсировский Д.Г.

Модели исследовательского подхода при анализе соотносимости всплесков значений параметров солнечного ветра и проявлений опасных природных процессов

3. Гонсировский Д.Г.

Показательные примеры следов воздействия солнечноветрового фактора на природные среды в приповерхностной области Земли

4. Гонсировский Д.Г.

Исследование возможного влияния солнечноветрового фактора на активизацию геодинамических процессов

5. Лаптухов В.А.

.Корреляционная связь стратосферы со скоростью ветра в приземном слое атмосферы

6. Котов В.А.

На пути в климатический ад?

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ВИРТУАЛЬНАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Воробьева Г.Р., Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А.

ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия,

gulnara.vorobeva@gmail.com

Актуальность создания интерактивной информационной системы для визуализации геофизических параметров в авроральных широтах во многом определяется необходимостью мониторинга положения аврорального овала в процессе принятия решений в прикладных областях. Именно для указанных областей характерны наиболее выраженные проявления космической погоды, губительные для систем и объектов техносферы (например, сбои в системах радиосвязи и навигационных спутниковых системах GPS/ГЛОНАСС).

Анализ известных программных продуктов показал их низкую эффективность ввиду невозможности масштабирования и динамической визуализации, отсутствия интерактивности и инструментов геоинформационного профиля. Усугубляет проблему и отсутствие на известных ресурсах агрегированных данных об актуальном состоянии космической погоды.

В этой связи предложена и разработана веб-ориентированная интерактивная геоинформационная система, обеспечивающая динамическую визуализацию параметров аврорального овала с возможностью их пользовательского анализа геоинформационными методами и инструментами на основе реальных значений параметров космической погоды.

С точки зрения функциональности, разработанное приложение обеспечивает визуализацию следующих параметров в области аврорального овала: вероятность наблюдения невооруженным глазом свечения верхних слоев атмосферы, электрический и магнитный потенциалы поля в области северного аврорального пояса, а также различные типы авроральных высыпаний. Визуализация пространственных слоев доступна в статическом и динамическом режимах, что позволяет как анализировать значения соответствующих параметров в заданный момент времени, так и оценивать их динамику в течение определенного временного интервала с установленным пользователем шагом дискретизации. Поддержка геоинформационных инструментов и возможность управления внешним видом пространственного изображения расширяют возможности пользователей при работе с приложением по сравнению с возможными аналогами. Еще одной отличительной особенностью является представление в приложении агрегированных данных по космической погоде в соответствующие моменты времени, что также повышает информативность результатов работы приложения в целом.

С точки зрения качества, результаты проведенного тестирования разработанного приложения показали, что оно корректно выполняет свои функции. В экстремальных и исключительных ситуациях программные сценарии выдают необходимые сообщения о соответствующей ошибке и продолжают работу в штатном режиме.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-77-30010

1. Kozyreva, O. V., V. A. Pilipenko, R. I. Krasnoperov [et al.] (2020) Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents // *Annals of Geophysics*, 63, no. 2, GM219.
2. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Krasnoperov R. I. [et al.] (2020) Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the "virtual globe" technology // *Russ. J. Earth Sci.*, 20, p. ES6001, doi:10.2205/2020ES000721.
3. Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Reshetnikov A.G. [et al.] (2020) Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // *Scientific Visualization*, no. 12.3, p.108–118, doi: 10.26583/sv.12.3.10

ОТКЛИК ОЗОНА НА ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

**Миронова И.А.¹, Гранкин Д.В.¹, Миронов А.Д.¹, Розанов Е.В.¹, Махмутов В.С.²,
Базилевская Г.А.²**

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

² *ФИАН, г. Москва, Россия*

Энергичные электроны, ускоренные в земной магнитосфере и хвосте магнитосферы во время авроральных суббурь и геомагнитных бурь, высыпаются в атмосферу в высоких широтах. Первичные процессы приводят к образованию озono-разрушающих компонент атмосферы, таких как оксиды азота NO_x (NO, NO₂) и водорода HO_x (H, OH, HO₂), преимущественно в мезосфере и нижней термосфере (70—120 км) и запускают ионно- и нейтрально-химические реакции. Оксиды водорода могут мгновенно влиять на мезосферный озон, а оксиды азота могут переноситься вниз в стратосферу ниже высоты 45 км в крупномасштабных нисходящих движениях над полярными широтами зимой и разрушать озон в каталитических циклах. Поскольку озон является одним из ключевых компонентов радиационного нагрева и охлаждения стратосферы, изменения в его составе непосредственно влияют на температуру в стратосфере и запускают цепочку механизмов динамической связи, влияющих на температуру атмосферы и циркуляцию на больших территориях вплоть до тропосферы. Хотя основные процессы, ведущие от образования NO_x и HO_x в мезосфере и нижних слоях термосферы к потере стратосферного озона, достаточно хорошо изучены, остаются большие неопределенности в отношении частоты, силы и энергетического спектра высыпаний энергичных электронов.

В данной работе мы подробно исследуем ряд случаев высыпания электронов в разные периоды геомагнитной активности, анализируя наблюдения потоков электронов со спутников и наблюдений с баллонов, представляем расчет скоростей ионизации атмосферы во время геомагнитных возмущений с использованием восстановленных спектров высыпаний электронов, проводим оценку разрушения озона во время геомагнитных возмущений с использованием одномерных фотохимических радиационно-конвективных моделей с учетом ионной химии, а также даем оценку электронной концентрации в возмущенные периоды.

Работа выполнена в СПбГУ «Лаборатория исследования озонового слоя и верхних слоев атмосферы» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору 075-15-2021-583.

ПОИСК ГЕОМАГНИТНО ОБУСЛОВЛЕННЫХ РИТМОВ НА ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ПСИХОДИНАМИКИ ИНТЕРНЕТ-ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Ожередов В.А., Бреус Т.К.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

Достаточно давно в мире существует гипотеза о наличии ритмов, сходных по частотам с ритмами геомагнитной активности, в длинных рядах динамики цен на продукты [1]. В настоящем докладе мы демонстрируем, что внезапно появляющееся желание интернет-пользователей вынести свои философские взгляды на публичное обсуждение тоже не совсем случайно – в его возникновении играют роль периоды геомагнитной активности. Авторы проанализировали примерно полтора миллиона сообщений с крупнейшего научного форума, вычислив для каждого сообщения его т.н. «философский коэффициент» Q . Алгоритм формирования числа Q следующий: на основе заранее подготовленного корпуса текстов, помеченных экспертами как «философские», мы построили семантическое ядро, т.е. множество слов и словосочетаний, которые достаточно часто (и притом коррелировано) встречаются в данном корпусе и крайне редко – вне его (подробнее о кластерном методе построения семантических ядер в [2]); соответственно, количество элементов семантического ядра, встреченных в заданном сообщении, и будет его Q , а суммарный «философский коэффициент» всех сообщений за день будет отсчетом интересующего нас временного ряда $X(t)$. Проблема поиска ритмов в $X(t)$ состоит в том, что нас интересуют экстремально длинные трендовые компоненты (с характерным «временем возврата» порядка десяти лет), а этот ряд содержит коррелированные выбросы: спонтанно возникающие на форуме философские обсуждения в течение нескольких дней разрастаются до невероятных размеров, и затем в течении пары последующих дней интерес к ним сходит на нет. Мы разработали алгоритм способный фильтровать такие выбросы, и показали наличие нескольких геомагнитных периодов в полученном временном ряде.

1. Pustil'nik L.A., Din G.Y. // Sol Phys 223, 335–356 (2004).
2. Ожередов В.А., Бреус Т.К. // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 4. С. 231–240.

АНОМАЛЬНАЯ ПОГОДА НА ЗЕМЛЕ И КОСМИЧЕСКАЯ ПЫЛЬ

Костров А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kstr@ipfran.ru

В работе на основании наблюдательных данных представлены результаты о влиянии нестационарных и неоднородных потоков космической пыли на аномальные погодные явления на Земле. Такие импульсные во времени и в пространстве потоки наблюдаются на фоне квазистационарного потока отрицательно заряженной пыли с величиной 2000 кг/с, которая определяет глобальную электрическую цепь Земли [1], что позволяет объяснить многие физические процессы в атмосфере и ионосфере нашей планеты.

Ежегодно в одно и то же время Земля при движении вокруг Солнца попадает в рой комет. Наиболее интенсивные звездопады наблюдаются от комет Квадрантиды, Геминиды и Персеиды и пыль от этих комет с определенной временной задержкой достигает поверхности Земли и стимулирует Рождественские, Крещенские морозы и «бабье» лето.

Анализ ежедневных карт озона в атмосфере Северного полушария позволил связать локальные нестационарные возмущения озона с пространственно временными флуктуациями потока космической пыли. Этот результат свидетельствует, что космическая пыль, двигаясь к поверхности Земли из стратосферы со стоковой скоростью порядка 2 см/с за счет вязкого трения увлекает сверху холодный воздух, что приводит к аномальным изменениям погоды. Достаточно высокая корреляция возмущений озона на высотах 20-25 км с аномальными температурами на поверхности Земли через 10-13 суток позволил сделать вывод, что образование озона в атмосфере Земли связано в основном с потоками отрицательно заряженной космической пыли.

На основании лабораторных исследований и наблюдательных данных показано, что образование озона очень сильно зависит от температуры окружающего воздуха и этот факт позволяет объяснить суточные, сезонные, годовые, а также широтные зависимости содержания озона в атмосфере Земли. Таким образом, во многих случаях карты озона позволили заранее, за 10-13 суток, предсказать аномальные явления: температурные аномалии, в том числе внезапное похолодание, смерч, торнадо, проливной дождь.

Приводятся примеры связи локальных и нестационарных возмущений озона с погодными аномалиями на поверхности Земли в Северном полушарии. Особо высокая корреляция озонных возмущений с погодными аномалиями на Земле проявляется вдали от прибрежных районов, где существуют интенсивная циркуляция воздуха.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПФ РАН (тема № 0030-2021-0010)

1. Kostrov A.V. // Plasma Physics Reports. 2020. V. 46. P. 443.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗ РАДИАЦИИ В АТМОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ ИНВЕРСИИ

Левашов Н.Н., Царева О.О., Попов В.Ю.

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

Межзвездное пространство заполнено космическими лучами - частицами, которые представляют естественный радиационный фон в космосе. Энергии этих частиц достигают десятков ГэВ. Эти частицы активно бомбардируют землю [1].

Геомагнитное поле защищает нашу планету от роя заряженных частиц. Благодаря геомагнитному полю, наша планета теряет гораздо меньше атмосферы по сравнению с другими телами Солнечной Системы, где отсутствует подобное магнитное поле, например, Марс и Венера. Однако, геомагнитное поле Земли не статично и постоянно изменяется. Самые значительные изменения геомагнитного поля - инверсии т.е. смена направления магнитного поля. Начиная с 1900 произошло значительное смещение полюсов: северный сместился более чем на 2000 км, южный более чем на 1000 км. В тоже в настоящее время магнитный дипольный момент демонстрирует резкое уменьшение, с уменьшением примерно на 10% с 1840 года или на 0,5% за десятилетие. Таким образом, геомагнитное поле с течением времени постепенно уменьшается, а координаты магнитных полюсов медленно изменяются, что может говорить о начале процесса геомагнитной инверсии.

Мы рассматриваем численное моделирование прохождения галактических космических лучей через атмосферу Земли в момент инверсии, измеряем дозы радиации и сравниваем с сегодняшними значениями. Для моделирования взаимодействия высокоэнергетических космических частиц с атмосферой используется пакет для разработки программ geant4 [2]. Для параметризации атмосферы Земли при расчете прохождения протонов ГКЛ используется эмпирическая модель атмосферы NRLMSISE-00 [3]. Рассчитаны изменения доз радиации от высоты. Показано, что дозы радиации галактических космических лучей в момент инверсии существенно выше сегодняшних, что может негативно сказаться на высокотехнологичном оборудовании в полярных зонах, а также, на высотах ~ 10км, где летают самолеты.

1. Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Б.Б. Гвоздевский // Труды Кольского научного центра РАН. Гелиогеофизика. Т.10, №8, 2019
2. Agostinelli S et al. Geant4 - A Simulation Toolkit // Nuclear Instruments and Methods. 2003 A 506 P. 250-303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
3. Picone, J. & Hedin, AE & Drob, D. & Aikin, A. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparison and scientific issues. Journal of Geophysical Research. 107 10.1029/2002JA009430.

ХРОНОЛОГИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И КЛИМАТ ЗЕМЛИ

Наговицын Ю.А.^{1,2}

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, nag-yury@yandex.ru

²ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия

На основе исторических данных о пятнах, видимых невооруженным глазом, полярных сияний в низких и средних широтах – с одной стороны и радионуклидных данных из природных архивов – с другой, сравнены датировки шкал природных и летописных архивов. Подтверждено, что для Новой эры нет нужды сомневаться в правильности исторической шкалы, установленной Скалигером [1] и Петавиусом [2], вопреки исследованиям сторонников «Новой хронологии» (акад. А. Фоменко и др. <https://chronologia.org/>).

Отмечено также, что рассмотрение длительных изменений солнечной активности с использованием различных независимых прокси может помочь в определении надежности известных радионуклидных реконструкций и выявляемых в них длительных циклов магнитной активности Солнца. Показано, что прямые и косвенные данные об изменениях солнечной активности в прошлом достаточно хорошо соответствуют друг другу, и мы надежно представляем эти изменения в последние два тысячелетия. Средняя частота наступления грандиозных минимумов (типа Маундеровского) и грандиозных максимумов (типа Современного – во второй половине 20-го века) составляет порядка раз в 400 лет для каждого из таких эпизодов.

Грандиозные максимумы несут опасность планетной системе в виде гигантских вспышек, изменяющих состояние ионосферы, магнитосферы и верхней атмосферы планет, а грандиозные минимумы – в виде повышения потока галактических космических лучей, состав которых определяется высокоэнергичными протонами и ядрами гелия. Согласно некоторым подходам именно благодаря вариациям ГКЛ возможны значительные колебания земного климата.

Сделанные оценки полезны как для Земли, так и для потенциально обитаемых экзопланет.

1. Scaliger I. Opus novum de emendatione temporum. Lutetiae. Paris, 1583. Thesaurum temporum. 1606
2. Petavius D. De doctrina temporum. Paris, 1627.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

Махмутов В.С.¹, Базилевская Г.А.¹, Маурчев Е.А.^{2,3}, Миронова И.А.⁴

¹ФИАН, г. Москва, Россия, makhmutv@sci.lebedev.ru

²ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия

³ПГИ, г. Апатиты, Россия

⁴СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Проведение Физическим институтом им. Лебедева (ФИАН) регулярных измерений потоков заряженных частиц в атмосфере Земли позволило зарегистрировать с 1963 года более 500 случаев выпадений энергичных электронов в северных полярных широтах. Полученные экспериментальные данные представляют собой единственную в мире базу данных о выпадениях электронов, зарегистрированных непосредственно в земной атмосфере. Первичные потоки выпадения электронов поглощаются в верхних слоях атмосферы. Однако, генерируемые ими потоки вторичных фотонов могут проникать глубоко в атмосферу, иногда до высот 20-35 км, доступных для баллонных измерений ФИАН. В работе представлена новая методика восстановления спектра выпадения электронов, разработанная на основе моделирования методом Монте-Карло процесса распространения энергичных электронов в атмосфере. Показана применимость методики для имеющихся экспериментальных данных и представлены полученные результаты для отдельных событий, зарегистрированных в атмосфере.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-55-12020, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (grant no. SI 1088/7-1).

ВЛИЯНИЕ КВАЗИДВУХЛЕТНИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ (КДО) НА ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

Габис И. П.

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, gabis@aari.ru

Перенос озона от экватора, где он в основном образуется солнечным УФ-излучением, к средним и высоким широтам осуществляется крупномасштабной меридиональной циркуляцией Брюера-Добсона. Интенсивность циркуляции Брюера-Добсона изменяется с годовым периодом и максимальна в зимнем полушарии, что проявляется в сезонной зависимости распределения общего содержания озона (ОСО). Квазидвухлетние осцилляции (КДО) зонального ветра экваториальной стратосферы создают дополнительную меридиональную циркуляцию, которая изменяется с квазидвухлетним периодом и оказывает модулирующее влияние на сезонные вариации ОСО в средних и высоких широтах обоих полушарий.

Непрерывно изменяющаяся фазовая взаимосвязь между годовым (12 месяцев) и квазидвухлетним циклами затрудняет исследование эффектов КДО в вариациях глобального распределения ОСО. Определение механизма взаимовлияния годового и квазидвухлетнего циклов на процессы, обеспечивающие перенос озона от экватора к внетропическим областям, дополнительно осложняется тем фактом что, согласно общепринятому мнению, период КДО постоянно и нерегулярно изменяется в диапазоне от 17 до 38 месяцев.

Однако, квазидвухлетним осцилляциям ветра экваториальной стратосферы свойственны собственные сезонные закономерности, то есть определенная упорядоченность изменений относительно сезонов года. Учет этих сезонных закономерностей КДО обеспечивает строго ограниченное число возможных сценариев циклов КДО и возможных вариантов их соотношения с сезонами года. Это позволяет существенно сократить разнообразие вероятных комбинаций квазидвухлетнего и годового циклов и помогает прояснить характер изменений внетропического ОСО в зависимости от КДО.

Анализ глобального распределения ОСО с использованием данных наблюдений SBUV Merged Ozone Data Set (MOD) за 1970-2021 гг. показал, что межгодовая изменчивость ОСО в субтропиках, средних и высоких широтах зависит от чередования циклов КДО различных сценариев. Ключевые моменты вариаций ОСО четко связаны с определенными стадиями во время спусков восточного и западного режимов ветра КДО и создаваемой ими сезонно-зависимой КДО-циркуляции. Эти результаты противоречат общему мнению о сложности выделения эффектов влияния КДО на ОСО во внетропических областях из-за нерегулярно меняющегося периода циклов КДО, и могут быть использованы при сравнении смоделированных и наблюдаемых КДО озона, а также при долгосрочном прогнозе вариаций распределения ОСО от экватора до полярных областей.

СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ В ТРАЕКТОРИЯХ ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Веретененко С.В., Дмитриев П.Б.

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

Исследованы долговременные изменения основных траекторий (шторм-треков) внетропических циклонов в Северной Атлантике, рассчитанных по данным архивов MSLP (Mean Sea Level Pressure) [1,2] за 1873-2021 гг. Обнаружено, что в холодное полугодие (период наиболее интенсивного циклогенеза) средняя широта шторм-треков в области долгот от 60° до 10°W испытывает колебания с периодами ~80-100, ~40-47 и ~22 лет, что указывает на их возможную связь с вариациями солнечной активности. В максимуме векового цикла Глайсберга траектории циклонов были смещены к югу, тогда как в минимуме и на нисходящей ветви цикла – к северу. В западной части Северной Атлантике (области, где преобладают процессы формирования и интенсивного развития циклонов) вековые изменения широты составляют в среднем ~5 градусов. На бидекадной шкале обнаружено смещение траекторий циклонов к северу в четных циклах и к югу в нечетных. Эффект имеет наибольшую амплитуду (~2-3 градуса) на фазе спада и в минимуме солнечного цикла в восточной части Северной Атлантики (области, где чаще происходит заполнение циклонов).

Проведено сопоставление широты шторм-треков в западной и восточной частях Северной Атлантики с индексами NAO (North Atlantic Oscillation) [3]. Обнаружена положительная корреляция между широтой шторм-треков в исследуемых областях и значениями NAO, осредненными за холодные месяцы (октябрь-март). Показано, что в холодное полугодие индекс NAO испытывает колебания с периодами ~80, ~40 и ~22 лет, аналогичные колебаниям широты траекторий циклонов.

Поскольку траектории внетропических циклонов определяются положением полярного струйного течения, зависящим от интенсивности стратосферного полярного вихря, обнаруженные изменения траекторий циклонов свидетельствуют о колебаниях интенсивности вихря на вековой, мультидекадной и бидекадной шкалах. Возможной причиной вариаций состояния стратосферного полярного вихря являются изменения химического состава и температурного режима полярной стратосферы, обусловленные вариациями скорости ионизации за счет галактических космических лучей.

1. Climatic Research Unit, <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/pressure>
2. NOAA PSL, <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.surface.html>
3. Climatic Research Unit, <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ – АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИНДИКАТОР СОЛНЕЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИЖНЮЮ АТМОСФЕРУ

Караханян А.А., Молодых С.И.

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

Климатическая система подвергается влиянию процессов, происходящих на Солнце и в околоземном космическом пространстве. В настоящее время существуют различные индексы, характеризующие солнечную активность и ее воздействие на Землю. Индексы геомагнитной активности (aa, Kp, H_{pro}, AE, PC, Dst и др.) широко используются в современных исследованиях солнечно-тропосферных связей по нескольким причинам: 1) геомагнитные индексы характеризуют то солнечное воздействие, которое достигло Земли и зарегистрировано на магнитной станции; 2) геомагнитные индексы представлены длинными рядами наблюдений. Однако эти индексы отражают степень возмущенности геомагнитного поля и характеризуют короткопериодические возмущения, при этом в них изменения геомагнитного поля за временной интервал больше трех часов учитываются частично [1]. Кроме того, глобальность геомагнитных индексов является дополнительным недостатком в исследованиях солнечно-тропосферных связей, поскольку тропосферный отклик на солнечное воздействие неоднороден в пространстве.

Электромагнитное взаимодействие между компонентами системы магнитосфера-ионосфера-тропосфера является одним из возможных направлений солнечного влияния на нижнюю атмосферу. В рамках физического механизма, разрабатываемого в ИСЗФ СО РАН, мы предполагаем, что солнечная активность оказывает воздействие на радиационный баланс климатической системы, обусловленное изменениями в глобальной электрической цепи вследствие вариаций солнечного ветра и межпланетного магнитного поля [2]. Электрический потенциал (ЭП) ионосфера-Земля представляет важную роль в изложенном выше механизме. Целью данной работы является анализ возможности применения ЭП в качестве параметра, характеризующего влияние солнечной активности на нижнюю атмосферу.

Электрический ионосферный потенциал рассчитывался на основе полуэмпирической модели, в которой пространственное распределение потенциала определяется вариациями параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и AL индексом геомагнитной активности [3]. Мы усреднили ЭП для области широт выше 60° N и провели сравнительный анализ ЭП с обычно используемыми индексами геомагнитной активности. Данные о межпланетной среде и геомагнитные индексы использовались с часовым разрешением (OMNIWeb DATA - https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html).

Анализ отдельных геомагнитных возмущений показал, что вариации ЭП коррелируют с геомагнитными индексами. Следовательно, ЭП отражает степень возмущенности магнитного поля Земли и описывает короткопериодические возмущения, с характерным временем менее 3 часов. Долговременные вариации ЭП антикоррелируют с геомагнитными индексами и коррелируют с изменениями температуры, усредненной для области широт выше 60° N. Обнаруженная корреляция между долговременными вариациями ЭП и изменениями температуры подтверждает, что изменения параметров климатической системы связаны с более медленными изменениями крупномасштабного магнитного поля Солнца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

1. Гаврилов Б.Г., Ряховский И.А., Маркович И.Э., Ляхов А.Н., Егоров Д.В. // Гелиогеофизические исследования 2016. Вып. 15. С. 42.
2. Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. // Геом. и аэрономия 2020. Т. 60. С. 208.
3. Weimer D.R. // JGR: Space Phys 2001. V. 106. P. 407.

ТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ТОКИ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ: ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ И ВОЗМОЖНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Новиков В.А.¹, Сорокин В.М.², Яценко А.К.², Мушкарев Г.Ю.²

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова

Современные исследования солнечно-земных связей и возможного влияния космической погоды на сейсмическую активность основаны на статистическом анализе без детального рассмотрения возможных физических механизмов, что приводит к размытым и противоречивым выводам. Предлагается рассмотреть гипотезу об электромагнитном инициировании землетрясений резким всплеском теллурических токов в литосфере, включая сейсмогенные разломы земной коры, за счет взаимодействия рентгеновского излучения солнечной вспышки с системой "ионосфера-атмосфера-литосфера". Эта гипотеза основана на полевых и лабораторных экспериментах, проведенных в России в течение последних сорока лет, убедительно продемонстрировавших возможность инициирования землетрясений за счет подачи электрического тока в разлом земной коры. Представлена математическая модель и компьютерная программа для численных оценок теллурических токов, генерируемых излучением солнечных вспышек. Проведенные численные оценки показывают, что солнечные вспышки могут вызывать вариации плотности теллурических токов в разломах земной коры, сопоставимые с плотностями токов, генерируемых в земной коре искусственными импульсными электрическими источниками, способными инициировать землетрясения. Следовательно, инициирование сейсмических событий возможно не только искусственными источниками электрического тока, но и ионосферными возмущениями, вызванными сильными солнечными вспышками. На примере сильных землетрясений Китая и Новой Зеландии показана возможность использования данной модели для оценки сейсмической опасности в период вариаций параметров космической погоды, в частности, импульсных изменений геомагнитного поля, обусловленных сильными солнечными вспышками класса X.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта No 21-55-53053.

СВЯЗЬ ДЛИННО-ПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ИЗВЕРЖЕНИЯМИ ВУЛКАНОВ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Космический климат и космическая погода – бурно развивающийся раздел солнечно-земной физики. Цель исследования – выяснить, существует ли связь между космическим климатом, определяемым параметрами длиннопериодических компонент спектров модуля межпланетного магнитного поля (ММП) и скорости солнечного ветра (V), солнечными циклами и мощными извержениями вулканов. К анализу привлечены спектры модуля ММП и скорости V , полученные на основе измерений в солнечном ветре на 1 АЕ [1], данные о солнечных циклах (СЦ) последней версии ISN 2.0 [2] и мощных извержениях вулканов [3].

В спектре V нестационарная синусоида с средним периодом 54 года имеет наибольшую амплитуду. Амплитуда этих колебаний затухала до (1980±1) года и росла после. Эти годы изменения режима колебаний включают мощный максимум СЦ21 в декабре 1979, 2й по величине в 20м веке [2]. Для смены режима необходимы необычные условия на солнце. Следствием этих условий может быть извержение вулкана Сент-Хеленс в 1980 году с индексом вулканического извержения VEI 5, самым значительным извержением в США [3].

Ранее было показано, что вариация модуля ММП с наибольшей амплитудой в спектре и средним периодом 198 лет достигла максимума в (1990±1) году [1]. Показано, что этот максимум модуля ММП был вблизи максимума СЦ22 в ноябре 1989 г. В 1989 году произошла самая большая магнитная буря с начала космической эры (с 1957 года). Максимальной интенсивности буря достигла 13 марта, когда суточный планетарный индекс возмущенности A_p достиг третьего по величине значения за всё время наблюдений с 1932 года [4]. А в 1991 году произошло извержение вулкана Пинатубо с VEI 6, который пришел в состояние активности после 611 лет спячки. Извержение признано одним из 3х самых сильных в XX веке. Извержения с VEI 6 могут вызывать эффект вулканической зимы - похолодания в планетарном масштабе. Так извержение Пинатубо вызвало временное падение температуры на 0.5 °C. По разным оценкам энергия извержения Пинатубо в 10 раз превосходила энергию извержения таких вулканов, как Сент-Хеленс.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что временные изменения модуля ММП с периодом 198 лет и скорости солнечного ветра V с периодом 54 года с наибольшими амплитудами в спектрах близки по времени максимумам СЦ21 и 22, когда происходит генерация нового полоидального магнитного поля солнца. Сделано предположение, что происходило существенное изменение начальных условий процесса генерации полоидальной компоненты магнитного поля солнца под воздействием длинно-периодных колебаний. Показано, что на особенности рассмотренных колебаний большой амплитуды в солнечном ветре Земля отвечает извержениями вулканов. Причем извержение мощнее, если совпадают максимумы величин скорости V и модуля ММП (как в 1991 году при извержении Пинатубо).

1. Kuznetsova, T.V., Tsirulnik, L.B., 2008. Time changes of solar activity, interplanetary magnetic field and solar wind velocity at the Earth's orbit in different spectral bands. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 70, 254–260.
2. List of solar cycles: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles
3. List of large volcanic eruptions: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_large_historical_volcanic_eruptions
4. Кузнецова Т.В. Особенности годовых распределений частоты появления больших геомагнитных возмущений в четных и нечетных солнечных циклах. Астрономия - 2018. Том 2. Солнечно-земная физика – современное состояние и перспективы. 2018, стр. 122-125. DOI: 10.31361/eaas.2018-2.031. http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/confs/EAAS_XIII/vv2.pdf

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА АКТИВНОСТЬ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ В 2002 И 2022 ГОДАХ

Мальнева И.В., Черкесов А.А..

ФБГУ ВГИ, г.Нальчик, Россия, malnir@mail.ru

В 2022 году исполнилось 20 лет после катастрофических событий 2002 года на всей территории Северного Кавказа. Особенно большой ущерб принесли зимой и летом катастрофические паводки и связанные с ними экзогенные геологические процессы – подтопление территорий, оползни, сели, а в сентябре - обвал ледника Колка. Как 2002, так и 2022 годы являются экстремальными по проявлению катастрофических природных процессов, связанных с погодными условиями. Однако, проявление экзогенных процессов, в частности, оползней и селей, происходит по-разному.

В 2002 году сильные дожди наблюдались по всей территории Северного Кавказа. Пострадала территория от Краснодарского края до Дагестана, сильные дожди вызвали паводки и селевые потоки. Предположительно, что во всех районах Северного Кавказа выпали осадки 1% обеспеченности. В 2022 году активность опасных природных процессов была значительно меньше, с начала года количество осадков было невелико, особенно летом. Наиболее значительные сели формировались в результате длительных процессов обводнения моренных масс и формирования водного импульса с ледника (в случае р. Каяартысу). Выпадение осадков не играло главную роль в образовании селей.

Характер погоды в 2022 году существенно отличался от 2002 года. Следует отметить, что лето было не просто жарким, а чрезвычайно жарким, особенно в Западной Европе, характер погоды года был обусловлен соответствующим характером атмосферной циркуляции. Годы максимального развития в северном полушарии меридиональной северной и южной групп циркуляции неоднократно были годами природных катастроф, с ними связана и аномальная жара летом 2022 года

В различных публикациях авторами указывалось, что тенденция развития селей и других склоновых процессов на ближайшие годы в первую очередь определяется тенденцией изменения солнечной активности. В декабре 2019 года закончился 24 солнечный цикл и начался новый 25-й цикл (по данным spaceweather.com). Наступивший 25 цикл по новым предположениям специалистов будет выше, чем 24 цикл и скорее всего похожа 23 цикл. Если считать от 2019 года в 25 цикле, года его начала, подобная активизация вероятнее в 2023 – максимум – в 1925 г.

По-видимому, в ближайшие годы увеличение активности селей и других опасных природных процессов почти неизбежно, поскольку молодой солнечный цикл 25 набирает обороты (spaceweather.com). Так количество солнечных пятен в мае 2022 года более чем вдвое превысило [прогноз NOAA](http://prognosis.noaa.gov), что подготовило почву для относительно сильного солнечного максимума в начале 2025 года (по материалам spaceweather.com). Солнечная активность была высокой в течение всего 2022 года. В июне активные процессы происходили на обратной стороне Солнца. На земной стороне Солнца не было значительных корональных дыр. После 15 июня увеличивается количество солнечных пятен, особенно после 23 июня – так называемого «парада планет». 8 июля на Землю обрушилась сильная магнитная буря, солнце было очень активно. В августе Солнце также было очень активно, почти весь месяц скорость солнечного ветра превышала 500 км/с. 2 октября спутники на околоземной орбите наружили [солнечную вспышку самого высокого класса - X1](http://solnecnuju.vspysku.samoju.vysokogo.klassa.-X1). 2 и 3 октября – Земля находилась внутри потока солнечного ветра вытекающего из корональной дыры (spaceweather.com). Активность Солнца быстро расла. Высыпечный индекс достиг в это время наиболее сильного красного уровня. (thesis xras). Эти события могли послужить причиной выпадения аномальных осадков и селевого потока в это время в Приэльбрусье.

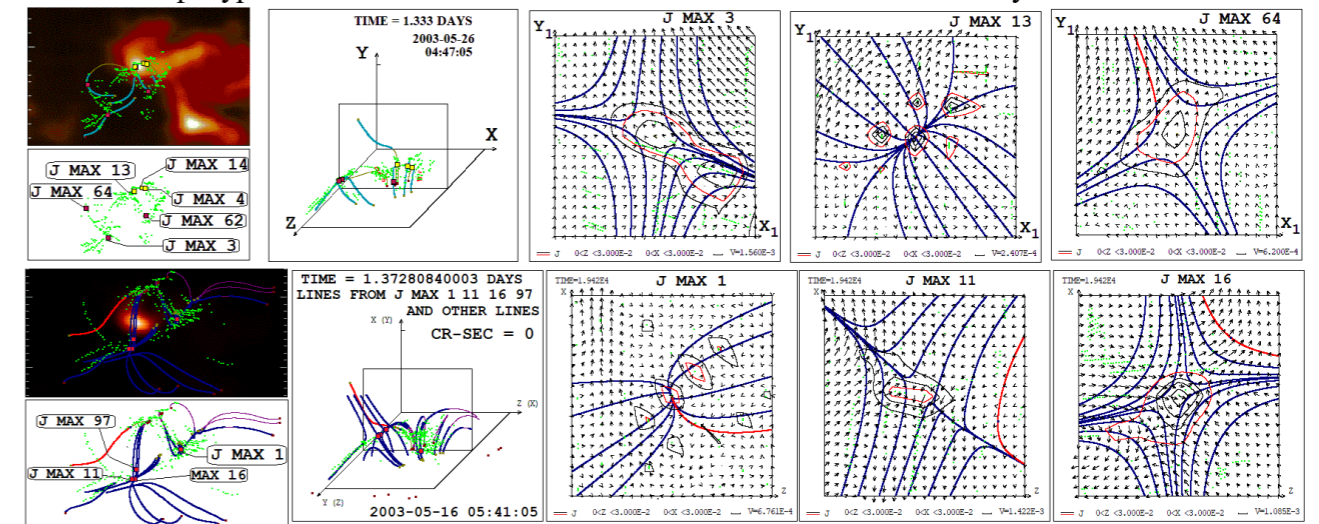
КОНФИГУРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕРЕД СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ И ВО ВРЕМЯ ВСПЫШЕК НАД АО 10365 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ

Подгорный А.И.¹, Подгорный И.М.², Борисенко А.В.¹

¹ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Продолжено исследование механизма солнечной вспышки путем магнитогидродинамического (МГД) моделирования в солнечной короне над реальной активной областью. При постановке задачи никаких предположений о механизме вспышки не делалось, все условия брались из наблюдений. Для изучения механизма солнечной вспышки, необходимо начинать расчет за несколько суток перед вспышкой, когда в короне еще не накоплена магнитная энергия для солнечной вспышки. Наблюдаемое появление вспышки высоко в короне может объяснить механизм вспышки, в котором происходит освобождение магнитной энергии токового слоя, образующегося в результате накопления возмущений в окрестности особой линии магнитного поля. С целью увеличения скорости расчета модернизировался алгоритм параллельных вычислений, осуществляемых вычислительными потоками на современных графических картах с использованием технологии CUDA. Параллельные вычисления позволили проводить МГД моделирование в реальном масштабе времени. Модернизирована ранее разработанная система графического поиска положений вспышек. Система поиска находит локальные максимумы плотности тока, поскольку они должны появляться, в частности, в центрах токовых слоев, далее проводится анализ конфигурации магнитного поля вблизи точек найденных максимумов.



Расчеты показали, что часто на конфигурацию магнитного поля X-типа наложено расходящееся магнитное поле, однако вследствие присутствия конфигурации X-типа в окрестности такой точки максимума плотности тока может образоваться достаточно мощный токовый слой. Сравнение результатов МГД моделирования с наблюдениями перед вспышками и во время вспышек показало расположение значительного количества точек максимумов плотности тока в области сильного излучения. На рисунке представлено сравнение с радиоизлучением на частоте 17 ГГц, наблюдаемым на радиогелиографе Нобеема (NoRH), для вспышки M 1.9 над активной областью АО 10365 (моменты 2003-05-26 04:47:05 и 05:41:05). Также значительная часть точек максимумов находится на сравнительно небольшом расстоянии от области сильного излучения (~10 Мм и меньше), что можно объяснить погрешностью численного метода и физическими процессами во время вспышки. На рисунке выделены точки максимумов плотности тока с номерами 1, 3, 4, 11, 13, 14, 16, 62, 64, 97, остальные положения максимумов плотности тока изображены зелеными точками.

СВЯЗЬ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ С ЦИКЛОМ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА. МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ CHARM-DE

А.А. Криволицкий, А.А. Куколева, М.В. Банин

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета, г. Долгопрудный М.О.,
Россия krivolutsky@mail.ru

Приводятся результаты трехмерного численного фотохимического моделирования изменений химического нейтрального и заряженного состава атмосферы Земли, вызванных вариациями УФ вариациями Солнца в цикле его активности. Для расчетов отклика на воздействие частиц была использована глобальная фотохимическая модель CHARM-DE (Chemical Atmospheric Research Model with D and E Regions), которая является модификацией модели CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions, [1]) а также модель общей циркуляции ARM (Atmospheric Research Model [2]). Результаты расчетов показали, что изменения электронной концентрации в ионосфере составляют около 20 % в полдень, что может повлиять, на условия распространения и поглощения радиоволн.

1. Криволицкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю., Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.

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, с. 808-828, 2015.

КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И ПАРАДОКСЫ ПАНДЕМИИ COVID-19

Рагульская М.В.

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

Пандемия COVID-19 оказалась парадоксальной в высокой разнице относительной смертности в различных странах (около 10 раз вместо 2 раз, характерных для обычного гриппа), в неэффективности локдаунов (менее 1%), а также в аномальных различиях успехов вакцинации по странам. Сравнительный анализ особенностей динамики развития в 2020-2022 годах пандемии COVID-19 в целом, и локальных эпидемий коронавируса в различных странах показал, что:

1. Пандемия COVID-19 не является уникальной, и протекает по закономерностям, характерным для пандемий минимума солнечной активности. Для них характерны существенные географические различия локальных эпидемий. В частности уровень заболеваемости, смертности и эффективности вакцинации в основном определяется не медицинскими или карантинными мерами, а доминирующей гаплогруппой населения страны.
2. Пандемия COVID-19 наиболее серьезна в странах с доминирующей гаплогруппой R1b. В первые две волны коронавируса разница в относительной смертности между странами с гаплогруппой R1b и R1a различалась в 5-7 раз (значения 16-30 в Португалии, Бельгии, Великобритании, Италии, Испании, Франции, Швейцарии против значений 3-6 в России, Иране, Индии) [1].
3. Эффективность массовой вакцинации также существенно зависит от генетического состава популяции в каждой из стран, а не от количества вакцинированного населения. Максимальное снижение относительной смертности после массовой вакцинации населения наблюдается в странах с гаплогруппой R1b (снижение в 5 - 8 раз). Однако в странах с гаплогруппой N и N+R1a относительная смертность к 2022 наоборот увеличилась в 2- 4 раза (Финляндия, Россия). При этом проценты вакцинированного населения в странах Западной Европы с гаплогруппой R1b и Финляндией с гаплогруппой N идентичны (более 80%).
4. Жесткие локдауны активируют негативные последствия для человеческой популяции в системе «коронавирус – человечество» (как системе «хищник – жертва») с увеличением дополнительных потерь населения до 3-4 раз. К 2022 году вместо затухающих волн пандемии сформировались устойчивые автоколебательные волны заболеваемости и смертности от COVID-19, особенно в странах с ограниченным размером территории и жестким локдауном в первую волну коронавируса (Португалия, Чехия, Грузия, Израиль). Причем смертность в последующие волны коронавируса были примерно в 3 раза дольше, и в 2 раза выше, чем в странах с генетически родственным населением в условиях мягкого локдауна.
5. С ростом солнечной активности для стран с доминантной гаплогруппой R1b эффективность массовой вакцинации снижается в 2-3 раза. В настоящее время относительная смертность в странах R1b опять превышает значения смертности в странах с доминантными гаплогруппами (N, R1a и N+R1a) в первую-вторую волны коронавируса.

Влияние этих разнонаправленных процессов на пандемию коронавируса в максимуме 25-го цикла солнечной активности требует дальнейшего изучения.

1. Ragulskaya M. Solar activity and COVID-19 pandemic // Open Astron. 2021; V 30, n. 1. P. 149

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ 4D ПРОЦЕССОВ КУМУЛЯЦИИ И ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ХВОСТЕ МЕТЕОРОИДА В ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНОЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Высикайло Ф.И.

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

На базе экспериментальных данных, полученных при изучении челябинского метеороида доказываются формирование за метеороидами поляризованного плазменного хвоста в 20 км с положительно заряженным цилиндрическим жалом, в котором формируется, фокусируется и ускоряется пучок высоко энергичных электронов до энергий в 20 ГэВ. При достижении пучком электронов метеороида он в импульсно-периодическом режиме разрушает метеороид, см. рис. Так высоко энергичным пучком электронов осуществляется кулоновский взрыв метеороида [1]. Предложенная импульсно-периодическая 4D модель разрушения метеороида в электроотрицательной атмосфере Земли и формирования протяженного (~20 км) плазменного хвоста за метеороидом объясняет все сопутствующие такому разрушению явления: акустические ("пулеметные очереди", шипение), электрические, фотографические (перистые облака, выброс частей метеороида вперед по движению метеороида) и др. **Расчеты параметров явлений делаются на базе имеющихся данных и теоремы вириала.** Модель является общей для объяснения явлений в межгалактических молниях, анодо- и катодо-направленных молниях в атмосфере Земли, гелиосфере и явлений в аналогичных плазменных кумулятивно-диссипативных андрогинных структурах в газовом разряде [2].

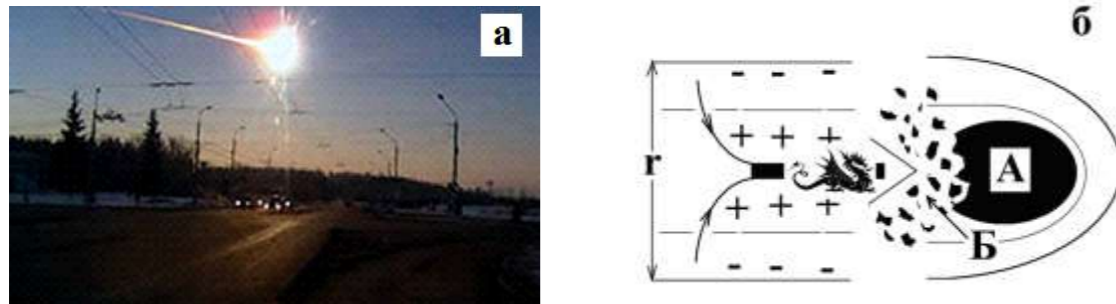


Рис. Разрушение метеороида, догоняющим пучком высоко энергичных электронов:

а) фото Марата Ахметвалеева кулоновского взрыва, разносящего метеороид «Челябинск 2013» на многие части, летящие даже вперед метеороида. Явление явно носит электрический характер, как и искрение контактов в троллейбусе или катодном пятне «плюющиеся кусками» катода к аноду.

б) схема кумулятивно-плазменного механизма **фрактального** дробления метеороидов, инициируемых кулоновским взрывом. Этот механизм предложен автором в 2013 г.[2] и детализируется в данной работе. А - быстро движущийся в электроотрицательной среде объект. Б – взрывающиеся осколки, формирующие реактивный двигатель за объектом А и разрушающие его одновременно сзади, тем поставляющие в двигатель новое высокоэнергетичное «топливо» с 200 эВ на атом уже твердотельного топлива.

1. Высикайло Ф.И. Электроотрицательная атмосфера Земли на защите от метеороидов. // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С. 361. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

2. Высикайло Ф.И. Detailed Elaboration and General Model of the Electron Treatment of Surfaces of Charged Plasmoids (from Atomic Nuclei to White Dwarves, Neutron Stars, and Galactic Cores): Self-Condensation (Self-Constriction) and Classification of Charged Plasma Structures—Plasmoids. Part III: Behavior, Variation, and Synergetism of Positively Charged Cumulative–Dissipative Plasma Structures (+CDS) under External Actions. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry 2013. 49. № 3. P. 222-234. DOI: 10.3103/S1068375513030125.

ДИАГНОСТИКА СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ: ПРИЧИННОСТЬ И СТАТИСТИКА.

Макаренко Н.Г., Волобуев Д.М., Князева И.С., Рыбинцев А.С.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, ng-makar@mail.ru

Динамические связи между Солнечной Активностью (СА) и климатом Земли принято диагностировать, используя контекст обобщенной синхронизации. Он предполагает, что фазовые переменные 2-х динамических систем связаны непрерывной и дифференцируемой, в общем случае, неявной функцией. Принято считать, что СА - управляющая система (driver), а климат- управляемая (response) система. Поэтому упомянутый контекст ограничивают лишь односторонним вариантом. Основная трудность обнаружения такой связи по наблюдаемым временным рядам связана с тем обстоятельством, что в шкале энергий, вариации СА на несколько порядков величин меньше энергии типичного крупномасштабного атмосферного вихря. Найти подходящий нелинейный усилитель в цепи управления СА-климат совсем непросто.

Тем не менее, причинную синхронизацию пытаются обнаружить двумя способами. Первый, основан на проверке реальности предполагаемого *непрерывного* отображения фазовых траекторий СА динамики, в фазовый портрет климата. Псевдофазовые портреты получают получают техникой топологического вложения временных рядов, в подходящее по размерности, евклидово пространство, следуя идеям теорем Манье-Такенса. Проверяется собственно *непрерывность* отображения пары близких точек из фазовой геометрии драйвера, на их образ, на геометрии второй системы. Второй способ основан на оценках качества предсказуемости AR модели временных рядов климата, при добавлении фрагментов ряда, продуцированного драйвером, т.е. СА. Этот ARMA тест для обнаружения причинной связи по временным рядам был предложен Клайвом Грейнджером [1].

В докладе обсуждаются корректность применения обеих упомянутых методов. Мы отмечаем, что в первом из них, статистика используется в применении к эффектам причинности, modus operandi которых лежит вне самой статистики. Примером этой ситуации является известный парадокс Лорда [2,3]. Во втором способе, функциональное представление («координаты» Вольда) случайного процесса используют для обнаружения эффекта причинности. Но AR схема является лишь безэнтропийным фильтром, превращающим временную последовательность в белый шум[4] и не способна обнаружить необратимость ряда.

1. Granger C.W.J.//J.Econ.Dynam.and Control, 1980,V. 2.P. 329
2. Lord F.M. // Psychological Bull. 1967. V. 68. P. 304.
3. Pearl J., Mackenzie D. *Book of Why*, NY.2018. <http://bayes.cs.ucla.edu/WHY/>.
4. Sir M.Kendall, J.K.Ord. *Time Series*, Oxford. NY.1990

ПЕРИОДЫ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЛАНЕТ В СПЕКТРАХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Спектр самого длинного ряда геомагнитного склонения (D) с 1810 года (Хартланд) был рассчитан Методом Глобального Минимума (МГМ) с доверительной вероятностью 99,8%. Угловые измерения D были значительно точнее, чем измерения других компонент в прошлом, что позволило получить достаточно точные результаты. Для поиска общих периодов в спектрах D и солнечной активности использовался спектр чисел Вольфа (W) с 1700 года [1]. В настоящем исследовании было рассчитано большое число периодов соединений орбитальных движений планет солнечной системы и их гармоник, чтобы решить вопрос о возможности приливных сил планет вызывать общие периоды в спектрах геомагнитного поля и солнечной активности.

Тренд в спектре D имеет наибольшую амплитуду и описывается нестационарной синусоидой с периодом T~334 года. Точность определения периода (T) невелика для установления его происхождения, но самосогласованное извлечение тренда из данных является более точным методом, чем используемые обычно. Наибольшая амплитуда (после тренда) у стационарной компоненты с средним T= 85.7 лет, которая является 2й гармоникой соединения Урана и Нептуна с T=171.4 лет. Этого периода нет в МГМ спектре чисел Вольфа W. Нестационарную компоненту с средним T=28.25 года рассматриваем как 2ю гармонику цикла Фрица с T~56 лет, давно обнаруженного в данных полярных сияний и солнечных пятен, и как 6ю гармонику соединения Уран – Нептун с T=28. 57 л.

Анализ показывает, что геомагнитное поле чувствительно к определенным линиям солнечного спектра, не всегда мощным. Это демонстрирует нестационарная компонента с T=4.25 года спектра D, у которой вторая по величине амплитуда в диапазоне периодов меньше 26 лет. В солнечном спектре W она имеет малую мощность (ниже, чем доверительный уровень 95%).

Проведен сравнительный анализ всех компонент спектров D и W. Анализ показывает, что в спектре W присутствуют периоды соединения Сатурн–Уран и Юпитер–Нептун, а также гармоники соединения Юпитер–Сатурн и Юпитер–Уран. Анализ показывает также, что в спектре D наиболее часто представлены гармоники периода соединения Уран – Нептун, но есть и гармоники соединений Юпитер–Сатурн (ЮС), Юпитер–Уран (ЮУ) и Юпитер–Нептун (ЮН). Таким образом общее в спектрах W и D – это разные гармоники соединений ЮС, ЮУ и ЮН.

Показано, что 12 гармоник периода соединения Уран-Нептун 171.4 года присутствуют в спектре вариаций геомагнитного склонения D с доверительной вероятностью 99,8 %. Результат указывает на важность этого цикла в генерации геомагнитного поля. Важным результатом является нестационарное поведение большинства гармоник в спектрах. Все нестационарные гармоники демонстрируют нелинейный механизм генерации. Показано, что приливные силы планет могут вызывать резонансные периоды в рассмотренных спектрах.

1. Kuznetsova T.V. and Tsurulnik L.B. Spectral analysis of solar activity, geomagnetic field, global temperature data and tide forces of the planets. In the book: Historical case studies in physics and geophysics, ed. by W. Schroeder, Science Edition of AKGGKP, Bremen/Postdam, Germany, 2001, p. 159-178.

МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОДХОДА ПРИ АНАЛИЗЕ СООТНОСИМОСТИ ВСПЛЕСКОВ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ПРОЯВЛЕНИЙ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Гонсировский Д. Г.

г. Москва, Россия, t.ilatovsky@yandex.ru

В арсенале находились такие модели: табличные, множественной графической корреляции, с анализом доказательственных датированных привязанных к точкам пространства изображений объектов и отрывков из текстов. Рисунок здесь - пример соединения таблиц с информативными исходными материалами.

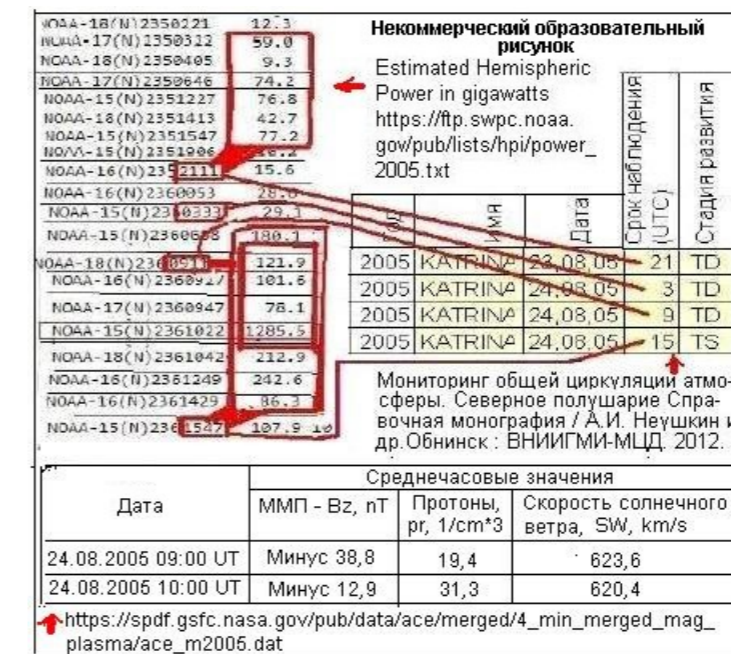


Рис. Аналитическое сопоставление баз данных NASA, NOAA POES и ВНИИГМИ-МЦД

Таблицы главных образом служили необходимой основой дальнейших графоаналитических способов доказать наличие соотносимости всплесков значений параметров солнечного ветра и проявлений опасных природных процессов. Сначала множественная графическая корреляция¹ базировалась на неизменённых временных рядах (см. тезисы-1 автора здесь по соседству), затем на временных рядах с данными, нормализованными по размаху их значений (вариант - эндпроценты²)³. В этом же комплексе находился и способ изучения степени сходства в многовременном ходе показателей с помощью интегральных кривых аномалий их модульных

коэффициентов. Среди изобразительных материалов весьма полезными оказались фото- и аэрокосмоснимки. Примеры приводятся выше (см. тезисы-2 автора здесь по соседству) и в литературе⁴. В текстовой модели использовалось явление периодичности повторения во времени активизации выбросов плазмы Солнца. Измеряя числами Бартельса, видим следующее. Их было 3 от времени землетрясения в Шемахе 11.06.1859 г. до события Каррингтона 1859 г. (когда Земля была поражена из сверхактивной области Солнца) и 65 после последнего, когда на севере Чёрного моря 14 ноября 1854 г. разразился погубивший много кораблей ураганный шторм. Косвенно подтверждает выход Тунгусского плазмоида из Солнца пролёт за 2 числа Бартельса до этого события там же болида 4 мая 1908 г.

¹ Гонсировский Д.Г., Хаджиев М.М. Графический метод ежесуточной прогнозной оценки опасности возникновения гляциальных селей // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций : Докл. VIII науч.-практ. конф. (8 – 10 окт. 2008 г., Санкт-Петербург, Центр «Антистихия»). М., 2009. С. 284 – 296.

² Эндпроцент – единица измерения, применяемая для документации итогов арифметических операций, при которых разность между текущими значениями членов данного временного ряда и наименьшим его значением делится на разность между наибольшим и наименьшим значением членов данного временного ряда. Полученные результаты умножаются на сто.

³ https://plasma2022.cosmos.ru/docs/2022/Plasma-2022-AbstractBook_v4.pdf [С. 220 - 222];

⁴ <https://www.skgmi-gtu.ru/Portals/0/Centres/RIU/Sborniki/VNPK-Kolka-2022.pdf> [С. 164 - 186].

ПОКАЗАТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕРЫ СЛЕДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОВЕТРОВОГО ФАКТОРА НА ПРИРОДНЫЕ СРЕДЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ЗЕМЛИ

Гонсировский Д. Г.

г. Москва, Россия, t.ilatovsky@yandex.ru

Выводы автора, в частности, основываются на исследовании следов событий. Ниже излагаются указания на эти следы. На рисунке показаны, по А. Л. Дунцу, физические основы динамики инжекций. Это же мнение он имеет и по кратерам Ямала¹. Отчасти сведения о



Рис. Иллюстрация процесса солнечноветрового инжекционного воздействия на ландшафты Земли

синхронно соответствовали колебания уровня воды в ледниковом оз. Башкара⁶. Широко известны формы поражения территории т. н. Тунгусским метеоритом (солнечноветровым плазмидом, по А.Н. Дмитриеву и В.К. Журавлёву, 1984 г.). Здесь же в перечень деформаций природной среды следует включить и 12 глубоких дыр в земле⁷. Возможно, в 1908 г. в районе р. Кова (на расстоянии около 400 км к югу от места падения т. н. Тунгусского метеорита) прожигание такой же дыры в земле привело к подземному пожару угля⁸. В урочище Джаракудук интрузия пучковой инжекции в верхи литосферы создала из материнских песков (после процесса дугового разряда плазмы) «лес» спёкшихся столбцов⁹.

¹ <https://a-dunc.livejournal.com/99342.html>; <https://www.youtube.com/watch?v=nUMXYsEJaT8>

² <https://www.skgmi-gtu.ru/Portals/0/Centres/RIU/Sborniki/VNPK-Kolka-2022.pdf> [С. 164 - 186];

³ <https://fishki.net/2628832-mownejshij-liveny-nad-avstrijskim-ozerom-v-tajmlaps-rolike.html>;

⁴ <https://www.youtube.com/watch?v=2xb9-17YxKs> (видео); <https://www.kp.ru/daily/26996.7/4057164>; ___

⁵ Деснов Л.В. Угроза пульсирующего глетчера // Газ. Труд-7. 2005. 22 февраля. С. 30;

⁶ https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/pdf/ZhZemli_T39-2_2017.pdf [С. 147 - 154];

⁷ https://dzen.ru/a/Y2PSeo-u92W_Qq1A; ___

⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=sYrFAaBnWic&t=2s>;

⁹ <http://www.hydrogen-future.com/news/92-kamennye-truby-pustyni-kyzylkum.html>; <https://www.hydrogen-future.com/list-c-phenomen/94-video-kamennye-truby-pustyni-kyzylkum.html>

соответствующих объектах изучения автор тезисов осветил в публикации². Ниже в качестве аргументации положений инжекционной гипотезы приводится перечень пополнений в базе материалов наблюдений. В тропосфере в целом наглядные (из космоса) примеры демонстрировали возвышавшиеся над ураганами и тайфунами “hot towers” (конденсационные следы внедрения инжекций). В Австрии 10.06.2018 г. сделали видео столба ливня (микрорыва), прорвавшегося сквозь перфорацию в облаке³. Пролёт 30 июня 1908 г. Филимоновского (возле г. Канска) плазмоида (увязываемого с Тунгуской)⁴ оставил после себя в воздухе и на земле зримый след. За 8,5 часов до схода ледника Колка была замечена предтеча катастрофы - бугры пучения его 150-метровой толщины льда⁵. Летом 2008 г. вариациям мощностей авроральной активности в Северном полушарии

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОГО ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОВЕТРОВОГО ФАКТОРА НА АКТИВИЗАЦИЮ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (ВУЛКАНЫ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ)

Гонсировский Д. Г.

г. Москва, Россия, t.ilatovsky@yandex.ru

Проработка фактических материалов даёт основание автору в отдельных случаях начало извержения «спящих» вулканов соотносить с воздействием инжекционного проникновения собранной в пучок и возбуждающей геологическую среду энергии корпускулярного излучения Солнца. Попадание подобных инжекций в магматические камеры вулканов явно

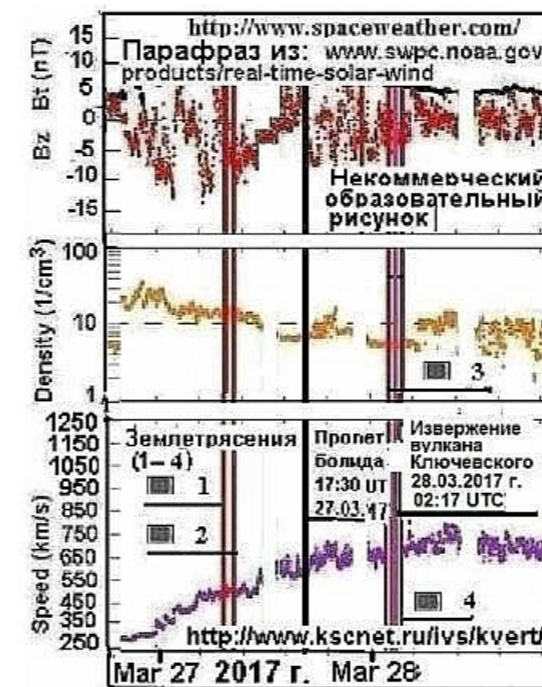


Рис. Начало извержения вулкана Ключевского и землетрясений в регионе в соответствии со всплесками значений параметров солнечного ветра

могут послужить триггерным энергетическим толчком и привести к извержениям. На материалах события Каррингтона 1859 г. показана гипотетическая подверженность Камчатки (и Большого Кавказа) неблагоприятным ситуациям, соотносимым с проявлениями космопозависимой геодинамики. В качестве мысленной модели возможного пути развития геодинимических событий взяты случай взрыва почти 650 лет молчавшего вулкана Камбального и момент активизации вулкана Ключевского на Камчатке. Методом графической корреляции события увязываются с воздействием на Землю всплесков мощности потока энергии солнечного ветра. Взрывное извержение вулкана Камбального произошло 24.03.2017 г. в 21:20 UT. Перед этим отмечались следующие всплесковые значения значимых факторов. Скорость плазмы солнечного ветра (SW) - до 687 км/с, плотность протонов (pr) - до 50,1 1/см³. Отрицательные значения показателя ММП Bz - до - 17 нТл. В полярной области синхронно интенсивно проявляли себя северные сияния. К площади расположения вулканов Камбального и Ключевского оказалась приуроченной глубокая, до 80 и более метров, и радиусом примерно в 50 км, депрессия топографической поверхности геопотенциала 500 гПа. Внимание уделено тем землетрясениям¹, у которых глубина очага составляет до 15 км.

Вместе с данными по вулкану Камбальному приведенный здесь рисунок объясняет жизнённость основанной на базовых понятиях физики солнечно-земных связей гипотезы, касающейся триггерного механизма начала извержений вулканов. Могла бы быть солнечноветрового происхождения и плазма, обволакивавшая ядро болида (как и других болидов). Наличием инжекций компонент геоэффективного солнечного ветра в роли триггера можно объяснить начало 20.03.2010 г. извержения молчавшего две сотни лет вулкана Эйяфьядлайёкюдль (SW - до 500 км/с, pr - до 16,4 1/см³, Bz - до - 4,1 нТл).

Целевое исследование инжекционного поражения может быть ориентировано на изучение возможности возникновения опасностей, которые могут исходить от «дремлющих» и подготовленных к своей активизации вулканов Эльбрус и с меньшей вероятностью Казбек.

¹ https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/pdf/ZhZemli_T42-3_2020.pdf [С. 283 - 292];

https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/phf/ZhZemli_T43-1_2021.pdf [С. 29 - 40];

<https://www.skgmi-gtu.ru/Portals/0/Centres/RIU/Sborniki/VNPK-Kolka-2022.pdf> [С. 180 - 183].

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ СТРАТОСФЕРЫ СО СКОРОСТЬЮ ВЕТРА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В.А. Лаптухов

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

В северном полушарии Земли обнаружена сильная корреляция между годовыми значениями температуры стратосферы и годовыми значениями скорости ветра в приземном слое атмосферы. Коэффициент корреляции составил 0,84. Аналогичная корреляция скорости ветра с температурой тропосферы по абсолютной величине значительно меньше и составила -0.55.

Данные температуры стратосферы были взяты для северного полушария Земли на сайте: http://www.meteo.ru/climate_var/isklim/2.htm. На этом сайте представлены месячные данные температуры стратосферы и тропосферы с 1958 года по 2004 год. В исходном файле аномалий четыре столбца: год, месяц, аномалия температуры тропосферы (слой 850-300 гПа), аномалия температуры нижней стратосферы (слой 100-50 гПа). Месячные данные температур стратосферы и тропосферы усреднялись по году. Данные по средней скорости ветра представлены на сайте: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=17>. На этом сайте имеются трехчасовые данные наблюдений средней скорости ветра с 1966 года по 2021 год для 515 российских метеорологических станций. Исходя из этого, получены среднегодовые значения скорости ветра для каждой станции. Усреднение по году велось с учетом пропусков. Далее годовые значения скорости ветра были усреднены по всем 515 станциям.

НА ПУТИ В КЛИМАТИЧЕСКИЙ АД?

В. А. Котов

КрАО РАН, п. Научный, Бахчисарайский р-н, Крым 298409, Россия, vkotov@craocrimea.ru

В связи с “глобальным потеплением” на Земле исследовалась переменность общего магнитного поля Солнца, вызванная его вращением. Всегда ли магнитное Солнце вращается правильно? На основе наблюдательных данных, полученных в КрАО и шести других обсерваториях мира за последние 55 лет (1968–2022 гг., более 28 тыс. суточных значений средней напряжённости продольного поля видимой солнечной полусферы), определён синодический период вращения Солнца как звезды, 27.027(4) сут, и период экватора, 26.927(7) сут. После 1993 г., однако, когерентное вращение “магнитного экватора” распалось, сменившись хаотическим (Солнце “остановилось”). Явление может быть связано с аномальным поведением циклов 23 и 24, сопровождавшимся глобальным изменением земного климата при неясном механизме влияния Солнце–Земля. Беспорядок на Солнце – хаос погоды на Земле?

СЕКЦИЯ «Космическая погода»

Четверг, 09.02.2023 г., комната 202 (Line 2)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
Председатель: <u>Калегаев В.В.</u>			
1	09.00 – 09.15	Курочкин Е.А., Петерова Н.Г., Топчило Н.А., Шендрик А.В.	Прогнозирование вспышек в активных областях Солнца на основе физического и статистического анализа микроволновых данных
2	09.15 – 09.30	Смирнов Д.Н. , Доленко С.А. , Мягкова И.Н.	Прогнозирование потока F10.7 с помощью методов машинного обучения
3	09.30 – 09.45	Ишков В.Н.	Прогноз геоэффективных солнечных активных явлений: практические вопросы
4	09.45 – 10.00	Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Вахрушева А.А., Калегаев В.В., Еремеев В.Е.	Прогнозирование геоэффективных КВМ в 24 цикле солнечной активности
5	10.00 – 10.15	Слемзин В.А., Родькин Д.Г., Шугай Ю.С.	Оптимизация прогноза возмущений солнечного ветра, связанных с корональными выбросами массы, при использовании модели магнитодинамического торможения
6	10.15 – 10.30	Родькин Д.Г., Слемзин В.А., Шугай Ю.С.	Определение солнечных источников межпланетных корональных выбросов массы с помощью обратной модели магнитодинамического взаимодействия солнечного ветра в гелиосфере
	10.30 – 11.00	<i>Перерыв на кофе</i>	
7	11.00 – 11.15	Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А.	Эмпирическая модель оценки скоростей и запаздываний межпланетных корональных выбросов массы
8	11.15 – 11.30	Каримов Э.З., Широкий В.Р., Баринов О.Г., Доленко С.А., Мягкова И.Н.	Существенность входных признаков для доменной адаптации данных космических аппаратов
9	11.30 – 11.45	Гаджиев И.М., Баринов О.Г., Мягкова И.Н., Доленко С.А.	Использование методов классификации данных для прогнозирования уровня возмущённости геомагнитного поля по индексу Kp
10	11.45 – 12.00	Золотарев И.А., Бенгин В.В.,	Моделирование характеристик чувствительности полупроводниковых

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

		Садыков А.М., Антонюк Г.И., Нечаев О.Ю., Сазонова А.В., Седых П.В., Оседло В.И.	детекторов прибора КОДИЗ
11	12.00 – 12.15	Владимиров Р.Д., Широкий В.Р., Баринов О.Г., Доленко С.А., Мягкова И.Н.	Оценка важности входных признаков в задаче прогнозирования потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли
	12.15 – 12.30	Зайцев А.Н., Канониди К.Х., Петров В.Г., Лукьянова Р.Ю.	База геомагнитных данных, Ямал, 1972 – 2022
	12.30 – 13.30	Пленарный час	
	12.30 – 13.00	Пулинец С.А.	Высокочастотная радиоспектрометрия космической плазмы. прошлое и будущее
	13.00 – 13.30	Морозова Л.Н.	А.Л. Чижевский и С.П. Королев
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: Ишков В.Н.			
12	14.30 – 14.45	Крашенинников И.В., Чумаков С.О.	Метод ИНС в задаче долгосрочного прогнозирования индексов солнечной активности
13	14.45 – 15.00	Трошичев О.А.,	Магнитная активность в полярных шапках (РС индекс) как показатель двух механизмов воздействия солнечного ветра на магнитосферу
14	15.00 – 15.15	Коган Л.П., Вольвач А.Е., Бубукин И.Т, Вольвач Л.Н., Ревунова Е.А.	О сопоставлении свойств статистики измерений магнитного поля в период перед землетрясением для пространственно удаленных магнитометров
15	15.15 – 15.30	Березин И.А., Тлатов А.Г.	Геометрия коронального магнитного поля и скорость солнечного ветра
16	15.30 – 15.45	Загайнова Ю.С., Громов С.В., Громова Л.И., Файнштейн В.Г.	Сравнение регистрации внезапного начала магнитной бури по данным с минутным и секундным разрешением
17	15.45 – 16.00	Сахаров Я., Селиванов В., Аксенович Т., Соколова О.	Непрерывная регистрация геомагнитно-индуцированных токов в региональной энергосистеме: конфигурация сети и экстремальные значения ГИТ
	16.00 – 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель: Мерзлый А.М.,			
18	16.30-16.45	Гуляева Т. Л., Лукьянова Р.Ю.	Ионосферные возмущения при техногенной катастрофе STARLINK 3-8 февраля 2022 г.
19	16.45-17.00	Фрезе Н.А.	Проблемы создания сети диагностики геофизических параметров в высоких

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

			широтах
20	17.00-17.15	Гурвич Е.Е., Мингалев И.В., Моисеев И.А, Мерзлый А.М., Тихонов В.В., Шубин В.Н., Янаков А.Т.	Методика проведения экспериментов по оценке характеристик радиотрассы кв диапазона в арктическом регионе
21	17.15-17.30	Сецко П.В., Дэспирак И.В., Сахаров Я.А., Билин В.А., Селиванов В.Н.	Геоиндуцированные токи во время события космической погоды 27-28 сентября 2017 года
22	17.30-17.45	.Аксенович Т.В., Селиванов В.Н., Билин В.А., Сахаров Я.А.	Исследование спектральных характеристик геоиндуцированных токов во время сильных магнитных бурь 24-го солнечного цикла
24	17.45-18.00	Селиванов В.Н., Сахаров Я.А., Колобов В.В., Аксенович Т.В., Билин В.А	Регистрация геоиндуцированных токов в линиях электропередачи дифференциальным методом
	18.00 – 18.30	Постерная сессия	

Постерные доклады

1. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н.

События экстремального роста геомагнитно-индуцированных токов в линиях электропередач на Кольском полуострове и в Карелии за 11 лет наблюдений

2. Евдокимова М.А., Петрукович А.А., Апатенков С.В.

Анализ моделей восстановления ионосферных токов по данным меридиональной цепочки магнитометров

3. Мингалев О.В., Митрофанов В.М., Когай Т.Г., Хабарова О.В., Мерзлый А.М.

Каталог геомагнитных событий с 2013 года

4. Зворыгина Е.С., Ягова Н.В.

Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и энергичные электроны на геостационарной орбите

5. Ягова Н. В., Сахаров Я. А., Пилипенко В. А., Селиванов В. Н.

Факторы, влияющие на эффективность возбуждения геоиндуцированных токов геомагнитными пульсациями Pc5/Pi3

6. Костарев Д.В., Пилипенко В.А., Козырева О.В.

Риски влияния космической погоды на трубопроводы в арктической зоне РФ

7. Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Соколов А.Д., Янаков А.Т.

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами и изображающими спектрографами с разных орбит и поверхности земли. часть 1. авроральные структуры, возбужденные природными источниками, включая АЛЬФ

8. Козелов Б.В., Воробьев В.Г., Титова Е.Е., Попова Т.А.
Структура авроральных высыпаний по наблюдениям ПГИ

Пятница, 10.02. 2023 г., Конференц-Зал (Line 1)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
Председатель: Пилипенко <u>В.А.</u>			
25	09.45-10.00	Тренькин А.А., Вахнина В.В., Воеводин С.В., Коблова О.Н., Кувшинов А.А., Черненко А.Н.	Исследование работы объединенной энергетической системы центра России при воздействии сильной магнитной бури
26	10.00 -10.15	Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н., Пудовинников Р.Н., Тренькин А.А., Воеводин С.В.	Ранжирование значений геоиндуцированных токов по степени угрозы для режима выдачи активной мощности блоком «генератор – трансформатор»
27	10.15 – 10.30	Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р.	Региональное диагностирование полярных сияний на основе данных наземных магнитометров
28	11.00 – 11.15	Мерзлый А.М., Мингалев И.В., Моисеев И.А, Калишин А.А., Шубин В.Н., Сахаров Я.А., Черняков С.М., Янаков А.Т.	Оценка влияния параметров высокоширотной ионосферы на распространение радиоволн КВ диапазона
29	11.15 – 11.30	Янаков А.Т., Мерзлый А.М., Моисеев И.А, Никифоров О.В., Старилов А.С., Филатов Г.С.	Особенности применения высокоширотной радиотрассы ИКИ РАН при решении прикладных задач
30	11.30 – 11.45	Мингалев И.В., Суворова З.В., Козелов Б.В., Мерзлый А.М., Янаков А.Т., Шубин В.Н.	Влияние ионосферных неоднородностей на возможности загоризонтного обнаружения в высоких широтах
31	11.45 – 12.00	Шубин В.Н., Мерзлый А.М.	Коррекция критической частоты FOF2 в модели GDMF2 по данным ПЭС
32	12.00 – 12.15	Климов С.И., Грушин В.А., Зелёный Л.М., Новиков Д.И.,	Регистрация грозových разрядов на орбитальных станциях. результаты и перспективы.

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

		Осадчая Л.А., Петрукович А.А., Головин Д., Лихтенбергер Я. , Сегеди П.	
	12.15 – 12.30	<i>Заккрытие конференции</i>	

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВСПЫШЕК В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО И СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МИКРОВОЛНОВЫХ ДАННЫХ

Курочкин Е.А., Петерова Н.Г., Топчило Н.А., Шендрик А.В.

СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, 79046155404@yandex.ru

Анализ вспышечной продуктивности основывается на физических параметрах [1, 2] микроволнового излучения активных областей (АО) Солнца. Примерами прогностических признаков для реализации на РАТАН-600 могут быть: спектральный индекс (форма спектра), поляризационные инверсии, NSL (пекулярные) источники, эволюционные признаки (изменения в спектре АО, смена знака поляризации и пр.), эволюция соотношения поток/размер АО, оценка величины коронального магнитного поля по сравнению с фотосферным и пр. Впоследствии может быть составлена статистическая зависимость [2] частоты возникновения конкретных предвспышечных признаков и мощности вспышек, с которыми признаки были ассоциированы. Архив данных РАТАН-600 включает в себя данные по крайней мере с 1997 г. по настоящее время -- почти полных два 11-летних цикла Солнечной активности (23-й и 24-й), а также начало текущего 25-го цикл, что позволяет исследовать вспышечную продуктивность Солнца на разных этапах циклов. Регулярные наблюдения в левой и правой круговых поляризациях на РАТАН-600, хорошее частотное и приемлемое пространственное разрешение [3] позволяют получать качественные микроволновые данные об АО Солнца.

1. Peterova N.G., Topchilo N.A., Kurochkin E.A., Geomagnetism and Aeronomy, Increased Microwave Radiation Brightness as a Sign of Flare-Producing Active Regions Based on Observations of NOAA Active Region 12371, Geomagnetism and Aeronomy, Volume 61, Issue Suppl 1, p.S24-S35, December 2021.
2. Bogod, V. M.; Svidskiy, P. M.; Kurochkin, E. A.; Shendrik, A. V.; Everstov, N. P., A Method of Forecasting Solar Activity Based on Radio Astronomical Observations, Astrophysical Bulletin, Volume 73, Issue 4, pp.478-486, October 2018.
3. Tokhchukova, S. Kh.; Korzhavin, A. N.; Bogod, V. M.; Kurochkin, E. A.; Shendrik, A. V. Computation of the horizontal size of the RATAN-600 beam pattern for the "Southern Sector with a Flat Reflector" mode with allowance for the parameters of primary feeds, Astrophysical Bulletin, Volume 69, Issue 3, pp.356-367, July 2014

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ F10.7 МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д.Н. Смирнов¹, С.А. Доленко², И.Н. Мягкова²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, smdn13@mail.ru

²НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобелева МГУ имени М.В.Ломоносова, г.Москва, Россия, irina@srd.sinp.msu.ru

Индекс интегральной солнечной активности F10.7 характеризует среднесуточный поток радиоизлучения Солнца, регистрируемый на длине волны 10.7 см (2800 МГц). Данные о потоке солнечного радиоизлучения на длине волны F10.7 необходимы для большинства моделей, описывающих состояние верхних слоев атмосферы Земли, таких как термосфера и ионосфера, а также для определения орбит спутников, расчета маневров космических аппаратов (КА), моделирования движения космического мусора, для предотвращения столкновений КА, расчета их времени жизни на орбите и др. В связи с этим прогнозирование значений F10.7 представляется актуальной задачей.

В данной работе поток солнечного радиоизлучения F10.7 прогнозируется на сутки вперед с помощью алгоритма машинного обучения – градиентного бустинга. Используются данные о величине индекса F10.7 из архива Мирового Центра данных <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/DAIYPLT.adj>. На вход модели подаются значения F10.7 и числа солнечных пятен за предыдущий день, за два, три и четыре дня назад, а также разница между их последовательными значениями на аналогичную глубину погружения. В качестве критерия качества прогноза используется коэффициент детерминации R².

Исследованы модели, обученные на данных различных эпох солнечной активности (СА). В частности, для последнего цикла СА – 24-го, начавшегося в 2009 году, при использовании в качестве тренировочного набора первых 90% имеющихся данных на тестовом наборе данных (оставшиеся 10%) было получено значение R²=0.65.

Таким образом, в данной работе показано, что использование градиентного бустинга позволяет прогнозировать значение индекса F10.7 на сутки вперед с приемлемой точностью. Дальнейшие исследования будут направлены на определение оптимальной методики подготовки и предобработки данных для осуществления такого прогнозирования, а также оптимального разделения имеющегося массива данных на тренировочный и тестовый наборы.

ПРОГНОЗ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ: ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

В.Н. Ишков

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

Возможность прогноза геоэффективных явлений на Солнце непосредственно связана с динамикой магнитных полей (МП). Под прогнозом геоэффективных солнечных явлений здесь понимается совокупность всех видов прогнозов, в задачу которых входит расчет развития процессов и явлений, происходящих в солнечной атмосфере и непосредственно влияющих на магнитную и радиационную обстановку в ОКП на заданные интервалы времени. Интервалы времени, на который возможен прогноз зависят от фоновых значений общего (среднего) определяющих эпохи солнечной активности (СА) и определяются характеристиками физических процессов всплытия новых магнитных потоков в атмосфере Солнца, характера их взаимодействия с уже существующим магнитным полем, а также закономерностями появления и эволюции солнечных структур, таких как солнечные вспышечные события и корональные дыры (КД) – областей с открытым в межпланетное пространство магнитными полями – из которых вытекают высокоскоростные потоки солнечного ветра. Реальный сценарий СА прямо приводит к заключению, что образование солнечных пятен осуществляется в трёх разных режимах, соответствующих эпохам повышенной, пониженной СА и переходным периодам между эпохами, которые и определяют характер пятнообразовательной активности, давая возможность преобладать либо небольшим группам пятен с пониженной вспышечной активностью, либо образовывать высокоактивные группы пятен сложной магнитной конфигурации, соответственно определяя и режим образования и характеристики корональных дыр. В переходные периоды солнечные пятна образуются в переменном по величине магнитном поле и образуют "смесь" разных физических условий что с большой вероятностью создаёт условия появления очень динамичных по развитию активных областей с группами пятен не экстремальных по площади ($\leq 2 \cdot 10^3$ мдп), но в которых концентрируются всплытия больших и быстрых новых магнитных потоков, создавая условия осуществления экстремальных вспышечных событий. Прогноз геоэффективности корональных дыр полностью определяется величиной магнитного поля в них и их площадью, рекуррентно воздействующих высокоскоростными потоками солнечной плазмы на околоземное космическое пространство и в настоящее время практически решён. Прогноз геоэффективных вспышечных событий полностью обеспечивает взаимодействие новых всплывающих магнитных потоков с магнитными полями активных областей и вне их, но всегда на линии раздела полярностей. Интервалы времени, на который возможен прогноз солнечных вспышечных событий, определяются характеристиками физических процессов всплытия новых магнитных потоков, характера их взаимодействия с уже существующим магнитным полем,

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ КВМ В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Капорцева К.Б.^{1,2}, Шугай Ю.С.², Вахрушева А.А.¹, Калегаев В.В.^{1,2}, Еремеев В.Е.²

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия, kb.kaportceva@physics.msu.ru

² МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ, Москва, Россия

Корональные выбросы массы (КВМ) – явления, вызывающие наиболее сильные геомагнитные возмущения, и прогноз таких событий – одна из важных задач в области космической погоды. Нами был проведен анализ КВМ из базы данных SACTus (на основе данных коронографа LASCO/SOHO) за 2010-2018 годы и разработан алгоритм отбора потенциально геоэффективных событий. Информация о корональных диммингах из базы Solar Demon (на основе данных SDO/AIA) используется для определения местоположения коронального источника КВМ. Для коронального источника КВМ было проведено сопоставление КВМ с диммингами на основе угловых и временных параметров событий диммингов из базы Solar Demon. Комбинация DBM-модели [1] и модели высокоскоростных потоков солнечного ветра [2] используется для прогнозирования времени и скорости прихода КВМ на орбиту Земли [3]. Результаты прогноза сравнивались с каталогами МКВМ Ричардсона и Кейн [4], ССМС CME Scoreboard [5], каталогом типов солнечного ветра ИКИ РАН [6]. Для 2010-2018 года проанализирована точность прогноза для успешно спрогнозированных событий МКВМ и выявлены причины по которым события не были спрогнозированы. Показано, что для максимума солнечной активности доля успешно спрогнозированных событий выше, чем для фазы спада и роста солнечной активности из-за отсутствия в базе диммингов, которые можно сопоставить с КВМ. Для решения этой проблемы на фазах роста и спада солнечной активности применяется альтернативный метод отбора событий, который не предполагает строгого КВМ-димминг соответствия.

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

1. Vrsnak B., Zic T., Vrbaneck D., et al. // Solar Physics. 2013. V. **285**. P. 295.
2. Shugay Yu., Slemzin V., Rodkin D., et al // Space Weather Space Clim. 2018. V. **8**. P. A28.
3. Shugay, Y.; Kalegaev, V.; Kaportseva, K., et al. // Universe. 2022. V. **8**. P. 565.
4. Richardson I.G., Cane H.V. // Space Weather Space Climate. 2012. V. 2. P A02
5. Riley P., Mays L., Andries J., et al. // Space Weather. 2018. V. 16. P. 1245.
6. Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., et al. //Cosm. Res. 2009. V. **47**. P. 81.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГНОЗА ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, СВЯЗАННЫХ С КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДЕЛИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Слемзин В.А.¹, Родькин Д.Г.¹, Шугай Ю.С.²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, slemzinva@lebedev.ru

²НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Наиболее удобной и простой моделью прогнозирования времени прихода и скорости межпланетных корональных выбросов массы (МКВМ), возникающих в результате корональных выбросов массы (КВМ) на Солнце, является полуэмпирическая модель магнитодинамического торможения (Drag-Based Model, DBM), которая рассматривает движение КВМ в гелиосфере в связи с взаимодействием плазмы КВМ с плазмой фонового солнечного ветра. Для расчетов по этой модели в качестве исходных данных используются время и скорость КВМ на расстоянии в 20 солнечных радиусов, получаемые по данным коронографов, а также предполагаемые величины скорости фонового солнечного ветра и коэффициента взаимодействия фоновой плазмы с КВМ. Из-за отсутствия данных измерений в гелиосфере, неопределенность последних двух параметров является основной причиной ограниченной точности данного метода.

В настоящей работе рассматривается алгоритм прогноза МКВМ, основанный на поиске оптимальных параметров задачи с помощью ансамблевой (групповой) обработки данных и использовании модели квазистационарного фонового ветра. Метод испытан на серии из 17ти МКВМ периода 2013-2015 г., выбранных по каталогу Ричардсона и Кейн, источниками которых были КВМ, указанные в базах данных SACTus и CDAW с сопутствующими диммингами в центральной части солнечного диска. Время t и скорость v прихода МКВМ в точку L1 к Земле рассчитывались по базовой модели DBM, скорости квазистационарного фонового солнечного ветра рассчитывались по площади корональных дыр с помощью модели НИИЯФ МГУ [1] для 4х участков траектории от Солнца до Земли 20-65, 65-115, 115-165 и 165-213 солнечных радиусов с поправочными коэффициентами. Расчеты времени и скорости МКВМ проводились для значений коэффициента взаимодействия γ от 0 до $1.10 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$. Оптимальные значения параметра взаимодействия и поправочных коэффициентов были найдены по минимуму средних по ансамблю разностей модельных и измеренных значений t и v . Минимальная средняя ошибка по времени прихода МКВМ составляла 0.9 ± 12.4 часа, по скорости 0.54 ± 47.2 км/с. По результатам расчетов для всего ансамбля событий были оценены доверительные интервалы отклонений модельных значений t и v от реально измеренных. 50% результатов по времени отличались от измерений менее, чем на 7,5 часов и 90% - менее 29,5 часов; по скорости 50% отличались менее, чем на 33,5 км/с и 90% - менее, чем на 78,5 км/с. Эти результаты лучше средних по 32м моделям прогнозирования, приведенным на сайте Average of models Scoreboard CSMC [2]. Разработанный алгоритм ансамблевых расчетов по серии КВМ с уточнением параметров фонового ветра и значения γ может быть использован для подстройки параметров расчета текущих прогнозов для различных периодов солнечной активности.

1. Шугай Ю. С., Веселовский И. С., Ситон Д. Б., Бергманс Д. // Астрон. Вестник 2011.Т. 45. С. 560.
2. Riley, P.; Mays, M.L.; Andries, J.; Amerstorfer, T. et al. //Space Weather 2018. V. 16. P.1245.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ПОМОЩЬЮ ОБРАТНОЙ МОДЕЛИ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ГЕЛИОСФЕРЕ

Родькин Д.Г.¹, Слемзин В.А.¹, Шугай Ю.С.²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, rodkindg@gmail.com

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

При разработке и тестировании методов прогнозирования межпланетных корональных выбросов массы (МКВМ) большое значение имеет установление их связи с источниками на Солнце – корональными выбросами массы (КВМ), наблюдаемыми коронографами. Часто применяемый обратный баллистический расчет времени старта КВМ не учитывает изменения их скорости при движении в гелиосфере и может давать неопределенность порядка нескольких суток. С хорошей точностью (порядка ± 10 ч) движение КВМ в гелиосфере от Солнца до Земли описывается моделью магнитодинамического взаимодействия КВМ с фоновым солнечным ветром (Drag-based model, DBM [1]).

В данной работе для поиска возможных корональных источников МКВМ, наблюдаемых у Земли, предлагается использование обратной модели магнитодинамического взаимодействия (Reverse DBM, RDBM), с помощью которой по измеренным параметрам МКВМ определяются их источники на выходе из солнечной короны. Проведено тестирование алгоритма RDBM на примере серии из 17 МКВМ за период 2013-2015 гг. путем сравнения его расчетов с измеренными временами и скоростями КВМ по SACTus [2]. Установлено оптимальное для модели значение параметра взаимодействия γ , равное $0.33 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ (что согласуется с [3]). Рассмотрено 2 варианта расчета: (1) с постоянной на всем интервале распространения солнечного ветра (СВ) фоновой скоростью (≈ 350 км/сек), и (2) со ступенчатой скоростью фонового ветра (расстояние от Земли до Солнца разделялось на отрезки 213–165 R_{Sun} , 165–115 R_{Sun} , 115–65 R_{Sun} , 65–20 R_{Sun}). В качестве скорости фонового СВ на каждом из отрезков использовались данные прогноза квазистационарных потоков СВ, полученные в Центре анализа космической погоды НИИЯФ МГУ [4, 5]. Продемонстрировано, что вариант разделения на интервалы со ступенчатой скоростью дает лучшую точность прогноза.

В целом, результаты показывают, что по измеренным у Земли параметрам МКВМ с помощью алгоритма RDBM эффективно идентифицируются наиболее вероятные КВМ-источники и определяются их параметры на выходе из солнечной короны.

1. 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.
2. <https://www.sidc.be/cactus>
3. J. Čalogović, M. Dumbović, D. Sudar, B. Vršnak, K. Martinić, M. Temmer, A. Veronig // Solar Phys. 2021. 296. 114.
4. https://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1&lang=ru
5. Ю.С. Шугай, И.С. Веселовский, Д.Б. Ситон, Д. Бергманс // Астрон. вестник. 2011. 45. 560-571.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ И ЗАПАЗДЫВАНИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

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

ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия, nshlyk@izmiran.ru

Исследуется изменение скорости межпланетных корональных выбросов массы (КВМ) в зависимости от гелиодолготы источника (ассоциированной солнечной вспышки), начальной скорости КВМ и скорости фонового солнечного ветра. В основе моделирования лежат данные о 372 КВМ, сопровождавшихся солнечными вспышками и наблюдавшихся в коронографе SOHO/LASCO, межпланетные возмущения от которых были впоследствии зарегистрированы на Земле (за период с 1995 по 2021 гг.). Описана эмпирическая модель, позволяющая оценивать транзитную и максимальную скорости соответствующего межпланетного возмущения, а также время его запаздывания.

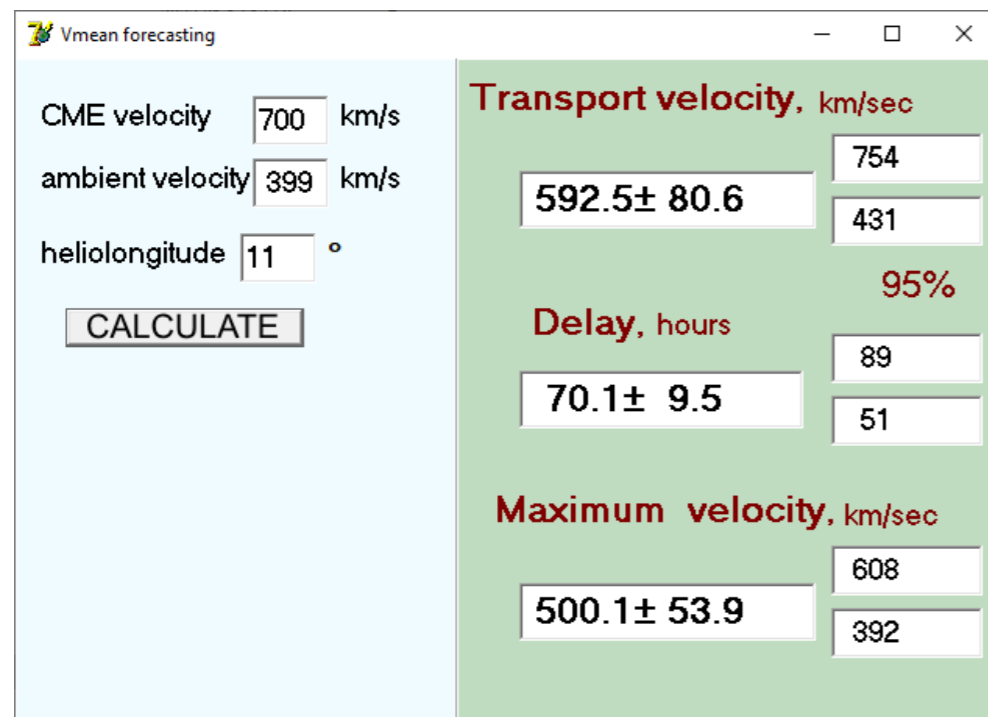


Рис. 1. Скриншот программы для расчета скоростей и запаздывания межпланетных КВМ.

СУЩЕСТВЕННОСТЬ ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ДОМЕННОЙ АДАПТАЦИИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Каримов Э.З.¹, Широкий В.Р.², Баринов О.Г.², Доленко С.А.², Мягкова И.Н.²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, Karimov.ez19@physics.msu.ru

²НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, Dolenko@srd.sinp.msu.ru

Для эффективного прогнозирования временных рядов (ВР) методами машинного обучения необходимо наличие длинных стационарных или квазистационарных ВР входных данных, по возможности получаемых из одного источника по всей длине ВР. Это может представлять проблему, когда источником данных являются приборы, установленные на космических аппаратах (КА), и по техническим причинам необходим переход с данных одного КА на данные другого.

В настоящее время на так называемых гало-орбитах вокруг точки Лагранжа L1 между Солнцем и Землей находятся несколько КА. Для определения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля чаще всего используют данные с КА ACE (Advanced Composition Explorer) и DSCOVR (Deep Space Climate Observatory). КА ACE поставляет данные с 1997 года, и в 2024 году запланировано его выведение из эксплуатации. Также этот КА имеет проблемы с поставкой данных в режиме реального времени: они получаются с большими пропусками. КА DSCOVR был запущен в 2015 году, находится практически в той же точке пространства, и не имеет подобных проблем, однако длина ВР его измерений является недостаточной для качественных прогнозов. Поэтому задача адекватного отображения данных из домена DSCOVR в домен ACE является весьма актуальной для обеспечения возможности работы с длинным ВР приемлемого качества.

Для обработки ВР мы используем так называемое погружение (топологическое вложение) ВР, смысл которого – включение информации о нескольких предыдущих значениях каждой компоненты ВР в каждый пример данных. Для каждого из параметров необходимая глубина погружения определяется по спаду автокорреляции в e раз. Также для всех данных производится линейная интерполяция пропусков длительностью до 12 отсутствующих значений подряд.

Для перевода данных из домена одного КА в домен другого в настоящей работе сравниваются три подхода. Первый способ можно назвать «один в одного», когда единственный преобразуемый параметр переводится в соответствующий параметр другого домена. Второй – «все в одного», когда для получения значения искомого параметра в новом домене на вход преобразующего алгоритма подаются все используемые параметры в исходном домене. Третий – для каждого искомого параметра находится оптимальный набор входных параметров, реализующий минимальное расстояние между доменами. Сама процедура преобразования (доменной адаптации) данных осуществляется с помощью алгоритмов машинного обучения (линейная регрессия, искусственные нейронные сети – многослойный персептрон с единственным скрытым слоем).

В качестве меры эффективности способов преобразования и обработки данных в настоящей работе используются показатели качества нейронной сети, которая осуществляет прогноз Dst-индекса. Показано, что использование данных с КА DSCOVR, преобразованных в домен КА ACE, позволяет получить пригодный для использования в реальном времени прогноз, лишь немного уступающий по качеству прогнозу, получаемому на данных только КА ACE, недоступных в реальном времени.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 6.1 (01201255512) и 2.1 (115041410195).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОЗМУЩЁННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ИНДЕКСУ Кр

Гаджиев И.М.^{1,2}, Баринов О.Г.¹, Доленко С.А.¹, Мягкова И.Н.¹

¹НИИ ядерной физики имени Д.В.Скобелева МГУ имени М.В.Ломоносова, г.Москва, Россия,

²Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, г.Москва, Россия, ismailgadzhievff@gmail.com

Геомагнитные возмущения – это один из наиболее важных факторов космической погоды, роль которого будет возрастать с развитием глобальной цифровой индустрии, как на Земле, так и в околоземном космическом пространстве [1].

В связи с этим, прогнозирование геомагнитных возмущений представляет большой практический интерес, так как магнитные бури могут вызывать нарушения в работе телеграфных линий и радиосвязи, трубопроводов, линий электропередач и электрических сетей [2]. Кроме того, магнитные бури влияют на радиационные условия в околоземном космическом пространстве, поскольку после примерно половины магнитных бурь поток релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли увеличивается на порядок и более [3].

Один из наиболее используемых геомагнитных индексов – планетарный индекс Кр, усредненный за 3 часа, характеризующий интенсивность геомагнитного возмущения. Кр-индекс является показателем уровня геомагнитного возмущения в высоких широтах.

По перечисленным выше причинам прогнозирование планетарного индекса Кр представляет большой практический интерес – это может позволить предсказывать сильные геомагнитные возмущения. В настоящей работе исследуется возможность классификации значений Кр-индекса по уровню геомагнитного возмущения – для этого область значений индекса разбивается на несколько интервалов, соответствующих степени возмущения.

Для классификации значений индекса по степени возмущения используются методы машинного обучения, такие как градиентный бустинг и искусственные нейронные сети. Результаты работы методов машинного обучения сравниваются с тривиальным инерционным прогнозом на горизонтах от трёх часов до суток с шагом в 3 часа.

Исследуется вопрос выбора схемы валидации для подбора гиперпараметров моделей. Производится оценка необходимого для классификации набора признаков.

По результатам работы делается вывод об оптимальном методе классификации значений индекса Кр по уровню геомагнитного возмущения на разных горизонтах.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

1. McGranaghan, R.M., Camporeale, E., Georgoulis, M., Anastasiadis, A. 2021. Space Weather research in the Digital Age and across the full data lifecycle: Introduction to the Topical Issue. *J. Space Weather Space Clim.* V.11, p.50. DOI: 10.1051/swsc/2021037.

2. 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.

3. 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИБОРА КОДИЗ

Золотарев И.А., Бенгин В.В., Садыков А.М., Антонюк Г.И., Нечаев О.Ю., Сазонова А.В., Седых П.В., Оседло В.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, zolotarev@sinp.msu.ru

Комбинированный детектор излучения (КОДИЗ) был запущен на полярную орбиту в августе 2022г в составе кубсата МОНИОР-1. Для определения чувствительности полупроводниковых детекторов к космической радиации в околоземном пространстве нами применен метод восстановления спектра падающего излучения с использованием данных моделирования.

Прибор КОДИЗ сочетает в себе черенковский, нейтронный и полупроводниковый детекторы.

Для моделирования отклика полупроводниковых детекторов на заряженные частицы использовалась среда Geant4. Модель детектора была сделана в формате .stl, после модель была конвертирована в формат .gdml с учётом всех данных о материале каждой детали. При построении модели прибора использованы 3д модель всего космического аппарата. Потоки электронов с энергией от 1 до 9 МэВ и протонов с энергией от 10 до 100 МэВ запускались изотропно по всему пространству и направлению частицы. Для статистики выбирались случаи срабатывания обоих детекторов.

Для определения чувствительности прибора к заряженным частицам различной энергии мы разделили плоскость в координатах энерговыделения в детекторах прямоугольной сеткой. Для каждого интервала по энерговыделениям в детекторах получено распределение по энергии первичной частицы. Полученные распределения энергии падающего излучения собраны в общую функцию чувствительности.

Разработанный подход позволил построить функции чувствительности полупроводниковых детекторов КОДИЗ без использования дополнительных упрощений, предполагающих прямолинейное прохождение частиц. Также важно, что это построение произведено без введения дополнительных ограничений на величины энерговыделения в детекторах как в методе для спектрометров [1].

1. Numerical simulation of metrological characteristics of cosmic radiation detectors / I. A. Zolotarev, L. S. Novikov, V. I. Osedlo et al. // *Inorganic Materials: Applied Research.* — 2017. — Vol. 8, no. 2. — P. 222–228. [DOI: 10.1134/S2075113317020241]

ОЦЕНКА ВАЖНОСТИ ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Владимиров Р.Д., Широкий В.Р., Баринов О.Г., Доленко С.А., Мягкова И.Н.

НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, vladimirov.rd16@physics.msu.ru

Целью настоящего исследования является оценка важности входных признаков (ВП) в задаче прогнозирования потоков релятивистских электронов (РЭ) внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) на геостационарной орбите методами машинного обучения (МО).

Прогнозируемыми значениями моделей являются среднечасовые данные о потоках РЭ с энергией > 2 МэВ. Физическими входными признаками в рассматриваемых моделях являются часовые значения следующих физических величин:

1. Параметры солнечного ветра (СВ) в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем:
 - а. Скорость СВ v (км/с)
 - б. Плотность протонов в СВ n_p (см^{-3})
2. Параметры вектора межпланетного магнитного поля (ММП) в той же точке L1 в системе GSM:
 - а-в. B_x, B_y, B_z (компоненты ММП) (нТл)
 - г. Модуль ММП B_{magn} (нТл)
3. Геомагнитные индексы:
 - а. Экваториальный геомагнитный индекс Dst (нТл)
 - б. Глобальный геомагнитный индекс K_p (безразмерный)
4. Потоки РЭ на геостационарной орбите (измеряются в $1/(\text{см}^2\text{с ср})$):
 - а. Поток электронов с энергиями > 2 МэВ

Для каждого из перечисленных физических признаков используется его текущее значение на момент прогнозирования и 23 предыдущих часовых значения за последние сутки.

Общая схема работы алгоритма отбора и оценки ВП такова [1]:

1) Исследуемая модель МО обучается на данных с полным комплектом из N рассматриваемых ВП, и производится оценка качества прогнозирования.

2) Каждый из используемых ВП поочередно удаляется из комплекта.

3) На данных с каждым из N уменьшенных комплектов ВП производится повторное обучение модели МО, и производится оценка изменения качества по сравнению с моделью, полученной на шаге 1.

4) Тот ВП, удаление которого привело к минимальному падению (или максимальному увеличению) качества прогноза по сравнению с остальными моделями, полученными на шаге 3, окончательно удаляется из комплекта.

5) Далее алгоритм повторяется с шага 2 с полученным сокращённым комплектом ВП.

Алгоритм повторяется до тех пор, пока не останется последний единственный ВП. После этого мы считаем, что ВП ранжированы по важности в обратном порядке.

В качестве метода МО в алгоритме отбора в настоящей работе использовалась линейная регрессия, в качестве критерия оценки качества модели – среднеквадратичное отклонение прогноза на тестовом наборе данных. Результаты оценки важности представлены в докладе.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-21-00237, <https://rscf.ru/project/23-21-00237/>.

1. Владимир Р.Д., Широкий В.Р. и др. // Геомагнетизм и аэрономия 2023, принято к публикации.

БАЗА ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ, ЯМАЛ, 1972 – 2022

А.Н.Зайцев, К.Х.Канониди, В.Г.Петров, Р.Ю.Лукьянова

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, г. Москва, Троицк, alex.zaitsev1940@mail.ru.
Институт космических исследований Российской Академии наук, г. Москва*

Исследования полярных геомагнитных возмущений после периода МГТ (1957 – 1958) и далее с началом космической эры позволили определить детальную картину токов в системе «солнечный ветер - магнитосфера – ионосфера». Важной основой исследований стали специальные сети магнитометров в зоне полярных сияний оформленные в виде проекта «Геомагнитный меридиан 145». В основе проекта лежит идея создания плотной цепочки магнитометров вдоль меридиана пересекающего Ямал. Развитие экспедиционных работ за прошедший период начиная с 1972 года можно разбить на несколько этапов. Первый этап – размещение магнитно-вариационных станций (МВС) с аналоговой регистрацией на магнитограммах с временным разрешением 1 мин и скоростью регистрации 20 мм в час. В период 1972 – 1992 гг. были получены данные по 20 пунктам наблюдений. Магнитограммы были отмикروفильмированы и переданы в Мировой Центр Данных в Москве. В настоящее время архив оригиналов магнитограмм хранится в ИЗМИРАН.

При реализации второго этапа проекта «Геомагнитный меридиан 145» в период 1980 – 1990 гг. были разработаны цифровые МВС для замены аналоговых приборов. В этот период удалось организовать наблюдения цифровыми МВС на основной части пунктов наблюдений и затем наладить сбор и обработку цифровых данных. Полученные данные были собраны в виде базы и размещены в сети интернет <http://www.cosmos.ru/magbase/>. К сожалению после 1991 года поддержка наблюдений на Ямале была прекращена и работа экспедиционных пунктов была остановлена. Вместе с тем несколько пунктов продолжили работу ввиду необходимости иметь данные для определения АЕ-индекса и обеспечения прогнозов космической погоды. Эти работы были проведены ААНИИ, ИЗМИРАН и ИСЗФ.

В 2012 году были начаты работы по восстановлению сети магнитометров для наблюдений вариаций МПЗ на Ямале. В итоге при поддержке местных организаций цифровые МВС были установлены в Салехарде, Надыме, п. Харасовэй. О. Белый. Учитывая наличие постоянных магнитных обсерваторий Амдерма, Диксон, Норильск удалось покрыть основную часть зоны полярных сияний на Ямале магнитными наблюдениями. В настоящее время перечисленные пункты служат основой программ исследований в ИЗМИРАН и ИКИ. Следует упомянуть перспективу восстановления всего меридиана 145 от высоких широт до экватора. Сеть магнитометров в Сибири и в Индии существенно расширяет возможности исследований полярных геомагнитных возмущений.

Таким образом, мы имеем опыт организации целевых наблюдений вариаций магнитного поля Земли на Ямале за прошедшие 50 лет. Архив геомагнитных данных за этот период служит основой исследований характера возмущений и космической погоды в околоземном космическом пространстве, а современные космические проекты основаны на комплексном использованию различных видов наблюдений во всем объеме околоземного космического пространства. Оценивая развитие проекта «Геомагнитный меридиан 145» на всех трех этапах следует подчеркнуть, что были получены важные научные результаты как основа для развития космической физики и ее приложений в виде прикладной геофизики.

Работа выполнена в ИЗМИРАН в рамках Государственного задания № 01201356397 и в рамках плановых исследований в ИКИ по Государственному заданию № 01200953488,

МЕТОД ИНС В ЗАДАЧЕ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Крашенинников И.В., Чумаков С.О.

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

Долгосрочный прогноз солнечной активности является одним из важнейших факторов космической погоды. Как ключевой управляющий индикатор, прогнозные данные солнечной активности (СА) в виде числа солнечных пятен (solar sunspot number – SSN; R_m) и потока солнечного радиоизлучения (solar radioflux – F10.7; F_m – среднемесячное значение), входят в прогностические ионосферные модели. Как две независимо измеряемые характеристики одного процесса они должны коррелировать, что и проявляется в исторических рядах данных на интервалах времени их совместного наблюдения (общий коэффициент корреляции среднемесячных данных SSN и F10.7 превышает 0.9).

Одним из активно развивающихся методов прогнозирования, основанных на существовании временных рядов данных, является метод искусственных нейронных сетей (ИНС). Первые попытки применения ИНС к долгосрочному прогнозированию солнечной активности в виде SSN были рассмотрены в [1], в дальнейшем данный подход получил развитие в ряде работ и, по-видимому, с 2020 г. является базовым инструментом в прогностическом центре SWPC, Boulder (USA) - <https://www.swpc.noaa.gov/products/predicted-sunspot-number-and-radio-flux>. Объектом исследования в методе ИНС является цикл солнечной активности, и для реализации процесса обучения ряд наблюдений должен иметь достаточную длительность, что проблематично в случае его применения к F10.7. Измерения потока солнечного радиоизлучения начались в 1949 г. и, по сравнению с SSN, интервал экспериментальных данных мал, что приводит к снижению устойчивости прогнозного решения только на собственных данных.

В данной работе представлены результаты анализа особенностей применения метода ИНС (на платформе ИНС Элмана) в задаче долгосрочного прогнозирования потока солнечного радиоизлучения - F10.7 на общей основе с временным рядом солнечных пятен. Рассматривались базовые вопросы устойчивости и общей корректности предсказания индекса F10.7 на временном масштабе цикла солнечной активности. На рис. 1 представлены результаты прогнозирования функциональной зависимости СА на текущий 25-й цикл в форме нормализованных данных R_m , F_m (абстрагированного солнечного цикла, как основы для обучения ИНС и предсказания) и в масштабе реальных данных на начало 2023 г.

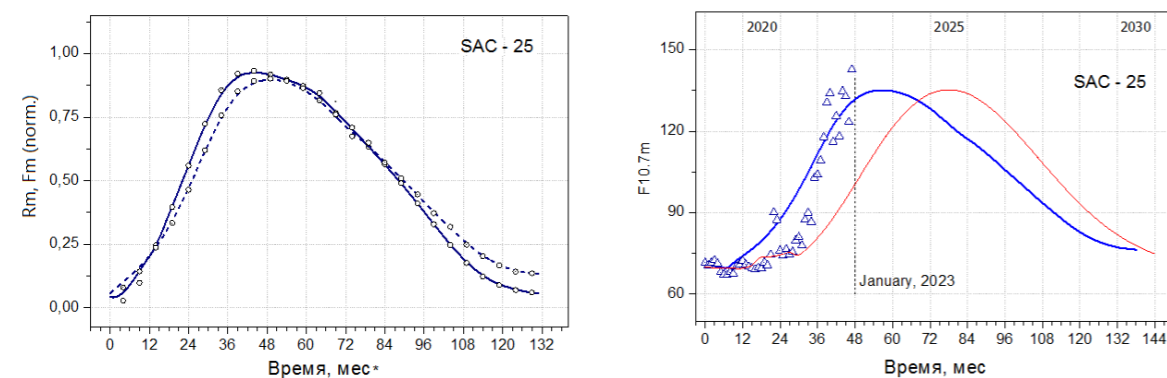


Рис. 1. Прогнозирование 25-го цикла солнечной активности: левая панель - нормализованные функции в цикле - SSN (сплошная линия) и F10.7 (пунктирная линия) и правая панель – реальные данные с прогнозами SWPC (красная линия) и метод ИНС (синяя линия). Среднемесячные данные отмечены полыми треугольниками.

1. Macpherson K. Neural network computation techniques applied to solar activity prediction // Advance in Space Research, 13(9), pp. 375–450, 1993.

МАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПОЛЯРНЫХ ШАПКАХ (PC ИНДЕКС) КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДВУХ МЕХАНИЗМОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА МАГНИТОСФЕРУ

Трошичев О.А.

АНИИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, olegtr@aari.ru

Магнитная активность в полярных областях является результатом воздействия солнечного ветра на магнитное поле Земли. Это воздействие осуществляется через посредство различных систем продольных магнитосферных токов (FAC systems) и генерации соответствующих ионосферных токовых систем (DP1, DP2, DP3, DP4). Индекс магнитной активности в полярных шапках (PC индекс) [Troshichev and Janzhura, 2012] характеризует суммарный эффект воздействия на магнитосферу условного «электрического поля» $E_{KL} = V_{SW}(B_z^2 + B_y^2)^{1/2} \sin^2 \Theta / 2$ [Kan & Liou, 1979], которое представляет наиболее геоэффективную комбинацию таких параметров солнечного ветра, как скорость (V_{SW}) и вертикальная (B_z) и азимутальная (B_y) компоненты ММП, где Θ - угол между поперечной компонентой МПП $B_T = (B_z^2 + B_y^2)^{1/2}$ и геомагнитным диполем. Рост PC индекса предопределяет развитие магнитных бурь и суббурь, при этом величины индексов PC и AL, Dst связаны линейным соотношением.

Влияние условного поля E_{KL} реализуется через постоянно действующую, вне зависимости от сезона и ориентации ММП, систему продольных токов R1 FAC, локализованных на приполюсной границе аврорального овала, которые втекают в ионосферу в утреннем секторе овала и вытекают из ионосферы в вечернем секторе. R1 FAC система проецируется во внутреннюю магнитосферу и связана с областью сильных градиентов плазменного давления в экваториальной магнитосфере. Во время суббурь (DP1 возмущения), когда проводимость авроральной ионосферы резко возрастает за счёт вторжений авроральных частиц, на экваториальной границе аврорального овала генерируется система R2 FAC с противоположной, чем в R1 FAC, полярностью токов.

При воздействии азимутальной B_y или северной B_{ZN} компонент ММП в магнитосфере генерируются BY и NBZ FAC системы, локализованные, соответственно, в области дневного каспа или к полюсу от каспа, т.е. в тех областях, которые связаны с пограничными слоями магнитосферы. Полярность BY токов определяется знаком B_y компоненты ММП, тогда как полярность NBZ токов всегда противоположна полярности R1 токов. При воздействии северной компоненты ММП в летний сезон (т.е. в условиях повышенной ионосферной проводимости) NBZ и R1 системы, с противоположной направленностью продольных токов, действуют одновременно и независимо друг от друга, тогда как в зимний сезон наблюдается только R1 FAC система. Совокупность этих экспериментальных фактов свидетельствует о том, что указанные системы продольных токов генерируются принципиально различными механизмами, такими как магнитное пересоединение в пограничных областях магнитосферы [Dungey, 1961] в случае NBZ и BY токов, и эффект градиентов плазменного давления во внутренней магнитосфере [Tverskoy, 1969; Antonova & Tverskoy, 1998] в случае R1 токов.

Сильное влияние (BY) FAC системы на летнюю ионосферу (DP4 возмущения) ведёт к искажению токовых системы и величины DP2 возмущений, обусловленных воздействием геоэффективного поля E_{KL} и оцениваемых PC индексом. Эти искажения носят противоположный характер в разных полушариях, что ведёт к сильному расхождению в величине PCN и PCS индексов в северной и южной полярных шапках при росте B_y компоненты ММП [Troshichev, 2022]. Для целей мониторинга состояния магнитосферы и оценки вероятного развития магнитных суббурь следует использовать PC индекс в зимней полярной шапке (PCwinter), который коррелирует с полем E_{KL} и индексами AL(Dst) существенно лучше, чем PCsummer индекс.

О СОПОСТАВЛЕНИИ СВОЙСТВ СТАТИСТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННО УДАЛЕННЫХ МАГНИТОМЕТРОВ

Коган Л.П.⁽¹⁾, Вольвач А.Е.⁽²⁾, Бубукин И.Т.⁽³⁾, Вольвач Л.Н.⁽²⁾, Ревунова Е.А.⁽¹⁾

⁽¹⁾ ННГАСУ, Нижний Новгород, Россия, L.kog@list.ru

⁽²⁾ КрАО РАН, Республика Крым, Россия

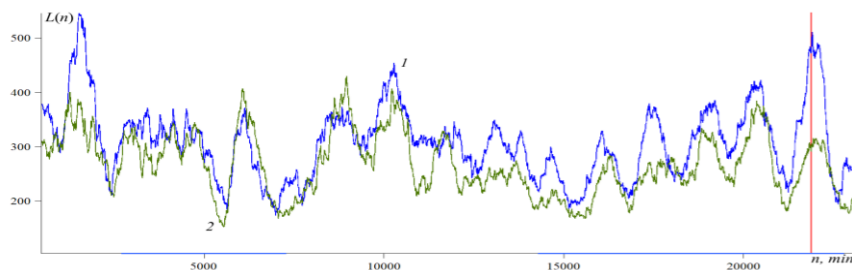
⁽³⁾ НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

В данной работе проводится сопоставление свойств статистики магнитного поля по данным измерений X-компоненты магнитного поля на магнитометрах SIM (Россия, Крым) и WIC (Австрия). Период измерений включает момент начала землетрясения магнитудой 5.1, начало которого имело место 3 ноября 2022 года в 04:50:25 UTC вблизи города Gura Teghii (Румыния). При проведении расчетов используется статистический функционал [1–3] вида

$$L(n) = \frac{A}{M} \sum_{l=n-M+1}^n |\mathcal{L}_l|, \quad \mathcal{L}_l = \sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m P_{m,l}. \quad (1)$$

Здесь $A = 1000$, интервал усреднения $M = 100$, коэффициент $P_{m,l}$ – вероятность попадания функции $\sin[x(t)]$ от измеряемых значений X-компоненты магнитного поля в интервал вида $\sin[x(t)]_{min} + mh \leq \sin[x(t)] < \sin[x(t)]_{min} + (m+1)h$, $0 \leq m \leq N-1$, $h = 20$, $N = 2/h$, n и l – номера последовательных отрезков реализации длительностью 300 секунд каждый.

На рисунке приведены зависимости $L(n)$ для измерений X-компоненты геомагнитного поля по данным магнитометров SIM (кривая 1) и WIC (кривая 2) на интервале времени с 00:00 19.10.2022 по 23:59 03.11.2022. Момент указанного землетрясения отмечен сплошной вертикальной красной прямой. Синими горизонтальными отрезками на оси абсцисс выделены интервалы времени, на протяжении которых имеет место существенный уровень топологического подобия данных кривых. Функционал (1) с высокой вероятностью описывает уровень хаоса, связанный с сейсмическими процессами в локальной геофизической системе. Поэтому указанное подобие, усиливающееся по мере приближения события (см. рисунок), а также почти полное совпадение времени достижения локальных максимумов обеих кривых $L(n)$ и момента события (эти же эффекты имеют место и при сопоставлении зависимостей вида (1) для станций SIM и BEL (Польша), а также BEL и WIC), позволяет выдвинуть гипотезу о распространении влияния явлений, порождаемых подготовкой землетрясений даже столь малого класса, на расстояния порядка тысячи километров от зоны будущего эпицентра.



ГЕОМЕТРИЯ КОРОНАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Березин И.А., Тлатов А.Г.

Кисловодская Горная Астрономическая Станция ГАО РАН, Россия, iberalex@ya.ru

В современных центрах прогнозирования космической погоды для моделирования потоков спокойного солнечного ветра (СВ) используют модель Wang-Shelley-Argе (WSA). Согласно модели WSA, СВ истекает из корональных дыр (КД) и движется к поверхности источника по магнитным трубкам. При этом скорость ветра определяется степенью расширения магнитной трубки f_s и расстоянием θ_b от основания магнитной трубки на фотосфере до края соответствующей КД. Для вычисления скорости применяют эмпирически найденное соотношение, основанное на двух вышеуказанных параметрах. Параметры f_s и θ_b , в свою очередь, определяются из моделирования коронального магнитного поля, как правило, в потенциальном (PFSS) или PFSS-подобном приближении.

В данной работе мы исследовали корреляцию между различными параметрами магнитного поля и наблюдаемой скоростью СВ. Мы рассмотрели, кроме параметров модели WSA, ещё ряд геометрических параметров: длина силовых линий L , расстояние до гелиосферного токового слоя и другие. Наше исследование показало, что параметр f_s , лежащий в основе модели WSA, обладает относительно плохой корреляцией со скоростью СВ. Мы предлагаем новые соотношения для моделирования спокойного СВ, не учитывающие напрямую степень расширения магнитных трубок. Представленные соотношения демонстрируют лучшую корреляцию с наблюдениями. Кроме того, в работе обсуждается перспектива использования в задаче моделирования СВ непотенциальных моделей солнечной короны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-22-00165.

1. Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., et al. // Commun Nonlinear Sci Numer Simul. 2022a. V. 108. P. 106200.
2. Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., et al. // Heliyon 2022b. V. 8(5). P. e10200.
3. Volvach A.E., Kogan L.P., Kanonidi K.H., et al. // Arab. J. Geosci 2022c. V. 15. P. 1358.

СРАВНЕНИЕ РЕГИСТРАЦИИ ВНЕЗАПНОГО НАЧАЛА МАГНИТНОЙ БУРИ ПО ДАННЫМ С МИНУТНЫМ И СЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Ю.С. Загайнова¹, С.В. Громов¹, Л.И. Громова¹, В.Г. Файнштейн²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Троицк yuliazag@izmiran.ru, yuliazagainova@mail.ru

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Геомагнитное поле Земли возмущается при воздействии на магнитосферу Земли различных структур солнечного ветра и наиболее сильно от таких структур, как область взаимодействия быстрых и медленных потоков квазистационарного солнечного ветра, межпланетных корональных выбросов массы (КВМ) и/или связанных с ними межпланетных ударных волн (УВ). Исследование таких возмущений является одним из наиболее важных направлений в области космической физики в целом, и, в частности, в области физики магнитного поля Земли [1,2]. Особый интерес представляет изучение отклика геомагнитного поля на воздействие на магнитосферу межпланетных УВ. Внезапное увеличение динамического давления на магнитосферу Земли, возникающего в результате воздействия на магнитосферу межпланетной УВ, является основной причиной резкого положительного скачка H компоненты геомагнитного поля, который может сопровождаться геомагнитной бурей. В таком случае этот скачок поля (импульс) называется внезапным началом геомагнитной бури и обозначается *SSC* (сокращенно от *Storm Sudden Commencement*). *SSC* регистрируются геомагнитными обсерваториями, расположенными на различных широтах и долготах в обоих полушариях Земли. В течение длительного времени измерения магнитного поля на наземных обсерваториях проводились с минутным временным разрешением. Анализ *SSC* по данным с таким разрешением показал, что импульс внезапного начала появляется в высоких широтах на 1 мин. и/или более минут раньше, чем на низких широтах. Практически не было обнаружено зависимости появления *SSC* от долготы.

При современном уровне наблюдений многие возможные инструментальные погрешности, в том числе, связанные с привязкой к всемирному времени (UT), были устранены. В настоящее время вариации геомагнитного поля на некоторых станциях измеряются с секундным разрешением. Выдвинуто предположение, что одна из причин – межпланетная УВ воздействует на магнитосферу Земли, распространяясь под углом к оси «Солнце – Земля». Другими словами, степень неодновременности регистрации *SSC* разными обсерваториями зависит от ориентации межпланетной УВ в пространстве [3,4].

В настоящей работе на примере 19 событий мы попытались выяснить, насколько одновременно регистрируются *SSC* на различных широтах и долготах, сравнивая данные с минутным и секундным разрешением.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01200953488 и Basic Research Program II.16., а также частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 20-02-00150).

1. Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Перевод с англ. М.: Изд-во «Мир», 384 с. 1974.
2. Nishida A. Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. Berlin: Springer-Verlag New-York-Hedelberg. 1978.
3. Wang, C., C. X. Li, Z. H. Huang, and J. D. Richardson. Effect of interplanetary shock strengths and orientations on storm sudden commencement rise times // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. P.L14104. 2006.
4. Selvakumaran R., Veenadhari B., Ebiyara Y., Kumar S., Prasad D.S.V.V.D. The role of interplanetary shock orientation on SC/SI rise time and geoeffectiveness // *Advances in Space Research.* V. 59. N. 5. P. 1425–1438. 2017.

НЕПРЕРЫВНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ: КОНФИГУРАЦИЯ СЕТИ И ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ГИТ

Сахаров Я¹., Селиванов В²., Аксенович Т²., Соколова О³..

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, sakharov@pgia.ru;

² ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия,

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Непрерывная регистрация геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) на подстанциях линии «Северный транзит» ведётся более десяти лет. Анализ амплитудных значений ГИТ в узлах энергосистемы позволяет выделить случаи с максимальными амплитудами тока, именно эти экстремальные явления могут быть наиболее опасными для обеспечения стабильной работы энергосистемы. В работе обсуждаются условия, влияющие на развитие экстремальных ГИТ в узлах энергосистемы, а именно величина геомагнитного возмущения, скорость изменения горизонтальной составляющей геомагнитного поля, параметры и конфигурация сети. Обнаружено, что конфигурация протяженной сети может существенно влиять на развитие максимальных значений ГИТ.

ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПРИ ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЕ STARLINK 3-8 ФЕВРАЛЯ 2022 г.

Гуляева¹ Т. Л., Лукьянова² Р.Ю.

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

²ИКИ, г. Москва, г. Троицк, Россия, renata@aari.nw.ru

В течение последних трех лет в рамках проекта SpaceX Илона Маска успешно создавалась группировка космических аппаратов (КА) Starlink. По обычной процедуре SpaceX выводит свои спутники на начальную орбиту высотой около 210 км, далее они должны использовать электрические двигатели для подъема до рабочей высоты. Низкая начальная орбита SpaceX предусмотрена, чтобы спутники, которые не прошли первоначальную проверку после запуска, быстро сбивались с орбиты из-за атмосферного сопротивления и не становились космическим мусором.

На фазе роста СЦ25 условия космической погоды стали меняться. За время с 2019 г. произошли 33 умеренные магнитные бури. В феврале 2022г при запуске с Мыса Канаверал очередной серии спутников системы Starlink произошла техногенная катастрофа. Этот запуск совпал с развитием двухфазной геомагнитной бури. Пики бури пришлись на 3 февраля 11 UT ($Dst = -77$ нТл) и 4 февраля 11 UT ($Dst = -64$ нТл). После старта 3 февраля в 18 UT все спутники Starlink достигли начальной высоты 210 км в перигее и должны были после маневра достичь высоты ~340 км. Однако, 38 из 49 запущенных КА не достигли запланированной высоты и вследствие усиленного торможения сошли с орбиты и вернулись обратно в атмосферу 8 февраля. Пресс-релиз SpaceX информировал, что повышенное торможение и потеря большинства запущенных спутников произошли вследствие повышения на 50% плотности атмосферы во время геомагнитной бури по сравнению со спокойными условиями.

Известно, что во время развития буревых авроральных электроджетов и высыпаний частиц происходит джоулев нагрев полярной атмосферы с увеличением нейтральной плотности в расширяющейся термосфере. Сила торможения спутников пропорциональна плотности масс термосферы. Эмпирическая модель термосферы NRLMSIS, исходя из уровня геомагнитной активности, предсказывает увеличение нейтральной плотности всего лишь на 5%. Модельная оценка оказалась недостаточной для описания динамической реакции термосферы во время конкретной магнитной бури.

В данной работе выполнен анализ эволюции ионосферных возмущений во время указанных событий со 2 по 8 февраля 2022 г. Для выявления перераспределения заряженной компоненты использовались глобальные ионосферные карты полного электронного содержания JPL GIM-TEC с повышенным разрешением в пространстве (1° по широте и долготе) и времени (15 минутные интервалы), а также данные наблюдений спутников SWARM и ионозондов.

Показано, что во время бури термосферный ветер, направленный к экватору, переносил повышенную плотность термосферы от высоких широт на средние и низкие широты, в результате чего нейтральная плотность и плотность ионосферной плазмы росли глобально. Обнаружена значительная асимметрия утро-вечер, в результате которой аномалии плотностей концентрировались в определенном – утреннем – секторе местного времени. Во время максимума буревой активности (3–5 февраля) азимутальная (V_u) компонента ММП была в основном отрицательной. Толщина аврорального овала на утренней стороне была примерно в 3 раза больше, чем на вечерней, так что и джоулев (ионный) нагрев был более интенсивен на утренней стороне. Вторым фактором, способствующим зональной асимметрии перераспределения плотностей, состоит в том, что на фиксированной высоте Солнце начинает нагревать термосферу на утренней стороне. Остывший за ночь газ способен поглотить больше энергии и нагреться сильнее относительно газа, находящегося на противоположной стороне.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СЕТИ ДИАГНОСТИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Фрезе Н.А.¹

¹ ОАО НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, nfreze@mail.ru

Геофизические условия распространения радиоволн КВ диапазона в высоких широтах имеет свою специфику [1-3]:

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;
низкое качество, иногда и отсутствие систем передачи информации (связи).

В работе рассмотрены основные проблемы по созданию сети мониторинга параметров высокоширотной ионосферы, представлены предложения по созданию сети на современной основе.

1. Отчет о составной части НИР «Участие в исследовании возможностей загоризонтного обнаружения воздушных целей в арктической зоне», АО «НПП «Эргоцентр», 2022 г.
2. Отчет о составной части НИР «Разработка предложений по облику комплекса оперативной диагностики геофизических параметров», ПГИ, 2022 г.
3. Отчет о составной части НИР «Исследование влияния состояния ионосферы в полярных широтах на распространение декаметровых радиоволн», ИКИ РАН, 2022 г.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТРАССЫ КВ ДИАПАЗОНА В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Гурвич Е.Е.¹, Мингалев И.В.², Моисеев И.А.¹, Мерзлый А.М.⁴,
Тихонов В.В.³, Шубин В.Н.⁵, Янаков А.Т.¹,

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ggurvich@mail.ru

²Полярный геофизический институт, г. Анпатиты, Россия, iv-mingalev@yandex.ru

³АО «НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, tih-vlad49@yandex.ru

⁴Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия, pinegal42@yandex.ru

⁵ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, shubin@izmiran.ru

В данной работе рассматриваются следующие основные аспекты методики.

Основные оцениваемые характеристики радиотрассы КВ диапазона в арктической зоне.

Программа экспериментальных работ на заданный период времени.

Методика обработки результатов эксперимента [1].

Методика оценки возможности применения на экспериментальной радиотрассе средств измерения ионосферы.

Показано, что разработанная методика позволит повысить эффективность эксперимента.

1. Методика обработки результатов экспериментов, АО «НПК «НИИДАР», 2022г.

ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ 27-28 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

Сецко П.В.¹, Дэспирак И.В.¹, Сахаров Я.А.¹, Билин В.А.¹, Селиванов В.Н.²

¹Полярный Геофизический Институт, Анпатиты, Россия, setsko@pgia.ru

²Кольский научный центр РАН, Анпатиты, Россия

В работе рассмотрены случаи появления геоиндуцированных токов (ГИТ) в нейтрали трансформатора на станциях Карело-Кольской линии электропередач и на финском газопроводе около станции Мантсала во время умеренной магнитной бури 27-28 сентября 2017 года (SYM-H ~ -75 нТл в ~ 06:00 UT 28.09). В этот период магнитосфера Земли находилась под воздействием фронта высокоскоростного потока солнечного ветра (CIR) с повышенной плотностью N_{sw} (~ 57 см⁻³) и амплитудой магнитного поля B_0 (~ 17 нТл). За CIR следовал высокоскоростной поток (HSS) с максимальным значением скорости V_{sw} ~ 715 км/с и периодическими изменениями направления B_z компоненты магнитного поля со значениями до -15 нТл, что и вызвало магнитную бурю. Показано, что на фоне этой бури вечером 27 сентября в ~ 19:40 UT и в ~ 22:00 UT и 28 сентября в ~ 01:00 UT произошло три суббури (I_L ~ -1200 нТл, -1100 нТл и -800 нТл, соответственно). Во время этих суббурь наблюдались ГИТ на станциях Выходной, Ревда, Кондопога и Мантсала. Кроме того, на восстановительной фазе третьей суббури (с ~ 02:30 UT до ~ 07:00 UT) наблюдались Pc5 пульсации с различной амплитудой, которые хорошо видны в профилях ГИТ. Резкое усиление амплитуды пульсаций в ~ 2:40 UT и в ~ 6:20 UT привело к сильным всплескам ГИТ (вплоть до 20 А на станции Выходной). Pc5 пульсации в утреннем секторе обычно связаны с большой скоростью солнечного ветра и небольшими значениями $B_z < 0$, что и наблюдалось в данном событии.

Также в работе продемонстрировано хорошее соответствие между пространственно-временной динамикой суббури, наблюдаемой по магнитометрам сети IMAGE и системе MIRACLE, и появлением ГИТ на станциях регистрации EURISGIC – экспансия западного электроджета отражалась в появлении ГИТ на разных широтах. Кроме того, показано, что профили ГИТ соответствовали профилю W_p индекса во время первой и второй суббури.

Работа П.В. Сецко, И.В. Дэспирак, В.А. Билин выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-55-18003) и Национального Научного Фонда Болгарии (ННФБ) (проект № КП-06Русия/15).

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Аксенович Т.В., Селиванов В.Н., Билин В.А., Сахаров Я.А.

ЦЭС КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия, t.aksenovich@ksc.ru

Бесперебойное питание потребителей является основной задачей электроснабжающих компаний по всему миру. Одной из причин аварийного отключения электроэнергии могут служить магнитные бури в периоды возросшей солнечной активности. Они вызывают протекание геоиндуктированных токов (ГИТ) в протяженных электрических сетях на поверхности Земли.

История изучения этого явления показывает, что ГИТ во время сильных магнитных бурь приводили к нарушению электроснабжения отдельных регионов Канады, Швеции и США. С целью изучения этого явления и оценки рисков таких аварий для региональной системы, на Северо-Западе России была создана система регистрации ГИТ в нейтралях автотрансформаторов 330 кВ Кольско-Карельского транзита.

За 11 лет непрерывного мониторинга были зафиксированы многочисленные случаи протекания высоких величин квазипостоянных токов разной длительности, индуктированные изменением геомагнитного поля. Для анализа токов было выбрано непрерывное вейвлет-преобразование, так как этот метод позволяет фиксировать не только состав частот, но и изменение спектральных характеристик во времени, что является немаловажным при изучении ГИТ.

Для вейвлетного анализа спектральных характеристик ГИТ было выбрано четыре события 24-го солнечного цикла: 13-14 Ноября 2012, 17-18 Марта 2015, 7-8 Сентября 2015 и 7-8 Сентября 2017. В результате обсуждения полученных скейлограмм ГИТ были сделаны следующие выводы:

- частотный диапазон 1.5-3.6 мГц проанализированных ГИТ совпадает с частотным диапазоном P₅/P₃ пульсаций, и именно на этих частотах были зафиксированы максимальные значения ГИТ;
- исследование сигнала ГИТ с отрезками, имеющими большой разброс в амплитуде, не дает ясных результатов о частотном составе ГИТ при меньших амплитудах;
- топология высоковольтных линий исследуемой подстанции сильно влияет на величину ГИТ.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00413, <https://rscf.ru/project/22-29-00413/>.

РЕГИСТРАЦИЯ ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Селиванов В.Н., Сахаров Я.А., Колобов В.В., Аксенович Т.В., Билин В.А.

ЦЭС КНЦ РАН, г. Анатимы, Россия, v.selivanov@ksc.ru

Разработаны новый принцип и устройство регистрации геоиндуктированных токов (ГИТ) для бесконтактного измерения переменных и квазипостоянных токов в фазных проводах воздушных линий (ВЛ) электропередачи дифференциальным методом. Дифференциальный метод измерения магнитного поля тока в линиях электропередачи известен давно, самое раннее упоминание датируется 1994 г. [1], свежий обзор вышел в 2020 г. [2]. Магнитное поле под ВЛ 330 кВ является суперпозицией магнитного поля Земли и магнитного поля токов, протекающих в фазных проводах. Чтобы вычлечь из данных регистрации токов в ВЛ магнитное поле Земли, используется дифференциальный метод: выполняются измерения двумя одинаковыми датчиками, один из которых размещен непосредственно под проводами ВЛ, а второй на таком расстоянии от ВЛ, где влияние токов в ней пренебрежимо мало. При обработке данных из результатов измерений первого датчика вычитаются данные со второго датчика (поле Земли одинаковое в этих точках).

Отличие нашей реализации состоит в том, что используются не феррозондовые датчики, а твердотельные двухкомпонентные магниторезистивные датчики магнитного поля. Этот выбор позволил многократно снизить стоимость макетного устройства, а также значительно уменьшить энергопотребление для увеличения автономности системы мониторинга.

С 2011 г. в мы проводим регистрацию ГИТ в нейтралях трех трансформаторов магистральной электрической сети «Северный транзит». Геоиндуктированные токи в нейтралях являются суммой токов всех линий электропередачи, присоединенных к трансформатору и, как правило, они значительно меньше ГИТ в отдельных линиях. Измерение токов в ВЛ позволит нам оценить погонную эдс, возбуждаемую геомагнитными возмущениями в линиях, для использования в модельных расчетах.

За два месяца опытной эксплуатации устройства подтверждена перспективность дифференциального метода для измерения геоиндуктированных токов в проводах ВЛ. Кроме того, сделан вывод, что твердотельный магниторезистивный датчик может с успехом применяться для измерения вариаций магнитного поля Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00413, <https://rscf.ru/project/22-29-00413/>.

1. Viljanen, A., & Pirjola, R. (1994). Geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system. *Surveys in Geophysics*, 15(4), 383–408. doi:10.1007/BF00665999.

2. Hübert, J., Beggan, C. D., Richardson, G. S., Martyn, T., & Thomson, A. W. P. (2020). Differential Magnetometer Measurements of Geomagnetically Induced Currents in a Complex High Voltage Network. *Space Weather*. doi:10.1029/2019sw002421.

СОБЫТИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РОСТА ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ И В КАРЕЛИИ ЗА 11 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

Белаховский В.Б.¹, Пилипенко В.А.², Сахаров Я.А.^{1,2}, Селиванов В.Н.³

¹ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, belakhov@mail.ru

² Геофизический центр РАН, г. Москва

³ Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты

В данной работе проанализированы случаи с экстремальными значениями геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) на Кольском полуострове и в Карелии за 2011-2022 года. Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом и Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, система включает в себя 5 станций. Система регистрации ориентирована в основном в направлении север-юг. Регистрация ГИТ ведется непрерывно с 2011 года, поэтому к 2022 году наблюдения ведутся уже 11 лет и включают в себя 24-25 циклы солнечной активности. Данные ГИТ сопоставлялись с данными магнитометров ПГИ в обсерваториях "Ловозеро", "Лопарская", с данными магнитометров сети IMAGE.

При анализе событий в качестве основной выбрана станция Выходной (VKH). Рассмотрено около 15 случаев, когда значения ГИТ на станции VKH превышали 30 Ампер. Например, это сильные магнитные бури 17-18 марта 2013, 17-20 марта 2015, 7-8 сентября 2017, 27-29 мая 2017, 25-27 августа 2018. Эти бури были вызваны корональным выбросом массы (СМЕ). То есть, как правило, именно СМЕ магнитные бури приводят к экстремальным значениям ГИТ. Наибольшие скачки ГИТ происходят во время суббури, связанных с развитием западного электроджета (отрицательные магнитные бухты). При этом развитие вихревых токовых систем во время суббури (P₃ геомагнитных пульсаций) может давать заметный вклад в рост ГИТ для ЛЭП, ориентированной в направлении север-юг. Рассматриваются различные геофизические условия (индексы геомагнитной активности, параметры солнечного ветра и ММП) для разных событий, приводящие к экстремальным значениям ГИТ.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 21-77-30010 (Пилипенко В.А., Сахаров Я.А.).

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ ПО ДАННЫМ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦЕПОЧКИ МАГНИТОМЕТРОВ

Евдокимова М.А., Петрукович А.А., Апатенков С.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, evdokimari@mail.ru

В работе исследуются модели восстановления профиля западного электроджета по данным магнитного поля меридиональной цепочки магнитометров. Эта задача представляет интерес в связи с тем, что данные магнитного поля известны в конечном, довольно небольшом количестве точек. Сделан обзор существующих линейных моделей и показана их применимость на сетях IMAGE, CARISMA, магнетометрах на Ямале. Оптимальной для сети IMAGE является модель с большим числом равномерно проводов (полос). Однако, большое число параметров (токов) приводит к большим ошибкам, и на более разреженной сети станций (Ямал или CARISMA) такие методы плохо применимы. Для малого количества станций оптимальной является нелинейная модель с малым числом некоррелированных параметров. Была построена модель одной полосы с тремя параметрами и проведен ее тест на малом количестве станций. Показано, как положение станций относительно границ электроджета влияет на параметры модели. Ширина электроджета и плотность тока может варьироваться в зависимости от взятых станций, однако, полное значение тока меняется не сильно. Был введен дополнительный параметр, позволяющий менять меридиональный профиль тока от прямоугольного к колоколообразному, но его влияние на работу модели оказалось слабым. Также проведено сравнение оценок тока, полученных по этим моделям с оценками суббурного токового клина, полученными по среднеширотным станциям. Наземные модели могут дополнять результаты, полученные по спутниковым данным, что показано на примере данных SWARM.

1. Kotikov A. L., Latov Yu. O., Troshichev O. A., Structure of auroral electrojets by the data from a meridional chain of magnetic stations, *Geophysica*, 1987, V. 23, P. 143-154.
2. Evdokimova M. A., Petrukovich A. A.: Estimation of westward auroral electrojet current with magnetometer chain data, *Ann. Geophys.*, 38, 1, 109-121, 2020
3. Sergeev, V.A., et al. Comparison of UV optical signatures with the substorm current wedge as predicted by an inversion algorithm., *J. Geophys. Res.: Space Physics* 101. A2 (1996): 2615-2627.
4. Petrukovich A. A., Evdokimova M. A. Apatenkov S. V.: Development of the Total Westward Auroral Electrojet Current Estimates during Intense Substorms. *Cosmic Res* 60, 397-405 (2022). <https://doi.org/10.1134/S0010952522060090>
5. https://space.fmi.fi/MIRACLE/iono_1D.php
6. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Swarm-AEBS-product-definition.pdf>

КАТАЛОГ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ С 2013 ГОДА

О.В. Мингалев¹, В.М. Митрофанов¹, Т.Г. Когай¹, О.В. Хабарова², А.М. Мерзлый³

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru

² ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Троицк, Москва

³ Институт космических исследований РАН, Москва

Для проведения анализа экспериментальных данных для событий с геомагнитными возмущениями различных типов составлен каталог событий с 2013 года по 2022 год с разбиением на четыре группы по уровню возмущения геомагнитных индексов Dst и SYM_H. Созданный каталог позволяет отслеживать процесс развития каждого события и определить интервалы времени, для которых нужно анализировать доступные данные спутниковых и наземных измерений.

В каталоге в первую группу внесены события, в которых возмущения индексов Dst и SYM_H присутствовали, но не достигли уровня слабой магнитной бури, то есть один из индексов Dst или SYM_H не опускался ниже -30 нТл. В эту группу событий входят, в том числе, внезапные сжатия магнитосферы, после которых не было магнитной бури, а также суббури без магнитных бурь. Второй группой событий в каталоге являются слабые магнитные бури, во время которых один из индексов Dst и SYM_H имеет минимальное значение в пределах от -50 нТл до -30 нТл. Третьей группой событий являются средние магнитные бури, во время которых один из индексов Dst и SYM_H имеет минимальное значение в пределах от -100 нТл до -50 нТл. Четвертой группой событий являются сильные магнитные бури, во время которых один из индексов Dst и SYM_H имеет минимальное значение менее -100 нТл.

Для каждого события в отдельной папке построены «рабочие» (в автоматическом режиме) графики изменения по времени следующих параметров солнечного ветра в точке Лагранжа L_1 : компоненты в системе координат GSE и величина для магнитного поля и для скорости солнечного ветра, а также концентрация и температура протонов. Кроме того, построены графики изменения по времени геомагнитных индексов кольцевого тока Dst и SYM_H, график индекса Kp, а также графики характеризующих наличие суббури геомагнитных индексов AL и AU. При этом записываются файлы с данными, по которым построены графики.

Отметим, что геомагнитные индексы AL и AU в цифровом виде доступны только до июня 2018 года включительно. Начиная с июля 2018 года доступны только рисунки с графиками (так называемые quick look). Поэтому для событий начиная с июля 2018 года использовалась программа оцифровки по этим рисункам значений этих индексов и запись полученных приближенных значений в форматные файлы.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc5/Pi3 И ЭНЕРГИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Зворыгина Е. С.¹, Ягова Н. В.²

¹ МФТИ (НИУ), г. Москва, Россия, zvorygina-el@yandex.ru

² ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Работа посвящена взаимосвязи между потоками энергичных электронами (40 кэВ, 75 кэВ, 150 кэВ, 275 кэВ и 475 кэВ) и амплитудами геомагнитных пульсаций Pc5/Pi3. Использовались данные измерений магнитного поля и дифференциального по направлению и энергии потока электронов на геостационарном спутнике GOES-15. Исследовались коэффициенты корреляции между амплитудой геомагнитных пульсаций при разных временах задержки. Выявлены качественные отличия в зависимости коэффициента корреляции от времени при низких (до 100 кэВ) и высоких энергиях электронов.

По характеру зависимости было выявлено, что для продольной компоненты магнитного поля время задержки монотонно возрастает, а максимальное значение коэффициента корреляции монотонно уменьшается с энергией, а для поперечной компоненты максимум корреляции наблюдается при 75 кэВ. Наибольшие значения коэффициента корреляции $C \geq 0,6$ и минимальные времена задержки $\tau < 10$ часов наблюдаются на более низких энергиях. Абсолютный минимум $\tau = 4$ часа был обнаружен при энергии 40 кэВ. При низких энергиях максимум коэффициента корреляции соответствует квазипродольному потоку, направленному от экватора к Земле.

При высоких энергиях максимум коэффициента корреляции наблюдается для поперечной популяции электронов, а время задержки приближается к суткам.

Зависимость максимального коэффициента корреляции и времени его достижения от питч-угла также оказалась существенно разной для низких и высоких энергий. При низких энергиях максимум корреляции наблюдается для частиц с малыми питч-углами, двигающимися от экватора и при том же угле наблюдалось минимальное значение времени задержки. Для высоких энергий зависимость имела максимум при питч-угле 90.

Вероятным механизмом ускорения электронов до энергии 100 кэВ является взаимодействие с МГД волнами на дрейфовой частоте, а для объяснения ускорения до более высоких энергий необходимо учитывать другие механизмы.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ Pc5/Pi3

Ягова Н. В.^{1,2}, Сахаров Я. А.^{2,3}, Пилипенко В. А.^{1,2}, Селиванов В. Н.⁴

¹ИФЗ РАН, Москва, Россия, nyagova@ifz.ru

²ГЦ РАН, Москва, Россия

³ПГИ, Апатиты, Россия

⁴ЦЭС КНЦ РАН, Апатиты, Россия

Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 являются эффективным источником геоиндуцированных токов (ГИТ). ГИТ, связанные с небуревыми пульсациями, остаются слабо изученными. Параметром, характеризующим эффективность возбуждения ГИТ пульсациями, может служить отношение амплитуд либо спектральной плотности мощности (PSD) вариаций тока и компоненты магнитного поля R_{IB} . Эффективность возбуждения ГИТ зависит от параметров самих пульсаций: поляризации, пространственного масштаба и спектрального состава [1-2]. В настоящей работе исследуется связь параметров магнитного поля и плазмы вне и внутри магнитосферы и пульсаций Pc5/Pi3 с высоким отношением R_{IB} . Для анализа используются данные регистрации ГИТ в Российской Арктике одновременно с магнитометрическими наблюдениями на станциях сети IMAGE и спутниковыми измерениями вне и внутри магнитосферы. Для оценки возможности прогноза потенциально опасных ГИТ выполнен анализ взаимосвязи неволновых параметров с параметрами пульсаций в зависимости от времени задержки.

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-77-30010.

1. 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>

2. Sakharov Ya. A., Yagova N. V., Pilipenko V. A., Selivanov V. N. // Russ. J. Earth. Sci. 2022. V. 22. ES1002. doi:10.2205/2021ES000785

РИСКИ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТРУБОПРОВОДОВЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Костарев Д.В.^{1,2}, Пилипенко В.А.^{2,3}, Козырева О.В.^{2,3}

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

2. ГЦ РАН, г. Москва, Россия

3. ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Одним из наиболее значимых факторов космической погоды являются геоиндуцированные токи (ГИТ) в протяженных проводящих заземленных технологических системах, вызываемые резкими изменениями геомагнитного поля. Магистральные нефтегазопроводы относятся к таким системам. Связанные с геомагнитными возмущениями вариации геоэлектрического поля создают колебания потенциала почва-труба (ППТ), что может негативно отразиться на эксплуатации трубопроводов.

В рамках данной работы разработан программный код для расчета потенциала трубопровода при заданном возмущении электро-теллурического поля. В качестве примера проведены оценки искажения ППТ при суббуре 9 октября 2018 г., сопровождавшейся интенсивными геомагнитными Pi3 пульсациями. Для этого использована база данных магнитных станций в Российской Арктике и глобальная модель проводимости поверхностных слоев Земли.

Возмущение теллурического поля построено с помощью пересчета зарегистрированного магнитного возмущения в амплитуду теллурического поля по импедансному соотношению. Модельная трубопроводная сеть представлена в виде набора эквивалентных схем замещения, которые объединяются между собой для формирования узловой сети проводимости. Используя метод узловой матрицы полной проводимости, определяются значения потенциала в узлах трубопроводной системы.

Полученные результаты могут быть интересны организациям, проектирующим и эксплуатирующим трубопроводы в высокоширотных областях.

АННОТИРОВАННЫЙ АТЛАС ПРИМЕРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМИССИЙ В АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ИМАДЖЕРАМИ И ИЗОБРАЖАЮЩИМИ СПЕКТРОГРАФАМИ С РАЗНЫХ ОРБИТ И ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ. ЧАСТЬ 1. АВРОРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВОЗБУЖДЕННЫЕ ПРИРОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, ВКЛЮЧАЯ АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ

Кузьмин А.К.¹⁾, Мерзлый А.М.¹⁾, Никифоров О.В.¹⁾, Петрукович А.А.¹⁾, Потанин Ю.Н.²⁾, Садовский А.М.¹⁾, Соколов А.Д.³⁾, Янаков А.Т.¹⁾

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, alkkuzmin@mail.ru

Составлен аннотированный атлас из конкретных примеров авроральных изображений и измерений потоков заряженных частиц в полярной ионосфере, полученных разными приборами с орбит КА и поверхности Земли, в событиях, происходивших в основном в геомагнитно-возмущенных условиях суббурь в разных секторах MLT. Каждый пример, а также характеристики приборов описаны в тексте и иллюстрированы комбинированными рисунками на основе, адаптированных из ряда работ (ссылки в тексте). Мотивацией данной работы стал анализ опыта развития технологии подготовки и проведения комплексных экспериментов на орбитах КА (включая малые КА, зондирующих ракеты и поверхности Земли), нацеленных на исследования многообразных авроральных явлений в полярной ионосфере, отражающихся в градиентах Ne в различных слоях ионосферы, являющихся основными «виновниками» проблем при распространении трансполярных сигналов [McMahon et al., 2009]. Атлас в основном акцентирован на результаты наблюдений авроральных эмиссий, как в видимой области спектра, так и области вакуумного ультрафиолета, полученных с помощью орбитальных и наземных изображающих камер, и изображающих спектрографов, а также спектрометров потоков высыпающихся частиц, работавших на относительно низких полярных орбитах. Все представленные примеры мелкомасштабных авроральных структур были выбраны исходя из условия, что они были возбуждены высыпающимися электронами плазменного слоя на ночной стороне овала или в дневном каспе, ускоренными процессами в ближней магнитосфере, включая Альфвеновские волны и их флуктуации и резонансы, и/или продольными электрическими полями и квазистатическими продольными токами, распространяющимися вниз по силовым линиям к авроральной ионосфере.

СТРУКТУРА АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ПГИ

Козелов Б.В., Воробьев В.Г., Титова Е.Е., Попова Т.А.

Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область, Россия, boris.kozelov@gmail.com

В докладе по данным высокоширотных наблюдений Полярного геофизического института проанализировано несколько типичных авроральных событий разного масштаба в различных секторах MLT. Используются данные авроральных камер в г.Апатиты, полигоне Верхнетуломский и обсерватории Ловозеро. События привязаны к параметрам солнечного ветра, физическим магнитосферным доменам и границам, фазе магнитосферного возмущения. Определены характеристики пространственной структуры полярных сияний в отобранных событиях: доминирующие масштабы, показатели скейлинга, динамическая оценка степеней свободы.

Работа поддержана грантом РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области №22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

Литература

1. Головчанская И. В., Б. В. Козелов. Диапазон масштабов альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны // Космические исследования. 2016 г., 54, № 1, с. 52–57. DOI: 10.7868/S002342061601009X
2. В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина, Е.Е. Антонова, Влияние скорости и плотности плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLI Annual Seminar, Apatity, P.30-33. 2018
3. Козелов Б.В., Ролдугин А.В. Получение информации об ионосферно-магнитосферной плазме по наблюдениям полярных сияний // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С.366-371. DOI: 10.31857/S0367676521030157

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОБЪЕДИНЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЦЕНТРА РОССИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ

Тренькин А.А.¹ Вахнина В.В.² Воеводин С.В.¹ Коблова О.Н.¹ Кувшинов А.А.² Черненко А.Н.²

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия

² Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия
alexey.trenkin@gmail.com

Исследование негативного влияния космической погоды и, как частного случая, магнитных бурь, на функционирование критической технологической инфраструктуры и развитие методов и средств её защиты является весьма актуальной и в то же время сложной задачей. Решением этой проблемы занимаются многие развитые страны, прежде всего США.

В настоящем докладе представлены результаты разработки методологии расчетного моделирования воздействия геоиндуцированных токов на крупные электроэнергетические системы. Методология позволяет учитывать факторы изменения реактивной мощности и температуры элементов конструкции силовых трансформаторов при их подмагничивании, а также работу релейной защиты.

Впервые выполнено моделирование воздействия сильной магнитной бури на Объединенную энергетическую систему (ОЭС) Центра России, включающую энергосистемы Московской, Ленинградской и других важнейших административно-промышленных областей страны. Для расчета режимов функционирования ОЭС Центра России при воздействии на силовые трансформаторы геоиндуцированных токов разработана её компьютерная модель, включающая наиболее мощные электроэнергетические объекты (электрические станции, трансформаторные подстанции), образующие электрическую сеть с номинальным напряжением 500 и 750 кВ. Исходные данные по воздействующим факторам бури взяты из американского стандарта NERC TPL-007-04, что обусловлено отсутствием отечественной нормативной документации, касающейся вопросов воздействия геомагнитных возмущений на электрические сети. Показано, что при таком воздействии возникает комплекс факторов, способный вызвать развитие системной аварии в ОЭС Центра России, к числу которых относятся:

- увеличение потерь реактивной мощности и, как следствие, значительное снижение напряжения на ряде объектов;
- массовое отключение ЛЭП действием третьей ступени дистанционной защиты;
- недопустимый нагрев элементов конструкций некоторых силовых трансформаторов.

Отмечено, что ряд допущений по характеристикам воздействующих факторов магнитной бури и параметрам модели ОЭС Центра России позволяет считать ожидаемые последствия воздействия как оптимистичные.

Представленные результаты обуславливают необходимость продолжения исследований в этом направлении.

РАНЖИРОВАНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ ПО СТЕПЕНИ УГРОЗЫ ДЛЯ РЕЖИМА ВЫДАЧИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ БЛОКОМ «ГЕНЕРАТОР – ТРАНСФОРМАТОР»

Вахнина В.В.¹, Кувшинов А.А.¹, Черненко А.Н.¹, Пудовинников Р.Н.¹, Тренькин А.А.², Воеводин С.В.²

¹ Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

² Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия
VVVahnina@yandex.ru

Блочные трансформаторы, работающие в составе энергетических блоков “синхронный генератор - трансформатор” электростанций, подвергаются в процессе эксплуатации более интенсивным и равномерным нагрузкам по сравнению с сетевыми трансформаторами, что служит причиной более быстрого истощения ресурса и более высокой удельной повреждаемости [1]. Поэтому блочные трансформаторы наиболее уязвимы к дополнительным факторам утяжеления условий эксплуатации, к числу которых относится воздействие геоиндуцированных токов (ГИТ). В условиях геомагнитных возмущений, вызывающих увеличение мощности намагничивания блочного трансформатора, сохранить установившийся режим работы блока без снижения активной нагрузки позволяют резервы синхронного генератора по выдаче реактивной мощности. В качестве критерия степени угрозы ГИТ для режима выдачи активной мощности используется сравнение мощности намагничивания блочного трансформатора при насыщении магнитной системы с уровнем генерации реактивной мощности синхронного генератора в номинальном режиме. Для количественной оценки используется относительная величина ГИТ $I_{ГИТ}^* = I_{ГИТ} / I_{m(\mu)}$, где амплитуда $I_{m(\mu)}$ тока намагничивания блочного трансформатора при полном насыщении магнитной системы. С учетом ограничений, налагаемых автоматическим регулятором возбуждения (АРВ), возможны несколько вариантов изменения режима в зависимости от величины ГИТ:

- незначительное увеличение мощности намагничивания при $I_{ГИТ}^* \leq 0,0047$ (не более 7,68–11,45% от уровня генерации реактивной мощности в номинальном режиме), которое может быть компенсировано увеличением генерации реактивной мощности при сохранении неизменного уровня напряжения и активной мощности за счет такого увеличения тока возбуждения в результате действия АРВ, при котором не возникает перегрузки по токам статора и ротора синхронного генератора;

- значительное увеличение мощности намагничивания (до 25–37% уровня генерации реактивной мощности в номинальном режиме) при увеличении ГИТ до значения $I_{ГИТ}^* \cong 0,01482$, которое может быть компенсировано увеличением генерации реактивной мощности без перегрузки по току возбуждения, но при условии уменьшения уставки АРВ по напряжению и снижения уровня активной мощности для предотвращения перегрузки синхронного генератора по току статора;

- критическое увеличение мощности намагничивания (более 42–62,3% номинального уровня генерации реактивной мощности) при увеличении ГИТ до значений $I_{ГИТ}^* \geq 0,0345$, при котором АРВ переходит в режим ограничения тока возбуждения и не способен предотвратить недопустимое снижение напряжения на генераторных шинах без разгрузки синхронного генератора по активной мощности.

1. Львов М.Ю. Анализ поврежденности силовых трансформаторов напряжением. – Электричество, 2010, № 2, с. 27-31.

РЕГИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ МАГНИТОМЕТРОВ

Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р.

ГЦ РАН, г. Москва, Россия, cpu16bit@yandex.ru

Несмотря на существующее разнообразие подходов к мониторингу космической погоды и различного рода геофизических параметров в области аврорального овала, вопрос эффективного прогнозирования и диагностирования полярных сияний на сегодняшний день остается открытым.

В настоящей работе исследуется возможность локального (в окрестности геофизической станции «Lovozero») диагностирования полярных сияний путем интеллектуальной обработки геомагнитных данных. Приводятся результаты статистического анализа признаков переменных, а также оценивается их значимость относительно целевой функции.

Вследствие применения теоремы Байеса к данным наблюдениям за 2015 г. показано, что при усредненном по 30 мин $|dH_{Loz}/dt| \geq 4$ нТл/мин возможно диагностировать существование полярных сияний в видимом спектре с вероятностью ~90 % и с вероятностью более 99 % при $|dH_{Loz}/dt| \geq 9$ нТл/мин. При этом применение методов машинного обучения для задач бинарной классификации позволяет обеспечить диагностирование сияний с точностью до 97 %. В заключение рассматриваются перспективные пути улучшения метрик качества полученных диагностических моделей и обсуждаются области их возможного применения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010).

1. Newell, P. T., T. Sotirelis, and S. Wing (2010), Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora, *J. Geophys. Res.*, 115, A03216, doi:10.1029/2009JA014805.

2. Newell P. T., Gjerloev J. W. Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices. *J. Geophys. Res.* 2011. No. 116. P. A12232. DOI: 10.1029/2011JA016936.

3. Ягодкина О. И., Воробьев В. Г., Шекунова Е. С. Наблюдения полярных сияний над Кольским полуостровом. *Труды Кольского научного центра РАН.* 2019. Т. 10. № 8-5. С. 43-55. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.

4. PGI Geophysical data. January, February, March 2015 / Ed. V. Vorobjev. Murmansk, Apatity: PGI KSC RAS. 2015.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН КВ ДИАПАЗОНА

Мерзлый А.М.^{1,4}, Мингалев И.В.², Моисеев И.А.¹, Калишин А.А.³, Шубин В.Н.⁵, Сахаров Я.А.², Черняков С.М.², Янаков А.Т.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pinegal42@yandex.ru

²Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

³ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия,

⁴Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия,

⁵ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, shubin@izmiran.ru

В докладе рассматриваются результаты численного моделирования распространения радиоволн КВ диапазона в арктической зоне. Моделирование проведено для условий возмущения ионосферы (магнитные бури).

Анализируются изменения характеристик высокоширотной радиотрассы во время авроральных высыпаний и во время спокойных условий.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЫ ИКИ РАН ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Янаков А.Т.¹, Мерзлый А.М.², Моисеев И.А.¹, Никифоров О.В.¹, Стариков А.С.¹, Филатов Г.С.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, eeet-21@mail.ru

²Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия, pinega142@yandex.ru

В данной работе рассматриваются основные особенности применения радиотрассы ИКИ РАН при решении прикладных задач в арктических условиях.

Определены основные научные и прикладные задачи радиотрассы, особенности размещения оборудования, проведена рекогносцировка в базовых и промежуточных точках трассы, подготовлены часть площадок для размещения оборудования, размещено и проводится тестирование оборудования в одной из базовых точек.

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ВОЗМОЖНОСТИ ЗАГОРИЗОНТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Мингалев И.В.¹, Суворова З.В.¹, Козелов Б.В.¹, Мерзлый А.М.², Янаков А.Т.², Шубин В.Н.³

¹Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия, mingalev_i@pgia.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия,

³ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

В данной работе изучается прохождение радиоволн КВ-диапазона через ионосферную плазму при наличии в последней неоднородностей с повышенной концентрацией электронов. Эти неоднородности возникают при высыпаниях энергичных протонов и электронов из магнитосферы. Они вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля и имеют размеры поперек магнитного поля в широком диапазоне от десятков метров до десятков километров. Концентрация электронов в этих неоднородностях может на 1-3 порядка превышать концентрацию в окружающей плазме. Если критическая частота плазмы в этих неоднородностях превышает частоту радиосигнала, а размеры неоднородности больше длины волны, то радиосигналы отражаются от этих неоднородностей, что создает помехи работе РЛС загоризонтного обнаружения. В работе представлены результаты численного моделирования прохождения КВ сигналов через области повышенной электронной концентрации, вызванной высыпаниями частиц энергий от 10 до 40 кэВ на высотах D и E слоев ионосферы на высоких широтах. Для моделирования использовалась разработанная в ПГИ модель для расчета лучевых траекторий коротких радиоволн и поглощения этих волн на траекториях. Расчеты проводятся в приближении геометрической оптики с учетом анизотропии ионосферной плазмы и поглощения за счет столкновений электронов без каких-либо упрощений. Для расчета концентрации и температуры электронов в ионосферной плазме используется глобальная эмпирическая модель ионосферы ГДМИ, разработанная в ИЗМИРАН, с дополнительной ионизацией энергичными электронами по модели, разработанной в ПГИ. Для расчета частоты столкновений электронов используются концентрации нейтральных составляющих атмосферы и их температура, рассчитанные с помощью эмпирической модели NRLMSISE-00. Представлены результаты, демонстрирующие влияние пространственных размеров областей высыпаний частиц на высотах D и E слоев ионосферы, а также энергии высыпающихся электронов и плотности их потока на возможности загоризонтного обнаружения и на однокачковую связь в КВ диапазоне в высоких широтах.

Работа Суворовой З.В. и Козелова Б.В. поддержана грантом РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области №22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

КОРРЕКЦИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ FOF2 В МОДЕЛИ GDMF2 ПО ДАННЫМ ПЭС

Шубин В.Н.¹, Мерзлый А.М.²

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

² ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pinega142@yandex.ru

Концентрацию электронов в F2 области ионосфере является функцией солнечного потока, состава нейтральной атмосферы и динамических эффектов, вызванных движением границ аврорального овала и главного ионосферного провала. Концентрацию электронов в F2 области ионосфере сравнительно легче наблюдать, чем солнечные, магнитосферные и термосферные драйверы, благодаря достижениям в области методов дистанционного зондирования ионосферы. Если можно вывести информацию о поведении термосферы, магнитосферы и Солнца из ионосферных наблюдений, то это, вероятно, существенно повысит точность прогноза с помощью усвоения ионосферных данных.

В работе представлены прогнозы критической частоты $foF2$ на основе Глобальной Динамической Модели F2-слоя ионосферы (GDMF2) [1], которая использует данные наблюдений ПЭС для корректировки $foF2$. Эффективность прогнозирования оценивается по данным наблюдений на наземных ионосферных станциях.

1. Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019. DOI: 10.1134/S0016794019040151.

РЕГИСТРАЦИЯ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

Климов С.И.¹, Грушин В.А.¹, Зелёный Л.М.¹, Новиков Д.И.¹, Осадчая Л.А.¹, Петрукович А.А.¹, Головин Д.¹, Лихтенбергер Я.², Сегеди П.³

¹ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,

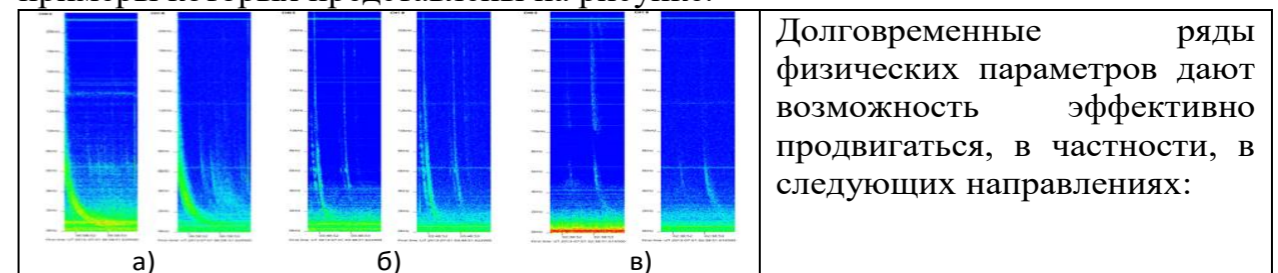
sklimov@iki.rssi.ru

² Университет Ётвёша, г. Будапешт, Венгрия

³ БЛ-Электроникс, г. Вакдука, Венгрия

Эксперимент «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС засвидетельствовал [1] с высоким частотно-временным разрешением [2] наличие свистящих атмосфериков (0,1 – 23 кГц) в различных областях ионосферы на стабильных по высоте и наклонению орбитах.

Молниевые разряды, вызывающие атмосферерики, как правило, имеют пик интенсивности около 5 кГц [3]. В работе анализируются физические условия образования, условно выделенных три конфигурации наблюдаемых атмосферерики: низкочастотные – а), классические б) и высокочастотные в), примеры которых представлены на рисунке.



- организация долгосрочного мониторинга грозовых разрядов по программам фундаментальных исследований солнечно-земных связей (Целевая работа «Обстановка 2.1») на Российской орбитальной служебной станции РОСС [4, 5], имеющей более высокое, чем МКС (~52 град), наклонение орбиты, что будет способствовать охвату всей территории России, включая полярные области.

- создание базы экспериментальных плазменно-волновых данных по состоянию ионосферы Земли для выявления и предотвращения ее катастрофических изменений.

[1] Климов С.И., В.А. Грушин и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперименте «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС. Космическая техника и технологии № 1(32)/2021, стр. 20-41. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-1-20-41.

[2] Климов С.И., Грушин В.А., и др. Частотно-временные характеристики плазменно-волновых излучений в ионосфере. Эксперимент «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС. Шестнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", 08-12 февраля 2021, ИКИ РАН, <https://plasma2021.cosmos.ru/> с. 274.

[3] Helliwell R. A., Jean A. G. and Taylor W. L. 1958 *Proc. IEEE* 46, 1760.

[4] Российская национальная орбитальная служебная станция (РОСС). "Наука и техника" <https://naukatehnika.com/rossijskaya-kosmicheskaya-stanciya-ross.html?noredir=true>

[5] Долгоносков, М.С., Л.М. Зелёный и др. Перспективы исследований высокоэнергичных процессов в атмосфере земли: «Чибиб-АИ» и «Обстановка 2.1». *Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 15-19 февраля 2016г., ИКИ РАН, Сборник тезисов, с. 204.*

СЕКЦИЯ «Волновые явления в космической плазме»

Среда, 08.02.2023 г., комната 202 (Line 2)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
Председатель: <u>Кочаровский Вл. В.</u>			
1	14.30 – 14.50	Беспалов П.А., Савина О.Н., Нещеткин Г.М.	Особенности квазипериодических КНЧ излучений вне плазмосферы
2	14.50 – 15.10	Грач В.С., Демехов А.Г.	Взаимодействие релятивистских электронов с пакетами электромагнитных ионно-циклотронных волн конечной длительности
3	15.10 – 15.30	Лужковский А.А., Шкляр Д.Р.	Возбуждение и распространение электромагнитных и квази-электростатических ионно-циклотронных волн в магнитосфере Земли
4	15.30 – 15.50	Дертеев С.Б., Шивидов Н.К., Сапралиев М.Е., Бембитов Д.Б., Михаляев Б.Б.	О роли излучения в затухании звуковых волн в солнечной короне
5	15.50 – 16.10	Михаляев Б.Б., Шивидов Н.К., Нага Варун Е., Дертеев С.Б., Бембитов Д.Б.	Дисперсия звуковых волн в плазме солнечной короны
	16.10 – 16.30	<i>Перерыв на кофе</i>	
Председатель: <u>Шкляр Д.Р.</u>			
6	16.30 – 16.50	Колпак В.И., Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л.	Условия "захвата" аврорального километрового радиоизлучения (АКР) в каналы плотности плазмы

7	16.50 – 17.10	Дорофеев Д.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М.	Основные свойства излучения типа гектометровый континуум в "ближней зоне"
8	17.10 – 17.30	Губенко В.Н., Кириллович И.А.	Изучение волновых явлений и наклонных спорадических E-слоев на ионосферных высотах по данным анализа радиозатменных измерений
9	17.30 – 17.50	Сысоев А.А., Иудин Д.И.	Новый подход к моделированию компактных внутриоблачных разрядов.
10	17.50 – 18.10	Иудин Д.И., Сысоев А.А.	Волны реинкарнации в плазменных каналах молнии
	18.10 – 18.30	Постерная сессия	

Постерные доклады

1. Савина О.Н., Беспалов П.А.
Влияние локальной волны ламба в неизотермической атмосфере на плазменный магнитосферный мазер
2. И.М. Вершинин, М.Е. Гуцин, И.Ю. Зудин, С.Ю. Корнишин, С.В. Коробков, К.Н. Лоскутов, С.А. Манаков. А.С. Николенко, А.В. Стриковский
Лабораторные испытания низкочастотных электрических датчиков для ионосферных и магнитосферных космических аппаратов
3. Ермакова Е.Н., Рябов А.В.
Исследование влияния ионосферных резонаторов на спектры унч магнитных полей, распространяющихся в горизонтально неоднородном волноводе земля-ионосфера от разных источников.
4. Захаров Ю.П., Терехин В.А., Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г.
Постановка экспериментов с облаками лазерной плазмы для моделирования процессов генерации квази-сферических бесстолкновительных ударных волн в космической плазме
5. Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Чибранов А.А., Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф.
Генерация интенсивных вистлерных возмущений лазерной плазмой в замагниченной фоне
6. Ларченко А.В., Никитенко А.С., Бекетова Е.Б., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В.
Особенности распространения СДВ сигналов передатчиков радионавигационной системы РСДН-20 во время суббурь
7. Нещеткин Г.М., Беспалов П.А., Савина О.Н.
Расчет размерности хаусдорфа типичных ОНЧ хоров в области их возбуждения

Четверг, 09.02. 2023 г., Конференц-Зал (Line 1)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
			<u>Председатель: Демехов А.Г.</u>
1	09.30 – 09.50	Кочаровский Вл.В., Гарасёв М.А., Деришев Е.В., Нечаев А.А.	Генерация сильных мелкомасштабных магнитных полей при инжекции плазмы с горячими электронами в неоднородный слой холодной намагниченной плазмы
2	09.50 – 10.10	Зудин И.Ю., Гушин М.Е., Николенко А.С., Айдакина Н.А., Гундорин В.И., Коробков С.В., Стриковский А.В.	Шумовые и дискретные компоненты электромагнитного излучения, возбуждаемые в магнитоактивной плазме электронными потоками в лабораторных экспериментах на крупномасштабном плазменном стенде
3	10.10 – 10.30	Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.	Резонансное взаимодействие периодических сгустков лазерной плазмы с замагниченным фоном. Импульс низкочастотных волн
	10.30 – 11.00		<i>Перерыв на кофе</i>
4	11.00 – 11.20	Викторов М.Е., Изотов И.В., Киселева Е.М., Поляков А.В., Выбин С.С., Скалыга В.А.	Лабораторные эксперименты по исследованию кинетической неустойчивости волн свистового диапазона в плазме непрерывного ЭЦР разряда в зеркальной магнитной ловушке
5	11.20 – 11.40	Рубцов А.В., Yamamoto К., Костарев Д.В., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Nosé М.	Доказательство генерации дрейфово-компрессионной волны в магнитосфере Земли

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

6	11.40 – 12.00	Костарев Д.В., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю.	Изменение функции распределения потоков холодных электронов под действием параллельного электрического поля альфвеновской волны
7	12.00 – 12.20	Галка А.Г., Малышев М.С., Костров А.В.	Линейная трансформация электронно-циклотронных волн в неоднородной плазме в верхнегибридную моду
	12.30 – 13.30	Пленарный час	
	12.30 – 13.00	Пулинец С.А.	Высокочастотная радиоспектрометрия космической плазмы. прошлое и будущее
	13.00 – 13.30	Морозова Л.Н.	А.Л. Чижевский и С.П. Королев
	13.30 – 14.30	Обед	
Председатель: <u>Клейменова Н. Г.</u>			
8	14. 30 - 14.50	Ягова Н. В., Федоров Е.Н., Мазур Н. Г., Пилипенко В. А.	Естественные электромагнитные колебания диапазона 4-12 Гц в верхней ионосфере и на земле по наблюдениям на спутниках SWARM и сети наземных магнитометров CARISMA
9	14.50 -15.10	Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Любчич А.А., Федоренко Ю.В.	Наблюдение высокочастотных пульсаций Pc1 и связанных с ними потоков энергичных протонов на малых высотах в условиях различных геомагнитных возмущений.
10	15.10 – 15.30	Феденёв В.В., Анфиногентов С.А.	Численное моделирование затухания медленных магнитозвуковых волн из-за эффекта смешивания фаз
11	15.30 – 15.50	Власов А.А., Леонович А.С., Козлов Д.А.	Определение поперечной структуры магнитосферных альфвеновских колебаний с помощью метода фазовых портретов
12	15.50 – 16.10	Моисеев А.В., Попов В.И.	Сравнительный анализ распространения магнитных вариаций и эквивалентных токовых вихрей геомагнитных Pc 5 пульсаций по меридиану и азимуту

	16.10 – 16.30	<i>Перерыв на кофе</i>	
		Председатели: <u>Беспалов П. А., Титова Е. Е.</u>	
13	16.30 – 16.50	Трухачев Ф.М., Герасименко Н.В., Васильев М.М., Петров О.Ф.	Солитонное возмущение функций распределения фоновой плазмы
14	16.50 – 17.10	Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г.	Электромагнитные поля в верхней ионосфере от наземных крупномасштабных КНЧ излучателей
15	17.10 – 17.30	Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И.	Удивительные спектры некоторых высокочастотных ОНЧ
	17.30 – 19.00	<i>Постерная сессия</i>	

Постерные доклады

1. Никитенко А.С., Клейменова Н.Г., Федоренко Ю.В.

Широтная динамика положения области выхода ОНЧ аврорального хисса во время суббури

2. Попова Т.А., Демехов А.Г., Любич А.А., Matsuoka A., Imajo S., Yokota S., Kasahara S., Keika K.,
Nori T., Kumamoto A, Tsuchiya F., Kasahara Y., Kitahara M., Nakamura S., Miyoshi Y., Shinohara I.

Наблюдения ЭМИЦ волн в магнитосфере Земли и высыпаний энергичных заряженных частиц в сопряженной области

3. Грач В.С., Демехов А.Г.

Высыпания энергичных электронов в атмосферу экзопланеты при взаимодействии с её радиоизлучением

4. Боровлева К.Е, Федоров Е.Н., Мазур Н.Г., Пилипенко В.А.

Электромагнитные унч поля заглубленного крупномасштабного источника на земной поверхности и в ионосфере

5. Лундин Б.В.

К спектральной плотности потока энергии волн в приземной плазме для оценки интенсивности квазирезонансных свистов вблизи нгр резонанса

6. Стуков Д. А., Сурков В. В., Пилипенко В. А., Касимова В. А.

Электромагнитные эффекты при распространении сейсмической волны в земной коре

7. Афанасьев Н.Т., Лукьянцев Д.С., Танаев А.Б.

Математическое моделирование потока энергии электромагнитной волны в сложном гравитационном поле

Пятница, 10.02. 2023 г., Комната 202 (Line 2)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
Председатель: <u>Беспалов П.А.</u>			
16	10.00 – 10.20	Демехов А.Г.	Спектры хоровых ОНЧ излучений при наличии возмущений магнитного поля (результаты расчетов)
17	10.20 – 10.40	Шевелёв М.М., Артемьев А.В.	О вкладе нелинейных резонансных эффектов в динамику внешнего радиационного пояса
18	10.40 – 11.00	Шкляр Д.Р., Титова Е.Е., Любчич А.А.	ОНЧ излучения вне плазмопаузы с частотами выше и ниже половины гирочастоты
Председатель: <u>Титова Е.Е.</u>			
19	11.00 – 11.20	Кузнецов А.А., Власов В.Г.	Дисперсионные характеристики электромагнитных волн в нетепловой плазме с кольцевым распределением электронов
20	11.20 – 11.40	Артеха Н.С., Шкляр Д.Р.	Дисперсионные характеристики свистовых волн в разреженной ($\omega_p < \omega_c$) магнитоактивной плазме
21	11.40 – 12.00	Никитенко А.С., Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В.	ОНЧ авроральный хисс и иррегулярные геомагнитные пульсации в обл. Ловозеро и Каннуслахто
	12.15-12.30	<i>Заккрытие конференции</i>	

ОСОБЕННОСТИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Беспалов П.А.^{1,2}, Савина О.Н.¹, Нещёткин Г.М.¹

¹ НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

² ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@ipfran.ru

В работе рассматриваются новые сведения о структурированных КНЧ излучениях за пределами плазмосферы, содержащиеся в данных наблюдений, выполненных на космических аппаратах Van Allen probes. Вблизи апогея траектории отмечались квазипериодические последовательности всплесков электромагнитных излучений на частотах ниже 2 кГц с периодом глубокой модуляции интенсивности порядка 60-150 с. Морфологически отдельный всплеск излучений подобен фрагменту излучений QR 2. Рассматриваемые последовательности всплесков могут иметь разную временную структуру. Во-первых, они могут быть четко периодическими. Во-вторых, в них могут периодически чередоваться импульсы разной интенсивности. В-третьих, последовательность импульсов может быть случайной. Возбуждение рассматриваемых шумовых по своей природе излучений, вероятно, происходит при развитии циклотронной неустойчивости в облаках оторвавшейся плазмы, которые существуют за пределами плазмосферы после сильных магнитных возмущений. Многие свойства излучений объясняет теория плазменного магнитосферного мазера, допускающая существования автоколебательного процесса генерации излучений, обусловленного модуляцией анизотропии функции распределения энергичных электронов. Теория объясняет новые результаты наблюдений квазипериодических излучений с более сложной временной структурой при наличии периодического внешнего воздействия на динамику плазменного магнитосферного мазера. Во всех рассмотренных случаях было проверено по данным магнетометра космического аппарата отсутствие признаков геомагнитных пульсаций с периодами, сравнимыми с периодами повторения спектральных форм на спектрограммах КНЧ излучений. Модельные расчеты показали, что акустико-гравитационные волны в ионосфере в основании трубки магнитного поля с облаком оторвавшейся плазмы могут обеспечить формирование рассмотренных излучений со сложной временной динамикой.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 22-22-00397.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПАКЕТАМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Грач В.С.¹, Демехов А.Г.^{1,2}

¹ ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@ipfran.ru

² ПГИ, г. Апатиты, Россия

В работе рассматривается взаимодействие релятивистских электронов с пакетами электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн конечной длительности. Анализируются результаты численного решения уравнений движения частиц в заданном поле волнового пакета (метод пробных частиц). Исследуется зависимость характеристик взаимодействия (среднего и среднеквадратичного изменения экваториального питч-угла электронов) от длительности пакета. Также анализируются потоки электронов, попадающих в конус потерь в результате однократного взаимодействия с рассматриваемыми пакетами.

Показано следующее. Для резонансного взаимодействия конечная длительность пакета приводит к уменьшению эффективности взаимодействия, т.е. к уменьшению среднего изменения экваториального питч-угла для нелинейных режимов и к уменьшению среднеквадратичного отклонения экваториального питч-угла в линейном режиме. Вместе с тем, для пакетов конечной длительности возможно взаимодействие с релятивистскими электронами, энергии которых находятся ниже нижнего предела диапазона резонансных значений. Подобное взаимодействие может приводить к высыпаниям в ионосферу электронов с энергиями порядка сотен килоэлектронвольт. Для пакетов с малой длительностью максимальные потоки в конус потерь соответствуют энергиям меньше минимальной резонансной энергии.

Работа В.С. Грач поддержана Российским научным фондом, проект № 19-72-10111.

ВОЗБУЖДЕНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И КВАЗИ-ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Лужковский А. А., Шкляр Д. Р.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, luzartyom@yandex.ru

Исследован инкремент ионно-циклотронных волн, обусловленный их резонансным взаимодействием с энергичными протонами, как функция частоты ω и угла волновой нормали θ . Рассматривается функция распределения протонов с анизотропией температур и конусом потерь. Вычисления выполнены с использованием дисперсионного соотношения, поляризационных коэффициентов и выражения для плотности энергии волны, справедливых во всем диапазоне частот и углов волновой нормали ионно-циклотронных волн, включая квази-электростатический предел. Предполагается, что плазма содержит один сорт ионов (протоны).

В настоящее время широко обсуждается резонансное взаимодействие электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн с релятивистскими электронами и связанное с ним питч-угловое рассеяние электронов. Поскольку в ЭМИЦ волнах продольная составляющая электрического поля очень мала, то указанное взаимодействие может происходить только на циклотронных резонансах с $n \neq 0$, что, как показывают оценки, требует энергии электронов \gtrsim нескольких МэВ. Кроме того, поскольку частота ЭМИЦ волн на три порядка меньше гирочастоты электронов, их энергия практически не изменяется, так что резонансное взаимодействие ведет лишь к изменению питч-угла электронов. Определение частот возбуждения ЭМИЦ волн, соответствующих частотам максимального инкремента, является важным в исследовании резонансного взаимодействия волн с электронами ввиду существенной зависимости волнового вектора, а значит, и резонансной энергии от частоты волны. Для характерных параметров магнитосферной плазмы и реалистичных параметров функции распределения инкремент волн имеет максимум для случая продольного распространения, для частот $\omega \sim (0.2 - 0.6)\omega_{ci}$ (ω_{ci} – ионная гирочастота). Характеристики генерации и распространения ЭМИЦ волн в плазме в значительной степени определяются отношением ω_{pe}/ω_{ce} электронной плазменной частоты к гирочастоте. На Рис.1а представлен инкремент ЭМИЦ волны, рассчитанный при реалистичных параметрах функции распределения и $\omega_{pe}/\omega_{ce} = 7$. Максимальное значение инкремента достигается при $\theta = 0^\circ$ и $\omega/\omega_{ci} \approx 0.35$. Кроме того, произведен расчет (Рис.1б) минимальной резонансной энергии электронов как функции параметра ω_{pe}/ω_{ce} для трех частот ЭМИЦ волн $\omega/\omega_{ci} = [0.2, 0.4, 0.6]$.

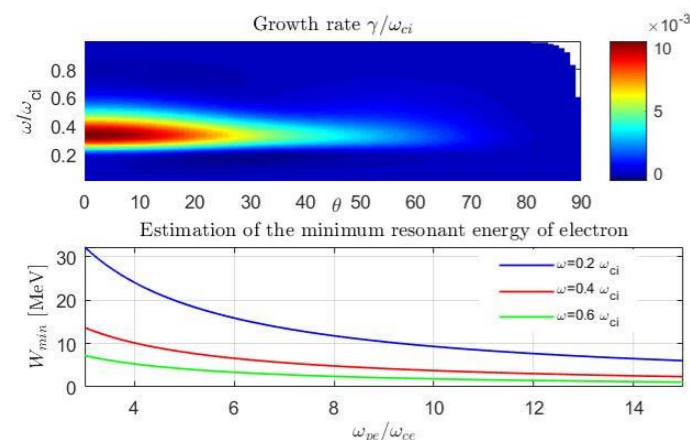


Рис.1 а) Нормированный инкремент ЭМИЦ волны как функция нормированной частоты ω/ω_{ci} и угла θ , максимум достигается при $\theta = 0^\circ$ и $\omega/\omega_{ci} \approx 0.35$; б) оценка минимальной резонансной энергии электронов как функции ω_{pe}/ω_{ce} для трех значений $\omega/\omega_{ci} = [0.2, 0.4, 0.6]$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-22-00135.

О РОЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАТУХАНИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Дертеев С.Б., Шивидов Н.К., Сапралиев М.Е., Бембитов Д.Б., Михалев Б.Б.

Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия, derteevsergei@mail.ru

Повсеместно в нижней короне Солнца наблюдаются волны сжатия, интерпретируемые как медленные магнитозвуковые волны [1-3]. Они быстро затухают, поэтому привлекают к себе внимание в связи с проблемой коронального нагрева. Важное место в исследовании этих волн занимает установление механизмов затухания, которые должны определить эффективность диссипации волновой энергии. Быстрозатухающие волны сжатия используются также в корональной сейсмологии для определения параметров плазмы. В настоящей работе рассматривается определенная модель затухающих звуковых волн, в которой учитываются эффекты теплопроводности, нагрева и радиационных потерь плазмы.

Существуют свидетельства того, что нагрев корональных петель имеет перманентный характер, поэтому мы выбираем постоянной функцию нагрева, определяющую энергию, получаемую в единицу времени единицей массы плазмы. Такой подход является распространенным при изучении неадиабатических волн. Для нахождения значений функции радиационных потерь $\Lambda(T)$ существуют различные алгоритмы, учитывающие всевозможные источники излучения, химический состав короны и т.п. Мы используем алгоритм CHIANTI ver. 10, доступный на соответствующем сайте. По ряду значений $\Lambda(T)$ мы строим ее аналитическое представление кубическими сплайнами. Таким образом, все неадиабатические эффекты строго определены, и тем самым построена модель неадиабатических звуковых волн.

Определен интервал температур корональной плазмы, при которых возможна тепловая неустойчивость волны, соответствующий условию неустойчивости Филда [4]. Оказывается, возможна противоположная ситуация, когда радиационные потери приводят к аperiodическому затуханию. Такая ситуация возникает при температурах, расположенных в интервалах возрастания $\Lambda(T)$, где на затухание волны работает изменение как плотности плазмы, так и температуры. Рассмотрено поведение звуковой волны в интервале температур от 0.5 до 10 МК. Эффект нагрева/радиационных потерь играет важную роль при определенных температурах, приводя к неустойчивости или аperiodическому затуханию. В других случаях он может составлять значительную конкуренцию эффекту теплопроводности. Построенная модель использована при описании быстрозатухающих стоячих волн сжатия в высокотемпературных корональных петлях [3]. Она позволяет получить период и время затухания стоячих волн, близкие к их значениям, которые получаются из наблюдений. Можно ожидать, что построенная простая модель неадиабатических звуковых волн может занять место в корональной сейсмологии, аналогичное модели цилиндрической магнитной трубки. В этой модели используется как период, так и время затухания волны.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№075-03-2022-119/1 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

1. De Moortel I. // Space Sci. Rev. 2009. V. 149. P. 65.
2. Banerjee D., Gupta G.R., Teriaca L. // Space Sci. Rev. 2011. V. 158. P. 267.
3. Wang T.J. // Space Sci. Rev. 2011. V. 158. P. 397.
4. Field G.B. // Astrophys. J. 1965. V. 142. P. 531.

ДИСПЕРСИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Михаляев Б.Б.¹, Шивидов Н.К.¹, Нага Варун Е.², Дертеев С.Б.¹, Бембитов Д.Б.¹

¹Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, г. Элиста, Россия, bbmikh@mail.ru

²САО РАН, п. Нижний Архыз, КЧР, Россия

Известно, что поглощение ведет не только к затуханию волны, но и является причиной появления дисперсии [1]. В качестве примера можно привести звуковую волну в теплопроводящей среде, теплопроводность ведет к затуханию и дисперсии. Похожий двойной эффект дает дисбаланс между нагревом и радиационными потерями высокотемпературной плазмы [2]. Последнее, правда, в некоторых ситуациях может вызвать неустойчивость волны [3]. Наличие нагрева и излучения может создать сложную картину квазипериодических колебаний в коронах звезд, находящихся под постоянным воздействием возмущений со стороны более плотных низших слоев атмосферы. Действительно, наблюдения показывают присутствие волн сжатия, распространяющихся вверх от основания короны со скоростями, близкими к звуковой [4, 5]. Они интерпретируются как медленные магнитозвуковые или звуковые волны. Наблюдаемые колебания плазмы часто имеют квазипериодический характер.

В настоящей работе рассматривается модель звуковых волн, в которой учитываются эффекты теплопроводности, нагрева и радиационных потерь плазмы. Функция нагрева, определяющая энергию, которую получает в единицу времени единица массы плазмы, выбирается постоянной, а функция радиационных потерь находится с помощью кода CHIANTI ver. 10. Для использования в дисперсионном соотношении кубическими сплайнами строится аналитическое представление функции потерь. Тем самым выбрана простая модель неадиабатических волн. Она применяется нами для изучения явлений затухания и дисперсии наблюдаемых волн сжатия. Показано, что теплопроводность и нагрев/радиационные потери вызывают дисперсию, свойства которой различаются в разных областях спектра. Дисперсия, вызванная теплопроводностью, имеет место на широком интервале частот, и при этом слабо выражена. Дисперсия, вызванная нагревом/радиационными потерями, выражена сильнее, но распространяется только на низкие частоты. Спектры наблюдаемых колебаний дают возможность установить тот или иной механизм дисперсии и тем самым определить их роль в поведении волн сжатия в корональной плазме.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ (№075-03-2022-119/1 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

1. Гинзбург В.Л. // Акуст. журн. 1955. Т. 1. С. 31.
2. Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.L. // Solar Phys. 2021. V. 296. P. 122.
3. Field G.B. // Astrophys. J. 1965. V. 142. P. 531.
4. Banerjee D., Teriaca L., Gupta G.R., et al. // Astron. Astrophys. 2009. V. 499, P. L29.
5. Wang T.J., Ofman L., Davila J.M. // Astrophys. J. 2009. V. 696. P. 1448.

УСЛОВИЯ "ЗАХВАТА" АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ (АКР) В КАНАЛЫ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

В.И. Колпак^{1,2}, М.М. Могилевский³, Д.В. Чугунин³, А.А. Чернышов^{2,3}, И.Л. Моисеенко³

1. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.

Пушкова РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия, lera.kolpak@yandex.ru

2. Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", 101000 Москва, Россия

3. Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

В работе представлены результаты обработки электрической компоненты электромагнитных излучений в диапазоне частот 5 – 800 кГц, зарегистрированных на спутнике ERG при его пролете вблизи внешней границы плазмосферы Земли. Поскольку вблизи плазмопаузы плазменная частота электронов много меньше гирочастоты ($f_{pe} \gg f_{ce}$), то наблюдаемые вариации частоты верхнего гибридного резонанса характеризуют изменения плотности плазмы, которые достигают $\Delta N/N \sim 0,3 - 0,7$. Мы предполагаем, что плазменные неоднородности вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля и образуют каналы, в которые захватывается АКР. Такой захват излучения наблюдается в эксперименте для каналов с пониженной плотностью. Результаты анализа условий, при которых происходит захват и распространение АКР в каналах, позволили определить ограничения, накладываемые на угол вхождения излучения в канал для различных частот излучения и различных значений $\Delta N/N$, взаимного расположения источника АКР и нижней границы канала, а также сделать оценку высоты границы канала над поверхностью Земли, что важно для определения времени формирования (вытягивания) канала. Результаты работы показывают, что захват АКР в плазменные каналы может приводить к переносу излучений из одного полушария в другое, без трансформации поляризации. Работа В.И. Колпак и А.А. Чернышова поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА ГЕКТОМЕТРОВЫЙ КОНТИНУУМ В “БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ”

Дорофеев Д. А.^{1,2}, Чернышов А. А.², Чугунин Д. В.², Могилевский М. М.²

¹НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, dadorofeev_1@edu.hse.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Измерения электрической составляющей электромагнитного поля в диапазоне частот 2 кГц - 10 МГц на японском спутнике ERG позволили обнаружить новое излучение типа гектометровый континуум. На ночной стороне плазмосферы наблюдались высокочастотные излучения, 600-1600 кГц, спектр которых представляет собой набор отдельных частот - линейчатый спектр. Источники излучения гектометрового континуума наблюдаются не только в области плазмосферы, то есть на расстояниях $4-6R_e$, но и вблизи Земли (“ближняя зона”), на расстояниях $1.1-2R_e$, где R_e - радиус Земли. В данной работе проведён подробный статистический анализ возникновения гектометрового континуума в “ближней зоне” за период в два года. Установлена зависимость генерации гектометрового излучения от местного магнитного времени (MLT). Показано, что данный тип континуум излучения возникает в основном в ночное и утреннее время. Проведено исследование зависимости возникновения гектометрового излучения от геомагнитной активности и продемонстрировано, что оно возникает в основном в геомагнитно спокойное время. Кроме того, проведённый статистический анализ позволил выявить локализацию источников такого типа радиоизлучения в околоземной плазме.

Изучение волновых явлений и наклонных спорадических E-слоев на ионосферных высотах по данным анализа радиозатменных измерений

Губенко В.Н., Кириллович И.А.

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com

Спорадические E-слои представляют собой тонкие слои повышенной ионизации на высотах от 90 до 130 км в ионосфере Земли. Распространение мелкомасштабной внутренней гравитационной волны (ВГВ) модулирует структуру изначально горизонтального спорадического E-слоя, что приводит к наклону этого слоя относительно плоскости локального горизонта. На основе того, что ВГВ обуславливает угол наклона спорадического E-слоя, разворачивая плоскость ионизации слоя параллельно ее фазовому фронту, мы разработали метод определения характеристик внутренних атмосферных волн на ионосферных высотах. Данный метод позволяет изучить взаимосвязи между мелкомасштабными внутренними волнами и спорадическими E-слоями в ионосфере Земли и существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы. Здесь наклонные спорадические структуры в ионосфере планеты служат в качестве детектора внутренних атмосферных волн. При восстановлении волновых параметров использовались базовые выражения (дисперсионное уравнение и поляризационные соотношения) для внутренних волн.

Радиозатменные измерения были использованы нами для исследования спорадических E-слоев в ионосфере Земли. Параметры ионосферных структур определялись на основе анализа высотных зависимостей эйконала (фазового пути) и интенсивности радиозатменных сигналов, зарегистрированных на несущей GPS-частоте 1575,42 МГц с помощью низкоорбитальных спутников CHAMP и COSMIC. В случае нарушения сферической симметрии, разработанный метод позволял оценить смещение спорадического слоя по отношению к перигею радиолуча, определить угол наклона слоя к локальному горизонту и найти фактическую высоту его расположения.

Исследованы вертикальные распределения спорадических E-слоев в ионосфере планеты, полученные на основе обработки измерений эйконала и интенсивности радиозатменных сигналов. Проанализированы типы спорадических E-структур (дискретные и двойные слои), которые наблюдаются в радиозатменных экспериментах. Рассмотрены механизмы формирования спорадических E-слоев (ветровой сдвиг и выпадение частиц) в ионосфере высоких и средних широт Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ КОМПАКТНЫХ ВНУТРИОБЛАЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Сысоев А.А.^{1,2}, Иудин Д.И.^{1,2}

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, zaratustrann@yandex.ru

²Приволжский исследовательский медицинский университет, г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлена продвинутая модель компактного внутриоблачного разряда (КВР), основанная на подходе [1]. КВР представляет собой изолированный во времени и пространстве одиночный разряд и является мощнейшим (на порядок большим, чем у «обычной» молнии) в природе источником ВЧ-ОВЧ излучения (3-300 МГц). Импульс тока КВР имеет амплитуду 15-65 кА (в редких случаях до 150-200 кА), сравнимую с током возвратного удара. При этом разряд возникает внезапно, без каких-либо инструментально измеряемых предшествующих ему сигналов. На данный момент не понятно, каким образом внутри безэлектродного грозового облака за очень малое время (импульс излучения КВР длится 10-30 мкс) происходит сбор порядка 0.5-1 Кл электрического заряда, разделяемого его током. Это обстоятельство делает вопрос о механизмах инициации и развития КВР одной из самых интригующих проблем атмосферного электричества.

Представленная в работе модель КВР обладает рядом прогрессивных особенностей, позволяющих воспроизвести временные профили импульсов его тока и излучения. Она учитывает (1) асимметрию характерных полей развития положительных и отрицательных стримеров, (2) эволюцию параметров (продольное электрическое поле, температура, проводимость и ток) разрядных каналов и (3) возможность их одновременного роста и отмирания в различных частях разрядного древа. Данные свойства позволяют описать самосогласованную динамику изменения структуры разряда и пространственного распределения электрического поля. Одной из основных особенностей новой модели КВР, отсутствующей у альтернативных подходов, является блок, отвечающий за описание термодинамики разрядных каналов. Его наличие позволяет использовать приближение дугового разряда, чтобы связать проводимость горячего (с температурой выше примерно 5000 К) лидерного канала с его температурой. Кроме того, знание радиального профиля температуры (проводимости) позволяет учесть временную зависимость токнесущего радиуса каждого канала. Описание динамики температуры разрядных каналов опирается на решение уравнения теплопроводности с источником в виде джоулевого энерговыделения. Входящие в него термодинамические величины (удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность воздуха) рассматриваются как функции давления и температуры воздуха. Расчет излучения моделируемой системы токов производится на базе авторской методики [2], которая учитывает положение и ориентацию каждого канала (и его отражения в идеально проводящей плоской земной поверхности) в пространстве и позволяет вычислить все три компонента поля излучения в точке нахождения приемной антенны.

Разработанная модель позволяет детально воспроизвести переход от нежизнеспособных стримерных разрядов к объемной иерархической сети плазменных каналов, внутри которой формируется горячий хорошо проводящий лидерный каркас, стягивающий на себя токи системы. Результаты моделирования позволяют лучше понять механизмы появления и развития КВР, что необходимо для совершенствования методов молниезащиты.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-21-00057.

1. Iudin D.I. et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. **122**, No. 12. P. 6416.
2. Syssoev A.A. et al. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2021. V. **221**, P. 105686.

ВОЛНЫ РЕИНКАРНАЦИИ В ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛАХ МОЛНИИ

Иудин Д.И., Сысоев А.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, iudin@ipfran.ru

Молния - это саморазвивающаяся транспортная система плазменных каналов, демонстрирующая способность к саморегуляции: структурная эволюция молнии сопровождается значительными морфологическими изменениями, сохраняющими её электронейтральность.

Процессы регуляции молнии, связаны не только с переходными процессами, которые пересекают основной горячий лидер или канал постоянного тока, но и с переходными процессами, которые «реанимируют» остатки распавшихся каналов и могут рассматриваться как процессы реактивации или «реинкарнации» лидерных ветвей. Изменение (увеличение или уменьшение) порядка (числа Хортон) плазменного канала на единицу или, другими словами, переход канала на соседний (следующий или предыдущий) этаж иерархии сопровождается либо накоплением, либо потерей заряда на входе в этот канал в соответствующей точке ветвления. Изменения заряда, вызванные структурными вариациями молнии, пропорциональны изменениям потенциала соответствующих фрагментов древа разряда относительно внутриоблачного потенциала. Накопление или потеря заряда на стыках каналов, до которых «докатилась» структурная волна роста или падения порядка потоков, сопровождается локальной зарядкой или перезарядкой чехла лидера и не может происходить мгновенно, поскольку энергия, запасённая в конденсаторе, не может меняться скачком. Резко меняется только ток канала, что и приводит к экспериментально наблюдаемым транзиентам светимости.

Особый интерес для данного исследования представляет класс транзиентов светимости, связанных с реактивацией распавшихся каналов. Очевидно, что для реактивации лидерная ветвь должна сначала затухнуть. В [1] было установлено, что существует два принципиально различных механизма затухания лидеров: если первый из них получил название «смерть лидера» и характерен как для симметричных, так и для асимметричных транспортных систем, то второй является привилегией только асимметричного случая и вызван конкурентным подавлением боковых ветвей доминирующего лидера из-за движения точки реверса и соответствующего изменения средневзвешенного потенциала древа молниевое разряда.

На основе парадигмы движущейся точки реверса была проведена классификация основных типов транзиентов, связанных с реактивацией затухших ветвей доминирующего лидера. Положительный лидер доминирует в подавляющем большинстве ситуаций. Основные транзиенты, связанные с развитием доминирующего положительного лидера, помимо отмирания его боковых ветвей, представлены уже давно известными лидерами отдачи и недавно обнаруженными игольчатыми событиями. Показано, что игольчатые события возникают из-за уменьшения потенциала ствола молнии при движении точки реверса к вершине положительного лидера. Наоборот, лидеры отдачи возникают при ретроградном движении точки реверса.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-21-00057.

1. Iudin D.I. // Atmospheric Research. 2021. V. **256**. P. 1-12.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ЛАМБА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ НА ПЛАЗМЕННЫЙ МАГНИТОСФЕРНЫЙ МАЗЕР

Савина О.Н.¹, Беспалов П.А.^{1,2}

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

² ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Получено аналитическое решение граничной задачи для возмущений скорости и давления в неизотермической атмосфере. Проанализированы особенности решения этой задачи на частотах, при которых локальные характеристики волнового поля приближаются к свойствам волны Ламба в изотермической атмосфере. Отмечено, что возмущение давления имеет особенности вблизи высоты, на которой выполняется равенство горизонтальной фазовой скорости возмущения и скорости звука в среде. На данной высоте сосредоточен тонкий слой атмосферы с конечной массой; выше волновые возмущения почти не проходят. Для реальных высотных температурных профилей атмосферы численными расчётами подтверждено наличие особенности в волновом возмущении давления. Расчеты выполнены с помощью оригинального алгоритма, основанного на сведении полноволновой граничной задачи о распространении акустико-гравитационных волн в атмосфере с заданными высотными зависимостями фоновых параметров к дифференциальному уравнению типа Риккати. Проведенный анализ важен для выяснения условий, при которых атмосферное возмущение с поверхности Земли может вызвать в ионосфере на высотах области особо сильно влияющей на отражение электромагнитных волн свистового диапазона заметную (порядка 10 %) модуляцию их коэффициента отражения. Результаты работы важны для количественного определения степени влияния атмосферных возмущений на режимы работы плазменного магнитосферного мазера.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 22-22-00397.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ И МАГНИТОСФЕРНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.М. Вершинин, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.Ю. Корнишин, С.В. Коробков, К.Н. Лоскутов, С.А. Манаков, А.С. Николенко, А.В. Стриковский

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, i.vershinin@ipfran.ru

Разработка и испытание электрических датчиков для космических аппаратов (КА) имеет большое практическое значение. Тестирование такого оборудования в наземных условиях представляет серьезную проблему, так как электромагнитная обстановка на Земле сильно отличается от условий околоземного пространства. Калибровка датчиков для ионосферных и магнитосферных КА осложняется помехами, вызываемыми токами промышленной частоты, искрением контактов электромоторов, а также прочими шумами в эфире. В результате проведение наземных испытаний или калибровка оборудования возможны только в экранированных помещениях или камерах, защищенных от посторонних электромагнитных полей, в которых достаточно места для установки аппаратуры или ее макетов, и оснащенных специализированными полеобразующими системами.

В докладе описан стенд для проведения испытаний датчиков электрического поля, работающих на частотах от 10 Гц до 1 МГц, которые предназначены для установки на ионосферные и магнитосферные КА. Стенд представляет собой экранированную кабину (ЭК) с полеобразующей системой (ПОС). Для функционирования стенда также требуются источники питания, генераторы сигналов специальной формы и диагностическое оборудование.

ЭК обеспечивает снижение влияния шумов эфира и наведенных токов промышленной частоты на характеристики работы испытываемых датчиков. Обшивка ЭК выполнена из стального листа, а все листы соединены между собой сплошным швом. Внутри ЭК размещается ПОС, представляющая собой крупногабаритный плоский конденсатор со схемой выравнивания амплитудно-частотной характеристики системы. ПОС обеспечивает создание переменного гармонического электрического поля в диапазоне напряженностей от 1 мВ/м до 1 В/м в требуемом диапазоне частот.

Использование стенда обеспечивает проведение испытаний датчиков для ионосферных и магнитосферных КА в лабораторных условиях проектов «Резонанс» и «Ионосфера».

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА СПЕКТРЫ УНЧ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНО НЕОДНОРОДНОМ ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА ОТ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ.

Ермакова Е.Н., Рябов А.В.

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru

В работе выполнен сравнительный анализ амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитных полей для источников типа горизонтальный магнитный и вертикальный электрический диполи. Первым типом диполя могут быть аппроксимированы горизонтальные токовые линии, вторым типом - наземные грозовые источники. Показано, что в темное время суток влияние ионосферных резонаторов может приводить к подъёму интенсивности от этих источников на разных частотах для модели неоднородного волновода земля-ионосфера, что может быть важным при выборе оптимальных частот генерации искусственных УНЧ сигналов. Показано, что для горизонтально однородного волновода максимум амплитуды в магнитных компонентах из-за влияния структуры суб-ИАР достигается примерно на одной и той же частоте для разных источников. Наиболее сильное различие в частотах максимума амплитуды может достигаться при наличии спорадических слоев E_s с горизонтально неоднородной интенсивностью вдоль трассы распространения н/ч волн от горизонтального диполя. Например, при изменении плазменной частоты f_0 слоя E_s от 3.5 МГц до 0, частотный сдвиг в максимумах амплитуды компонент для разных источников достигает 1.8-2 Гц. Также при такой горизонтальной неоднородности ионосферы резко возрастают абсолютные значения поляризационного параметра ϵ магнитного поля от 0.05 до 0.3-0.4 для горизонтального диполя. При этом значения ϵ для вертикального источника определяются параметрами локального суб-ИАР без спорадического слоя E_s . Частоты максимальных значений параметра ϵ для разных источников в таких условиях также разнесены на 3-4 Гц, что позволяет более точно определять поляризацию искусственных сигналов на оптимальных частотах. Другой период сильной горизонтальной неоднородности связан с прохождением терминатора через трассы распространения н/ч волн, что существенно сказывается на характере амплитудных и поляризационных спектров УНЧ магнитных полей от горизонтального источника. При этом абсолютные значения параметра ϵ для магнитного поля от горизонтального источника могут быть в 1.5-2.5 раза выше, чем значения ϵ для вертикального источника. Разное влияние неоднородных структур ионосферы на амплитуду магнитного поля от разных источников продемонстрировано на примере суточной динамики величины сигнал/шум на частоте 3 Гц для разных компонент магнитного поля для магнитоспокойных суток 21.09.2011. Обнаружен немонотонный характер временной зависимости в ночное время, что связано с влиянием структуры суб-ИАР, как на величину амплитуды шумовых компонент, так и на амплитуду компонент сигнала. Амплитуда сигнала рассчитывалась по модели горизонтально неоднородного волновода земля-ионосфера для диполя, ориентированного вдоль направления СЮ [1], а уровень магнитного шума в компонентах СЮ и ВЗ определялся на основе анализа данных низкочастотного мониторинга на среднениротном пункте с координатами (46° в.д., 56° с.ш.). Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-17-00050.

1. Ermakova E. N., Kotik D. S., Ryabov A. V. // Journal of Geophysical Research: Space Physics 2022. 127, e2021JA030025. <https://doi.org/10.1029/2021JA030025JGR>

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ОБЛАКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ КВАЗИ-СФЕРИЧЕСКИХ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ.

Захаров Ю.П., Терехин В.А. *, Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ki1z@mail.ru, *ВНИИЭФ, г. Саров

На стенде КИ-1 ИЛФ (Космические Исследования - 1), с 80^х годов успешно реализуется программа экспериментов с Облаками Лазерной Плазмы (ОЛП), по моделированию процессов бесстолкновительного взаимодействия потоков космической плазмы в магнитном поле \mathbf{V}_0 . В первую очередь, для проверки модели [1] Магнитного Ламинарного Механизма (МЛМ), разработанной во ВНИИЭФ. На основе этих опытов, в дальнейшем впервые были реализованы условия (эффективная энергия ОЛП [2] до $E_0 \sim 1$ кДж) и проведены эксперименты [2-4] по формированию Бесстолкновительных Ударных Волн (БУВ) на масштабе ~ 1 м (в камере КИ-1 диаметром $\varnothing 1,2$ м и длиной 5 м, заполняемой Фоновой Плазмой – ФП, из источника θ -пинча). В настоящее время на КИ-1, за счет применения симметричной (4 луча) схемы облучения шарика-мишени $\varnothing \sim 1$ см (C_2H_4), достигнута генерация близких к сферическим ОЛП [5], с кинетической энергией $E_k \approx 25$ Дж, при скорости фронта $V_0 \approx 100$ км/с. В результате, появилась уникальная возможность по формированию и исследованиям квази-сферических БУВ, характерных для взрывов Сверхновых. Для подготовки таких экспериментов была проведена серия расчетов по гибриднему коду [6], который был проверен, путем сравнения с расчетами ВНИИЭФ [1] по динамике падения энергии облака за счет МЛМ, при близких значениях критериев подобия задачи: число Альфвена-Маха ($Ma \approx 10$, по V_0) и т.н. МЛМ-параметр ($\delta = R^*/R_L R_{L*} \approx 2 \div 3$). Здесь $R^* = (3N_e/4\pi n^*)^{1/3}$ – радиус диамагнитной каверны облака в фоне, а n^* -его концентрация, N_e – полное число электронов в облаке, а R_L и R_{L*} - Ларморовские радиусы ионов облака и фона (по скорости V_0). Проведенные расчеты по БУВ-эффектам сжатия поля (и фона- n^*), по этому коду [6], показали (по данным вдоль 90° и 45° , относительно \mathbf{V}_0 , Рис. а), что при энергии ОЛП в $40 \div 50$ Дж (при $Ma \approx 6 \div 7$ и $\delta \approx 0,3 \div 0,9$), возможна реализация режимов МЛМ-взаимодействия с формированием близкой к сферической формой БУВ. При этом, учитываемые в расчетах углеродные ионы (C^{+3} и C^{+4} , переносящие основную часть энергии ОЛП), слабо тормозятся на масштабе каверны R^* и, распространяясь впереди возмущения фона, могут заметно исказить профиль самой БУВ (Рис. б), что может заметно усложнить анализ зондовых данных в ходе планируемых на КИ-1 новых экспериментов с ОЛП.

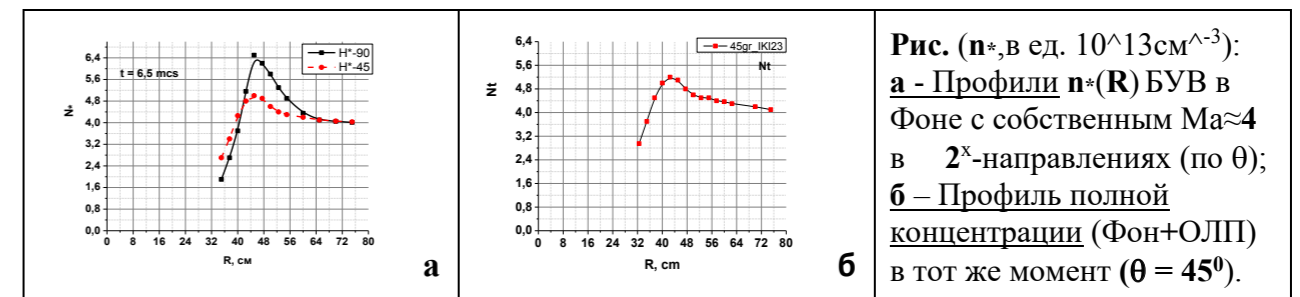


Рис. (n^* , в ед. 10^{13}см^{-3}):
а - Профили $n^*(R)$ БУВ в Фоне с собственным $Ma \approx 4$ в 2^x -направлениях (по θ);
б – Профиль полной концентрации (Фон+ОЛП) в тот же момент ($\theta = 45^\circ$).

1. Башурин В.П., Голубев А.И., Терехин В.А. // ПМТФ, 1983, №5, с. 10.
2. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Terekhin V.A., et al//Plasma Phys.&Techn.2014,p.163
3. Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Терехин В.А., и др.// Кв. Электр. 2016. Т. 46. с. 399.
4. Zakharov Yu.P., Ponomarenko A.G., Antonov V.M. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. P. 012078.
5. Захаров Ю.П., Терехин В.А., Шайхисламов И.Ф., и др.// Кв. Электр. 2022. Т. 52. с. 55.
6. Вшивков В.А., Дудникова Г.И., Захаров Ю.П. и др. 1986. Препринт № 20-87, ИТПМ. Работа выполнена в рамках ИЦФМ и Государственного задания №0243-2021-0003 ИЛФ.

ГЕНЕРАЦИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ВИСТЛЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ФОНЕ

Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Чибранов А.А., Тищенко В.Н., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по генерации интенсивных вистлерных возмущений сгустками лазерной плазмы в замагниченном фоне.

В вакуумной камере стенда КИ-1 ИЛФ СО РАН (давление в камере $2 \cdot 10^{-6}$ торр, длина 5 м, диаметр 1.2 м) создавались аксиальное магнитное поле $B_0 \sim 100 \div 300$ Гс и аргоновая фоновая плазма с концентрацией $n_0 = 10^{12} \div 4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, температура $T_0 \sim 10$ эВ. CO $_2$ -лазер с энергией ~ 200 Дж (~ 1 мкс) генерировал сгусток лазерной плазмы с энергией $Q \sim 25$ Дж, температурой ~ 50 эВ на полиэтиленовой мишени диаметром ~ 25 мм расположенной на оси камеры. Скорость разлета плазмы $\sim 1.5 \cdot 10^7$ см/с, Альфвеновское число Маха $M_A \sim 10$. На расстоянии $z = 87 \div 310$ см от мишени зонды измеряли концентрацию плазмы, продольный ток, электрическое поле и производные компонент магнитного поля.

На рисунке 1 представлена производная азимутальной компоненты магнитного поля, содержащая ВЧ (1) и НЧ вистлеры (2).

При уменьшении безразмерной ионно-плазменной длины от $L_{pi} = 0.79$ до $L_{pi} = 0.63$ генерируются ВЧ и НЧ вистлеры в диапазоне частот $f \sim 0.5 \cdot F_1 \div 0.25 \cdot F_2$ ($F_1 [Гц] = (f_{ci} \cdot f_{ce})^{1/2} = 6.54 \cdot 10^4 \cdot B_0 [Гс] \cdot \sqrt{Z_0/m_0 [a.e.m.]} \approx 10^6$,

$F_2 [Гц] \equiv f_{ce} = eB_0/c \cdot m_e = 2.8 \cdot 10^6 B_0 \approx 2.8 \cdot 10^8$). Скорость ВЧ вистлера $V_1 \sim 1.8 \cdot 10^8$ см/с близка к групповой скорости $V_g \sim 2 \cdot 10^8$ см/с.

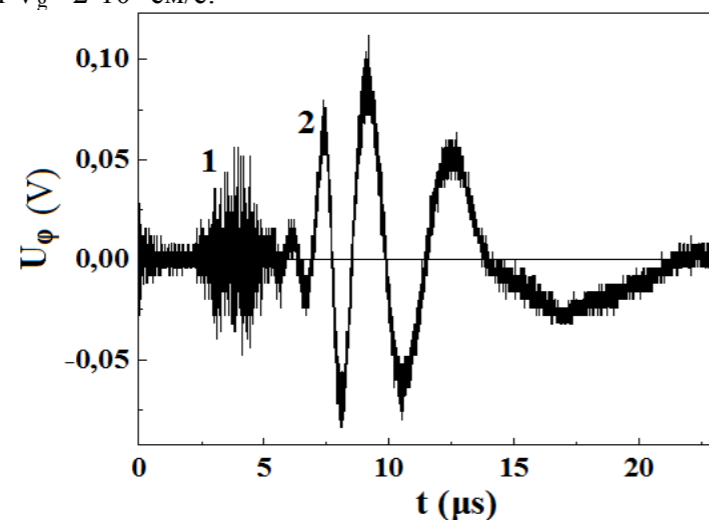


Рис. 2. Изменение во времени азимутальной производной магнитного поля ВЧ (1) и НЧ (2) вистлеров. $L_{pi} = 0.63$, $B_0 = 100$ Гс, $n_0 \sim 10^{13}$ см $^{-3}$, $\beta = 0.8$, $M_A = 13.7$, $V_1 = 1.8 \cdot 10^8$ см/с, $V_g \sim 2 \cdot 10^8$ см/с, $V_2 \sim 4.5 \cdot 10^7$ см/с.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СДВ СИГНАЛОВ ПЕРЕДАТЧИКОВ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РСДН-20 ВО ВРЕМЯ СУББУРЬ

Ларченко А.В., Никитенко А.С., Бекетова Е.Б., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В.

¹ ПГИ, г. Мурманск, Россия

Представлены результаты наблюдения СДВ сигналов радионавигационной системы РСДН-20 на сети широкоширотных станций Полярного геофизического института. В работе использованы данные obs. Ловозеро и Верхнетуломский, расположенных на Кольском полуострове, и данные obs. Баренцбург (арх. Шпицберген). В результате анализа амплитуд горизонтального магнитного поля сигналов СДВ передатчиков показано, что на фоне возникновения суббурь с довольно большими значениями северной компоненты геомагнитного поля ($-600 \dots -800$ нТл), возможны снижения регистрируемых амплитуд горизонтального магнитного поля сигналов передатчиков в ночное время до практически дневных значений. Наблюдаемый эффект может быть вызван локальными изменениями в нижней ионосфере при высыпаниях заряженных частиц во время суббури. В работе приведен комплексный анализ нескольких случаев наблюдения такого рода событий.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0243-2021-0003.

РАСЧЕТ РАЗМЕРНОСТИ ХАУСДОРФА ТИПИЧНЫХ ОНЧ ХОРОВ В ОБЛАСТИ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Нешеткин Г.М.¹, Беспалов П.А.^{1,2}, Савина О.Н.¹

¹ НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия, gmneschetkin@edu.hse.ru

² ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В работе мы проанализировали количественно степень сложности электромагнитных ОНЧ хоров, используя современный математический аппарат анализа волновой турбулентности. Из огромного набора данных наблюдений, накопленных при реализации миссии космических аппаратов Van Allen probe, были выбраны типичные примеры хоровых эмиссий, для которых доступны данные высокого разрешения. Для исключения влияния на результаты эффектов распространения в работе использовались данные, полученные в области возбуждения хоров вблизи локального минимума магнитного поля за пределами плазмосферы. В работе использован оригинальный код расчета размерности Хаусдорфа длинной числовой последовательности. Сложность расчета данной размерности компенсируется тем, что для нее доказаны важные теоремы, позволяющие сделать выводы об ограничениях математического описания изучаемого процесса. Во всех случаях размерность оказалось нецелой, что свидетельствует о сложной динамике системы. При расчетах отмечены скачки размерности, в том числе уменьшение ее вдвое в пределах всплеска хоров. Полученные результаты важны для подтверждения ВРА (beam pulse amplifier) механизма возбуждения хоров, для проверки достоверности численных симуляций и развития методов автоматической обработки данных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 20-12-00268.

ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ПЛАЗМЫ С ГОРЯЧИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В НЕОДНОРОДНЫЙ СЛОЙ ХОЛОДНОЙ НАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Кочаровский Вл.В., Гарасёв М.А., Деришев Е.В., Нечаев А.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru

Осуществлено численное моделирование инъекции плазмы с горячими электронами в тонкий слой холодной плазмы в присутствии внешнего магнитного поля и показано, что оно может значительно влиять на возникающие мелкомасштабные токовые филаменты и слои, даже если не замагничивает частицы и в целом не изменяет динамику перераспределения общей концентрации плазмы в процессе инъекции. Обнаруженное влияние зависит от ориентации внешнего магнитного поля, параллельного плоскости, ограничивающей слой холодной плазмы, если инъекция происходит из узкой полосы, лежащей на этой плоскости.

Обсуждается возможность реализации подобной ситуации для различных параметров рассмотренной задачи в космической плазме, а также в лазерной плазме, возникающей при абляции плоской мишени пучком излучения фемтосекундного лазера с использованием цилиндрической фокусировки. Для ряда типичных условий исследована эволюция характерных структур формируемого мелкомасштабного магнитного поля. Установлено, что его генерация связана с неустойчивостями анизотропного распределения электронов по скоростям, а величина может во много раз превышать величину внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00416).

ШУМОВЫЕ И ДИСКРЕТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПОТОКАМИ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ

Зудин И.Ю., Гущин М.Е., Николенко А.С., Айдакина Н.А., Гундорин В.И., Коробков С.В., Стриковский А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, zudin@ipfran.ru

Известно, что популяции энергичных электронов радиационных поясов Земли могут эффективно взаимодействовать с низкочастотными свистовыми волнами. Результатом развития свистовых неустойчивостей является генерация шумовых сигналов, таких как хоры и хиссы (шипения). Развитие неустойчивостей влияет на популяции энергичных электронов, являясь одним из факторов ограничивающих их число. Низкочастотные волны, излучаемые наземными передатчиками либо бортовыми антеннами космических аппаратов, также взаимодействуют с энергичными частицами радиационных поясов. В качестве примеров такого взаимодействия можно назвать явления усиления сигналов диапазона ОНЧ и генерацию триггерных излучений на магнитосферных трассах. Всё это объясняет интерес к исследованиям процессов взаимодействия свистовых волн с энергичными частицами. Несмотря на длительную историю исследований, вопрос взаимодействия популяций энергичных частиц с электромагнитными волнами до сих пор остаётся актуальным.

Эффективным подходом к изучению явлений в космической плазме является лабораторное моделирование, основанное на законах подобия. Явления мазерной генерации излучения наблюдаются в компактных магнитных ловушках, заполняемых горячей неравновесной плазмой [1, 2]. Генерация шумовых излучений наблюдалась в экспериментах, в которых широкие моноэнергетические пучки инжектировались в магнитоактивную плазму. В результате удавалось воспроизвести режимы, похожие на авроральные шипения [3] и хоры [4].

Настоящий доклад посвящен анализу результатов экспериментов, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», в которых наблюдалась генерация широкополосных шумов при протекании тока по магнитоактивной плазме. Обсуждаются и сравниваются между собой результаты двух экспериментов. В первом случае ток возникал при подаче высокого (по сравнению с потенциалом плазмы) положительного напряжения на электрод, введённый в плазму. Во втором случае электроны эмитировались в плазму с накаливаемого катода, к которому прикладывалось высокое отрицательное напряжение. Накаленный катод контактировал непосредственно с плазмой, без каких-либо сеток. В обоих случаях предполагается широкое распределение электронов по энергиям, что существенно отличает выполненные эксперименты от экспериментов с квазимоноэнергетическими электронными пучками либо с существенно неравновесными функциями распределения электронов. В экспериментах был зафиксирован эффект генерации широкополосного шума, спектр которого, в основном, был сосредоточен в диапазоне свистовых волн. Область генерации совпадала с областью плазмы, по которой протекал ток. Из области генерации шумы излучались в виде свистовых волн. Спектры шумов в обоих случаях носили степенной характер, а амплитуды значительно превосходили уровень тепловых флуктуаций. Кроме того, в экспериментах, выполненных с использованием катода, регистрировалась генерация шумовых сигналов на кратных и полуволновых гармониках циклотронной частоты существующих в виде нераспространяющихся мод. Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0030-2021-0028.

1. Shalashov A.G., Vodopyanov A.V., Golubev S.V. et al. // JETP Lett. 2006. V. 84. P. 314.
2. Viktorov M.E.; Shalashov A.G.; Gospodchikov E.D. et al. // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 062104.
3. Stenzel R.L. // J. of Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 4805.
4. Van Compernelle B., An X., Bortnik J. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion 2017. V. 59. P. 014016.

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СГУСТКОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ЗАМАГНИЧЕННЫМ ФОНОМ. ИМПУЛЬС НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН

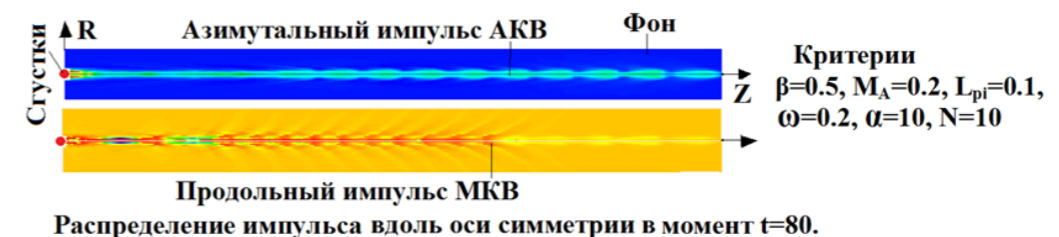
Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, tvn25@ngs.ru

В ИЛФ СО РАН выявлен эффект резонансного взаимодействия периодических сгустков лазерной плазмы с замагниченной плазмой (фон) [1 – 3]. При выполнении шести условий (критерии), связывающих параметры цуга сгустков и фона, в магнитной силовой трубке формируются квазистационарные волновые пакеты большой длины: единая крутильная альфвеновская волна (АКВ), единая медленная магнитозвуковая (МКВ) и струя плазмы сгустков, которые содержат ~ 80 % энергии сгустков. АКВ переносит момент импульса вращающейся плазмы фона, МКВ - продольный импульс сжатой плазмы фона, струя - продольный импульс. В АКВ преобладает азимутальное магнитное поле $B_\phi/B_0 \sim 0.2$ и радиальное электрическое поле, а также продольный ток. Методы исследования - эксперименты на стенде КИ-1, расчеты на суперкомпьютерах.

В расчетах варьировались значения критериев и получены следующие результаты. Длина АКВ, ее импульс и структура наиболее сильно зависят от Альфвеновского числа Маха M_A и отношения давлений плазмы и магнитного поля фона β . Рассмотрен диапазон от $M_A \sim 0.2$, когда интенсивность и длина АКВ максимальны, и до $M_A \sim 1$, когда происходит одновременная генерация АКВ, МКВ и струи.

В случае выброса одного сгустка плазмы длина АКВ слабо зависит от его энергии; в начале и в конце генерируемой волны плазма вращается в противоположных направлениях, в результате интегральный по объему волны импульс мал. МКВ в этих условиях слабая. В случае цуга из N сгустков длина АКВ линейно зависит от N , а радиус волнового пакета определяется энергией одиночного сгустка; плазма вращается в одном направлении почти во всем объеме АКВ. При $\beta \ll 1$ АКВ и МКВ распространяются раздельно; при $0.5 < \beta < 1$ - АКВ и МКВ совмещены между собой; $\beta > 2$ - АКВ и МКВ слабые. При нарушении условий резонанса АКВ и МКВ практически не формируются. Структура сцепленных АКВ и МКВ показана на рисунке. Десять сгустков, действующих на частоте $\omega = 0.2$, создают единую АКВ и единую МКВ и струю плазмы сгустков. Форма волн цилиндрически симметрична.



Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0243-2021-0003.

1. Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г., Бояринцев Э.Л., Мелехов А.В., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Прокопов П.А. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т.104. С. 302.
2. Тищенко В. Н., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л., Захаров Ю. П., Мелехов А. В., Мирошниченко И. Б., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Шайхисламов И. Ф. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. С. 849.
3. Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Дмитриева Л.Р., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф. // Журнал Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 2. С. 101.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КИНЕТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА В ПЛАЗМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА В ЗЕРКАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Викторов М.Е.^{1,2}, **Изотов И.В.**^{1,2}, **Киселева Е.М.**^{1,2}, **Поляков А.В.**^{1,2}, **Выбин С.С.**^{1,2}, **Скалыга В.А.**^{1,2}

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mikhail.viktorov@ipfran.ru

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Исследуется стационарная стадия турбулентности плазмы, возникающая в плотной неравновесной плазме электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда, поддерживаемого в открытой магнитной ловушке непрерывным микроволновым излучением частотой 28 ГГц [1]. Использование мощного миллиметрового излучения современных гиротронов позволяет создавать в лабораторных условиях характерную для космических условий неравновесную двухкомпонентную плазму и моделировать физические механизмы неустойчивостей, развивающихся в космических магнитных ловушках.

В экспериментах регистрировалось нетепловое электромагнитное излучение плазмы на частоте 3-4 ГГц в виде последовательности всплесков с длительностью до 500 нс [2]. В большинстве случаев всплески излучения представляли собой волновые пакеты с глубокой амплитудной модуляцией на частоте около 200 МГц, что приводит к образованию множественных «сателлитов» в фурье-спектре. Частота излучения плазмы ниже электронной циклотронной частоты в области источника, что может свидетельствовать о развитии циклотронной неустойчивости свистовых волн в плотной магнитоактивной плазме. Для одновременного измерения функции распределения электронов, высыпавшихся из магнитной ловушки, использовался магнитостатический метод, позволяющий получать непрерывный энергетический спектр электронов с высоким временным разрешением.

В работе обсуждаются механизмы развития неустойчивости в условиях эксперимента, а также происхождение амплитудной модуляции возбуждаемых свистовых волн и возможные кандидаты в низкочастотные плазменные колебания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-12-00262).

[1] V. A. Skalyga et al., Review of Scientific Instruments **90**, 123308 (2019).

[2] M. Viktorov et al., Physics of Plasmas **30**, *in press* (2023); arXiv:2209.11512

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ГЕНЕРАЦИИ ДРЕЙФОВО-КОМПРЕССИОННОЙ ВОЛНЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Рубцов А.В.¹, **Yamamoto K.**², **Костарев Д.В.**^{1,3}, **Магер П.Н.**¹, **Климушкин Д.Ю.**¹, **Nosé M.**⁴

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru

²Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

³Геофизический центр РАН, Москва, Россия

⁴Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan

В работе проведён подробный анализ данных спутника Arase во время наблюдения компрессионной УНЧ-волны 19 ноября 2018 г. Во время наблюдения волны спутник находился в вечернем секторе, MLT ~ 21 час, около геомагнитного экватора, возле апогея орбиты ($L \sim 6$). Продолжительный период спокойной геомагнитной обстановки привёл к тому, что спутник всё время находился внутри плазмосферы и электронная концентрация превышала 150 см^{-3} . Наблюдавшаяся широкополосная волна охватывала диапазон частот от 4 до 12 мГц. Отношение давления плазмы к магнитному давлению, параметр β , достигало 1, в то время как параметр анизотропии Γ был существенно ниже нуля, что исключает дрейфово-зеркальную моду как интерпретацию наблюдаемой волны. Измерения потоков протонов показали колебания частиц с энергиями 15–30 кэВ, что позволяет говорить о взаимодействии волны с протонами кольцевого тока.

Предполагая 19.2 кэВ, как резонансную энергию, мы получили, что наблюдаемые колебания могут соответствовать дрейфовому резонансу протонов с волной с азимутальным волновым числом $m = -140$. Использование эффекта конечного гирорадиуса показало, что наблюдаемые колебания имеют $m = -134 \pm 57$, тем самым подтверждая вывод о дрейфовом резонансе с протонами 19.2 кэВ. Мы не обнаружили неустойчивых распределений частиц по энергиям, но выявили отрицательный радиальный градиент функции распределения. В сочетании с отрицательным значением m , этот результат удовлетворяет условию развития градиентной неустойчивости.

Полученные результаты, а также все доступные измерения со спутника Arase позволили вычислить частоту дрейфово-компрессионной моды. Несмотря на сложность корректного определения радиального градиента параметров плазмы вблизи апогея орбиты спутника, нам удалось показать для большей части интервала наблюдения, что вычисленная частота дрейфово-компрессионной моды близка к наблюдаемой частоте компрессионной волны. Ранее теоретические вычисления частоты либо не проводились, либо отличались от наблюдаемой частоты в разы. Таким образом, с учётом исключения иных интерпретаций наблюдений, мы можем заключить, что наблюдали дрейфово-компрессионную волну, возбуждённую дрейфовым резонансом с протонами с энергией 15–30 кэВ, и получающую свободную энергию из-за градиентной неустойчивости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10032. Авторы благодарят руководителей инструментов MGF, HFA, PWE, MERi и LERi на спутнике Arase Аяко Мацуоку, Ёшия Касахару, Ацуши Кумамото, Фуминори Цучия, Шоичиро Йокоту и Кацуши Асамуру а также руководителя миссии Arase Ику Шинохару и ведущего учёного миссии Arase Ёшидзуми Миёши за предоставленные данные спутника Arase.

ИЗМЕНЕНИЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПТОКОВ ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ

Костарев Д.В.^{1,2}, Магер П.Н.¹, Климушкин Д.Ю.¹

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

2. ГЦ РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрено изменение функции распределения холодных электронов ($T_e \sim 100$ эВ) под действием параллельного (относительно внешнего магнитного поля) электрического поля альфвеновской волны в диполеподобном магнитном поле с запертыми частицами. Параллельное электрическое поле альфвеновской волны возникает из-за инерции горячих электронов ($T_e \sim 1000$ эВ), запертых в диполеподобном геомагнитном поле.

В рамках этой задачи получено и решено интегральное уравнение, описывающее изменение функции распределения холодных электронов в зависимости от питч-углов. Полученное уравнение возникает при усреднении движения горячих электронов по баунс-периоду. Это невозможно сделать используя магнитогидродинамический подход, поэтому в работе применяется гирокинетическое приближение [1]. Для численных расчетов мы использовали профили параллельного и поперечного электрических потенциалов альфвеновской волны, полученных в работе [2].

Решение интегрального уравнения показывает, что параллельный электростатический потенциал альфвеновской волны может сильно изменять потоки холодных электронов с малыми питч-углами. Это должно наблюдаться при фиксации альфвеновской волны в месте пролета спутника как модуляция количества холодных электронов с альфвеновской частотой в зависимости от питч-углов.

Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации распределений холодных электронов и верификации профилей продольного и поперечного электрических полей генерируемых альфвеновскими волнами вдоль силовых линий геомагнитного поля.

1. Chen L., Hasegawa A. Kinetic theory of geomagnetic pulsations. 1. Internal excitations by energetic particles // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 1503–1512.

2. Kostarev, D. V., Mager, P. N., & Klimushkin, D. Y. Alfvén wave parallel electric field in the dipole model of the magnetosphere: Gyrokinetic treatment // Journal of Geophysical Research: Space Physics 2021, 126, e2020JA028611. <https://doi.org/10.1029/2020JA028611>

ЛИНЕЙНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ В ВЕРХНЕГИБРИДНУЮ МОДУ

Галка А.Г., Малышев М.С., Костров А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, galasnn@ipfran.ru

В работе представлены экспериментальные результаты по исследованию распространения электронно-циклотронных волн в неоднородной плазме. Эксперименты выполнены на крупномасштабном стенде «Ионосфера», который позволяет моделировать электродинамические процессы в околоземной плазме. Представленные экспериментальные результаты стимулированы попыткой объяснения возникновения аврорального километрового излучения (АКР), которое генерируется на частотах вблизи локальной гирочастоты электронов в авроральной магнитосфере Земли в областях с пониженной плотностью плазмы (кавернах), где плазменная частота ниже циклотронной.

Из спутниковых измерений известно, что излучение возникает в области с большим количеством неоднородностей различных масштабов. Известно [1], что при наличии градиентов концентрации плазмы в областях нарушения геометрического приближения волны разных типов и направлений могут переходить друг в друга. Эти данные определили постановку экспериментов для объяснения физики возникновения аврорального километрового излучения. Ранее было показано [2], что циклотронное излучение распространяется поперек магнитного поля (в направлении групповой скорости) в плазме, где плазменная частота ниже циклотронной. Такое излучение выходит из плазменного столба в вакуум в виде линейно поляризованной волны.

В настоящем эксперименте на пути распространяющейся циклотронной волны была создана искусственная плазменная неоднородность с характерным размером много меньше длины волны. Установлено, что наличие неоднородности приводит к трансформации циклотронного излучения в волну, которая имеет групповую скорость вдоль магнитного поля (верхнегибридная мода).

Результаты этих достаточно сложных экспериментов позволяют сделать вывод, что АКР, возникающее вблизи края плазменной каверны в авроральной зоне магнитосферы, связано с циклотронным излучением электронных пучков в условиях, когда плазменная частота меньше циклотронной. В дальнейшем циклотронная волна распространяется в сильно неоднородной плазме и линейно трансформируется в верхнегибридную моду, поляризация которой почти круговая.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-22-20093)

1. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.:Наука,1967. 684 с.
2. Малышев М.С., Назаров В.В., Костров А.В., Галка А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2019 Т. 110, №4, С. 237

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДИАПАЗОНА 4-12 Гц В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СПУТНИКАХ SWARM И СЕТИ НАЗЕМНЫХ МАГНИТОМЕТРОВ CARISMA

Ягова Н. В., Федоров Е. Н., Мазур Н. Г., Пилипенко В. А.

ИФЗ РАН, Москва, Россия, nyagova@ifz.ru

В работе [1] на основе анализа данных двух спутников SWARM показано существование в верхней ионосфере колебаний с периодами выше номинального Pc1 диапазона. Анализ спектральной когерентности для интервалов порядка или меньше отношения расстояния между спутниками к их скорости позволяет надежно дифференцировать их от пространственных структур. При этом для промежуточных пространственных масштабов частоты колебаний, измеренные магнитометром, установленном на низколетящем спутнике, могут в несколько раз отличаться от измеренных неподвижным сенсором. Это приводит к задаче о дискриминации ионосферных колебаний на частотах выше номинального диапазона Pc1 от пульсаций Pc1.

Для решения этой задачи исследовался наземный отклик на наблюдаемые на спутниках когерентные колебания в диапазоне 4-12 Гц по данным магнитометрических измерений на спутниках миссии SWARM и станций сети CARISMA. Обнаружены когерентные колебания со спектральными максимумами на частотах выше 4 Гц, наблюдаемые одновременно на Земле и в ионосфере. Для этих колебаний было выполнено сравнение определенного из наблюдательных данных отношения спектральной плотности мощности Земля-ионосфера с его расчетными значениями для падающего на ионосферу альвеновского пучка конечного радиуса [2] и получены оценки параметров пучка.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

1. Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Мазур Н.Г., Мартинес-Беденко В.А. // Солнечно-Земная Физика 2023. (в печати)
2. Fedorov, E. N., Pilipenko, V. A., Engebretson, M. J., & Hartinger, M. D. // Journal of Geophysical Research: Space Physics 2018. V. 123. 3965–3982. doi:[10.1029/2018JA025338](https://doi.org/10.1029/2018JA025338)

НАБЛЮДЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1 И СВЯЗАННЫХ С НИМИ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Любчич А.А., Федоренко Ю.В.

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Анатиты, Россия, tyahnina@gmail.com

Пульсации диапазона Pc1, наблюдаемые на субавроральных наземных станциях, обычно имеют частоту ниже 2 Гц, поэтому пульсации с более высокими частотами можно назвать высокочастотными. В данной работе рассмотрены два случая высокочастотных (3-4 Гц) пульсаций Pc1, наблюдавшихся на Земле (в обл. Ловозеро) и на спутниках после разных геомагнитных возмущений. В одном событии (28 февраля 2014 г.) - после геомагнитной бури ($Dst = -97nT$), в другом событии (30 ноября 2015 г.) - после серии суббурь. В обоих случаях наблюдению пульсаций предшествовали поджатия магнитосферы, а скорость солнечного ветра достигала больших значений (430-450 км/сек). Пульсации наблюдались во время регистрации низкоорбитальными спутниками NOAA/POES усиления в потоках захваченных энергичных протонов, когда спутники находились вблизи меридиана наземной обл. Ловозеро. Эти усиления свидетельствуют об изотропизации потоков энергичных протонов в экваториальной плоскости в режиме слабой питч-угловой диффузии и могут указывать на области генерации пульсаций Pc1 (ЭМИЦ волн) в магнитосфере.

В первом событии проекции спутников RBSP-A, RBSP-B находились на большом расстоянии $\sim 3,5$ MLT от меридиана обл. Ловозеро, и ЭМИЦ волны на спутниках не наблюдались. При этом обоими спутниками RBSP зарегистрировано положение плазмопаузы вблизи инвариантной геомагнитной широты $\sim 57^\circ$. Проекция вероятного источника пульсаций Pc1, наблюдаемых на Земле, в этом случае располагалась с внешней стороны от плазмопаузы.

Во втором событии многополосные пульсации Pc1 были зарегистрированы как на спутнике RBSP-A, так и на Земле. Проекция вероятных источников пульсаций располагались как с внутренней, так и с внешней стороны от плазмопаузы. Для второго события был определен инкремент ЭМИЦ волн, рассчитанный с использованием распределения энергичных протонов, измеренного спутником RBSP-A. Инкремент увеличивался в трех частотно-временных областях, что хорошо соответствует наблюдаемым ЭМИЦ волнам. Этот факт позволяет предположить, что RBSP-A пересек области генерации пульсаций Pc1 во время наблюдения ЭМИЦ волн.

В обоих событиях пульсации, связанные с высыпаниями, имеющими усиления в потоках лишь захваченных протонов, генерировались в «протонной» полосе $f_{H^+} < f < f_{H^+}$. Проведен анализ усиления в потоках захваченных энергичных протонов.

Работа Яхниной Т.А., Демехова А.Г., Любчича А.А. поддержана грантом РФФ № 22-62-00048.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН ИЗ-ЗА ЭФФЕКТА СМЕШИВАНИЯ ФАЗ

Феденёв В.В., Анфиногентов С.А.

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

В данной работе выполнялось МГД моделирование медленных магнитозвуковых волн, распространяющихся в корональной структуре на Солнце, с целью проверки теории затухания данного типа волн за счёт механизма смешивания фаз (phase mixing). Численные симуляции производились с помощью кода Lare2D. Использовалась 2.5D модель магнитного слоя с повышенной плотностью в центре и поперечным температурным профилем, плавно изменяющимся от 750 000 К до 2 000 000 К от центра к краям.

По результатам численных расчётов были построены несколько моделей для значений фонового магнитного поля от 3 до 20 Гаусс, что соответствует значениям плазменного параметра β от 0.01 до 0.5. Каждая модель включает в себя временные серии пространственных распределений температуры и плотности. По полученным данным были определены характерные длины затуханий волновых вариаций плотности плазмы, а также «наблюдаемые» длины затуханий вариаций яркости, видимых в линиях крайнего ультрафиолетового (КУФ) диапазона под разными углами зрения и соответствующие различным каналам инструмента SDO/AIA.

Для вариаций плотности получено, что длина затухания изменяется от 90 Мм для $\beta \sim 0.5$ до более чем 1000 Мм при $\beta \sim 0.01$, что хорошо согласуется с теорией затухания медленных магнитозвуковых волн за счёт смешивания фаз. У «наблюдаемых» вариаций яркости излучения наблюдается зависимость длины затухания от плазменной β , однако измеренная длина затухания не превышает 250 Мм даже для случая $\beta \sim 0.01$, когда реальное затухание волны практически отсутствует. Таким образом, можно сделать вывод, что для малых значений β наблюдаемое затухание распространяющихся вариаций яркости излучения в КУФ диапазоне в значительной степени объясняется чисто наблюдательным эффектом интегрирования оптически тонкого излучения вдоль луча зрения по сравнению с реальным затуханием волн за счёт смешивания фаз. Кажущееся затухание волн будет обнаруживаться в наблюдениях даже при полном отсутствии физического затухания наблюдаемых медленных магнитозвуковых волн.

Работа поддержана грантом РНФ 21-12-00195.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ МАГНИТОСФЕРНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ

Власов А.А., Леонович А.С., Козлов Д.А.

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

Спутниковые исследования позволяют регистрировать магнитосферные МГД-колебания, в том числе альфвеновские колебания. Однако определение типа наблюдаемой волны и ее пространственной структуры представляет собой сложную задачу. Для определения поперечной (поперек магнитных оболочек) структуры нами предложен метод «фазовых портретов» - анализ поведения разности фаз между поперечными компонентами электрического/магнитного поля монохроматических альфвеновских колебаний. Показано, что разность фаз однозначно связана с поперечной структурой альфвеновской волны. В работе [1] были построены фазовые портреты для некоторых типов таких волн.

С помощью данного метода проведено исследование поперечной структуры квазимонохроматических азимутально-мелкомасштабных альфвеновских колебаний, зарегистрированных спутником RBSP-A 23 октября 2012 года в интервале 22.00-22.45 UT. Особенностью этого случая является наблюдаемая смена поляризации рассматриваемых волн от полоидальной к тороидальной [2]. Показано, что наблюдаемые колебания можно объяснить генерацией полоидальных альфвеновских волн на двух резонансных поверхностях, расположенных с двух сторон от локального максимума в радиальном распределении альфвеновской скорости. В направлении вдоль силовых линий геомагнитного поля эти волны представляют собой основную гармонику стоячих альфвеновских волн. В радиальном направлении - это волны, убегаящие в противоположных направлениях от полоидальных резонансных поверхностей к тороидальным резонансным поверхностям.

Исследование было поддержано Российским Научным Фондом по гранту 22-77-10032.

1. Leonovich, A. S., Zong, Q.-G., Kozlov, D. A., & Vlasov, A. A. (2022). "Phase portraits" of Alfvén waves in magnetospheric plasma. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030432. <https://doi.org/10.1029/2022JA030432>.
2. Leonovich, A. S., Klimushkin, D. Y., & Mager, P. N. (2015). Experimental evidence for the existence of monochromatic transverse small-scale standing Alfvén waves with spatially dependent polarization. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 5443 – 5454.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ И ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТОКОВЫХ ВИХРЕЙ ГЕОМАГНИТНЫХ РС5 ПУЛЬСАЦИЙ ПО МЕРИДИАНУ И АЗИМУТУ

Моисеев А.В., Попов В.И.

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

В ряде событий геомагнитных РС5 пульсаций проанализированы скорости их распространения в азимутальном и меридиональном направлении двумя методами: по фазовым задержкам сигнала между станциями и по смещению центров вихрей их эквивалентных токовых систем. Величины скоростей, оцененные по фазовым задержкам: меридиональные $V_m = 1-10$ км/с, азимутальные $V_{az} = 10-20$ км/с, по токовым системам $V_m = 1-3$ км/с и $V_{az} = 10-20$ км/с. Видно, что величины скоростей, оцененных обоими методами, неплохо согласуются. Обнаружено распространение в основном на запад в утреннем секторе по азимуту и в обоих направлениях (к полюсу и экватору) по меридиану. Большая часть рассмотренных событий РС5 пульсаций регистрировалась в утреннем секторе магнитосферы. В магнитосфере пульсации в этих событиях регистрировались на спутниках в центральном плазменном слое и имели резонансное происхождение. Азимутальные скорости распространения пульсаций в экваториальной плоскости магнитосферы с дневной на ночную сторону по спутниковым данным в разных событиях изменялись от нескольких сотен до тысячи км/с. Полученные результаты подтверждают предположения о том, что причиной наблюдаемой динамики магнитных вариаций в импульсных событиях является перемещение вихрей эквивалентных ионосферных токов.

СОЛИТОННОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

Трухачев Ф.М.^{1,2,3}, Герасименко Н.В.², Васильев М.М.^{1,3}, Петров О.Ф.^{1,3}

¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, ftru@mail.ru

²БРУ, г. Могилев, Беларусь

³МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

Волны в плазме могут являться эффективным механизмом нагрева и ускорения заряженных частиц. Большинство научных работ в этой области посвящено альфвеновским, ленгмюровским и электромагнитным волнам [1-4]. Однако, нелинейные волны и солитоны акустического типа до недавнего времени [5] не исследовались в этом отношении. А между тем они играют важную роль в динамике как космической, так и лабораторной плазмы [6]. Предлагаемая работа посвящена анализу влияния одномерных консервативных солитонов на функции распределения фоновой плазмы. В частности, с использованием одномерной гидродинамической модели электрон-протонной бесстолкновительной плазмы, а также одночастичного приближения рассчитана ионная функция распределения по скоростям и энергиям в присутствии ионно-звуковых солитонов. Анализ проведен в рамках численного моделирования динамики большого ансамбля ионов фоновой плазмы, участвующих во взаимодействии с солитоном. Кроме того, в предположении эргодичности плазмы получены аналитические выражения для описания функции распределения. В частности для ионно-звуковых солитонов произвольной амплитуды функция распределения по скоростям может быть описана выражением $f(v_i) = 2[T(dv_i/dt)]^{-1}$, где T – время измерения (постоянная времени приборов) функции распределения, определяющая нормировку, v_i – скорость пробного иона в электрическом поле солитона. Для солитонов малой амплитуды можно воспользоваться формулой $f(v_i) = \sqrt{2} [T\Phi_0\mu\sqrt{(\mu-1)A}]^{-1}$, где Φ_0 – амплитуда солитона, $\mu = [M^2 - (M - v_i)^2]/2\Phi_0$, $A = 0.5(M^{-2} - 1)$, M – число Маха. Анализ полученных выражений показал, что возмущенная функция распределения подобна функции распределения плазмы имеющей сверхзвуковой ионный пучок. Для проверки полученных формул была рассчитана средняя плотность ионного тока, индуцированного ансамблем солитонов, показано отличное согласие с результатами [7], полученными другими способами. Наши результаты будут полезны при интерпретации экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00354

1. Escande D. F., et.al. *Scientific Reports* 9(1), 14274 (2019).
2. Seo Jaemin, et.al. *Nuclear Fusion* 61:9, 096022 (2021).
3. Esarey, E., et.al. *Rev. Mod. Phys.* 81, 1229–1285 (2009).
4. Cardinali A., et.al. *Plasma Phys. Control. Fusion* 62 044001 (2020).
5. Трухачев Ф.М. и др., *Физика плазмы* 48(10), 967-974 (2022).
6. Lakhina G.S., et.al. *Plasma* 4, 681 (2021).
7. Trukhachev F.M. et.al., *Cosmic Res.* 54, 351 (2016).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ОТ НАЗЕМНЫХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КНЧ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Пилипенко В.А.^(1,2) Федоров Е.Н.⁽¹⁾, Мазур Н.Г.⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Институт физики Земли РАН, Москва, РФ (e-mail: pilipenko_va@mail.ru, ENFedorov1@yandex.ru, ngmazur@mail.ru);*

⁽²⁾ *Геофизический Центр РАН, Москва, РФ*

Теоретически рассмотрена возможность обнаружения низкоорбитальными спутниками электромагнитного отклика в верхней ионосфере от заземлённых крупномасштабных КНЧ передатчиков. В качестве примера таких мега-излучателей рассмотрены передатчик ЗЕВС на частоте 82 Гц, эксперименты FENICS по возбуждению искусственных излучений на частотах 3-100 Гц, и магистральные линии электропередач (ЛЭП) с промышленной частотой 50 Гц. Численно рассчитана утечка энергии КНЧ излучений в верхнюю ионосферу от заземленного линейного тока конечной длины L , подвешенного над высокоомной земной поверхностью. Высотный профиль параметров плазмы реконструирован с использованием модели ионосферы IRI. Для передатчика ЗЕВС ($L=60$ км), запитываемого током 200 А, моделируемые амплитуды электромагнитного отклика в ночной ионосфере могут достигать ~ 60 мкВ/м. Предположение о бесконечном масштабе излучателя завышает отклик электрического поля в верхней ионосфере в 5 раз по сравнению с реальным масштабом 60 км передатчика ЗЕВС. Во время экспериментов FENICS ($L=100$ км) при типичном токе 100 А излучение с частотой 10-150 Гц может просачиваться в ночную верхнюю ионосферу с амплитудой до $\sim 60-70$ мкВ/м. По результатам моделирования, излучение на частотах 50/60 Гц с наблюдаемой на спутниках в ночной ионосфере интенсивностью ~ 1 мкВ/м может возбуждаться несбалансированным током в ЛЭП ~ 10 А над земной корой с проводимостью 10(-3) См/м. Установки типа FENICS могут быть использованы для искусственного возбуждения Pc1 излучений. К настоящему времени наша планета оказалась в диапазоне 50-150 Гц в электромагнитной среде, созданной скорее промышленной деятельностью, чем естественными магнитосферными процессами. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-77-30010.

УДИВИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ОНЧ

Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И

*ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия;
kleimen@ifz.ru, ngk1935@yandex.ru*

Дискретные ОНЧ излучения, наблюдаемые в авроральных широтах (финская станция Каннуслахто в 40 км от обс. Соданкюля) на частотах выше 4-5 кГц (так называемые «птички»), характеризуются большим разнообразием спектральных форм. Рассмотрены некоторые необычные динамические спектры таких излучений. Прежде всего, это так называемые «триггерные» всплески длительностью 1-3 мин, в которых излучения появляются неожиданно и одновременно во всей полосе частот всплеска (обычно 4-7 кГц) с четкой нижней и верхней частотной границей, и так же неожиданно кончаются. Их разновидностью являются всплески, начинающиеся как узкополосный длинный «нос», который иногда распадается на отдельные периодические сигналы. Показаны также квазипериодические излучения в полосе частот 8-10 кГц с периодом повторения порядка 2-3 с или 3-5 мин. Кроме того, рассмотрены необычные ОНЧ эмиссии (“magnetospheric line radiation”?), зарегистрированные 26 декабря 2022 в виде 2-х часового всплеска излучений в полосе частот 2-8 кГц, состоящего из сложного набора одновременных очень узкополосных квазипериодических сигналов варьирующей частоты.

ШИРОТНАЯ ДИНАМИКА ПОЛОЖЕНИЯ ОБЛАСТИ ВЫХОДА ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ВО ВРЕМЯ СУББУРИ

Никитенко А.С.¹, Клейменова Н.Г.², Федоренко Ю.В.¹

¹ПГИ, г. Анапты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

²ИФЗ, г. Москва, Россия

Представлены результаты анализа одновременных наблюдений ОНЧ аврорального хисса и геомагнитных пульсаций типа Pi2 и Pi1B, зарегистрированных на станциях Полярного Геофизического Института обс. Ловозеро (испр. геом. к-ты $\Phi=64.07^\circ$, $\Lambda=126.97^\circ$, LOZ) и обс. Баренцбург ($\Phi=75.21^\circ$, $\Lambda=126.06^\circ$, ВAB). Обнаружены события, характеризующиеся появлением всплеска ОНЧ аврорального хисса сначала в авроральных широтах (LOZ) и спустя несколько минут в приполярной зоне (ВAB).

Исследуемые всплески были зарегистрированы в начале дрейфующей к полюсу магнитосферной суббури. Анализ поляризации и азимутальных углов прихода ОНЧ аврорального хисса показал, что во всех событиях область выхода аврорального хисса сначала находилась вблизи LOZ, после чего произошло ее перемещение на более высокие широты. Область выхода всплесков, регистрируемых в ВAB, сначала находилась южнее станции, после чего стала приближаться к ней. Поскольку станции расположены на близких геомагнитных меридианах, можно предположить, что регистрируемый авроральный хисс может возникать от одного и того же источника, перемещающегося по широте.

Сопоставление полученных результатов с данными наблюдений геомагнитных пульсаций в LOZ показало, что пульсации типа Pi1B и Pi2 сопровождали возникновение хисса в LOZ в каждом событии в начале суббури. Через несколько минут после начала суббури пульсации наблюдались в ВAB. Пульсации Pi2 были также зарегистрированы на станциях сети IMAGE, расположенных на широтах выше LOZ. Время начала пульсаций на различных широтах запаздывало с увеличением геомагнитной широты станции, что показывает перемещение источника геомагнитных пульсаций в более высокие широты (т.е. на более дальние L-оболочки). Это перемещение совпало с перемещением области выхода ОНЧ хисса в том же направлении. Мы предполагаем, что в рассматриваемых событиях высыпаящиеся электроны были источником как аврорального хисса, так и триггером наземных иррегулярных геомагнитных пульсаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн» (НАС, ФЮВ).

НАБЛЮДЕНИЯ ЭМИЦ ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СОПРЯЖЕННОЙ ОБЛАСТИ

Т.А. Попова¹, А.Г. Демехов^{1,2}, А.А. Любич¹, А. Matsuoka³, S. Imajo³, S. Yokota⁴, S. Kasahara⁵, K. Keika⁵, T. Hori⁶, A. Kumamoto⁷, F. Tsuchiya⁷, Y. Kasahara⁸, M. Kitahara⁷, S. Nakamura⁶, Y. Miyoshi⁶, I. Shinohara⁹

¹ПГИ, г. Анапты, Россия

²ИИФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

³Kyoto University, Kyoto, Japan

⁴Osaka University, Osaka, Japan

⁵University of Tokyo, Tokyo, Japan

⁶ISEE, Nagoya University, Nagoya, Japan

⁷Tohoku University, Tohoku, Japan

⁸Kanazawa University, Kanazawa, Japan

⁹JAXA, Sagami, Japan

tarkada@yandex.ru

Анализируются результаты наблюдений электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в магнитосфере Земли, пульсаций Pc1 на Земле и высыпаний энергичных заряженных частиц, регистрируемых низкоорбитальными спутниками NOAA/POES для события 7 декабря 2018 года, которое произошло во время геомагнитного возмущения, - на фазе развития суббури ($AL = -340$ нТл). ЭМИЦ волны в «протонной» полосе ($f_{He+} < f < f_{H+}$, где f_{He+} и f_{H+} - гирочастоты ионов гелия и протонов соответственно) были зарегистрированы одновременно двумя магнитосферными спутниками RBSP-B и Arase/ERG в вечернем секторе местного магнитного времени (MLT). На основе данных этих спутников был сделан вывод о вероятной локализации области ионно-циклотронной неустойчивости, наличие которой подтверждается наблюдением пульсаций типа колебаний убывающего периода (IPDP) наземной обсерваторией Ловозеро, находившейся в это время в магнитосопряженной области. Было проанализировано пространственное распределение потоков высыпаящихся энергичных протонов по данным нескольких сопряженных пролетов низкоорбитальных спутников NOAA/POES. Энергии высыпаящихся энергичных протонов сопоставлены с энергиями резонансного взаимодействия волна-частица, полученными в результате расчета коэффициентов питч-угловой диффузии протонов при малом питч-угле, и показано их хорошее взаимное соответствие. Коэффициент питч-угловой диффузии в максимуме интенсивности волн был максимален для энергий 10—80 кэВ и соответствовал режиму сильной диффузии. По данным этих пролетов спутников наблюдались высыпания релятивистских электронов, которые, вероятно, также были вызваны зарегистрированными ЭМИЦ волнами.

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРУ ЭКЗОПЛАНЕТЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЕЁ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Грач В.С.¹, Демехов А.Г.¹

¹ ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@ipfran.ru

В работе анализируется возможность высыпаний энергичных электронов в атмосферу планеты Tau Bootis b (tau boo b, Тау Волопаса b) в результате резонансного взаимодействия с ее радиоизлучением. Данная работа продолжает работу [1]; рассматриваются те же параметры магнитосферы планеты и радиоизлучения.

Радиоизлучение генерируется в ближней окрестности планеты и распространяется от нее; в предположении, что радиоизлучение представляет собой X-моду (быструю необыкновенную волну), резонансное взаимодействие возможно только для попутных электронов. Поэтому высыпания вследствие такого взаимодействия возможны в сопряженном полушарии, что, в свою очередь, требует нахождения области радиоизлучения на замкнутых силовых линиях.

При резонансном взаимодействии релятивистских электронов с X-модой на первом циклотронном резонансе существуют две резонансные области с противоположными знаками эффективной неоднородности. В условиях магнитосферы Tau Bootis b для большей части резонансных энергий взаимодействие в обеих областях будет существенно нелинейным. Нелинейный режим характеризуется группировкой частиц по фазе и ненулевым средним изменением энергии и питч-угла как для частиц, захваченных полем волны, так и для незахваченных (пролетных) частиц.

При взаимодействии с X-модой в большинстве случаев знак изменения питч-угла электрона совпадает со знаком изменения энергии. При увеличении энергии абсолютное значение изменения питч-угла уменьшается. В [1] было показано, что уменьшение энергии возможно для пролетных частиц, если в волновом пакете находится только первая точка резонанса (с меньшей высотой), или для захваченных частиц, когда в волновом пакете находятся обе точки резонанса и преобладает влияние второй резонансной зоны.

Проведенные расчеты взаимодействия энергичных электронов с пакетом конечной длительности радиоизлучения (X-моды) в магнитосфере планеты Tau Bootis b показали, что высыпания пролетных частиц возможны для частиц небольших начальных энергий при небольших временах старта частиц (когда частицы попадают в пакет почти сразу после его генерации). Высыпания захваченных волной частиц возможны в широком диапазоне начальных энергий при не очень малых временах старта частиц.

В целом, при условии, что область генерации радиоизлучения находится на замкнутых силовых линиях, резонансное взаимодействие энергичных электронов с радиоизлучением может приводить к высыпанию в нижние слои ионосферы электронов с энергиями 1-100 кэВ. При этом интервал времени, в котором возможны высыпания частиц, примерно в полтора раза превышает длительность пакета, а энергия высыпающихся частиц со временем увеличивается.

1. Грач В.С., Демехов А.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 2022. Т. 65. С. 249.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УНЧ ПОЛЯ ЗАГЛУБЛЕННОГО КРУПНОМАСШТАБНОГО ИСТОЧНИКА НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И В ИОНОСФЕРЕ

К.Е. Боровлева, Е.Н. Федоров, Н.Г. Мазур, В.А. Пилипенко

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, k.borovylova@gmail.com

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. Геомагнитное поле считалось вертикальным, поскольку учет наклона существенно результаты не изменяет. 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. это подземный ток необходимой интенсивности должен возбуждать интенсивные возмущения геомагнитного поля на поверхности Земли. Такие возмущения были бы обнаружены 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.

К СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ВОЛН В ПРИЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ СВИСТОВ ВБЛИЗИ НГР РЕЗОНАНСА

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, lundin.by@gmail.com

Известно [1], что для оценок эволюции амплитуды свистовых волн в квазирезонансных режимах вдоль нисходящих лучей, формирующихся вблизи геомагнитного экватора из восходящих потоков низкочастотного излучения грозовых разрядов, возможно использование законов сохранения (асимптотических интегралов - АИ) присущих устойчивому распространению волновых пакетов почти вдоль осей специальной криволинейной ортогональной системы координат. Ее наличие связано с ортогональностью волновых векторов и групповых скоростей для электронных свистовых волн в холодной плазме вблизи косоугольного гибридного резонанса. Однако, на меньших высотах с приближением частоты пакета сверху к локальной частоте нижнегибридного резонанса (НГР) проявляется сингулярность АИ в оценке интенсивности поля квазирезонансных (КР) волновых пакетов.

Найденное представление для спектральной плотности потока энергии квазирезонансных волн в холодной плазме удерживает коррекции необходимые для прохождения зоны совпадения частоты КР волнового пакета с локальной частотой НГР [2]. Сингулярность в оценке интенсивности поля КР свистовых волн исчезает вместе с отклонением их волновых векторов от направления ортогонального геомагнитного полю на частоте НГР. При этом для локального частотного диапазона от НГР до частот превышающих ионную плазменную (но существенно меньших гирочастоты электронов) оценки величины доминирующей электрической компоненты КР волн и модуля магнитной компоненты их поля имеют разный частотный ход. При фиксации спектральной плотности потока энергии и малых обратных волновых чисел оценки интенсивности магнитной компоненты КР волнового поля имеют минимум на ионной плазменной частоте, тогда как электрическая интенсивность КР волнового поля продолжает падать и выше ионной плазменной частоты.

1. Lundin B., Krafft C. // J. Geophys. Res. 1997. V. **102**. P. 141.
2. Lundin B.V., Krafft C. // J. Plasma Physics 2002. V. **67**. P. 149.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Стуков Д. А.¹, Сурков В. В.¹, Пилипенко В. А.¹, Касимова В. А.²

¹ ИФЗ РАН, Б. Грузинская 10, 123242, Москва, Россия, dstkov922@gmail.com

² КФ ФИЦ ЕГС РАН, Б. Пуйна, 683006, Петропавловск-Камчатский, Россия

Эффективность мониторинга электромагнитных предвестников землетрясений во многом зависит от выбора наиболее «чувствительных» точек наблюдения. С другой стороны, электромагнитный отклик земной коры на сейсмические волны определяется локальными механо-электрическими свойствами земной коры. Таким образом, предварительное зондирование сейсмоактивного региона сейсмическими волнами от удаленного взрыва/землетрясения с использованием одновременных сейсмических и электромагнитных наблюдений может указать наиболее перспективные точки наблюдения для мониторинга электромагнитных предвестников. Надежное извлечение необходимой информации требует четкого физического понимания различных механизмов магнитного отклика на акустическое воздействие в среде. Существует как минимум два физических механизма, с помощью которых можно объяснить косейсмические электромагнитные явления. Во-первых, это геомагнитные возмущения, вызванные генерацией токов в проводящих слоях земли во время их движения в сейсмической волне. Второй механизм – сейсмоэлектрический эффект, обусловленный электрокинетическими явлениями, возникающими при деформациях пористой влагонасыщенной породы под действием сейсмических волн. С помощью сейсмоэлектрического эффекта можно изучать физические свойства и параметры горных пород на глубине, такие как пористость, проницаемость, водонасыщенность, электрокинетический коэффициент и другие. Большинство параметров, от которых зависит значение электрокинетического коэффициента, не могут быть измерены напрямую, но этот коэффициент может быть оценен при анализе ко-сейсмических электромагнитных явлений. В данной работе предложен такой метод анализа, а также проведена оценка величины электрокинетического коэффициента с помощью экспериментально полученных сейсмических и теллурических данных. В качестве примера используются сейсмические, магнитные и теллурические данные, зарегистрированные с высокой частотой дискретизации на Камчатке во время Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. Предложенный метод дал физически разумную оценку сейсмоэлектрического коэффициента в низкочастотном диапазоне. Работа поддержана грантом РФФИ 22-17-00125 «Физический анализ сейсмо-электромагнитных явлений на Камчатском геодинамическом полигоне: модернизация системы наблюдений и теоретическое моделирование».

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В СЛОЖНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

Афанасьев Н.Т., Лукьянцев Д.С., Танаев А.Б.

ИГУ, г. Иркутск, Россия, spacemaklay@gmail.com

Согласно общей теории относительности процесс распространения электромагнитной волны в вакууме, погруженном в поле тяготения массивного объекта можно рассматривать как процесс в евклидовом пространстве с эффективным показателем преломления [1,2]. На межзвездных и галактических расстояниях характерные пространственные масштабы такого показателя существенно превышают длину волны, поэтому возникающие рефракционные эффекты можно рассчитать с помощью метода геометрической оптики и его квазилучевых обобщений [3,4]. Между тем получить аналитические решения для энергетических характеристик волны в лучевом приближении удастся лишь для простейших моделей эффективного показателя преломления вакуума. В сложных гравитационных полях, создаваемых системой звезд и галактик, расчет рефракционного ослабления потока энергии и траекторных характеристик электромагнитной волны возможен только численно. Одним из таких примеров может быть задача линзирования излучения квазаров на галактиках, лежащих на трассе распространения.

В настоящем докладе на основе лучевых дифференциальных уравнений в форме Эйлера разработан алгоритм расчета и приведены результаты численного моделирования траекторных характеристик и рефракционного ослабления потока энергии волн для различных моделей эффективного показателя вакуума. Проведено тестирование алгоритма для простых моделей показателя преломления. Показано, что в зависимости от конфигурации сложного гравитационного поля от нескольких космических объектов при распространении электромагнитных волн может возникать различная пространственная структура волнового поля. Приведены результаты расчетов траекторий и распределения точек прихода лучей в евклидовом пространстве в условиях вакуума. В гравитационном поле нескольких объектов траекторная картина существенно искажается и возможно явление группировки точек прихода лучей. Проведено сравнение количественных значений пространственной расходимости лучевого поля (рассчитанной путем совместного численного интегрирования системы лучевых уравнений и траекторных уравнений, продифференцированных по прицельному угловому параметру) с амплитудой поля, полученной суммированием удельных энергетических порций лучей, приходящих в окрестность наблюдателя. Рассмотрены межзвездные расстояния, когда возможно пересечение лучей, приводящее к эффекту гравитационного линзирования и фокусировкам различного типа. Рассмотрена возможность приближенной оценки поля волны в области фокусировки с использованием лучевого приближения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (тема государственного задания FZZE-2020-0024, соглашение № 075-15-2021-675), Гранта ИГУ №091-22-307.

1. Волков А.М., Измestьев А.А., Скроцкий Г.В. // ЖЭТФ. 1970. Т.59. №10. С.1254.
2. Plebanski I. // Phys.Rev.1960. V.118. №5 P. 1396
3. Kravtsov YuA and Orlov YuI. GeometricalOptics of Inhomogeneous Medium. Berlin: Springer-Verlag. 1990. p 312.
4. Zaharov A.F. Gravity lenses and micro-lenses. Moscow: Yanus-K. 1997. p 328.

СПЕКТРЫ ХОРОВЫХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ (РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ)

Демехов А.Г.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

Представлены результаты численных расчетов генерации хоровых ОНЧ излучений в рамках модели режима лампы обратной волны (ЛОВ) в магнитосферном циклотронном мазере [1-4]. Обсуждается зависимость динамического спектра генерируемых волн от положения наблюдателя в области генерации. Ранее было показано [5], что асимметрия процесса генерации по отношению к геомагнитному экватору (точке минимума магнитного поля) обеспечивает сдвиг частоты дискретных хоровых элементов, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях, если они наблюдаются в стороне от геомагнитного экватора. В этом случае волны, распространяющиеся по направлению к экватору, имеют меньшую амплитуду и несколько более высокую частоту, чем волны, распространяющиеся от экватора.

В данной работе рассматриваются особенности динамического спектра волн в разных точках области генерации при наличии квазистатических возмущений геомагнитного поля. В этом случае оказывается возможной генерация элементов как с повышающейся, так и с понижающейся частотой. При этом вид динамического спектра качественно изменяется при перемещении точки наблюдения внутри области генерации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00416.

Литература

- [1] Trakhtengerts V. Y. (1995). Magnetosphere cyclotron maser: Backward wave oscillator generation regime. Journal of Geophysical Research, 100(9), 17205–17210. <https://doi.org/10.1029/95JA00843>
- [2] Демехов А. Г., Трахтенгерц В. Ю. О динамике магнитосферного циклотронного КНЧ-ОНЧ мазера в режиме лампы обратной волны. II. Влияние неоднородности магнитного поля // Изв. вузов — Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 977–987.
- [3] Демехов А. Г. О генерации ОНЧ излучений с повышающейся и понижающейся частотой в магнитосферном циклотронном мазере в режиме лампы обратной волны // Изв. вузов — Радиофизика. 2010. Т. 53, № 11. С. 679–694.
- [4] Demekhov A. G., Taubenschuss U., Santolík O. Simulation of VLF chorus emissions in the magnetosphere and comparison with THEMIS spacecraft data // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2017. V.122, No.1. P. 166–184. <https://doi.org/10.1002/2016JA023057>
- [5] Demekhov A. G., Taubenschuss U., Hanzelka M., Santolík O. Frequency dependence of very low frequency chorus Poynting flux in the source region: THEMIS observations and a model // Geophysical Research Letters. 2021. V. 47, No. 6. e2020GL086958. <https://doi.org/10.1029/2020GL086958>

О ВКЛАДЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ЭФФЕКТОВ В ДИНАМИКУ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

Шевелёв М.М., Артемьев А.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, shevelev.mm@phystech.edu

Моделирование динамики потоков энергичных электронов во внешнем радиационном поясе Земли является ключевой задачей в контексте предсказания космической погоды. Все существующие глобальные модели радиационных поясов основаны на решении уравнения Фоккера-Планка для квазилинейной теории, описывающей резонансные взаимодействия волна-частица. Однако многочисленные спутниковые наблюдения фиксируют в радиационных поясах наличие большой популяции очень интенсивных когерентных волн, которые могут взаимодействовать с энергичными электронами в режиме нелинейного резонансного взаимодействия. Такие нелинейные резонансные эффекты не включены в существующие модели динамики радиационных поясов. В этом исследовании мы проводим сравнение эффективности квазилинейных и нелинейных резонансных эффектов для динамики потоков энергичных электронов. Основным результатом является определение пороговой амплитуды вероятности нелинейных резонансных взаимодействий, при которой нелинейные эффекты становятся более важными, чем квазилинейная диффузия. Эта пороговая вероятность зависит от средней интенсивности волн и может быть определена по измеряемому распределению амплитуд волн. Мы обсуждаем полученные результаты в контексте применения к моделям, описывающим динамику потоков электронов, резонансно взаимодействующих со свистовыми волнами.

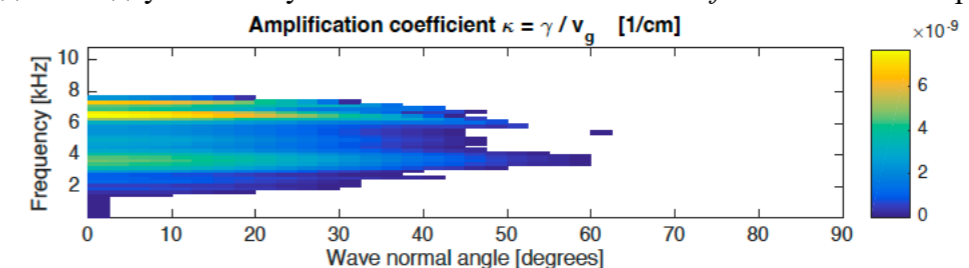
ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ВНЕ ПЛАЗМОПАУЗЫ С ЧАСТОТАМИ ВЫШЕ И НИЖЕ ПОЛОВИНЫ ГИРОЧАСТОТЫ

Шкляр Д. Р.¹, Титова Е. Е.^{2,1}, Любич А. А.²

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, david@iki.rssi.ru

²ПГИ, г. Анапты, Россия

При возбуждении волн за счет электронной циклотронной неустойчивости в экваториальной области магнитосферы наблюдаемые на низких широтах спектры тесно связаны с локальным коэффициентом усиления. Одновременные измерения волн и частиц на спутниках Van Allen Probes дают возможность выполнить сравнение наблюдаемых спектров и рассчитанных коэффициентов усиления, что и является предметом настоящего доклада. Для этого на основе измерений дифференциальных потоков электронов были рассчитаны коэффициенты усиления свистовых волн γ/v_g (γ - инкремент волны, v_g - групповая скорость) в зависимости от частоты и угла волновой нормали (см. рисунок). Сравнение полученных коэффициентов усиления со спектральными характеристиками одновременно наблюдаемых ОНЧ излучений показывает их достаточно хорошее соответствие. Наиболее примечательной особенностью наблюдаемого спектра и рассчитанного инкремента является существование двух спектральных максимумов, ниже и выше половины электронной гирочастоты. Мы нашли характерную черту функции распределения электронов, ответственную за эту особенность (хотя мы не определили причину ее появления), которая состоит в резком падении функции распределения с ростом энергии в диапазоне энергий, которые вносят основной вклад в инкремент свистовых волн на половине гирочастоты. Эта особенность функции распределения обнаруживается при анализе дифференциальных потоков электронов, определяющих их функцию распределения. Чтобы понять, почему такая зависимость функции распределения должна приводить к значительному уменьшению инкремента на частотах вблизи $f_c/2$ (f_c - электронная гирочастота) заметим, что инкремент волны определяется "конкуренцией" между уменьшением функции распределения с ростом энергии и ростом функции распределения с увеличением магнитного момента μ , причем относительный вклад частиц в инкремент увеличивается с ростом μ . Чтобы частицы вносили вклад в инкремент, их энергия должна быть больше, чем параллельная резонансная энергия $w_{r\parallel} = mv_r^2/2$ (m - масса частицы, v_r - резонансная скорость), причем этот вклад увеличивается с ростом магнитного момента и, соответственно, с ростом полной энергии частиц. Таким образом, энергии частиц, вносящих основной вклад в инкремент, лежат в диапазоне от $w_{r\parallel}$ до нескольких $w_{r\parallel}$. Дальнейшее увеличение μ и, таким образом, полной энергии частиц, сопровождается общим уменьшением числа резонансных частиц. Как показывает анализ функции распределения, именно в диапазоне энергий, отвечающих резонансному взаимодействию с волнами вблизи $f_c/2$, производная функции распределения по энергии имеет наибольшие по абсолютной величине отрицательные значения, что и приводит к подавлению инкремента волн на этих частотах. Таким образом, выполненный анализ может быть шагом на пути к пониманию часто наблюдаемых двух максимумов на частотах выше и ниже $f_c/2$ на ОНЧ спектрограммах.



Коэффициент усиления как функция частоты и угла волновой нормали. $f_c/2 = 5.45$ кГц.

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В НЕТЕПЛОЙ ПЛАЗМЕ С КОЛЬЦЕВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

Кузнецов А.А.¹, Власов В.Г.²

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

² ИРНИТУ, г. Иркутск, Россия

Непосредственные спутниковые измерения показывают, что в источниках аврорального километрового радиоизлучения Земли ускоренные электроны характеризуются так называемым «кольцевым» или «подковообразным» распределением, когда электроны с энергиями порядка нескольких кэВ распределены более-менее изотропно в пространстве скоростей, а более холодная (тепловая) компонента плазмы практически отсутствует. В подобных условиях дисперсионные характеристики электромагнитных волн существенно отличаются от случая холодной плазмы, что подтверждается рядом численных расчётов. В данном докладе представлены аналитические формулы для дисперсионных характеристик электромагнитных волн, распространяющихся перпендикулярно к магнитному полю в плазме с кольцевым распределением электронов. В частности, показано, что в достаточно разреженной и горячей плазме (при выполнении условия $\omega_p/\omega_c < v/c$, где ω_p и ω_c – электронная плазменная и циклотронная частоты, v – скорость ускоренных электронов и c – скорость света) дисперсионные ветви быстрой (X) и медленной (Z) необыкновенных волн соединяются, образуя единую ветвь; данная особенность позволяет излучению (которое генерируется на частотах ниже электронной циклотронной частоты) выходить из области генерации. Для условий, типичных для источников аврорального километрового излучения Земли, найдены коэффициенты усиления обыкновенной и необыкновенной мод; показано, что, как правило, необыкновенная мода является доминирующей. Исследовано также возможное влияние тепловой компоненты плазмы на дисперсионные характеристики электромагнитных волн.

ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВИСТОВЫХ ВОЛН В РАЗРЕЖЕННОЙ ($\omega_p < \omega_c$) МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Н. С. Артеха^{1,2}, Д. Р. Шкляр¹

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия

² НИУ «ВШЭ», г. Москва, Россия, natalya.arteha@mail.ru

Исследование распространения свистовых волн и их дисперсионных характеристик – одна из важнейших задач физики космической плазмы, которая остается актуальной на протяжении многих десятилетий, вплоть до настоящего времени. При этом дисперсионные характеристики свистовых волн в основном исследовались для случая плотной плазмы ($\omega_p \gg \omega_c$, где ω_p, ω_c – электронная плазменная и циклотронная частота, соответственно). Однако, при наличии достаточно сильного магнитного поля у планет может наблюдаться противоположный случай, когда $\omega_p < \omega_c$, что имеет место, в частности, в авроральной области магнитосферы Земли. По данным миссий Voyager 1, 2 такая область была обнаружена также у Юпитера на расстояниях $18.5R_{ju} < R < 22.5R_{ju}$. Поэтому изучение волн в разреженной плазме помимо теоретического интереса имеет и свои приложения к волновым процессам в космической плазме. В настоящей работе выведено дисперсионное соотношение в виде бикубического уравнения для частоты волны как функции волнового вектора и параметров плазмы для частот в диапазоне $\sqrt{m_e/M_i} \ll f \ll 1/p$, где m_e, M_i – масса электрона и протона, соответственно, $f = \omega/\omega_p$ – частота волны ω , нормированная на электронную плазменную частоту ω_p , и $p = \omega_p/\omega_c$ – безразмерный параметр. Результаты исследования полученного дисперсионного уравнения будут проиллюстрированы графиками зависимости $k_{\parallel}(k_{\perp})$ при различных фиксированных значениях f и p , а также зависимостью $f(k_{\parallel}, k_{\perp})$ для ряда значений параметра p . Показано, что в области $f_1 < f < f_{res}$ существуют две распространяющиеся волновые моды, а в области $f < f_1$ – одна мода, где $f_1 = p/(1+p^2)$ – частота отсечки Z-моды, а $f_{res} = \sqrt{\cos^2 \theta / (1+p^2 \sin^2 \theta)}$ – резонансная частота свистовой моды, полученные в рамках выполненного анализа. К важным дисперсионным характеристикам свистовых волн относятся угол Жандрэна и угол Стори. Угол Жандрэна – это (отличный от нуля и $\pi/2$) угол между волновым вектором и внешним магнитным полем \mathbf{B}_0 , при котором групповая скорость волны коллинеарна \mathbf{B}_0 . Угол Стори – это угол максимального отклонения групповой скорости от направления внешнего магнитного поля в области низких частот. В работе получено аналитическое выражение для угла Жандрэна, а также найдена максимальная частота волны f_{max} , до которой существует угол Жандрэна:

$$f_{max}^2 = \frac{4 + 3p^2 - p\sqrt{8 + 9p^2}}{8(1 + p^2)}.$$

Показано, что когда существует угол Жандрэна, всегда существует угол Стори, и численно найдено его значение. Результаты исследования поведения угла Жандрэна и угла Стори для свистовых волн в разреженной магнитоактивной плазме проиллюстрированы на графиках для различных значений f и p .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-22-00135.

ОНЧ АВРОРАЛЬНЫЙ ХИСС И ИРРЕГУЛЯРНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ В ОБС. ЛОВОЗЕРО И КАННУСЛЕХТО.

Никитенко А.С.¹, Клейменова Н.Г.², Маннинен Ю.³, Федоренко Ю.В.¹

¹ПГИ, г. Апатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

²ИФЗ, г. Москва, Россия

³Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, Финляндия

Представлены результаты совместного анализа нескольких случаев когерентных всплесков ОНЧ аврорального хисса обс. Ловозеро и Каннуслахто, расположенных на близких геомагнитных широтах авроральной зоны и разнесенных по долготе на ~400 км. Эти данные сопоставлены с одновременной регистрацией геомагнитных пульсаций типа P_i2 и P_i1B. Обнаружены и исследованы случаи их одновременного появления. Анализ частотно-временной структуры регистрируемых ОНЧ всплесков показал, что их можно отнести к категории импульсных всплесков аврорального хисса.

Проведено сопоставление азимутальных углов прихода регистрируемых всплесков с временными вариациями пульсаций. Полученные данные были также сопоставлены с положением дуги полярных сияний, сопровождающей появление аврорального хисса, по данным наблюдений all-sky камер Полярного Геофизического Института. Результаты проведенного анализа позволили ассоциировать возникновение сияний и геомагнитных пульсаций с генерацией аврорального хисса.

СЕКЦИЯ «Токовые слои»

Понедельник, 06.02.2023 г., комната ЦО (Line 3)

№	Время	Ф.И.О. автора	Название доклада
	<i>10.30 – 11.00</i>		<i>Перерыв на кофе</i>
	<i>12.30 – 13.30</i>		<i>Пленарный час</i>
			Председатель: <u>Петрукович А.А.</u>
	12.30 – 12.45		<i>Открытие</i>
	12.45 - 13.30	Зеленый Л.М.	Токовые структуры в космической плазме. Путешествие внутрь "сингулярности"
	<i>13.30 – 14.30</i>		<i>Обед</i>
			Председатель: <u>Франк А.Г.</u>
1	14.30 – 14.45	Мингалев О.В., Сецко П.В., Мельник М.Н., Мингалев И.В., Малова Х.В., Мерзлый А.М., Зелёный Л.М.	Нарушение замагниченности электронов в ионном тонком токовом слое ближнего хвоста магнитосферы Земли
2	14.45 – 15.00	Царева О.О., Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Малова Х.В., Попов В.Ю., Зеленый Л.М.	Равновесная структура сверхтонких токовых слоев: влияние квазиadiaбатических электронов
3	15.00 – 15.15	Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зелёный Л.М.	Трансформация энергии в сверхтонких токовых слоях в хвосте земной магнитосферы по наблюдениям спутников MMS

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

4	15.15 – 15.30	Брыжахина Д.Д., Апатенков С.В.	Исследование токовых слоев в хвосте магнитосферы Земли в невозмущенных условиях с помощью спутников Cluster
5	15.30 – 15.45	Хабарова О.В., Büchner J., Jain N., Тревес Т.М., Малова Х.В., Кислов Р.А.	Электронные токовые слои в солнечном ветре
6	15.45 – 16.00	Губченко В.М.	Разлет плазмы от границ в кинетических режимах возбуждения индукционных токовых систем динамо Фарадея и Вейбеля
	16.00 – 16.30	Перерыв на кофе	
Председатель: <u>Григоренко Е.Е.</u>			
7	16.30 – 16.45	Франк А.Г., Артемьев А.В.	Ограничение длительности быстрых потоков в токовых слоях
8	16.45 – 17.00	Apatenkov S.V., He X., Mao A., Xiao Q., Yang X., Wang X.	Application of multipoint observation methods to investigate reconnection in laboratory plasma
9	17.00 – 17.15	Дивин А.В., Зайцев И.В., Семенов В.С., Парамоник И.П., Кубышкин И.В., Чжун Д.	Ускорение холодной компоненты плазмы на сепаратрисах магнитного пересоединения
	18.00 – 18.30	Постерная сессия	

Постерная сессия

1. Кирий Н.П. О нейтральной компоненте гелиевой плазмы токового слоя по результатам спектральных измерений

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН

НАРУШЕНИЕ ЗАМАГНИЧЕННОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОННОМ ТОНКОМ ТОКОВОМ СЛОЕ БЛИЖНЕГО ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

О.В. Мингалев¹, П.В. Сецко¹, М.Н. Мельник¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{2,3},

А.М. Мерзлый³, Л.М. Зелёный³

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

³ Институт космических исследований РАН, Москва

Данные спутников миссии MMS показывают, что в тонком токовом слое (ТТС) ближнего хвоста магнитосферы могут присутствовать и играть важную роль две популяции электронов с близкой температурой около 0.5-0.7 КэВ: фоновые электроны, которые дают вклад в полную концентрацию на краях слоя примерно 70-80%, а также встречные потоки электронов вдоль силовых линий магнитного поля из долей хвоста с гидродинамической скоростью сравнимой с их тепловой скоростью. Из-за поверхностных электростатических эффектов на аппаратах миссии MMS электронные датчики фактически обрезаны ниже энергии электронов примерно 0.3 КэВ, что делает невозможными более детальные измерения структуры функции распределения электронов, а также усиливает роль численного моделирования и ставит задачу корректного учета обеих популяций электронов в численных моделях ТТС ближнего хвоста магнитосферы.

В работе с целью проверить для электронов применимость приближения замагниченности в магнитном поле протонного ТТС (согласно оценкам, в таком поле электроны находятся на грани замагниченности) проводится расчет большого числа фазовых траекторий электронов с контролем значений магнитного момента вдоль траектории. Так же в нескольких точках токового слоя строятся графики функции распределения как фоновой популяции электронов (для которой на краях токового слоя функция распределения считается максвелловской с нулевой гидродинамической скоростью), так и функции распределения от их встречных продольных потоков (на краях токового слоя функция распределения потока считается максвелловской с направленной в сторону ТТС продольной гидродинамической скоростью). Расчеты показали, что при пересечении протонного ТТС магнитный момент тепловых электронов изменяется в разы, то есть он не является приближенным интегралом вдоль траектории. Это означает, что в центральной области протонного ТТС тепловые электроны размагничиваются. При этом в центре ТТС функция распределения фоновых электронов близка к изотропной, в то время как функция распределения электронов от встречных продольных потоков демонстрирует заметное нарушение гиротропности.

Из проведенных расчетов можно сделать вывод, что для корректного моделирования в ТТС ближнего хвоста магнитосферы электростатических эффектов и вклада электронов необходимо численно решать для них уравнение Власова с учетом обеих популяций электронов.

РАВНОВЕСНАЯ СТРУКТУРА СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ: ВЛИЯНИЕ КВАЗИАДИАБАТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Царева О.О., Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Малова Х.В., Попов В.Ю., Зелёный Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, olga8.92@mail.ru

Недавние наблюдения ММС [1] подтвердили существование квазистационарных сверхтонких токовых слоев (СТТС) электронного масштаба с половинной толщиной (δ_e) в несколько электронных гирорадиусов (ρ_{Le}). СТТС содержат электронную популяцию, состоящую из замагниченных и размагниченных частиц. Для изучения роли размагниченных электронов была разработана самосогласованная гибридная модель СТТС, в которой динамика части электронной популяции описывается в квазиadiaбатическом приближении, а динамика другой части — в приближении ведущего центра. В представленной модели мы ввели весовой коэффициент плотности размагниченной электронной плазмы χ в зависимости от нормальной компоненты магнитного поля B_n/B_0 и сравнили характеристические профили двух СТТС, отличающихся наличием ($\chi \neq 0$) и отсутствием ($\chi = 0$) размагниченных электронов. Показано, что наличие размагниченных электронов делает профиль плотности тока СТТС более интенсивным и узким. Толщина и интенсивность СТТС зависят от коэффициента анизотропии замагниченных электронов (Λ_{Me}) и скорости дрейфа размагниченных электронов (u_{De}). Максимальная плотность тока непрерывно увеличивается с ростом популяции размагниченных электронов и регулируется параметром $\epsilon_{De} = v_{Te}/u_{De}$. Таким образом, интенсивные токовые слои могут формироваться даже при отсутствии сильной электронной анизотропии, что подтверждается наблюдениями ММС.

[1] Leonenko, M. V., Grigorenko, E. E., Zelenyi et al.// JGR 2021, V. 126 (11), P. e2021JA029641

ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГИИ В СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ В ХВОСТЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СПУТНИКОВ MMS

Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зелёный Л.М.

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

В работе выполнен анализ интервала, содержащего 95 пересечений сверхтонкого токового слоя (СТС) спутниками миссии MMS в хвосте земной магнитосферы с обеих сторон от магнитной X-линии. Исследуемые СТС имели толщину от одного до нескольких гирорадиусов тепловых электронов (ρ_e). Большинство СТС характеризовались малым параметром адиабатичности $k_e < 1$, что свидетельствует о размагничности электронной популяции.

Для количественного анализа преобразования энергии в СТС используется параметр $(j \cdot E)$, характеризующий объемную мощность трансформации энергии. Определены значения параметра $(j \cdot E)$ в центре СТС, а также на краях электронного токового слоя. Показано, что вероятность наблюдения данного значения $(j \cdot E)$ распределена квази-нормально с шириной ~ 0.2 нВт/м³. В отдельных событиях наблюдаются значения ~ 0.5 нВт/м³, что свидетельствует об интенсивной трансформации энергии в СТС. Так, например, вблизи электронной диффузионной области пересоединения наблюдаются значения порядка (1-2) нВт/м³. Полученные результаты свидетельствуют об интенсивном энерговыделении и возможной неустойчивости некоторых СТС из нашей базы данных вне электронной диффузионной области.

Также, мы показали, что наблюдение разного знака параметра $(j \cdot E)$ равновероятно, что свидетельствует о равновероятности протекания процессов трансформации энергии электромагнитного поля в кинетическую энергию электронов и наоборот. В большинстве СТС из нашей базы данных величина параметра незначительна: $|j \cdot E| < 0.1$ нВт/м³, что, скорее всего, свидетельствует о квази-стационарности большинства СТС.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В НЕВОЗМУЩЕННЫХ УСЛОВИЯХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВ CLUSTER

Брыжахина Д.Д., Апатенков С.В.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, st072438@student.spbu.ru

С помощью спутников Cluster мы исследуем токовый слой хвоста магнитосферы Земли в спокойных условиях. В отличие от предыдущих исследований, где пересечения токового слоя вызваны в основном движением самого слоя, в частности флэппинг колебаниями, мы рассматриваем квази-стационарные события. Критерии отбора событий: (1) АЕ индекс менее 50нТл и (2) отсутствие быстрых потоков плазмы, абсолютное значение массовой скорости ионов (V_x) менее 100 км/с. Пересечения слоя занимают интервалы длительностью 1-4 часа, и сканирование происходит в основном из-за собственного движения спутников Cluster. Нам удалось обнаружить токовые слои толщиной 5-10 тыс. км. (более 10 ионных гирорадиусов). Существенные различия формы профилей концентрации и токов позволяют назвать исследуемые токовые слои вложенными. Диамагнитный ток, оцененный из градиентов давления, дает существенный вклад в общую плотность тока.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Хабарова О.В.¹, Büchner J.², Jain N.², Тревес Т.М.¹, Малова Х.В.^{3,4}, Кислов Р.А.¹

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

² Center for Astronomy and Astrophysics, Technical University of Berlin, D-10623 Berlin, Germany

³ НИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

⁴ ИКИ РАН, г. Москва, Россия

В работе показано, что в солнечном ветре есть возможность наблюдать токовые слои, в которых электрический ток переносится преимущественно электронами (Khabarova et al. 2022). Ранее предполагалось, что электронные токовые слои невозможно найти в солнечном ветре, поскольку их толщина должна быть порядка нескольких электронных гирорадиусов. Это намного меньше размера структур, которые способны наблюдать космические аппараты в солнечном ветре с типичным разрешением по магнитному полю 1-3с. Было проведено численное моделирование образования тонких токовых слоев в турбулентной плазме. Носителями тока в таких слоях были электроны. Результаты моделирования сравнивались с наблюдениями магнитосферной миссии MMS, периодически выходящей в солнечный ветер. Показано, что эффекты в плазме, ассоциирующиеся с наличием сильных электронных токовых слоев, видны в скоростях электронов и протонов на масштабах нескольких секунд. В частности, в широкой окрестности электронных токовых слоев резко увеличивается отношение скоростей электронов к ионным скоростям. Это открывает новые возможности исследования тонких токовых структур в солнечном ветре.

Khabarova O., J. Buchner, N. Jain, T. Sagitov, H. Malova, R. Kislov (2022) Electron-to-ion Bulk Speed Ratio as a Parameter Reflecting the Occurrence of Strong Electron-dominated Current Sheets in the Solar Wind, *The Astrophysical Journal*, 933, 1, 97, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac71ab>

РАЗЛЕТ ПЛАЗМЫ ОТ ГРАНИЦ В КИНЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ТОКОВЫХ СИСТЕМ ДИНАМО ФАРАДЕЯ И ВЕЙБЕЛЯ

В.М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия (ua3thw@appl.sci-nnov.ru)

Рассматривается вынужденное возбуждение - «динамо» крупномасштабных слабозамагниченных индукционных токовых структур (ТС) при расширении, разлетах или потоках вблизи заданной проницаемой частицами или отражающей их границы – поверхности- «пятна-апертуры». В слабозамагниченном режиме электромагнитное поле ограничено пакетом только гармоник индукционной моды плазмы («энтропийная волна») с фазированным набором волновых чисел и амплитуд. Граница это сфера, цилиндр, плоскость, находящиеся в режимах «гипер» высоких значений электронного плазменного бета горячей бесстолкновительной плазмы в «макро» - космическом или «микро» -лазерном представлениях задачи. На границе задано внешнее магнитное (ВМ) поле «источником» намагниченности, связанное со сторонним возбуждением, возникшим на апертуре. У границы плазма характеризуется двумя независимыми интегральными параметрами, характеризующими формы функции распределения электронов (ФРЧ): асимметрией и анизотропией, формируемыми спецификой разлетов. Введение асимметрии (разлета) приводит к появлению бесстолкновительной проводимости, формируемой на ускорении резонансных электронов, что приводит к кинетическому эффекту возбуждения разлетом резистивных ТС, известному как «динамо Фарадея» в электротехнике. Введение анизотропии приводит к появлению неустойчивости индукционной моды, что есть кинетический эффект возбуждения ТС намагничивания -«динамо Вейбеля» - не рассматриваемого в электротехнике. Соотношение этих динамо определяет параметр электромагнитной добротности разлета. Оба эффекта динамо аддитивно представлены в выражении диэлектрической проницаемости через два скиновых масштаба в плазме разлета, далее позволяет ввести гибридные масштабы для описания структуры ТС.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий № 0030-2021-0002 и № 0030-2021-0015, поддержана грантом RSF # 23-22-00014.

1. V. M. Gubchenko, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020. Vol. 60, No. 7, pp 896-903, DOI: 10.1134/S0016793220070129DOI

ОГРАНИЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ БЫСТРЫХ ПОТОКОВ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ

***Франк А.Г., **Артемов А.В.**

**ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru*

***EPSS/UCLA, CA, USA, aartemyev@igpp.ucla.edu*

Пересоединение магнитных силовых линий в хвосте магнитосферы характеризуется формированием быстрых плазменных потоков, распространяющихся к Земле и в дальний хвост со скоростями в несколько сотен км/с. Спутниковые наблюдения показывают, что потоки плазмы состоят из отдельных плазменных струй с масштабами в несколько тысяч км и длительностью $10 \div 5$ сек [1]. При распространении поперёк сильного дипольного поля в ближней магнитосфере плазменные струи тормозятся и разрушаются [2]. Данные процессы, по-видимому, связаны с формированием системы обратных токов на ведущем фронте плазменных струй [3], но возможности детального анализа динамики струй по спутниковым данным существенно ограничены. Как следствие, в этом докладе мы хотели бы обсудить возможность сопоставления данных спутниковых наблюдений и лабораторного эксперимента по изучению процесса торможения плазменных струй, распространяющихся в токовом слое.

На основе экспериментальных данных, полученных с помощью установки ТС-3D (ИОФ РАН), мы анализируем процессы ускорения и торможения сверхтепловых плазменных потоков, которые двигаются вдоль поверхности токового слоя (в x-направлении) из центральной области слоя к его обоим боковым краям. Появление ускоренных потоков плазмы обусловлено силами Ампера, которые направлены от середины слоя к боковым краям, что и определяет направление движения потоков. Особое внимание привлекает тот факт, что ускоренные потоки плазмы ограничены как во времени, так и по длине. В зависимости от условий эксперимента быстрые потоки плазмы наблюдались в течение 1.5 - 3.5 мкс, что меньше времени существования токового слоя ≈ 5 мкс, а длина плазменных струй не превышала $\approx 5 - 6$ см при радиусе вакуумной камеры 9 см.

Ограничение длительности потоков связано с возбуждением токов обратного направления у боковых концов слоя, как следует из анализа эволюции магнитных полей, токов, сил Ампера и энергии направленного движения плазмы [4,5]. Существенно, что обратные токи возникают в результате внедрения ускоренных в токовом слое быстрых плазменных потоков в сильное поперечное магнитное поле на краях слоя [6].

Возбуждение обратных токов связано с появлением сил Ампера, которые направлены вдоль поверхности токового слоя, от его концов к центральной области, и должны вызывать торможение ранее ускоренных потоков плазмы. Силы торможения у концов слоя соизмеримы по абсолютной величине с силами ускорения в центральной (основной) части слоя, а работа, производимая силами торможения, приводит к значительному уменьшению энергии плазменных потоков.

Таким образом, ограничение времени существования и длины потоков плазмы, которые ускоряются вдоль поверхности токовых слоев, получает естественное объяснение при учете возбуждения токов обратного направления и появления связанных с ними сил торможения.

1. Angelopoulos V., et. al. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 4027.
2. Dubyagin S., et. al. // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L08102.
3. Lu S., et al. // J. Geophys. Res. 2016. V. 121. P. 4269.
4. Frank, A.; Kyrie, N.; Satunin, S.N.; Savinov, S. // Universe 2021, V. 7(11), P. 400(1-13).
5. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Физика плазмы 2022. Т. 48 (1). С. 12-17.
6. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. С. 667.

APPLICATION OF MULTIPOINT OBSERVATION METHODS TO INVESTIGATE RECONNECTION IN LABORATORY PLASMA

Apatenkov S.V., He X., Mao A., Xiao Q., Yang X., Wang X.

HIT, Harbin, China, apatenkov@mail.ru

A novel laboratory plasma experiment led by Harbin Institute of Technology is planned to have the first runs in 2023. The first phase of SPERF (Space Plasma Environment Research Facility) experiment is to study magnetopause-like current sheet and magnetic reconnection. Before the run of SPERF we use Hall MHD simulation to reconstruct real facility geometry and test different plasma regimes. Based on Hall MHD results we plan the location of magnetic sensors to study the current sheet and reconnection Hall currents. We also discuss application of multipoint observation techniques to investigate plasma structures in SPERF.

УСКОРЕНИЕ ХОЛОДНОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ НА СЕПАРАТРИСАХ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ

Дивин А.В., Зайцев И. В., Семенов В. С., Парамоник И. П., Кубышкин И. В., Чжун Д.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, a.divin@spbu.ru

Кинетика магнитного пересоединения в значительной степени определяется составом и температурой плазмы в окрестности нейтральной линии. Особенностью магнитного пересоединения на ночной стороне в хвосте магнитосферы Земли является наличие в окрестности диффузионной области ионов ионосферного происхождения. Такая популяция низкоэнергетических (холодных) частиц часто присутствует в магнитном хвосте Земли наряду с популяцией тепловых (горячих) ионов токового слоя. Малый гирорадиус холодных ионов вносит мелкомасштабные эффекты в магнитное пересоединение [1].

Наблюдения, полученные спутниками Cluster и MMS, а также численное моделирование [2] показывают, что наличие холодной ионной компоненты способно изменять скорость магнитного пересоединения, размер диффузионной области и общее энерговыделение в ходе процесса [1]. В частности, локализованное электрическое поле Холла на сепаратрисах пересоединения приводит к размагничиванию и ускоряет втекающие холодные ионы в направлении, перпендикулярном локальному магнитному полю. В области вытекания ионы дрейфуют под действием электрического поля пересоединения до входа в область центрального плазменного слоя. Наложение траекторий ионов создает в точках разворота холодных пучков функцию распределения, напоминающую частичное кольцевое распределение ("полумесяц").

Было проведено численное моделирование магнитного пересоединения многопроцессорным кодом iPIC3D, в котором реализован полунейный метод типа "частица-в-ячейке (Particle-in-cell) [3]. Проводились расчеты с различными соотношениями плотностей холодных и горячих ионов. По результатам моделирования предлагается простая аналитическая модель, указывающая на периодическое формирование частично кольцевой функции распределения холодных ионов в области вытекания. Результат моделирования с пренебрежимо малой плотностью холодных ионов близок к аналитическому решению. В моделях с увеличенной плотностью холодной компоненты возникают ион-ионная и нижнегибридная неустойчивые моды, которые приводят к диффузии частично кольцевой функции распределения и дополнительному нагреву плазмы.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта 23-47-00084 российского научного фонда.

1. Divin, A., Y. V. Khotyaintsev, A. Vaivads, M. André, S. Toledo-Redondo, S. Markidis, and G. Lapenta // *J. Geophys. Res.* 2016, 121
2. I. Zaitsev, A. Divin, V. Semenov, I. Kubyshkin, D. Korovinskiy, J. Deca, Yu. Khotyaintsev, and S. Markidis // *Phys. Plasmas* 2021, 28, 032104
3. Markidis, S., G. Lapenta, and Rizwan-uddin // *Math. Comput. Simul.* 2010, 80(7), 1509–1519

О НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЕ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ТОКОВОГО СЛОЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Кирий Н.П.

Институт общей физики им.А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, natalya.kyrie@yandex.ru

Проведены исследования динамики нейтральной компоненты плазмы в токовых слоях, сформированных в двумерных (2D) и трехмерных (3D) магнитных конфигурациях при разряде в гелии. Измерены уширения спектральной линии He I 587.6 нм в разные моменты времени. Определена эволюция температуры и энергии направленного движения атомов гелия. Обнаружено, что в отдельные моменты времени энергия направленного движения атомов гелия более чем на порядок превышает тепловую энергию.

Измерения проводились с помощью экспериментальной установки ТС-3D. Токовые слои создавались в неоднородном магнитном поле с особой линией X типа при разряде в гелии. Градиент магнитного поля составлял $h = 0.5$ кГс/см, начальное давление газа – $p = 320$ мТорр, максимальная величина электрического тока в слое – $J_z = 45$ кА. В 3D магнитных конфигурациях продольная компонента магнитного поля вдоль X-линии равнялась $B_z = 2.9$ кГс [1].

В экспериментах использовалась двухканальная оптическая схема. Излучение плазмы собиралось как из центральной квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока в слое, так и вдоль ширины (наибольшего из поперечных размеров) слоя. Профили спектральной линии He I 587.6 нм регистрировались в одном импульсе работы экспериментальной установки с помощью цифровой камеры Nanogate-1UF, которая представляет собой электронно-оптический преобразователь с усилителем яркости на основе микроканальной пластины. В качестве детектора в камере используется CCD матрица. Длительность строб-импульса камеры составляла $\Delta t_{\text{gate}} = 0.8$ мкс.

Профили линии He I 587.6 нм в условиях данных экспериментов уширялись как за счет Доплера, так и за счет Штарк-эффекта. Штарковская составляющая уширения рассчитывалась по ранее измеренной плотности плазмы [2]. По доплеровскому уширению линии He I 587.6 нм определялась температура и энергия направленного движения атомов гелия.

Установлено, что при формировании токового слоя в 2D магнитной конфигурации энергия направленного движения атомов гелия быстро увеличивается до величины $W_x = 480 \pm 120$ эВ, что в ~ 20 раз больше температуры атомов $T_a = 20 \pm 2$ эВ в то же время. Появление сверхтепловых атомов гелия в плазме токового слоя коррелирует с генерацией потоков ускоренных ионов гелия [3,4] и связано, по всей видимости, с резонансной перезарядкой ионов гелия [5].

При формировании токового слоя в 3D магнитной конфигурации направленное движение атомов гелия не обнаружено, при этом направленное движение ионов гелия также не зарегистрировано [3,4].

1. Франк А.Г., Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Островская Г.В. // ЭНТП. М.: Янус. 2008. Серия Б. Т. III-2. С. 335.
2. Кирий Н.П., Франк А.Г., Мингалеев А.Р., Мавлюдов Т.Б., Шпаков К.В., Байдин И.С. // *Физика плазмы* 2022. Т. 48. С. 1035.
3. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. // *Письма в ЖЭТФ* 2012. Т. 95. С. 17.
4. Кирий Н.П., Франк А.Г. // *Физика плазмы* 2012. Т. 38. С. 1042.
5. Майоров С.А. // *Краткие сообщения по физике ФИАН* 2007. Т. 34. С. 26.

06-10 февраля 2023 г. ИКИ РАН