

Проблемы космофизики

30 июня 2025 - 4 июля 2025

Книга тезисов

Москва 2025

Оглавление

Солнце и солнечная активность	1
Алексеева Л.М. Природа и поведение мелкомасштабных структур в верхней хромосфере Солнца	1
Вернова Е.С., Костюченко И.Г. Вклад больших активных областей в формирование квази-двуухлетних вариаций площади солнечных пятен	2
Гетлинг А.В., Косовичев А.Г. Вариации масштабов течений в конвективной зоне Солнца с уровнем солнечной активности	3
Грушин В.А. Струминский А.Б. Монте-Карло моделирование стохастического ускорения протонов в солнечных вспышках	4
Дмитриев В.А., Куприянова Е.Г. Квазипериодические быстрые бегущие волновые пакеты. II. Методика детектирования	5
Думин Ю.В. Серпантинобразные особенности магнитного поля (switchbacks) во внутренней короне Солнца и их интерпретация в рамках топологической модели	6
Зобова И.Ю. Модель глобальных характеристик солнечной цикличности: прогнозирование	7
Кислов Р.А. Сравнение дипольного магнитного момента Солнца и магнитного момента гелиосферного токового слоя	8
Коновалихин А.М., Гетлинг А.В. О структуре течений на различных глубинах в конвективной зоне Солнца	9
Кузнецов В.Д. Космические и внеатмосферные исследования Солнца	10
Кузнецова Т. В. Связь солнечных циклов с 15 по 22 с мощным 198-летним колебанием в солнечном ветре, орбитальным движением Юпитера и Квебекским событием	11
Куприянова Е.Г. и др. Квазипериодические быстрые бегущие волновые пакеты. I. Диагностический потенциал	12
Охлопков В.П. Гравитационное влияние планет на солнечную активность	12
Охлопков В.П. 11-летние линейные конфигурации планет Венеры, Земли, Юпитера и солнечная активность	13

Подгорный А.И., Подгорный И.М. Проблемы поиска положений солнечных вспышек по конфигурации магнитного поля, полученной МГД моделированием над активной областью	14
Садыков А.М., Красоткин С.А. Радиальные движения на начальном этапе развития солнечных активных областей	15
Струминский А.Б и др. Темп ускорения в некоторых протонных событиях 24-го и 25-го циклов солнечной активности	16
Тимашев С.Ф., Борог В.В. Вращение системы Земля-атмосфера вокруг своей оси как диффузионный стационарный процесс	17
Тимашев С.Ф., Борог В.В. Эффект Энни Маундер: феномен влияния Земли на солнечную активность	18
Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы .	19
Белов С.М., Шлык Н.С., Абунина М.А. Подход к параметризации предвестников Форбуш-эффектов	19
Бенгин В.В. и др. Солнечные протонные события, зарегистрированные прибором Люлин-МО на космическом аппарате «ТГО» на орбите вокруг Марса	20
Васильев Р.В и др. Оптические инструменты Национального гелиофеофизического комплекса РАН	21
Вахрушева А.А. и др. Моделирование взаимодействующих КВМ в гелиосфере с использованием Drag-Based Model на примере геоэффективного события 22.01.2012	22
Власова Н.А. и др. О влиянии крупномасштабных гелиосферных структур на временные профили потоков солнечных энергичных частиц 09.02.2024, 14.09.2024 и 09.10.2024	23
Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. Мюонные телескопы в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) для измерения слабых вариаций космических лучей из области полюса мира	24
Германенко А.В., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. Крупные форбуш-эффекты в 2024 г. на полярных нейтронных мониторах и мюонных телескопах в Апатитах и Баренцбурге	25
Григорьева И.Ю., Ожередов В.А., Струминский А.Б. Модуляция галактических космических лучей малых энергий по данным SOHO/EPHIN с 1996 года по настоящее время	26
Дмитриев А.В. и др. Основные причины возрастаний потоков солнечных протонов на фазе роста и в максимуме 25-го цикла солнечной активности	27
Евстафьева Д.Д. и др. Оценка влияния КВМ на вариации протонов ПКЛ	27
Зельдович М.А., Логачев Ю.И. Динамика потоков плазмы из корональных дыр на Солнце	28
Измоденов В.В. Граница гелиосферы – теория и эксперимент	28

Капорцева К.Б. и др. Варианты взаимодействия корональных выбросов массы в гео- лиосфере и статистика для 24 цикла солнечной активности	29
Козелов Б.В. Нейросетевое определение параметров солнечного ветра по наблюдениям Солнца с Земли	30
Крайнев М. Б., Luo Xi, Калинин М.С. О долготном распределении интенсивности ГКЛ, связанных с коротирующими областями взаимодействия: МГД- и СДУ- модели	30
Маурчев Е.А., Янке В.Г., Диденко К.А. Новая система сбора данных для нейтронного монитора	31
Мягкова И.Н. и др. Возрастания потоков электронов солнечных космических лучей в 25 цикле солнечной активности по данным экспериментов на спутниках МГУ формата кубсат	32
Ожередов В.А., Струминский А.Б. Статистическая модель ускорения КВМ для некоторых протонных событий 24-го и 25-го циклов солнечной активности	33
Петухов С.И., Петухова А.С., Петухов И.С. Диффузационная модель распространения солнечных космических лучей в межпланетном пространстве	34
Стародубцев С.А. Модуляция галактических космических лучей быстрыми магнитозвуковыми волнами в области предфронта межпланетных ударных волн	35
Челидзе К.С., Петрухин А.А. Использование морфологических признаков сигналов GLE в нейтронных мониторах для их классификации	36
Шестаков Д.А., Измоденов В.В. Модуляция галактических космических лучей в гео- лиосфере	37
Ширяев А.О., Капорцева К.Б., Шугай Ю.С. Геоэффективное взаимодействие КВМ и ВСП 28 мая 2011 года	38
Шлык Н.С. и др. Почему не каждый Форбуш-эффект связан с геомагнитной бурей?	39
Якунина Г.В. Взаимодействие корональных выбросов массы	40
Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи	41
Азра-Горская К.Ж. Универсальное определение границы между внутренним и внешним радиационными поясами, положения максимума потоков внешнего пояса и внутренней границы кольцевого тока	41
Азра-Горская К.Ж., Калегаев В.В., Власова Н.А. Динамика энергетических спектров в максимумах потоков протонов кольцевого тока и электронов внешнего радиационного пояса во время двух магнитных бурь 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015	42
Алексеев И.И., Невский Д.В., Лаврухин А.С. Полярные сияния планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна по данным КА Voyager 2 и фотографиям космических телескопов Хаббл (УФ диапазон) и Джеймс Вебб (ИК излучение).	43
Антонова Е.Е. и др. Изменения подходов к описанию магнитосферной динамики (краткий обзор)	44

Белаховский В.Б., Пилипенко В.А. The role of poloidal Pc4 pulsations in acceleration of electrons up to relativistic energies at the Earth's magnetosphere	45
Беленькая Е.С. Экзопланеты	46
Буслаева Э.Е., Беленькая Е.С. Влияние металличности родительской звезды на образование планет	47
Груздов Д.С., Калегаев В.В. Расчет плотности электронов ВРПЗ в фазовом пространстве на основе параболоидной модели магнитосферы	48
Груздов Д.С., Калегаев В.В., Власова Н.А. Динамика потоков электронов внешнего радиационного пояса во время продолжительной суббуровой активности по данным спутников Van Allen Probes и Метеор-М2	49
Губайдулин Н.Т. и др. Моделирование параметров плазмы в магнитослое Земли по данным многолетних наборов спутниковых измерений	50
Демехов А.Г., Яхнина Т.А., Попова Т.А. Соотношение между интенсивностью волн в магнитосфере и потоками высывающихся энергичных заряженных частиц .	51
Зыкина А.А. и др. Динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в период низкой геомагнитной активности 7-24 января 2018 г.	52
Иванова А.Р. и др. Процессы ускорения и высapsulation энергичных электронов ВРПЗ во время геомагнитных возмущений разных типов	53
Иевенко И.Б. Протонные и электронные сияния во время магнитной бури 1 января 2025 г. Наземные и спутниковые наблюдения	54
Калегаев В.В. и др. Динамика внешнего радиационного пояса под воздействием потоков солнечного ветра разной природы	55
Климов П.А. и др. Пульсирующие полярные сияния и оптические микровсплески во время геомагнитной бури на субавроральных широтах	56
Коурова Е.А., Дмитриев А.В. Наблюдение геоэффективных сверхэнергичных плазменных струй магнитослоя в 2009 г.	57
Кротов А.С., Беленькая Е.С. Магнитосфера HD 209458 b в параболоидной и МГД моделях	58
Лаврухин А.С. и др. Асимметрии импульса внезапного начала магнитной бури утром-вечер и север-юг в зависимости от параметров действующей межпланетной ударной волны	59
Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зелёный Л.М. Трехпиковый сверхтонкий токовый слой наблюдаемый в хвосте земной магнитосферы	60
Любич А.А. и др. Геомагнитно-индукционные токи (ГИТ) во время сильной магнитной бури в октябре 2024	61
Малова Х.В. и др. Влияние нормальной магнитной компоненты на формирование токового слоя геомагнитного хвоста	62
Малыгин Г.П., Беленькая Е.С. Сравнение коричневых карликов с красными карли-	

ками и газовыми гигантами	63
Манина А.С. и др. Динамика высоколатитной области магнитосферы Земли в период магнитной бури 27.02.2023 г. по данным полярных спутников	64
Миронова И.А. и др. Роль различных процессов вызывающих высыпания энергичных электронов для отклика в атмосфере и ионосфере Земли	65
Морозов Г.А., Беленькая Е.С. Зависимости характеристик экзопланет от спектрального класса родительской звезды	66
Мягкова И.Н., Калегаев В.В., Рубинштейн И.А. Пространственно-временная динамика захваченных и высыпающихся электронов внешнего РПЗ по данным ИСЗ МЕТЕОР-М2 во время магнитных бурь разной природы	67
Невский Д.В., Алексеев И.И., Лаврухин А.С. Усиление магнитного поля в переходном слое магнитосфер планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна по данным КА Voyager 2	68
Овчинников И.Л., Найко Д.Ю., Антонова Е.Е. Пространственное распределение коэффициента вихревой диффузии в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным MMS	69
Оганов С.А., Калегаев В.В., Власова Н.А. О связи вариаций потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с секторной структурой межпланетного магнитного поля	70
Пилипенко В.А., Белауховский В.Б. Ускорение релятивистских электронов УНЧ пульсациями: аргументы за и против	71
Позднякова Д.Д., Пилипенко В.А. Механизмы формирования Pi2 пульсаций	72
Попова Т.А., Яхнина Т.А., Демехов А.Г. Анализ свойств высыпаний релятивистских электронов в зависимости от солнечной активности	73
Савельева Н.В., Пилипенко В.А. Границы аврорального овала на территории РФ во время экстремальных магнитных бурь	74
Сафаргалеев В.В. Сценарий модуляции неструктурированных пульсаций герцового диапазона вариациями ММП	75
Стуков Д.А., Ягова Н.В. Параметры вне и внутри магнитосферы во время резких усилений потоков электронов с энергиями 40-500 кэВ на геостационарной орбите	76
Суворова А.В. Ионизационное воздействие квазизахваченных 30-кэВ электронов на низколатитную ионосферную F область : магнитная буря 1 июня 2013	77
Щелканов К.Д. и др. Высота возникновения авроральных оптических микровсплесков по спектрометрическому анализу их излучения	78
Юшков Б.Ю. Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей	79
Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г. Пространственное распределение и когерентность пульсаций Рс1 в магнитосфере, верхней ионосфере и на Земле	80
Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Попова Т.А. Потери частиц из внешнего радиационного	

пояса, связанные с высыпанием релятивистских электронов	81
Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли	82
Богомолов А.В. и др. Наблюдение транзиентов астрофизического и солнечного происхождения на спутниках формата кубсат группировки Московского университета «Созвездие-270»	82
Власенко Д.М. Поиск астрофизических источников гравитационных волн, регистрируемых детекторами LIGO/Virgo, на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ	84
Жирков К.К., Липунов В.М., Часовников А.Р. Поиск источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий среди блазаров	85
Июдин А.Ф., Никулина А.С., Стародубцева У.М. Метагалактические и Галактические транзиенты наблюдаемые в гамма-излучении высоких и сверхвысоких энергий	86
Кучеренко И.А. и др. Гамма-спектрометр ТГС для исследования атмосферных и космических гамма-всплесков на борту малого спутника Скорпион	87
Сигаева К.Ф. и др. Оценка высоты пульсирующих полярных сияний по данным эксперимента PAIPS	88
Тарасенков А.Н. Исследование карликовых новых звезд, открытых сетью роботов-телескопов МАСТЕР, по данным TESS	89
Тополев В.В. и др. Прекурсор и килоновая при слиянии нейтронной звезды и черной дыры на примере GW S250206dm	90
Часовников А.Р., Власенко Д.М., Жирков К.К. Ограничения на оптическое излучение быстрых радиовсплесков	91
Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе	92
Белаховский В.Б. и др. The statistics of the extreme GICs and dB/dt during observations on the North-West of Russia and in Scandinavia	92
Владимиров Р.Д. и др. Разработка системы «СИВИЛЛА»: поддержка разработки методик прогнозирования космической погоды с помощью машинного обучения	93
Дэспирак И.В. и др. Геомагнитно-индукционные токи (ГИТ) во время суперсуббурь	95
Гаджиев И.М. и др. Использование пятиминутных данных для характеристик межпланетного магнитного поля и солнечного ветра с целью улучшения качества прогнозирования индекса Кр	96
Доленко С.А. и др. Зависимость качества прогнозирования геомагнитных индексов методами машинного обучения от фазы солнечного цикла	97
Зверев А.С. и др. Учет температурного эффекта атмосферы в данных регистрации подземных мюонных телескопов Якутского спектрографа космических лучей по	

данным наземных измерений температуры	98
Зворыгина Е.С., Ягова Н.В. Взаимосвязь амплитуды УНЧ волн (пульсаций Pc5/Pi3) с потоком электронов с энергиями порядка сотен кэВ в зависимости от питч-угла.	99
Калегаев В.В. Памяти М.И. Панасюка: Отдел космических наук в 2023-2025 годы	100
Майбуров С.Н. Исследование корреляций солнечной активности и параметров распадов ядер Fe-55 и Co-60	101
Маурчев Е.А., Диденко К.А. Моделирование прохождения солнечных протонов через атмосферу Земли	102
Муртазов А.К., Трегулов В.В. Применение лазерной абляции для управления отражательной способностью поверхности алюминия	102
Рагульская М.В. Космофизические и аэрономические аспекты вирусных пандемий	103
Рославцев С.В. и др. О прогнозе мощности солнечного протонного события в реальном времени с использованием нейросетевых методов	104
Семенов М.В. и др. Анализ эффективности моделей типа трансформер для прогнозирования состояния магнитосферы Земли	105
Сецко П.В. и др. Динамика ГИТ во время супербури 10-12 мая 2024 года: суббури, пульсации, скачки давления солнечного ветра	106
Сурков В.В. Влияние солнечных вспышек на шумановские резонансы и распространение СДВ волн	107
Трошичев О.А. РС индекс как стандарт оценки мощности магнитных суббурь	108
Шаракин С.А., Сараев Р.Е. Эльфолокация: новый подход к изучению грозовой атмосферы	109
Ягова Н.В. Геомагнитные пульсации Pc5-6/Pi3 во внешней магнитосфере и ограничения возможности прогноза потенциально опасных возмущений космической погоды	110
Яшин И.И. Состояние и перспективы развития мюонографии	111
Ященко А.К., Сорокин В.М. Триггерный механизм генерации геомагнитных пульсаций ионизирующими излучением солнечных вспышек	112
Медико-биологические проблемы космических полетов .	113
Иванова О.А. и др. Дозиметр «Тритель-Б» для измерения ЛПЭ-спектров ионизирующего космического излучения внутри космического аппарата Бион-М» № 2 .	113
Кашулин П.А., Калачёва Н.В. Синхронные реакции живых и неживых систем на солнечную активность	114
Рябева Е.В. и др. Дозиметрия нейтронов на борту высокоширотной орбитальной станции: проблемы и аппаратный комплекс для измерений	115
Шуршаков В.А. и др. Использование дополнительной защиты для снижения дозовых нагрузок в каюте Служебного модуля МКС	116

Научно-образовательные космические проекты 117

Ефимкин А.Н. и др. Создание прибора МАДИЗ	117
Кудрявцев В.Д. и др. СОНЭТ – система оптических наблюдений энергичных транзисторов для кубсатов МГУ	118
Радченко В.В. В космос по ступеням «Воздушно-инженерной школы»	119
Садыков А.М. и др. Моделирование отклика детекторной системы КОДИЗ-2 на потоки электронов (50 кэВ - 5 МэВ) и протонов (2 - 200 МэВ)	121
Сазонова А.В. и др. Регистрация потоков заряженных частиц в околоземном пространстве на малом космическом аппарате «Монитор-1»	122
Свертилов С.И. Памяти М.И. Панасюка: Космическая программа Московского университета. Современный статус	123

Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года 124

Абунина М.А. и др. Об особенностях большого Форбуш-эффекта во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 г.	124
Балабин Ю.В. и др. Событие в солнечных космических лучах GLE74 (11.05.24)	125
Громова Л.И. и др. Некоторые особенности развития восточного электроджета во время супербури 10-11 мая 2024	126
Грунская Л.В. и др. Явления в D-компоненте геомагнитного поля в мае 2024 года по данным физического экспериментального полигона ВлГУ	127
Дмитриев А.В., Суворова А.В. Пересечения дневной магнитопаузы во время бури 10 мая 2024	128
Клейменова Н.Г. и др. Сверхинтенсивные суббури в магнитной буре 10-11 мая 2024	129
Козлов В.И. Прогноз экстремальных событий в мае 2024 г. в реальном времени. По данным мировой сети полярных станций космических лучей	129
Лаврухин А.С. и др. Анализ реакции магнитосферы Земли на последовательные МКВМ во время магнитной бури 10-12 мая 2024 г.	131
Свертилов С.И. Участие приборного комплекса ГГАК в наблюдениях магнитосферы Земли во время крупной магнитной бури в мае 2024	132
Суворова А.В., Дмитриев А.В. Возрастания потоков энергичных электронов в запрещенной области и дневные супер-суббури в мае 2024 и январе 2005	133
Шейнер О.А., Выборнов Ф.И. Возмущения в ионосфере в мае 2024 года: динамика и причины их вызывающие	134
Шейнер О.А. Фридман В.М. Особенности микроволновых предвестников солнечных корональных выбросов масс, зарегистрированных в мае 2024 года	134

Солнце и солнечная активность

Природа и поведение мелкомасштабных структур в верхней хромосфере Солнца

Алексеева Л.М.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: l.m.alekseeva@yandex.ru

Распространено мнение, что глобальная энергизация солнечной атмосферы (нагрев короны, генерация скоростного солнечного ветра и др.) так долго остается непонятой потому, что она создается фоновыми магнитными полями верхней хромосферы (ВХ). Свойства этих полей практически неизвестны из-за плохой изученности ВХ – точнее, сложных и очень быстрых крайне мелкомасштабных процессов, текущих в ней.

Мы аналитически и моделированием изучаем слой ВХ, решая классическую систему столкновительных МГД уравнений для плазмы из протонов и электронов. Система нелинейна, полностью самосогласована, учтены омическая диссипация, теплопроводность, эффект Холла. Продуктивно ставить для нее 2D задачи помогает мелкомасштабность процессов. Свойства магнитоплазменных структур оказались весьма экзотичными.

– Пусть начальное магнитное поле размещается на высоте, где влияние эффекта Холла становится определяющим. И пусть оно изменяется намного резче в горизонтальном направлении, чем в вертикальном. Оказывается, его профиль по горизонтальной координате со временем станет изменяться так, что области, соответствующие току вверх, сужаются, и ток станет греть плазму (токи вниз расплываются). Из-за этого, несмотря на присутствие омической диссипации, здесь существуют очень тонкие стационарные токовые слои с током вверх. Вообще, на «холловских» высотах тонкие токовые слои с током вверх встречаются намного чаще, чем с током вниз.

– Солнечную плазму может энергизировать также пинч – пограничная зона между двумя находящимися рядом по горизонтали одинаковыми, разнополярными магнитными областями, природный аналог лабораторного плоского пинча. Перетяжечная неустойчивость приводит к генерации узких пучков скоростных протонов. (Если пинч находится на «холловских» высотах, эффект Холла способствует этому или препятствует, в зависимости от того, вверх или вниз течет ток.) Но до стадии генерации скоростных потоков эволюция природного пинча отличается от привычной лабораторной: в ВХ нет стенок, и плазма может свободно уходить из области перетяжки через концы осевой области. Остановимся сначала на случае , когда уход вверху – как внизу; так бывает у конфигураций, мало чувствующих влияние силы тяжести. Во-первых, из-за эффекта Бернулли даже у пинча, бывшего в начальный момент в состоянии баланса давлений, осевая область сжимается не только в области перетяжки, но по всей длине. Поэтому природный пинч внешне мало напоминает «связку сосисок». Во-вторых, эффект Бернулли приводит к раздвоению перетяжки. Образовавшиеся две бьют навстречу друг другу, образуя вблизи центра пинча область повышенного давления плазмы и затем 2 потока, исходящие из этой области и перпендикулярные осевым. Получившаяся крестообразная фигура с неоднородностями вдоль потоков выглядит как система дуг и аркад.

Сила тяжести заставляет сжатое при процессе тонуть, а разреженное всплывать, что создает запутанность светящихся образований в ВХ. Четкие крестообразные конструкции из петель и аркад порождаются лишь эволюцией пинчевых конфигураций, параметры и строение которых позволяют им «не замечать» присутствия силы тяжести. Путем численного моделирования мы показываем, что такие конфигурации существуют.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Вклад больших активных областей в формирование квазидвухлетних вариаций площади солнечных пятен**Вернова Е.С.¹; Костюченко И.Г.²¹ СПбФ ИЗМИРАН² НИФХИ им.Л.Я.Карпова**email:** irkost46@gmail.com

Наиболее известной и высокоамплитудной вариацией солнечной активности является 11-летний цикл, развитие которого описывает теория динамики среднего поля. На его фоне наблюдаются более короткопериодические вариации с неустойчивым периодом порядка 2-лет, получившие название квазидвухлетние осцилляции (КДО), происхождение которых остается дискуссионным. Эти вариации наблюдаются не только в большинстве индексов солнечной активности, но и в крупномасштабном магнитном поле Солнца, в параметрах межпланетной среды, в интенсивности галактических космических лучей.

В данной работе исследуются квазидвухлетние вариации площади как всех солнечных пятен, так и, отдельно, тех, которые входят в наиболее крупные группы пятен, с площадью больше 500мдп и 1000мдп. При этом, в отличие от предыдущего анализа, площадь каждой такой группы учитывалась не только когда она превышала указанный размер, но и за все время ее наблюдения. Также, анализировались КДО в площади групп пятен, не достигавших размера 500мдп. Поскольку предыдущие исследования показали, что КДО развиваются независимо в широтных полушариях, КДО в каждом из широтных полушарий анализировались отдельно. Использовались данные о площадях и координатах групп солнечных пятен обсерватории Гринвич и Кисловодской Горной Станции в солнечных циклах 12-24.

Получены численные оценки вклада каждой из рассматриваемых фракций групп солнечных пятен в суммарную по солнечному диску площадь всех пятен в 11-летнем солнечном цикле, которые сравниваются с их вкладом в формирование КДО в каждом из циклов. Анализируется связь полученных параметров с амплитудой циклов.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Вариации масштабов течений в конвективной зоне Солнца с уровнем солнечной активности**Гетлинг А.В.¹; Косовичев А.Г.²¹ НИИЯФ МГУ² Технологический институт Нью-Джерси**email:** a.getling@mail.ru

Солнечная конвекция – важнейшая составная часть динамо-механизмов, управляющих цикличностью солнечной активности. Она также должна быть ответственна за локальные процессы формирования магнитных полей солнечных пятен и активных областей. Поэтому изучение структуры и динамики течений в конвективной зоне Солнца имеет принципиальное значение для расшифровки комплекса активных явлений на Солнце и в околосолнечном пространстве. В предstawляемой работе карты скоростей подповерхностных течений, полученные методами гелиосейсмологии времен и расстояний из доплеровских измерений на инструменте Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) орбитальной Обсерватории солнечной динамики (Solar-Dynamics Observatory, SDO), используются для исследования вариаций крупномасштабной конвекции в слое толщиной 19 Мм в течение 24-го и 25-го солнечных циклов. По пространственным спектрам мощности поля дивергенции горизонтальных течений выявляются характерные масштабы солнечной супергрануляции в приповерхностном слое толщиной 4 Мм, тогда как масштаб гигантских ячеек выделяется на глубинах, больших $d \sim 8$ Мм. На промежуточных глубинах масштабы конвекции соответствуют суперпозиции течений названных масштабов. Коэффициент корреляции характерного масштаба конвекции с числом солнечных пятен имеет два максимума высотой около 0.8 на глубинах $d \sim 4$ и 11–12 Мм и локальный минимум при $d \sim 8$ Мм. Наименьшие коэффициенты корреляции соответствуют наименьшей изменчивости масштабов конвекции, а наибольшие – их самой высокой изменчивости. Пики корреляции приходятся на зоны частичной ионизации водорода и гелия, которые обладают наибольшей конвективной неустойчивостью. Характерные масштабы супергрануляции стабильны, в то время как масштабы гигантских ячеек возрастают в периоды максимумов 11-летнего цикла. Это может быть связано с вариациями стратификации конвективной зоны в цикле активности, а также с крупномасштабными течениями вокруг активных областей.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Монте-Карло моделирование стохастического ускорения протонов в солнечных вспышках**Грушин В.А.¹; Струминский А.Б.¹¹ ИКИ РАН**email:** vgrushin@cosmos.ru

Под стохастическим ускорением понимают процесс многократного ускорения, в котором длительность одного акта ускорения много меньше длительности всего процесса ускорения. В докладе представлены результаты моделирования энергетических спектров первых дошедших до Земли солнечных протонов, которые ускорялись стохастически и далее распространялись без рассеяния по спирали Паркера.

Процесс ускорения задается темпом ускорения протонов 0.1-10 МэВ/с, разыгрываемой длительностью одного акта ускорения и вероятностью покинуть область ускорения после акта ускорения. Показано, что при определённых сочетаниях параметров работы ускорителя для протонов с энергией 100-1000 МэВ важным становится эффект обратной дисперсии по скоростям — первыми на орбиту Земли будут приходить протоны меньших энергий[1]. Наблюдаемыми на Земле величинами по результатам моделирования являются: максимальная измеренная энергия протонов в событии, время появления протонов максимальной энергии, энергия первых зарегистрированных протонов и время прихода первых зарегистрированных протонов. На примере протонных возрастаний после вспышек X2.2 08.12.2024 и X17.2 28.10.2003 в докладе будет показано влияние длительности процесса ускорения (времени нахождения протонов в зоне ускорения) на перечисленные выше характеристики протонных возрастаний.

1. Struminsky A.B. et al., Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than $4 \cdot 10^{-4}$ V/cm //Advances in Space Research (2025), in press, available on line, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.003>.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Квазипериодические быстрые бегущие волновые пакеты. II.
Методика детектирования**Дмитриев В.А.¹; Куприянова Е.Г.²¹ СПбГУ² ГАО РАН**email:** viacheslavdmitriev99@gmail.com

Наблюдения некоторых солнечных вспышек в радиодиапазоне и крайнем ультрафиолетовом (КУФ) диапазоне показывают наличие квазипериодических бегущих быстрых волновых пакетов (QFP), спектр которых имеет характерный вид “головастика” или, в более общем случае, “бумеранга” [1]. Преимуществом таких вспышек является большой диагностический потенциал QFP, позволяющий оценить пространственные и временные масштабы импульсных процессов. Однако в литературе описано менее трех десятков таких событий в КУФ диапазоне и всего несколько в радиодиапазоне, причем все эти события были детектированы вручную. В данной работе поставлена задача автоматического детектирования QFP в радиодиапазоне на большом объеме данных. Для решения задачи создана классифицирующая нейросеть. Ввиду дефицита реальных данных для обучения нейросети была генерирована обучающая выборка синтетических кривых блеска солнечных вспышек. В докладе представлена методика создания синтетических кривых блеска, их обработки, а также результаты обучения классификатора и перспективы его применения для поиска QFP в многолетних наблюдениях в радиодиапазоне.

[1] Kolotkov et al. // MNRAS 2021. V. 505. P. 3505.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Серпантинобразные особенности магнитного поля (switchbacks)
во внутренней короне Солнца и их интерпретация в рамках
топологической модели**Думин Ю.В.¹¹ ГАИШ МГУ**email:** dumin@yahoo.com

Одним из космофизических явлений, активно обсуждаемых в последнее время, являются серпантинобразные изгибы (или, в английской терминологии, switchbacks) силовых линий магнитного поля, иногда возникающие в короне Солнца и солнечном ветре. Интерес к таким структурам особенно усилился после их наблюдения на спутнике Parker Solar Probe, проведённых на сравнительно небольших расстояниях от Солнца. В большинстве предложенных моделей предполагается, что серпантинобразные особенности генерируются в момент магнитного пересоединения во внутренней короне и далее распространяются наружу вдоль силовых линий магнитного поля. Существенной трудностью таких моделей является то, что они обычно требуют наличия значительных электрических токов поперёк магнитного поля в момент пересоединения, тогда как плазма на больших высотах является сильно анизотропной, и её электропроводность велика лишь вдоль магнитного поля. Цель настоящего доклада - показать, что эффективным способом преодоления этой трудности может быть использование так называемой “топологической” (или, правильнее сказать, “нелокальной”) модели магнитного пересоединения, в которой процесс разрыва и перезамыкания магнитных силовых линий реализуется не за счёт локальных токовых систем, а в результате специфической суперпозиции воздействий от удалённых источников. Как вытекает из наших расчётов, в рамках этой модели на некотором расстоянии от области пересоединения действительно происходит генерация пучков магнитных силовых линий с серпантинобразными особенностями. Причём, как уже было подчёркнуто выше, этот процесс не требует наличия электрических токов поперёк магнитного поля.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Модель глобальных характеристик солнечной цикличности: прогнозирование**Зобова И.Ю.¹, Красоткин С.А.¹¹ МГУ, физический факультет

email: zobova.ii20@physics.msu.ru

Солнечная активность (СА) – это совокупность всех проявлений локальных активных процессов, происходящих на Солнце. Она включает изменения магнитных полей Солнца на различных временных масштабах, а также связанные с указанными изменениями спорадические и регулярные явления. Вариации солнечной активности оказывают существенное влияние на геофизические, климатические и биологические процессы на Земле. Изучение и прогнозирование солнечной цикличности важно для планирования космических миссий и расчета радиационной нагрузки на приборы на космических аппаратах. Поэтому исследование физической природы солнечной цикличности остается одной из ключевых нерешенных проблем в физике Солнца. Целью настоящей работы является построение статистико-феноменологической модели вариаций СА и проверка её прогностической способности. Для этого были использованы данные Бельгийской королевской обсерватории [1] о среднем ежемесячном числе солнечных пятен (SSN) с февраля 1755 года, охватывающие 24 полных цикла солнечной активности. С помощью метода сингулярного спектрального анализа (SSA), описанного в работе [2], были выделены три главных компонента, соответствующих вековому циклу, 11-летнему циклу и квазидвухлетней вариации солнечной активности. Для улучшения качества модели была проведена предварительная оптимизация входного параметра метода SSA. Также рассматривается вопрос о наличии связей между выделенными компонентами, а именно об амплитудной и частотной модуляции вековым циклом более высокочастотных периодических составляющих. Аппроксимация отдельных составляющих солнечной цикличности и их прогнозирование на текущий 25-й цикл позволили сравнить прогноз индекса SSN с данными наблюдений до мая 2025 года включительно.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Сравнение дипольного магнитного момента Солнца и магнитного момента гелиосферного токового слоя**Кислов Р.А.¹¹ ИЗМИРАН

email: kr-rk@bk.ru

Гелиосферный токовый слой во время минимума солнечной активности можно приближённо рассматривать как гигантский диск с током. Этот ток можно оценить, зная теоретические или наблюдательные зависимости компонент межпланетного магнитного поля от гелиоцентрического расстояния. Тогда можно найти магнитный момент токового диска как функцию его радиуса. В данном исследовании сделаны оценки магнитного момента гелиосферного токового слоя. Оказалось, что вне зависимости от используемой модели межпланетного магнитного поля, полный магнитный момент гелиосферного токового слоя на несколько порядков превышает осевой дипольный магнитный момент Солнца в минимуме солнечной активности, оценённый способом, дающим максимальную величину. Отсюда следует предположение, что в системе Солнце-солнечный ветер следует учитывать не только влияние Солнца на структуру гелиосферы, но и обратное влияние процессов в солнечном ветре на магнитное поле Солнца. Предположение проиллюстрировано на примере рассмотрения токов альфвеновской глобальной гелосферной токовой цепи.

Секция «Солнце и солнечная активность»**О структуре течений на различных глубинах в конвективной зоне Солнца**Коновалихин А.М.¹; Гетлинг А.В.²¹ МГУ, физический факультет² НИИЯФ МГУ**email:** konovalikhin.a21@physics.msu.ru

В рамках общей проблемы изучения пространственной структуры течений в конвективной зоне Солнца выполнен сравнительный анализ следующих данных:

- полей скорости вещества на различных глубинах конвективной зоны, найденных методами гелиосеймологии времен и расстояний;
- численно рассчитанных по этим данным полей дивергенции горизонтальных скоростей;
- вертикальных скоростей в фотосфере, определенных прямыми доплеровскими измерениями;
- горизонтальных скоростей в фотосфере, найденных методом локального корреляционного трассирования (прослеживание элементов поля яркости).

Представлены результаты анализа корреляций вертикальных скоростей и дивергенции горизонтальных скоростей в конвективной зоне на глубинах от 0,5 Мм до 19 Мм в разные моменты развития активной области NOAA 11158 (с 09.02.2011 до 18.02.2011). 12.02.2011 появился восходящий поток, рассматриваемая область стала активной, поэтому можно выделить два характерных промежутка времени – до и после его появления. Обнаружено различие характера глубинного хода усреднённого коэффициента корреляции по периоду 09–12.02.2011 (в который область можно было считать спокойной) и 13–18.02.2011 (в который область была активной). А именно, в активный период появился провал кривой корреляции на уровнях 2 и 4 Мм. Обнаружены существенные расхождения между вертикальными скоростями и дивергенцией горизонтальных в восходящем потоке: вертикальные скорости на уровнях 2 и 4 Мм в границах потока имеют большие положительные значения, а дивергенция положительна лишь в структурах, напоминающих кольца, которые опоясывают области с отрицательными значениями. Имеются основания для предположения, что на уровнях 2 и 4 Мм в период активности данной области характер распределения вертикальных скоростей в восходящем потоке отличается от того, что показывают вертикальные скорости, определённые гелиосеймологическими методами.

Также на глубине 8,5 Мм обнаружен характерный минимум коэффициента корреляции, усреднённого по промежутку времени 09–12.02.2011 (спокойные условия). Этот минимум возникает на фоне максимальных различий между вертикальными скоростями и дивергенцией горизонтальных, по-видимому связанных с тем, что примерно в этих слоях лежит нижняя граница супергрануляции. С увеличением глубины точность определения вертикальных скоростей уменьшается быстрее, чем точность горизонтальных, и поэтому на определённой глубине границы супергранул пропадают с карт вертикальных скоростей, оставаясь различными по картам дивергенции горизонтальных скоростей.

Секция «Солнце и солнечная активность»*Пленарный доклад***Космические и внеатмосферные исследования Солнца**Кузнецов В.Д.¹¹ ИЗМИРАН

Наблюдения с космических аппаратов дают все более детальную информацию о происходящих на Солнце явлениях и процессах, стимулируя построение физических моделей солнечных явлений и давая более глубокое понимание того, как устроено и как работает Солнце. Современная концепция солнечных космических миссий включает наблюдения Солнца с близких расстояний, наблюдения из внеэклиптических положений, наблюдения с околоземных орбит с высоким пространственным разрешением, а также внеатмосферные ракетные наблюдения. В рамках этой концепции реализованные, действующие и недавно запущенные солнечные космические миссии (TRACE, RHESSI, SOHO, SDO, STEREO, Hinode, Parker Solar Probe, Solar Orbiter, ASO-S, Aditya-L1, Proba-3 и др.) призваны обеспечить исследователей самыми лучшими на сегодняшний день данными для решения таких актуальных проблем физики Солнца как механизмы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, тонкая и сверхтонкая структура и динамика солнечной атмосферы и триггерные механизмы наиболее мощных проявлений солнечной активности - вспышек и корональных выбросов массы, ускорение частиц и их распространение в короне и гелиосфере, структура и динамика магнитных полей в приполярных областях Солнца, механизм динамо и солнечный цикл, свойства плазменной турбулентности и др. В докладе дается обзор результатов в исследованиях Солнца, полученных за последние годы с помощью космических аппаратов. Эти результаты охватывают все слои солнечной атмосферы от конвективной зоны и фотосфера до солнечной короны и солнечного ветра. Дается также обзор новых солнечных космических миссий.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Связь солнечных циклов с 15 по 22 с мощным 198-летним колебанием в солнечном ветре, орбитальным движением Юпитера и Квебекским событием**Кузнецова Т. В.¹¹ ИЗМИРАН**email:** tvkuz3@gmail.com

Рассмотрены 8 солнечных циклов (SC) CSC15 по SC22, которые находятся в интервале между минимумами SC15 и SC23 (minSC15 и minSC23). Определена средняя длительность (L_m) этих 8 циклов в соответствии с данными таблицы солнечных циклов по версии (ISNv2.0), равная 10.38 лет. Интервал между minSC15 и minSC23, равный 83.04 лет, содержит не только 8 средних солнечных циклов L_m длительностью 10.38 лет ($\text{minSC23} - \text{minSC15} = 8 \times 10.38\text{л} = 83.04\text{л}$), но и 7 периодов орбитального периода Юпитера J (83.02л=7x11.86л, где $J=11.86\text{л}$). Таким образом в интервале между minSC23 и minSC15 обнаружена связь длительности средних солнечных циклов $L_m=10.38$ лет с орбитальным периодом движения Юпитера вокруг Солнца. Следует помнить, что Юпитер – единственная планета солнечной системы, у которой центр масс с Солнцем (барицентр) находится вне Солнца и отстоит от него примерно на 7 % солнечного радиуса.

Обнаруженный нами ранее мощный цикл в модуле межпланетного магнитного поля (ММП) имеет средний период 198 лет, который также содержит 19 периодов по 10.42 года ($198=10.42 \times 19$). Близкий период 198.6 лет содержит 10 периодов соединения Юпитер-Сатурн JS ($198.6=19.86 \times 10$, где $JS=19.86$). Показано, что 198-летний цикл модуля ММП достиг стяженного максимума вблизи максимума SC22 в ноябре 1989 г. В настоящее время продолжается медленный спад этого цикла (прогноз минимума модуля ММП в 2090 г.).

За 40 лет в КРАО и других пяти обсерваториях мира сделано более 18.5 тыс. среднесуточных измерений общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды [1]. Там сообщается о загадочной существенной периодичности с средним периодом 19.8 лет, которая является 10м обертоном мощного колебания модуля ММП с средним периодом 198 лет, обнаруженному нами и обсуждаемого здесь.

В 1989 году 13–14 марта произошла известная сильнейшая геомагнитная буря с начала космической эры, названная Квебекским событием. Сейчас многие полагают, что геомагнитная буря, вызвавшая событие в Квебеке, явилась результатом двух отдельных событий, известных как выбросы корональной массы (CME) 10 и 12 марта 1989 года, а 13 марта на Землю обрушилась геомагнитная буря. Однако, существует целый ряд наблюдений, когда CME регистрируются без каких-либо явлений на солнечном диске, в том числе и без солнечных вспышек. Вывод - необходим учет влияния мощных вековых циклов Солнца – таких, как 198 – летний цикл модуля ММП.

1. Котов В.А. 2009. Сорок лет измерений общего магнитного поля Солнца. Известия Крымской астрофизической обсерватории. Т. 105, № 1, С. 75 - 90.

<https://jncrao.ru/index.php/izvcrao/article/view/883>

Секция «Солнце и солнечная активность»**Квазипериодические быстрые бегущие волновые пакеты. I.
Диагностический потенциал**

Куприянова Е.Г.¹; Михальчук А.В.²; Дмитриев В.А.²; Волобуев Д.М.¹; Макаренко Н.Г.¹

¹ ГАО РАН

² СПбГУ

email: elenku@bk.ru

Наблюдения некоторых солнечных вспышек в радио- и крайнем ультрафиолетовом диапазонах показывают наличие квазипериодических быстрых бегущих волновых пакетов (QFP) с характерным вейвлет спектром в виде “головастика” или, в более общем случае, “бумеранга” [1]. Параметры и характерный вид QFP пакета позволяют судить о пространственных и временных параметрах ассоциирующегося с ним процесса энерговыделения [2-4]. В докладе представлен краткий обзор литературы, раскрывающий диагностический потенциал QFP-событий. Обсуждается их применение для диагностики временных масштабов вспышечного энерговыделения, а также для уточнения моделей солнечной атмосферы. Проведено сравнение различных математических методов детектирования и анализа QFP-событий на динамических изображениях SDO/AIA.

- [1] Kolotkov et al. // MNRAS 2021. V. 505. P. 3505.
- [2] Goddard et al. // A&AL. 2019. V. 624. P. 4.
- [3] Nakariakov et al. // Rev. Mod. Plasma Phys. 2024. V. 8. P. 19
- [4] Karlicky et al. // A&A 2011. V. 529. P. 96.

Гравитационное влияние планет на солнечную активность

Охлопков В.П.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: ovpetrovich@yandex.ru

Проведены расчеты расстояния центра масс планет (ЦМП) от центра Солнца и соответствующие гелиоцентрические долготы для интервала времени с 1900 года и до наших дней. Рассмотрены две ситуации расположения ЦМП и Земли по отношению к Солнцу. Первая – Земля и ЦМП находятся по одну сторону от Солнца и на одной линии с ним. Вторая - Земля и ЦМП находятся по разные стороны от Солнца. Разность гелиоцентрических долгот Земли и ЦМП бралась не более одного градуса, т. е. Земля и центр масс планет находились на одной линии с Солнцем. Показано, что в первой ситуации значения чисел Вольфа превышают аналогичные значения для второй ситуации на 22 процента. Это свидетельствует о гравитационном воздействии планет на вытягивание солнечного вещества с магнитными полями с последующим образованием солнечных пятен.

Секция «Солнце и солнечная активность»**11-летние линейные конфигурации планет Венеры, Земли, Юпитера и солнечная активность**Охлопков В.П.¹¹ НИИЯФ МГУ

email: ovpetrovich@yandex.ru

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 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, а также соответствие 11-летних циклов в планетном индексе и в солнечной активности за 1000-летний интервал времени не является случайным и может свидетельствовать о связи этих процессов.

ЛИТЕРАТУРА

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 «Солнце и солнечная активность»**Проблемы поиска положений солнечных вспышек по конфигурации магнитного поля, полученной МГД моделированием над активной областью**Подгорный А.И.¹; Подгорный И.М.²¹ ФИАН² ИНАСАН**email:** podgorny@lebedev.ru

Первичное освобождение энергии во время солнечной вспышки в солнечной короне на высотах 15 000 - 60 000 км (1/40 - 1/10 радиуса Солнца), которое подтверждается объясняет механизм С. И. Сыроватского, согласно которому накопление магнитной энергии вспышки происходит в магнитном поле токового слоя, который образуется в окрестности особой линии магнитного поля. Далее, токовый слой переходит в неустойчивое состояние. Взрывное освобождение магнитной энергии слоя вызывает наблюдаемые проявления вспышки, которые объясняются электродинамической моделью солнечной вспышки, предложенной И. М. Подгорным. Появление пучкового жесткого рентгеновского излучения на солнечной поверхности объясняется ускорением электронов в продольных токах, вызванных электрическим полем Холла jxB/nec в слое. Электродинамическая модель солнечной вспышки использует аналогии с электродинамической моделью суббури, предложенной ранее её автором на основании измерений на космическом аппарате "Интеркосмос-Болгария-1300".

Наблюдения не дают возможности определить конфигурацию магнитного поля в короне над активной областью, поэтому, для изучения физического механизма солнечной вспышки необходимо проводить МГД моделирование. Полученная МГД моделированием конфигурация магнитного поля настолько сложная, что часто из нее невозможно определить положения особых линий и появляющихся вблизи них токовых слоев. Для этой цели разработана система графического поиска, основанная на определении положений максимумов плотности тока, которые достигаются в центрах токовых слоев. В окрестности особой линии магнитного поля на конфигурацию X-типа может быть наложено расходящееся магнитное поле, представляющее собой поле пробкотрона. Расходящееся поле препятствует развитию неустойчивости в токовом слое, поэтому, конфигурация вблизи максимума плотности тока будет более благоприятной для появления вспышки, если поле X-типа преобладает.

Проблема совпадения положений вспышек, найденных по результатам МГД моделирования, с наблюдаемыми положениями вспышек состоит в том, что максимумы плотности тока со свойствами благоприятными для появления вспышек, возникают, также, и вне яркой области вспышечного излучения. Этую проблему может решить исследование конфигураций магнитного поля вблизи различных точек поверхности повышенной плотности тока, проходящей через цепочку максимумов плотности тока. Появление такой поверхности показал анализ конфигурации поля над активной областью АО 10365 за три часа до вспышки бала M 1.9 26 мая 2003 года. Поверхность является протяженным токовым слоем размером ~50 000 км. В настоящей работе это исследование выполнено более детально. Решение проблемы совпадения положений вспышки может быть получено за счет того, что вспышечная неустойчивость начинает развиваться не в местах максимумов плотности тока, а в местах, где конфигурация магнитного поля благоприятна для развития неустойчивости. В местах развития вспышечной неустойчивости плотность тока не на много меньше её значений в максимумах плотности тока. В дальнейшем, необходимо будет проводить проверку предложенного решения проблемы путем детального исследования конфигураций магнитного поля для других моментов выбранной вспышки и других вспышек.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Радиальные движения на начальном этапе развития солнечных активных областей**Садыков А.М.¹; Красоткин С.А.¹¹ НИИЯФ

email: sadykov.am19@physics.msu.ru

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

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

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

Литература

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

Секция «Солнце и солнечная активность»**Темп ускорения в некоторых протонных событиях 24-го и 25-го циклов солнечной активности**

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

¹ ИКИ РАН

² ГАО РАН

email: astrum@iki.rssi.ru

На примере GLE (Ground Level Enhancement) событий 24-го и 25-го циклов проверяется гипотеза о том, что у каждой протонной вспышки существует начальная импульсная фаза – источник «раннего» и слабого протонного возрастания [1]. Эта идея основана на сравнении солнечного протонного события (СПС) 28 октября 2021 (GLE73) с “ранним” и слабым протонным возрастанием от вспышки 16 июля 2023 (M4.0) по данным темпа счета ACS SPI (The AntiCoincidence Shield of the SPectrometer on the INTEGRAL space). Примерами других «ранних» и слабых протонных возрастаний, зарегистрированных ACS SPI, являются события, связанные с импульсными вспышками 14 мая (X8.7) и 8 декабря (X2.2) 2024 [2]. Следы ускорения в импульсной фазе могут быть видны на орбите Земли в первый час СПС. Эффективное электрическое поле (темпер ускорения протонов) оценивалось по разнице времени между началом HXR излучения >100 кэВ и началом возрастания солнечных протонов (СП) по данным ACS SPI, а также сетью нейтронных мониторов в случаях GLE событий. Большинство СП, ответственных за 73-е (28 октября 2021), 74-е (11 мая 2024) и 75-е GLE (8 июня 2024) события, были ускорены в слабых электрических полях ~3·10-5 В/см и не достигли жесткостей > 1650 МВ [2]. Если СП и ускорялись в импульсной фазе родительских вспышек в более сильном поле ~3·10-4 В/см, то очень кратковременно и в недостаточном количестве для наблюдения «раннего» начала GLE. Так как временной профиль протонного возрастания ACS SPI в 76-м GLE (21 ноября 2024) практически идентичен профилям в предыдущих трех GLE, то эти выводы справедливы и для него.

В GLE событиях 24-го цикла 71-м (17 мая 2012) и 72-м (10 сентября 2017) первые пришедшие протоны, ускорялись в электрических полях > 1·10-4 В/см [2]. Так как большее электрическое поле соответствует большей плотности вещества (неустойчивости в плазме должны развиваться при сравнимых β), то плотность магнитной энергии в короне в 25-ом цикле должна быть меньше, чем в 24-ом.

[1] Sturinsky A. B., et al., Sources of Solar Protons in the Events of February 24–25 and July 16–17, 2023 // CosRes. 2024. V. 62. No. 2. PP. 133–146 doi: 10.1134/S0010952523600300

[2] Sturinsky A.B. et al., Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than 4·10-4 V/cm // JASR, in press, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.003>.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Вращение системы Земля-атмосфера вокруг своей оси как диффузионный стационарный процесс**

Тимашев С.Ф.¹; Борог В.В.¹

¹ НИЯУ МИФИ

email: serfedtim@mail.ru

Одна из загадок современного естествознания – уникально высокая стабильность вращения небесных тел вокруг своей оси. Наиболее убедительный и впечатляющий пример такого объекта – система Земля-атмосфера, что следует из величины флюктуирующих вариаций продолжительности суток на уровне миллисекунд и установления тренда возрастания суток – 1.8 мс за столетие. При анализе причин такого «замедления» выясняется, что только за счет одного лишь приливного трения возрастание суток составило бы большую величину – 2.3 мс за столетие [1]. Естественно полагать, что постоянно происходящие процессы, в том числе, катастрофических масштабов, в приземных слоях атмосферы и во внутренних геосферах, сопровождаемые неизбежной диссиляцией энергии, лишь усиливают загадочность феномена.

В данной работе показано, что принципиальная разрешимость этой проблемы возможна на основе анализа существующей информации – временных рядов для вариаций продолжительности земных суток (Lod) с 1962 по 2024 год при использовании метода фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [2]. Отличие ФШС от иных методов анализа хаотических сигналов состоит в придании информационной значимости нерегулярностям анализируемых сигналов – всплескам и скачкам динамических переменных и в установлении корреляционных взаимосвязей в последовательности таких нерегулярностей. При анализе установлено, что для Lod флюктуационная динамика δ -вариаций (характерные значения $\delta \sim$ мс) – стационарный субдиффузионный процесс, характеризующийся константой Херста $H_1 = 0.41$, характерным временем выхода на стационарное значение $T_1 = 771$ суток и коэффициентом диффузии фиксируемых вариаций $D_\delta = 1.2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{сут}$. Естественно, такой процесс требует постоянной подпитки сторонней энергией. Возможность такой подпитки через реализацию параметрического резонанса [3] следует непосредственно из наличия в спектре мощности специфических резонансов: f_{ES} – частоты обращения Земли вокруг Солнца и f_S – частоты собственного вращения Солнца, а также резонансов с удвоенными частотами $2f_{ES}$ и $2f_S$.

Причина возникновения последних частот, через стороннее возбуждение которых может реализоваться постоянная «подпитка» процесса вращения Земли, за счет существования параметрических резонансов в системе Солнце-Земля. Это следует из анализа спектра мощности временного ряда (с 1932 по 2024 год) значений планетарного индекса K_p , характеризующего периодическую возмущённость магнитного поля Земли. На основе ранее развитых представлений о вакууме электромагнитного поля как базовой среде расширяющейся Вселенной как открытой системы [4, 5] обсуждается механизм подпитки Земли энергией.

Литература

1. F. R. Stephenson et al. Proc. Roy. Soc. 2016. A 472(2196): 20160404.
2. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит. 2007. 248 с.
3. Зельдович Я.Б. УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 489-510.
4. Тимашев С.Ф. Журнал физ. химии. 2022. Т. 96. № 8. С. 1093-1117.
5. Тимашев С.Ф. Журнал физ. химии. 2022. Т. 96. № 12. С. 1695-1716.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Эффект Энни Маундер: феномен влияния Земли на солнечную активность**Тимашев С.Ф.¹; Борог В.В.¹¹ НИЯУ МИФИ

В мае 1907 года в журнале «Месячные записки Королевского астрономического общества» была опубликована статья Эмми Маундер [1] об изменении активности Солнца при прохождении Землей перигелия, что указывало на прямое воздействие Земли, размеры которой сопоставимы с солнечными пятнами, на изменение активности нашей звезды. Впоследствии было подтверждено, что активность Солнца в перигелии (ноябрь-декабрь) несколько меньше активности в апогее (май-август) и, более того, установлено, что в зимний период несколько возрастает скорость вращения Солнца. Физическую сущность этих явлений проясняет проведенный кросс-корреляционный анализ временных рядов вариаций длительности $\delta_i(t)$, где t – время, суточных вращений Земли (Lod , масштабы \sim мс) с временными рядами W_j солнечной активности – чисел Вольфа в указанные «зимние» и «летние» интервалы времени для двух полных циклов солнечной активности – 1977-1999 и 1998-2019. Для анализа использовался метод фликкер-шумовой спектроскопии (ФШС) [2] с введением двухвременных кросс-корреляторов $q_{ij}(\tau, \theta_{ij})$, где τ и θ_{ij} – время задержки и параметр смещения во времени анализируемых временных рядов. Знак и величина θ_{ij} параметра кросс-коррелятора (КК) при его максимальных величинах характеризуют причинно-следственную связь и характерное время передачи информации между процессами i и j . Полученные кросс-корреляционные зависимости θ_{Lod-W} для усредненных сезонов «зима» (слева) и «лето» (справа) цикла 1979-1999 представлены на рисунке. При этом из величины из знака параметра θ_{Lod-W} следует, что фиксируемые взаимосвязи инициируются процессом Lod , а W процесс «включается» с задержкой \sim от 20 до 40 суток. Из рисунка следует, что «летом» солнечная активность проявляется как достаточно регулярный и организованный процесс (при $KK_{max} \sim 0.75$) в отличие от периода «зима» (при $KK_{max} \sim 0.75$), что полностью подтверждает реальность эффекта Энни Маундер и заставляет переосмыслить генезис солнечно-земных связей. Возможный механизм реализующихся кросс-корреляционных взаимосвязей обсуждается на основе ранее развитых представлений о вакууме электромагнитного поля – ЕМ вакууме как базовой среде расширяющейся («разбухающей») Вселенной как открытой системы [3, 4].

Литература

1. Maunder A.S.D. An Apparent Influence of the Earth on the Numbers and Areas of Sun-spots in the Cycle 1889-1901. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 67 (7): 451–476. doi:10.1093/mnras/67.7.451.
2. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физматлит. 2007, 248 с.
3. Тимашев С.Ф. О физической сущности квантовой механики и природы гравитации: феноменология // Журнал физической химии. 2022. Т. 96. № 8. С. 1093-1117.
4. Тимашев С.Ф. Атом как открытая диссипативная система в базовой среде – электромагнитной составляющей физического вакуума: феноменология // Журнал физической химии. 2022. Т. 96. № 12. С. 1695-1716.

Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы

Подход к параметризации предвестников Форбуш-эффектов

Белов С.М.¹; Шлык Н.С.¹; Абунина М.А.¹

¹ ИЗМИРАН

email: sfrovis@gmail.com

Форбуш-эффекты - быстрые изменения потока космических лучей, вызванные событиями солнечной активности, нередко сопровождаются предвестниками. Предвестником называются аномальные изменения анизотропии КЛ, наблюдаемые до фактического прилета межпланетного возмущения к земле (до ударной волны). Принято разделять предвестники на пред-возрастания, вызванные ускорением частиц или сжатием перед фронтом возмущения, и пред-понижения, вызванные связью по магнитной линии между Землей, и областью геоиосферы, где уже начался Форбуш-эффект. При этом оба вида могут наблюдаться в одном событии.

Нами и нашими коллегами было написано множество работ по теме предвестников. При этом основным инструментом для их изучения был Метод Кольца Станций, применяемый к данным нейтронных мониторов. По результатам этого метода строятся долготные распределения, где вариации на отдельных станциях отображаются кружками разного размера (рисунок приложен). Не смотря на то, что такие рисунки помогают субъективно определить наличие предвестника, без строгого критерия не представляется возможным перейти к статистическому исследованию данного явления.

В докладе будут обсуждаться возможности для параметризации предвестников, с целью определения критериев для их выделения, и дальнейшей разработки системы для автоматического определения наличия предвестников. В частности, будет представлен конкретный подход и оценена его эффективность.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Солнечные протонные события, зарегистрированные прибором Люлин-МО на космическом аппарате «ТГО» на орбите вокруг Марса**

Бенгин В.В.^{1,2}; Дробышев С.Г.¹; Шуршаков В.А.¹; Семкова Й.³; Колева Р.³; Крыстев К.³; Матвийчук Ю.³; Банков Н.³; Томов Б.³; Малчев С.³; Дачев Ц.³; Митрофанов И.Г.⁴; Головин Д.В.⁴; Мокроусов М.И.⁴; Литвак М.Л.⁴; Лукьянов Н.⁴

¹ ИМБП РАН

² НИИЯФ МГУ

³ ИКИТ-БАН. София, Болгария

⁴ ИКИ РАН

email: v_benghin@mail.ru

Дозиметр Люлин-МО является частью российского прибора ФРЕНД (Fine Resolution Epithermal Neutron Detector) на борту космического аппарата (КА) ТГО (Trace Gas Orbiter, ESA) миссии «ЭкзоМарс». КА ТГО работает на круговой орбите вокруг Марса с апреля 2018 года. Мы представляем в данном докладе результаты измерения потоков частиц и мощности поглощенной дозы, полученные с помощью Люлин-МО на марсианской орбите. Интервал измерений охватывает период от фазы спада 24-го цикла солнечной активности до фазы роста и максимума следующего – 25-го цикла. В полученных данных наблюдается модуляция потока и мощности дозы галактических космических лучей (ГКЛ), обусловленная солнечной активностью. В период 25-го цикла солнечной активности наблюдался целый ряд солнечных протонных событий, часть из которых была зарегистрирована прибором Люлин-МО. Рассмотрены изменения радиационной обстановки, вызванные этими событиями. Отмечен эффект модуляции скорости счета, регистрируемой прибором, которую мы считаем обусловленной орбитальным движением КА ТГО. Для более подробного анализа этого эффекта были рассмотрены достаточно сильные возрастания потоков частиц во время СПС 28 октября 2021 года, 15 февраля 2022 года, 20 мая 2024 года. Вариации потока солнечных космических лучей были сопоставлены со взаимным расположением Марса, КА ТГО и направлением силовой линии межпланетного магнитного поля (ММП). Показано, что регистрируемый поток уменьшается, когда расчетное направление силовой линии ММП со стороны Солнца перекрывается Марсом или достаточно толстыми элементами конструкции прибора ФРЕНД и космического аппарата «ЭкзоМарс». Возможное объяснение наблюдаемого эффекта может состоять в том, что распределение прихода частиц во время солнечного протонного события не изотропно в окрестностях Марса и поток частиц, идущих с направлений близких к направлению силовой линии ММП заметно превышает средний уровень.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»*Пленарный доклад***Оптические инструменты Национального гелиогеофизического комплекса РАН**

Васильев Р.В.¹; Белецкий А.Б.¹; Ткачёв И.Д.¹; Артамонов М.Ф.¹; Михалёв А.В.¹; Сыренова Т.Е.¹; Подлесный С.В.¹; Шелков А.Д.¹; Жеребцов Г.А.¹; Медведев А.В.¹

¹ ИСЗФ СО РАН

Фотодиссоциация и фотоионизация газов верхней атмосферы на освещённой Солнцем стороне Земли приводит к появлению активных плазменно-химических компонент и возникновению хемилюминесценции вследствие химических реакций восстановления. Хемилюминесценция составляет значительную часть естественного свечения ночного неба, как по интенсивности, так и по спектральному составу, которые в значительной степени могут варьироваться вследствие действия динамических процессов верхней атмосферы, так и в результате внешнего воздействия из магнитосферы – частиц плазмы высывающихся во время геомагнитных бурь и суббурь. Таким образом, характеристики хемилюминесцентного свечения: временная и пространственная вариативность интенсивности и спектрального состава, форма и смещение линий могут использоваться для диагностики процессов магнитосферно-ионосферно-атмосферного взаимодействия. Оптические инструменты Национального гелиогеофизического комплекса РАН это набор современной аппаратуры, предназначенный для регистрации естественного свечения ночного неба, и исследования структуры и динамики верхней атмосферы Земли. Набор аппаратуры размещён в средних широтах и включает в себя несколько типов инструментов. Наиболее полными по своему функционалу устройствами можно считать интерферометры Фабри-перо, адаптированные для астрономических исследований, и способных регистрировать интенсивность различных спектральных линий, а также скорость ветра и температуру светящихся слоёв верхней атмосферы. Широкоугольные камеры полного неба (камеры всего неба, all-sky cameras) позволяют получать пространственное распределение интенсивности свечения на различных линиях. Быстрые фотометры на основе вакуумных фотодетекторов работающих в режиме счёта фотонов, позволяют регистрировать быструю (0.01 с) изменчивость интенсивности свечения. Спектрометры видимого и инфракрасного диапазона позволяют получать наиболее полную спектральную картину свечения. В докладе представлены некоторые результаты, демонстрирующие возможности для исследования среднеширотных явлений возникающих в верхней атмосфере Земли при помощи Оптических инструментов в составе Национального гелиогеофизического комплекса РАН.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Моделирование взаимодействующих КВМ в гелиосфере с использованием Drag-Based Model на примере геоэффективного события 22.01.2012**

Вахрушева А.А.^{1,2}; Шугай Ю.С.¹; Капорцева К.Б.^{1,2}; Калегаев В.В.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: vakhr.anna@gmail.com

Корональные выбросы массы (КВМ) являются одним из важных факторов возникновения сильных геомагнитных возмущений. Самые интенсивные геомагнитные возмущения вызваны прибытием к Земле нескольких взаимодействующих между собой КВМ. Как известно, в результате магнитогидродинамического взаимодействия потоков солнечного ветра (например, взаимодействие КВМ с высокоскоростным потоком, или взаимодействие двух КВМ) возникают сложные структуры, параметры ветра в которых могут значительно отличаться от характерных значений [1]. Взаимодействие нескольких КВМ также может значительно повлиять не только на время и скорость прибытия, но и на геоэффективность – при взаимодействии КВМ могут сжиматься, что может привести к увеличению южной компоненты магнитного поля [2].

В данной работе рассмотрены результаты моделирования времени и скорости прибытия КВМ к Земле на примере взаимодействия 2-х КВМ 18.01.2012 и 19.01.2012, которое привело к геомагнитному возмущению с падением Dst до -73 нТл. Моделирование было проведено двумя способами: 1) без учёта взаимодействия; 2) с учётом взаимодействия 2-х КВМ. Для моделирования была выбрана Drag-Based Model (DBM). Эта модель основывается на предположении о том, что, начиная с некоторого расстояния от Солнца, можно пренебречь силой Лоренца и гравитационной силой, то есть, на распространение КВМ влияет только сила вязкого трения, определяемая взаимодействием КВМ с окружающим солнечным ветром [3]. В работе используется концентрическая двумерная версия DBM.

Взаимодействие нескольких КВМ в гелиосфере может начаться задолго до наблюдаемого сближения их фронтов – межпланетному пространству необходимо от 2 до 5 дней, чтобы восстановиться после воздействия проходящего межпланетного коронального выброса массы [4]. Распространение КВМ в межпланетном пространстве приводит к изменению силы взаимодействия между распространяющимся впоследствии следующим КВМ и межпланетной средой.

При моделировании 1-м способом ошибка времени моделирования составила -12.3 ч, ошибка скорости составила 110 км/с. При моделировании 2-м способом ошибка времени моделирования составила -4.3 ч, ошибка скорости составила 45 км/с. На данном примере показано, что учёт взаимодействия 2-х КВМ в модели DBM позволяет улучшить результат моделирования.

Анализ геоэффективного взаимодействия КВМ выполнен за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>. Двумерное моделирование КВМ выполнено А. Вахрушевой при поддержке фонда «БАЗИС».

1. Rodkin D. et al. // Solar Phys. 2018. T.293. A78
2. Scolini C. et al. // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2020. T.247. №21.
3. Vršnak B. et al. // Solar Phys. 2013. T.285. C.295.
4. Temmer M. et al. // The Astrophysical Journal. 2017. T.835. №2. C.141

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**О влиянии крупномасштабных гелиосферных структур на временные профили потоков солнечных энергичных частиц
09.02.2024, 14.09.2024 и 09.10.2024**

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

¹ НИИЯФ МГУ

² ФИАН

³ ИПГ

⁴ МГУ, физический факультет

Солнечные энергичные частицы, получив первоначальное ускорение на Солнце, при распространении в гелиосфере неизбежно испытывают воздействие неоднородной и нестационарной межпланетной среды. Диапазон энергий исследуемых солнечных протонов (от 1 МэВ до 500 МэВ), в соответствии с их гирорадиусами, определяет пространственно-временные масштабы в гелиосфере, на которых следует рассматривать физические процессы, влияющие на потоки частиц. Именно в этот пространственный масштаб попадают основные структуры межпланетной среды, такие как межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) и области взаимодействия перед высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр. Результаты воздействия межпланетной среды на поток солнечных энергичных частиц могут проявляться по-разному. В случае прихода к наблюдателю потока солнечных частиц вместе с МКВМ может наблюдаться значительное искажение временного профиля. Бездисперсионные по энергии локальные максимумы на фазе роста потока могут сформироваться, если частицы распространяются в области сжатия перед высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры. На примере солнечных протонных событий (СПС) 09.02.2024, 14.09.2024 и 09.10.2024, которые ассоциируются с солнечными вспышками рентгеновских классов X3.4, X4.5 и X1.8, произошедшими на гелиодолготах W85, E59 и W08, соответственно, обсуждаются причины формирования временных профилей потоков частиц с замедленным спадом в течение примерно двух суток. Результаты сравнительного анализа условий в межпланетной среде во время наблюдения исследуемых СПС 2024 года и СПС 28.03.2022 и 02.04.2022, временные профили которых имели традиционную форму спада, дают основание предположить, что главной причиной формирования временных профилей потоков частиц с замедленным спадом может быть модуляция потоков частиц с энергией вплоть до 100 МэВ при их распространении в межпланетной среде, в которой в это время на пути частиц находилось несколько крупномасштабных гелиосферных структур: МКВМ и/или областей сжатия перед высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Мюонные телескопы в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) для измерения слабых вариаций космических лучей из области полюса мира**

Германенко А.В.¹; Балабин Ю.В.¹; Гвоздевский Б.Б.¹

¹ ПГИ

email: alex.germanenko@gmail.com

В Апатитах (Кольский полуостров) и Баренцбурге (арх.Шпицберген) установлены идентичные мюонные телескопы. Они выполняют непрерывную регистрацию в течение трех лет. Минимальная энергия первичной частицы космических лучей для мюонных телескопов составляет ~5 ГэВ, а эффективная энергия регистрируемых частиц находится в диапазоне 50-100 ГэВ. Магнитосфера Земли оказывает слабое влияние на частицы такой энергии, можно принять, что поля зрения мюонных телескопов представляют собой геометрические конусы, направленные в зенит. В результате суточного вращения Земли поле зрения мюонного телескопа описывает широкий конус в пространстве. Из общего потока данных были отобраны периоды, когда ориентация поля зрения мюонного телескопа в межпланетном пространстве соответствовала заданному направлению относительно звезд. Интерес представляет в первую очередь направление на северный полюс мира и окрестности. Указанное направление недоступно большинству установленных на земле нейтронных мониторов, составляющих основную часть приборов, выполняющих мониторинг космических лучей. После внесения стандартных корректирующих поправок, связанных с изменением давления и температуры атмосферы, по разработанной специальной методике проводилось дополнительное устранение вариаций, вызванных активностью Солнца (корональные дыры, форбуш-понижения) и происходящих на паре мюонных телескопов синхронно. После внесения поправок эти вариации существенно уменьшались, что давало возможность выявить слабые вариации, связанные с анизотропией космических лучей в межпланетном пространстве, которая может быть обусловлена широтной зависимостью солнечной активности или различиями в ее проявлении в высоких широтах эклиптики. Выполненные наблюдений пары мюонных телескопов в 2022-24 годы соответствуют периоду высокой солнечной активности. Анализ показал, что имеются периоды длительностью 15-20 дней, в которые вариации космических лучей на этих мюонных телескопах превосходит флуктуации в 2-3 раза. Учитывая значительную длительность этих периодов, можно уверенно сказать, что такое отклонение от среднего значение не может быть случайным, а отражает реальную анизотропию космических лучей в области полюса эклиптики. Представленные результаты показывают возможность парой одинаковых мюонных телескопов регистрировать слабые эффекты анизотропии космических лучей, создаваемые проявлениями активности Солнца в высоких широтах эклиптики.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Крупные форбуш-эффекты в 2024 г. на полярных нейтронных мониторах и мюонных телескопах в Апатитах и Баренцбурге**Германенко А.В.¹; Балабин Ю.В.¹; Гвоздевский Б.Б.¹¹ ПГИ

email: alex.germanenko@gmail.com

Полярный геофизический институт имеет по паре идентичных детекторов (нейтронных мониторов и мюонных телескопов) в Апатитах и Баренцбурге (арх.Шпицберген). Мюонный телескоп, установленный в Баренцбурге, практически постоянно принимает потоки космических лучей из направлений на северный полюс эклиптики. На протяжении 2024 г. произошло четыре значительных форбуш-понижения. Также эти форбуш-эффекты являются наиболее мощными за весь 25-й цикл. Самый сильный форбуш-эффект наблюдался 24.03.24. Следующий случился 10.05.24 г. Третий форбуш-эффект получился составным: 06.10.24 произошло умеренное понижение космических лучей, затем на фазе восстановления 10.10.24 после очередной вспышки на Солнце начался второй форбуш-эффект, в сумме вызвавший уменьшение потока космических лучей на ~10 %. На мюонных телескопах в Апатитах и Баренцбурге амплитуда форбуш-эффекта составила примерно вдвое меньшее по сравнению с нейтронными мониторами. Пристальное внимание привлекает последнее форбуш-понижение, начавшееся 26.10.24. Оно имело растянутый фронт, минимум был достигнут только 31.10.24. Особенno выделяется растянутый передний фронт в данных мюонных телескопов. Типичный и обособленный форбуш-эффект имеет резкое начало и медленное, в течение 5-10 дней восстановление. В последнем событии фазы спада и последующего роста примерно одинаковой длительности. Кроме того, минимальный уровень держался около трех дней что нетипично для форбуш-эффекта. Сравнение профилей последнего форбуш-эффекта, полученных на полярных мюонных телескопах, показывает заметные различия, которые указывают на наличие анизотропии космических лучей в области полюса эклиптики.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038,
<https://rscf.ru/project/25-17-20038/> и гранта Министерства образования и науки Мурманской области*

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Модуляция галактических космических лучей малых энергий по данным SOHO/EPHIN с 1996 года по настоящее время**

Григорьева И.Ю.¹; Ожередов В.А.²; Струминский А.Б.²

¹ ГАО РАН

² ИКИ РАН

email: irina.2014.irina@mail.ru

В минимумах солнечной активности (максимумах галактических космических лучей (ГКЛ)) при уменьшении энергии спектр протонов падает и достигает минимума при энергии в несколько единиц МэВ – минимальной энергией протонов ГКЛ в точке наблюдения. А при еще меньших энергиях спектр протонов растет, благодаря «застрявшим» во внутренней гелиосфере солнечным космическим лучам, переходя далее в спектр солнечного ветра. Эти представления, например, изложены в [1]. Интересно оценить спектр ГКЛ в максимумах солнечной активности (СА) и исследовать модуляцию ГКЛ в прошедших 23-м и 24-м и текущем 25-м циклах по данным SOHO/EPHIN. Корректные оценки модуляции ГКЛ малых энергий непосредственно зависят от вычисления фона ГКЛ в различных фазах СА. Вычислен динамически меняющийся фон ГКЛ в канале 4.3-7.8 МэВ и канале 25-53 МэВ EPHIN с 1996 года по настоящее время, и на его основе разработан метод автоматического выделения значимых возрастаний потока солнечных протонов – конгломератов протонных возрастаний [2]. Амплитуда модуляции потока ГКЛ в момент времени t , равная $100 \cdot (I(t) - I_{\max})/I_{\max}$, в канале 4.3-7.8 МэВ положительна и равна 60% в 23-м, 36% в 24-м и 31% в текущем 25-м цикле, а в канале 25-53 МэВ отрицательна и равна 90% в 23-м, 83% в 24-м и 85% в текущем 25-м цикле. Это свидетельствует о солнечном происхождении протонов < 10 МэВ, зарегистрированных в максимумах СА вблизи Земли, что не противоречит представлениям [1]. Введен индекс No , характеризующий отсутствие солнечной протонной активности – число дней без протонных возрастаний. Максимальные $No=1119$ и $No=1020$ соответствуют минимумам СА 23-24 и 24-25. Найдено, что $No=272$ и $No=270$ предшествовали последним протонным событиям 23 и 24 циклов (13 декабря 2006 и 10 сентября 2017).

[1] K. Kecskemeti, Yu. I. Logachev, M. A. Zeldovich, and J. Kota, MODULATION OF THE GALACTIC LOW-ENERGY PROTON SPECTRUM IN THE INNER HELIOSPHERE // ApJ, 2011, 738:173 (10pp). Doi:10.1088/0004-637X/738/2/173 [2] В.А.Ожередов, А.Б.Струминский, И.Ю.Григорьева, СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАКСИМАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ: УСКОРЕНИЕ И/ИЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЕ? // Косм. Иссл. 2025, подано в печать.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Основные причины возрастаний потоков солнечных протонов на фазе роста и в максимуме 25-го цикла солнечной активности**

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

¹ НИИЯФ МГУ

² ФИАН

³ ИПГ

⁴ МГУ, физический факультет

email: dalexav@mail.ru

По данным КА GOES проведен статистический анализ 5-минутных данных возрастаний потоков энергичных протонов (5 – 500 МэВ) во время 58 солнечных протонных событий на фазе роста и в максимуме солнечной активности в 2021 - 2024 гг. Рассматривались следующие основные причины возрастаний: непосредственно солнечные вспышки в рентгеновском диапазоне, межпланетные ударные волны (МУВ), межпланетные корональные выбросы масс (МКВМ) и межпланетные каналы (МК) – магнито-плазменные трубы, соединяющие область ускорения вблизи Солнца с Землей. Всего было проанализировано 98 пиков возрастаний на временных профилях потоков солнечных протонов. Из них 33 имеют характерные диффузионные профили и соответствуют потокам, приходящим непосредственно от солнечных вспышек, 34 возрастания сопровождаются приходом МУВ, 20 – МКВМ и 9 – МК. Для двух возрастаний потоков протонов источники пока найти не удалось. Наибольшую вариабельность демонстрируют потоки протонов с энергией до 30 МэВ, которые существенно модулируются такими структурами как МУВ и МКВМ. Сильная возмущенность внутренней гелиосферы большим количеством этих структур в рассмотренный период объясняет комплексную динамику временных профилей потоков протонов, которая сильно отличает их от простого диффузионного распространения из области ускорения на Солнце. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Оценка влияния КВМ на вариации протонов ПКЛ

Евстафьева Д.Д.¹ Кузьменкова П.С.¹; Астапов И.И.¹; Шутенко В.В.¹

¹ НИИУ МИФИ

email: evstafeva_daria@mail.ru

Возмущения межпланетной среды, вызванные корональными выбросами массы (КВМ), модулируют поток первичных космических лучей (ПКЛ). Вариации интенсивности вторичного излучения на поверхности Земли способны отражать изменения потока ПКЛ. Целью работы является оценка влияния КВМ на траектории и энергии ПКЛ и сравнение результатов с наблюдениями мюонного годографа УРАГАН. Для анализа гелиосферных возмущений используется метод построения обратных траекторий первичных протонов; а для анализа вариаций потока мюонов – метод мюонографии.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Динамика потоков плазмы из корональных дыр на Солнце**

Зельдович М.А.¹; Логачев Ю.И.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: ms.zeldovich@mail.ru

Изучаются потоки плазмы из долгоживущей корональной дыры (КД) в 2006-2009 гг. с целью определения динамики развития и состава плазмы на протяжении существования данной КД. Главное внимание обращено на величину потоков ионов и параметры энергетических спектров ионов с энергией, превышающей среднюю энергию ионов надтепловых энергий, в основном, ионов наиболее распространенных химических элементов: H, He, C, O и Fe. Показано, что основное влияние на вариации потоков частиц оказывает структура и интенсивность магнитного поля, которое проявляется и при отсутствии пространственных структур типа корональных ударных волн.

Пленарный доклад

Граница гелиосферы – теория и эксперимент

Измоденов В. В.¹

¹ ИКИ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова

Структура границы гелиосферы – области, заполненной плазмой солнечного ветра – определяется взаимодействием солнечного ветра с локальным межзвездным облаком, в котором Солнце движется с относительной скоростью ~26 км/с. Течение плазмы в этой области характеризуется наличием гелиопаузы – тангенциального разрыва, отделяющего солнечный ветер от межзвездной среды, гелиосферной ударной волны – волны торможения солнечного ветра, и, возможно, головной ударной волны в межзвездной среде. Характер взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой отличается сложной многокомпонентной и неравновесной природой, в которой существенно 1) влияние гелиосферного и межзвездного магнитных полей, 2) взаимодействие нейтральных и заряженных частиц, 3) образование и перенос энергичных частиц. В докладе будет представлен обзор работ по кинетико-МГД моделированию глобальной структуры гелиосферы и сравнению результатов модели с данными, полученными на космических аппаратах Voyager, Hubble Space Telescope, IBEX и SOHO.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Варианты взаимодействия корональных выбросов массы в гелиосфере и статистика для 24 цикла солнечной активности**

Капорцева К.Б.¹; Вахрушева А.А.¹; Ширяев А.О.¹; Шугай Ю.С.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: kb.kaportceva@physics.msu.ru

Корональные выбросы массы (КВМ) – это проявления солнечной активности в виде выбросов вещества атмосферы Солнца, наблюдаемые в солнечной короне. Распространяющиеся в межпланетном пространстве КВМ получили название межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ). Характер распространения КВМ в гелиосфере может быть описан эмпирическими или МГД-моделями [1]. При этом случаи взаимодействия нескольких КВМ друг с другом являются наиболее сложными в моделировании, однако такие события часто приводят к наиболее сильным геомагнитным возмущениям [2,3]. В данной работе проведено статистическое исследование взаимодействующих КВМ за период 2013–2018 годы на основе данных в базе CCMC CME Scoreboard, каталога МКВМ Ричардсона и Кейн и наблюдений солнечной короны и хромосферы. В этих каталогах есть информация о событиях МКВМ, источниками которых могли быть несколько КВМ, провзаимодействовавших между собой. Исследованы такие параметры взаимодействующих КВМ как скорость, угловые параметры, координаты соответствующего коронального димминга или активной области. Сделаны выводы о характере взаимодействия – фронтальное центральное или периферийное. Проанализировано изменение скорости каждого КВМ вследствие взаимодействия, а также расстояние, на котором произошло взаимодействие согласно Drag Based модели [4]. Эта работа является предварительным шагом для разработки подходов к моделированию взаимодействующих КВМ в гелиосфере при помощи Drag Based модели. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Нейросетевое определение параметров солнечного ветра по наблюдениям Солнца с Земли**Козелов Б.В.¹¹ ПГИ

email: bob-koz@yandex.ru

Состояние Солнца регулярно наблюдается Кисловодской Горной астрофизической обсерваторией и существуют данные наблюдений по крайней мере за несколько лет. В докладе обсуждаются возможности по наблюдениям Солнца с Земли предсказывать геоэффективные параметры солнечного ветра вблизи магнитосферы. Солнечный ветер определяется состоянием Солнца и, в принципе, его формирование и распространение до Земли может моделироваться с различной детализацией, что требует значительных вычислительных ресурсов. В данном случае используется альтернативный нейросетевой подход, ищется непосредственная связь состояния Солнца и параметров солнечного ветра. Состояние Солнца характеризуется изображениями (магнитные поля по СТОП) и/или таблицами (по вспышкам и волокнам). Для тренировки нейросетевой модели использованы часовые данные базы OMNI параметров солнечного ветра. Обсуждаются нейросети, основанные на структурах U-net, результаты тренировки нейросетей для различных геоэффективных параметров солнечного ветра.

О долготном распределении интенсивности ГКЛ, связанном с коротирующими областями взаимодействия: МГД- и СДУ-моделиКрайнев М.Б.¹; Luo Xi²; Калинин М.С.¹¹ ФИАН² Shandong Institute of Advanced Technology

email: mkrainev46@mail.ru

В докладе обсуждаются результаты и подход к их интерпретации моделирования долготного распределения интенсивности протонов ГКЛ, обусловленного коротирующей областью взаимодействия (КОВ), вблизи орбиты Земли для кэррингтоновского оборота 2066 (январь-февраль 2008 г.), относящегося к периоду долгоживущих корональных дыр и устойчивой рекуррентной вариации гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ. Моделирование ГКЛ проведено методом стохастических дифференциальных уравнений (СДУ) в рамках простой МГД-модели КОВ с учётом только дипольных составляющих фотосферного магнитного поля. Обсуждаются пути интерпретации долготной зависимости интенсивности ГКЛ.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Новая система сбора данных для нейтронного монитора**Маурчев Е.А.¹; Янке В.Г.¹; Диценко К.А.¹¹ ИЗМИРАН

email: maurchev1987@gmail.com

Нейтронный монитор (НМ) - инструмент для исследования космических лучей, который надежно эксплуатируется уже более полувека. Благодаря особенности своей конструкции, состоящей из полиэтиленовых замедлителей и отражателей, свинцового генератора и счетчиков, НМ позволяет детектировать вторичные нейтроны, рождающиеся в результате взаимодействия высокоэнергичных первичных космических лучей с атмосферой Земли. Электрический импульс на выходе счетчика формируется благодаря ионизации, вызываемой заряженной частицей, возникающей в результате захвата нейтрона. Много лет для регистрации этих импульсов использовались устаревшие системы. Сейчас, с развитием микропроцессорной техники, стало возможным разрабатывать совершенно новые системы сбора данных. В этой работе представлена реализация такой системы, которая включает в себя непосредственно регистратор, выполненный на базе 8-и разрядного микроконтроллера, периферийных модулей, а также подключаемой GPS\GLONASS-антенны с выносными датчиками температуры и давления. Показаны первые результаты записи скорости счета. Проектируемое устройство предполагается использовать в дальнейшем эксперименте для измерения широтной зависимости скорости счета во время установки НМ на корабль.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Возрастания потоков электронов солнечных космических лучей в 25 цикле солнечной активности по данным экспериментов на спутниках МГУ формата кубсат**

Мягкова И.Н.¹; Богомолов А.В.¹; Богомолов В.В.^{1, 2}; Июдин А.Ф.¹; Свертилов С.И.^{1, 2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: irina@srd.sinp.msu.ru

В работе приведен каталог событий в электронах солнечных космических лучей (СКЛ) за период 2022-2025 гг., созданный на основе данных экспериментов, выполняющихся на спутниках формата кубсат (CubSat), входящих в научно-образовательный проект «Созвездие-270», приуроченный к юбилею Московского университета. Рассматриваемые в работе малые космические аппараты формата кубсат функционируют на круговых полярных орбитах, потоки электронов СКЛ регистрируются ими в полярных шапках на высоте ~550 км при помощи аппаратуры, созданной в НИИЯФ МГУ - сцинтилляционных детекторов ДеКоР-1, ДеКоР-2 и ДеКоР-3. Данные о потоках электронов СКЛ, ускоренных в солнечных вспышках, получаемые на низких полярных орbitах в полярных шапках, представляют научный интерес, поскольку являются фактически единственным источником информации об электронах СКЛ вблизи Земли. Это вызвано тем, что на геостационарной орбите потоки солнечных электронов не могут быть измерены из-за высоких и сильно нестационарных потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли. Информация о потоках электронов, регистрируемых на орбите Земли, также важна для решения ряда прикладных задач. Например, она является одним из ключевых параметров для моделей, рассчитывающей ионизацию земной атмосферы под действием энергичных заряженных частиц, влияющих на химический состав атмосферы и способных вызвать разрушение озонового слоя.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса», проект №24-Ш01-05 «Созвездие 270», а также в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Статистическая модель ускорения КВМ для некоторых протонных событий 24-го и 25-го циклов солнечной активности**Ожередов В.А.¹; Струминский А.Б.¹¹ ИКИ РАН**email:** ozheredov2016@gmail.com

В нашей с соавторами работе [1] было показано, что “ранние” и слабые протонные возрастания от импульсных вспышек могут рассматриваться, как «pattern»-примеры возможного начального развития GLE (Ground Level Enhancement) событий 24-го и 25-го циклов. Этими «pattern»-примерами были события от вспышек 16 июля 2023 (M4.0), 14 мая (X8.7) и 8 декабря (X2.2) 2024, зарегистрированных ACS SPI (The AntiCoincidence Shield of the SPectrometer on the INTEGRAL spacecraft). В свою очередь в работе [2], было показано, что различие между потоками солнечных протонов (СП) и корональными выбросами массы (КВМ) от импульсной вспышки 9 августа 2011 (X6.9) и длительной вспышки 17 мая 2012 (M5.1), что было связано с длительностью процессов ускорения, как СП, так и КВМ. Интересно проверить: а) как различаются свойства КВМ в «pattern»-примерах и их более мощных партнерах? б) различаются ли КВМ в GLE и subGLE событиях? И в) чем выделяются КВМ в мощных протонных возрастаниях от залимбовых источников? Рассматривается 12 протонных возрастаний и ассоциируемые с ними КВМ, которые мы делим на 3 группы по их «pattern»-примерам: 1) 16 июля 2023 - subGLE 27 января 2012, GLE73 28 октября 2021, GLE74 11 мая 2024 и GLE75 8 июня 2024; 2) 14 мая 2024 – GLE72 10 сентября 2017; 3) 8 декабря 2024 – GLE71 17 мая 2012 и группа 4) – залимбовые события – subGLE 6 января 2014, 11 июня 2024 и GLE76 21 ноября 2024. Событие 11 июня 2024 интересно тем, что имеет однозначную привязку к солнечному источнику – залимбовой вспышке STIX и радиоизлучению II типа. К этим 12 КВМ применяется статистическая модель аппроксимации положения КВМ [3]. Для протонных вспышек на видимом диске Солнца установлено, что корональные выбросы массы могли начать свое ускорение до выбранного нулевого времени (нагрев плазмы вспышки до 12 МК (GOES) и начала радиоизлучения на 15.4 ГГц). Ускорения частиц и корональных выбросов массы продолжаются, по крайней мере, во время активной фазы вспышки ($T > 12$ МК). В рассмотренных залимбовых событиях – subGLE 6 января 2014 и GLE76 11, 21 ноября 2024 – характеристики протонных возрастаний и КВМ близки к друг-другу, а событие 11 июня 2024 не укладывается в общую картину из-за позднего и высокого первого появления КВМ, и из-за медленного роста протонного сигнала ACS SPI.

[1] Struminsky A.B. et al., Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than $4 \cdot 10^{-4}$ V/cm // JASR, in press, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.003>. [2] Grigor'eva, I.Yu. and Struminsky, A.B. Formation of sources for solar cosmic rays in eruptive flares X6.9 and M5.1 observed August 9, 2011, and May 17, 2012 // Astron. Rep. 2022. V. 66. No. 6. PP. 481–489. <https://doi.org/10.1134/S106377292206004X> [3] Ozheredov V.A. et al., A statistical model of CME acceleration, Geomagn. Aeron. 2023. V. 63. No. 8. PP. 1197–1209. DOI: 10.1134/S0016793224700373

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Диффузионная модель распространения солнечных космических лучей в межпланетном пространстве**

Петухов С.И.¹; Петухова А.С.¹; Петухов И.С.¹

¹ ИКФИА СО РАН

email: petukhov@ikfia.ysn.ru

Разработан и реализован алгоритм численного решения нестационарного уравнения переноса частиц в диффузионном приближении в спиральном магнитном поле. Рассчитаны характеристики интенсивности частиц в зависимости от расстояния, времени и энергии в безграничном пространстве. Определена динамика спектра частиц на орбите Земли. Проведено сопоставление характеристик интенсивности частиц в событиях с постепенным и внезапным возрастания потока солнечных космических лучей. Определен интегральный по пространству и времени баланс количества частиц, учитывающий инжектированные частицы, частицы, находящиеся в межпланетном пространстве, и частицы, выбывшие вследствие адиабатических потерь энергии. Погрешность численного расчета, определенная по балансу частиц, составляет порядка 1-го процента.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Модуляция галактических космических лучей быстрыми магнитозвуковыми волнами в области предфронта межпланетных ударных волн**Стародубцев С.А.¹¹ ИКФИА СО РАН

email: starodub@ikfia.ysn.ru

Изучаются эффекты модуляции галактических космических лучей (КЛ) высоких энергий ($E > 500$ МэВ) в области предфронта квазипараллельных межпланетных ударных волн (МУВ). С января 2009 г. по май 2024 г. рассмотрены 37 событий регистрации на орбите Земли МУВ этого типа. К анализу привлечены 1-минутные измерения параметров околоземного космического пространства на космическом аппарате WIND и нейтронных мониторов станций Якутск и Бухта Тикси. Показано, что модуляция потока галактических КЛ быстрыми магнитозвуковыми волнами (БМЗВ) в области частот $\approx 10^{-4} \div 10^{-2}$ Гц (периоды $T \approx 3$ час $\div 100$ с), приводит к возникновению значимых вариаций (так называемых «флуктуаций») галактических КЛ в области предфронта МУВ. Сделан вывод, что БМЗВ генерируются КЛ гелиосферного происхождения с энергией $E \sim 1$ МэВ, которые генетически связаны с квазипараллельными МУВ и характеризуются большими величинами потоков и градиентов.

Полученные результаты являются физической основой для разработки методов прогноза прихода к Земле геоэффективных крупномасштабных возмущений солнечного ветра на основе наземных измерений КЛ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН *FWRS – 2021 – 0012*.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Использование морфологических признаков сигналов GLE в нейтронных мониторах для их классификации**

Челидзе К.С.¹; Петрухин А.А.¹

¹ НИЯУ МИФИ

email: kschedidze@mephi.ru

Различные активные процессы на Солнце могут приводить к появлению солнечных энергетических частиц. Некоторые из них ускоряются до энергий, предположительно, больше ГэВ, что может вызвать наземные повышения темпом счёта нейтронных мониторов, называемые GLE (от анг. Ground Level Enhancement). Большинство работ по теме GLE направлены на рассмотрение их источников и механизмов ускорения. В этой работе предлагается исследование проблемы классификации GLE с точки зрения сигналов в нейтронных мониторах. Для этого был проведён морфологический анализ событий и выделены их общие признаки. В результате определены четыре класса событий, каждый из которых отличается характерной формой сигнала. При дальнейшем рассмотрении событий внутри классов были выявлены общие временные и амплитудные признаки. Также в работе рассматривается сезонное распределение регистрируемых событий. Данное исследование позволяет по-новому взглянуть на явление GLE, что в дальнейшем, возможно, позволит пролить свет на процессы их генерации.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Модуляция галактических космических лучей в гелиосфере**

Шестаков Д.А.¹; Измоденов В.В.²

¹ НИУ ВШЭ

² ИКИ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова

Галактические космические лучи (ГКЛ) – заряженные частицы (в основном протоны) с энергиями выше 10 МэВ/нуклон, источник которых находится далеко за пределами Солнечной системы. Проникая из межзвездной среды, ГКЛ подвергаются гелиосферной модуляции, то есть их интенсивность потока меняется при движении через гелиосферу. Ключевое влияние на траектории ГКЛ оказывает гелиосферное магнитное поле. В данной работе представлены результаты численного моделирования проникновения ГКЛ через гелиосферу до орбиты Земли. Исследование основано на численном решении уравнения переноса Паркера, описывающего эволюцию функции распределения ГКЛ, осредненной по питч-углам. Была рассмотрена стационарная сферически-симметричная постановка задачи, где коэффициент диффузии зависит от положения в пространстве и энергии частиц. Для численного решения были применены конечно-разностные методы (метод установления и схема Кранка-Николсона) и метод стохастических дифференциальных уравнений. Результаты численных подходов сравнивались с аналитическим решением для случая постоянного коэффициента диффузии. Кроме того, была исследована задача с анизотропным тензором диффузии и межпланетным магнитным полем, имеющим форму спирали Паркера (рассматривалась плоская и волнообразная конфигурация токового слоя). Полученные результаты были сопоставлены с данными работы Jokipii and Kopriva (1979). Основные выводы работы:

Энергетический спектр ГКЛ вблизи орбиты Земли существенно зависит от пространственной и энергетической зависимости коэффициента диффузии. Смена полярности МП и структура гелиосферного токового слоя оказывают определяющее влияние на проникновение ГКЛ через гелиосферу до околоземного пространства. Эффект модуляции ГКЛ значительно усиливается в период солнечного максимума при отрицательной полярности МП.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Геоэффективное взаимодействие КВМ и ВСП 28 мая 2011 года**

Ширяев А.О.¹; Капорцева К.Б.¹; Шугай Ю.С.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: anton.o.shiryaev@gmail.com

Межпланетные корональные выбросы массы — вошедшие в межпланетное пространство выбросы несущей организованное магнитное поле плазмы Солнца [Kilpua, Koskinen, Pulkkinen, 2017]. Фоновый солнечный ветер (СВ) оказывает существенное влияние на распространение МКВМ в межпланетном пространстве [Vršnak и др., 2013] Солнечный ветер можно разделить на низкоскоростную и высокоскоростную компоненты, имеющие различное происхождение. Высокоскоростные потоки солнечного ветра ассоциированы с корональными дырами (КД) [Grandin, Aikio, Kozlovsky, 2019]. Они могут взаимодействовать с МКВМ, влияя на траекторию и параметры распространения КВМ [Gopalswamy и др., 2009], но влияние КВМ на ВСП и ассоциированные с ними КД менее изучено. В работе произведен анализ МКВМ, зарегистрированного у Земли 28 мая 2011 года, и ВСП, наблюдавшихся в мае 2011 года. Расположение предполагаемых источников МКВМ согласно каталогу Richardson & Cane [Cane, Richardson, 2003] сопоставлено с границами КД, предположительно являвшейся источником ВСП. Рассмотрена динамика изменения скорости СВ по данным БД OMNI [King, Papitashvili, 2005] и расположения и площади КД на предыдущем и следующем оборотах Солнца. Показано, что МКВМ достиг Земли на фронте ВСП. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048,
<https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Почему не каждый Форбуш-эффект связан с геомагнитной бурей?**

Шлык Н.С.¹; Белов А.В.¹; Абунина М.А.¹; Белов С.М.¹

¹ ИЗМИРАН

email: nshlyk@izmiran.ru

Выделены и исследованы события Форбуш-эффектов в галактических космических лучах (по данным сети нейтронных мониторов) и сопутствующих геомагнитных возмущений за длительный период с 1957 по 2024 гг. Проанализированы статистические связи между различными параметрами вариаций потока космических лучей и индексами геомагнитной активности. Установлено, что величина Форбуш-эффектов нелинейно зависит от класса геомагнитной бури. Найдена умеренная корреляция между экстремальными значениями различных индексов геомагнитной активности (Ap , K_p , Dst) и характеристиками космических лучей. Показано, что одновременная регистрация экстремальных значений параметров космических лучей и геомагнитной активности происходит далеко не всегда, а зависит от знака Bz -компоненты межпланетного магнитного поля в конкретном событии.

Секция «Межпланетная среда и солнечные энергичные частицы»**Взаимодействие корональных выбросов массы**Якунина Г.В.¹¹ ГАИШ МГУ**email:** yakunina45@yandex.ru

Корональные выбросы массы (КВМ) на Солнце взаимодействуют с различными структурами. Взаимодействие между КВМ и магнитными полями в короне и межпланетном пространстве, а также солнечным ветром определяет распространение и эволюцию самого КВМ. Поскольку КВМ представляют собой расширяющуюся структуру намагниченной плазмы, процесс столкновения КВМ довольно сложен. Взаимодействия между последовательными КВМ могут привести к экстремальной буре в межпланетном пространстве. Большое количество сильнейших штормов было вызвано взаимодействием выбросов друг с другом. Это указывает на решающее значение взаимодействий КВМ-КВМ как для фундаментальной физики плазмы, так и для прогноза космической погоды. Сильнейшая магнитная буря в 23-м цикле произошла 20.11.2003 г. ($Dst = -472$ нТл, $K_p = 9$). Две вспышки (M3.2 и M3.9) сопровождались двумя КВМ, которые зафиксировал спутник LASCO. Первый КВМ имел скорость ≈ 1223 км/с и ширину -104° . Второй КВМ типа гало наблюдался в 08:50 UT, скоростью ≈ 1660 км/с. Серия выбросов в мае 2024 г. привела к сильной геомагнитной буре, близкой к той, что наблюдалась в октябре 2003 г., индекс Dst достиг ~ -412 нТл. Экстремальная солнечная буря в мае 2024 г. стала следствием множественных взаимодействующих КВМ. Сложные события, состоящие из последовательных выбросов из одной и той же АО, приводят к взаимодействию между последовательными КВМ.

Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи

Универсальное определение границы между внутренним и внешним радиационными поясами, положения максимума потоков внешнего пояса и внутренней границы колышевого тока

Азра-Горская К.Ж.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: clemenceanastasia@gmail.com

Разработаны универсальные численные алгоритмы для определения положения границы между внутренним и внешним радиационными поясами, а также для определения положений максимумов потоков электронов внешнего радиационного пояса и внутренней границы колышевого тока.

Алгоритмы разработаны и протестированы на основе экспериментальных данных потоков частиц, полученных с космического аппарата Van Allen Probes A во время двух магнитных бурь 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015. Магнитные бури 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015 имели похожие профили Dst-вариации, но были вызваны разными условиями в межпланетной среде. Энергетический диапазон электронов составляет $\sim 100 \div 4216$ кэВ (прибор MagEIS), а протонов $\sim 1 \div 52$ кэВ (прибор HOPE).

В алгоритмах учтены структура и характеристики радиационных поясов на разных этапах развития магнитных бурь, на основе которых подобраны различные критерии и пороговые значения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Динамика энергетических спектров в максимумах потоков протонов колышевого тока и электронов внешнего радиационного пояса во время двух магнитных бурь 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015**

Азра-Горская К.Ж.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}, Власова Н.А.¹

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: clemenceanastasia@gmail.com

Представлены результаты сравнительного анализа динамики колышевого тока и потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли во время двух магнитных бурь 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015. Магнитные бури 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015 имели похожие профили Dst-вариации, но были вызваны разными условиями в межпланетной среде. Начало бури 17.03.2015 обусловлено медленным возрастанием давления солнечного ветра при преимущественно южной ориентации межпланетного магнитного поля, что привело к традиционному развитию бури. Буря 22-23.06.2015 была вызвана внезапным сильным ударным воздействием солнечного ветра и развивалась преимущественно при северной ориентации межпланетного магнитного поля.

Работа выполнена на основе экспериментальных данных по потокам частиц, полученных с космического аппарата Van Allen Probes A. Энергетические диапазоны исследуемых частиц: для электронов – $\sim 100\div 4216$ кэВ (прибор MagEIS), для протонов $\sim 1\div 52$ кэВ (прибор HOPE). Во время двух магнитных бурь спутник находился в разных секторах магнитосферы: в марте 2015 г. в вечерне-ночном секторе, в июне 2015 г. в до-вечернем и пост-вечернем секторах. Разработаны универсальные численные алгоритмы для определения положения границы между внутренним и внешним радиационными поясами, а также, для определения положений максимумов потоков электронов внешнего радиационного пояса и внутренней границы колышевого тока.

Восстановлена динамика энергетических спектров в максимумах колышевого тока и внешнего радиационного пояса, а также, динамика положения границы между внутренним и внешним радиационными поясами для событий 17-18.03.2015 и 22-23.06.2015.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Полярные сияния планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна по данным КА Voyager 2 и фотографиям космических телескопов Хаббл (УФ диапазон) и Джеймс Вебб (ИК излучение)**

Алексеев И.И.¹; Невский Д.В.¹; Лаврухин А.С.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: iialexeev@mail.ru

На основе модели (Kobel and Flückiger, 1994) проведена разработка модели магнитного поля в переходном слое магнитосферы Меркурия, Земли, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Модель представляет магнитное поле в переходном слое, заключенном между двумя параболоидами вращения, приближенно описывающими головную ударную волну и лобовую магнитопаузу, с учётом внешнего межпланетного магнитного поля. Геометрия данной модели соответствует параболоидной модели магнитосферы (Alexeev2010). В результате получена зависимость магнитного поля в переходном слое B_x, B_y, B_z от координат x, y, z в солнечно-магнитосферной планетарной системе координат. Рассмотрена совместная модель универсального переходного слоя и параболоидной модели магнитосферы-гиганта, которые объединяют однородное магнитное поле $b = k^*B_{imf}$, k – определяющее эффективность пересоединения магнитосферного и межпланетного полей ($k=0.2$). Взаимная ориентация и относительная величина планетарного диполя и поля солнечного ветра B_{imf} определяет геометрию пучка открытых силовых линий и связанных с ними продольных токов. А это, в свою очередь фиксирует геометрию форшока в окрестности планеты, который заполняется пучками отраженных фронтом ускоренных частиц. Ионосферное «пятно» открытых силовых линий и их проскальзывание на уровне ионосферы приводит к появлению продольного ускорения электронов и в итоге к полярным сияниям, которые зафиксированы в ИК диапазоне на снимках JWST Юпитера, Урана и Нептуна (Nichols 2025, Milan 2025).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 25-22-00468.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Изменения подходов к описанию магнитосферной динамики (краткий обзор)**

Антонова Е.Е.¹; Степанова М.В.²; Кирпичев И.П.³; Овчинников И.Л.¹; Воробьев В.Г.⁴; Ягодкина О.И.⁴; Антонюк Г.И.¹

¹ НИИЯФ МГУ

² University of Santiago de Chile

³ ИКИ РАН

⁴ ПГИ

email: elizaveta.antonova@gmail.com

Исследования применимости подхода, в соответствии с которым характерные особенности магнитосферной динамики описываются с привлечением понятия пересоединения магнитных силовых линий, продемонстрировали неэффективность данного подхода при описании конкретных магнитосферных явлений, включая формирование и динамику магнитопаузы, магнитосферные суббури и бури. Часто удается проследить и восстановить связи различных магнитосферных возмущений с возмущениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Выделение особенности такой динамики дает возможность восстановить причинно-следственные связи магнитосферных процессов с изменениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля не используя приближение вмороженности нарушенного в определенных точках и линиях. При этом необходим анализ устойчивости характеристик плазменных областей магнитосферы и уровня наблюдаемых в них турбулентных флуктуаций. Даётся краткий обзор последних результатов работ в данном направлении.

Antonova E.E., Stepanova M.V., Kirpichev I.P. (2023). Main features of magnetospheric dynamics in the conditions of pressure balance, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 242.105994. doi:10.1016/j.jastp.2022.105994

Antonova E. E., Kirpichev I., and Stepanova M. (2025). Hall Scale in the Earth's Magnetosphere and Magnetospheric Substorm. Geophysical Research Letters, 52, e2024GL114315. doi:10.1029/2024GL114315

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**The role of poloidal Pc4 pulsations in acceleration of electrons up to relativistic energies at the Earth's magnetosphere**Белаховский В.Б.¹; Пилипенко В.А.²¹ ПГИ² ИФЗ РАН**email:** belakhov@mail.ru

An increase in electron fluxes to relativistic energies (~ 1 MeV) in the Earth's outer radiation belt is one of the most important factors in space weather, since electrons of these energies can damage equipment on satellites. However, the mechanism of electron acceleration is still a matter of debate in scientific circles. Most researchers associate the acceleration of electrons either with their interaction with toroidal waves of the Pc5 range [1] or with VLF chorus emissions [2]. However, the growth of ULF and VLF activity in the magnetosphere ends, as a rule, more than a day before the start of the growth of relativistic electrons [3], and their flux reaches a maximum after a magnetic storm. Therefore, the question arises as to what mechanisms are responsible for the relativistic electron fluxes continuing to increase after the decline in Pc5 and VLF activity. Tverskoy's betatron mechanism, associated with the restoration of the magnetospheric magnetic field [4], cannot be a universal explanation, because an increase in relativistic electron fluxes occurs frequently and during very weak magnetic storms.

In our opinion, poloidal Pc4 pulsations can be a quite likely candidate for the role of an electron accelerator up to MeV energies. These waves are observed only under calm geomagnetic conditions; they can last for several days. The report presents cases where Pc4 pulsations were recorded by the GOES satellites during a period of increasing relativistic electron fluxes. Observations show that the rise and fall of MeV electron fluxes in geostationary orbit occurs almost simultaneously with the rise and fall of energetic proton fluxes (95 keV). Thus, Pc4 pulsations turn out to be an agent that transfers energy from energetic protons to electrons of MeV energies. The mechanism of excitation of Pc4 waves and subsequent acceleration of electrons is associated with the resonant bounce-drift interaction of waves and particles.

1. Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations. *Geophys Res Lett* 26:3273–3276. 1999.
2. Thorne R.M., W. Li et al. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus, *Nature*, 504, 411. 2013.
3. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Antonova E.E., Miyoshi Y., Kasahara Y. et al. Relativistic electron flux growth during storm and non-storm periods as observed by ARASE and GOES satellites // *Earth, Planets and Space*, 2023, Vol.75, Article number:189.
4. Tverskoy B.A., Formation mechanism of the ring current structure of magnetic storms, *Geomagn. Aeronomy*, 37, N5, 29-34, 1997 (in Russian).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»*Пленарный доклад***Экзопланеты**Беленъкая Е.С.¹;¹ НИИЯФ МГУ

Исследование экзопланет – активно развивающаяся ветвь астрофизики, лежащая на стыке астрономии, геофизики и физики магнитосфер планет. Исследователи из этих областей науки используют свои знания для того, чтобы объяснить непрерывно нарастающий объем наблюдений. При этом оказывается, что как сами экзопланеты, так и механизмы их взаимодействия с окружающей средой могут сильно отличаться от того, что происходит в Солнечной системе. Таким образом, мы знакомимся с новыми объектами, с новыми типами магнитосфер и узнаем больше о нашей гелиосфере.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Влияние металличности родительской звезды на образование планет**Буслеева Э.Е.¹; Беленькая Е.С.¹¹ НИИЯФ МГУ

email: buslaeva.ee21@physics.msu.ru

Считается, что звезды с экзопланетами имеют более высокую металличность, чем звезды без планет [1]. Это может быть связано с большим количеством тверого материала для формирования планетизималей в протопланетных дисках [1]. В настоящей работе для систем с числом экзопланет от одной до семи было построено распределение по металличности родительской звезды. Корреляции между числом систем с большим количеством планет и более высокой металличностью родительской звезды не наблюдается. Наибольшее число систем с одной и несколькими планетами подтверждено у звезд с металличностью близкой к солнечной. При этом распределение по металличности звезды для каждого рассмотренного числа экзопланет в системе имеет одинаковый вид и положение максимума.

В исследовании Adibekyan было найдено, что гигантские планеты чаще обнаруживаются у звезд с более высокой металличностью [2]. Это связывают с тем, что высокое содержание металлов в протопланетном диске способствует образованию массивных ядер, которые затем могут аккрецировать газ и формировать гигантские планеты [2]. В настоящей работе была рассмотрена зависимость плотности планеты от металличности родительской звезды систем, содержащих от одной до пяти экзопланет. Более высокая плотность характерна для каменистых планет, а газовые гиганты, как правило, имеют более низкую плотность. Ожидалось, что у звезд с большей металличностью увеличится число планет с низкой плотностью. В настоящей работе показано, что наибольшее число планет всех типов подтверждено у звезд с металличностью близкой к солнечной или чуть больше. Рост количества газовых планет у более металлических звезд останавливается на значении 0,3 dex для многопланетных систем и 0,4 dex для однопланетных.

Для систем с одной и несколькими экзопланетами (до пяти) было проведено сравнение распределения по характеристикам, определяющим плотность планеты: массе и радиусу. Так же построены распределения по радиусу орбиты и периоду обращения. При наличии отличий в этих распределениях для однопланетных и мультипланетных систем можно было бы предположить существование большого числа однопланетных систем, которые являются таковыми не из-за ограничения возможностей обнаружения планет, а по условиям их формирования. Распределения по радиусу орбиты и периоду обращения у систем с одной и несколькими планетами по своему виду не отличаются друг от друга. В распределение по радиусу планеты у систем есть общий максимум 1,6 – 3,2 радиуса Земли, второй максимум 11,2 – 12,8 радиусов Земли есть только у систем с одной подтвержденной планетой и может соответствовать истинно однопланетным системам. Распределение по массе у однопланетных и мультипланетных систем различается: в мультипланетных системах чаще встречаются планеты меньшей массы, и число планет резко падает с ростом массы, из однопланетных системах число планет уменьшается более плавно, что может говорить о том, что в момент формирования системы на каждую планету в мультипланетной системе вещества в протопланетном диске тратилось меньше, чем на планету в однопланетной системе.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Расчет плотности электронов ВРПЗ в фазовом пространстве на основе параболоидной модели магнитосферы**Груздов Д.С.^{1,2}; Калегаев В.В.^{1,2}¹ НИИЯФ МГУ² МГУ, физический факультет**email:** d.gryzd@mail.ru

Среди основных возможных механизмов ускорения электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) выделяют два основных: радиальная диффузия; локальное ускорение электронов, уже присутствующих в ВРПЗ. Оба типа связаны с нарушением адиабатических инвариантов – при радиальной диффузии нарушается третий инвариант с сохранением первых двух, при локальном ускорении нарушается первый инвариант.

Одним из перспективных методов анализа процессов ускорения электронов во внешнем поясе является расчет плотности электронов в фазовом пространстве. Этот метод основан на переходе в пространство координат адиабатических инвариантов μ, K, L^* и получении функции плотности частиц $f(\mu, K, L^*)$, которая не зависит от адиабатических изменений энергии электронов.

В данной работе подробно описан метод расчета функции $f(\mu, K, L^*)$ и представлен пример реализации с использованием языков Python и Fortran. Реализация основана на методе, описанном в работе [Green and Kivelson]. В качестве модели магнитного поля Земли используется параболоидная модель A2000.

Преобразования данных из $j(E, \vec{x}, \alpha, t)$ в $f(\mu, K, L^*, t)$ требуют нескольких шагов и интенсивных вычислений. Сначала вычисляются локальные питч-углы, соответствующие фиксированному значению K , после чего рассчитывается энергия частиц, соответствующая фиксированным μ, K , вычисляется значение плотности f и, наконец, трассируется полный дрейф частиц вокруг Земли и вычисляется значение третьего инварианта L^* .

Применение подобного расчета для каждой точки орбиты спутника при пересечении ВРПЗ позволит получить $f(L^*)$ при заданных μ, K . Реализованный расчет не зависит от выбора космического аппарата, главное – чтобы инструменты КА позволяли получать информацию о потоках частиц в зависимости от их питч-углов, а также о магнитном поле в точке наблюдения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

Green J. C., Kivelson M. Relativistic electrons in the outer radiation belt: Differentiating between acceleration mechanisms // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2004. – Т. 109, A3

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Динамика потоков электронов внешнего радиационного пояса во время продолжительной суббуровой активности по данным спутников Van Allen Probes и Метеор-М2**Груздов Д.С.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}, Власова Н.А.¹¹ НИИЯФ МГУ² МГУ, физический факультет

email: d.gryzd@mail.ru

Внешний радиационный пояс Земли (ВРПЗ) является одной из самых динамичных областей в магнитосфере. Наиболее существенные изменения ВРПЗ происходят под влиянием солнечного ветра и связаны с геомагнитными возмущениями. Во время таких событий могут наблюдаться сильные вариации потоков энергичных электронов, а также, изменения пространственных параметров внешнего пояса: максимума ВРПЗ или его высокоширотной границы.

Вариации захваченных (на приэкваториальной орбите космических аппаратов (КА) Van Allen Probes-А; -В) и квазизахваченных (на низкой полярной орбите спутника Метеор-М2) потоков электронов ВРПЗ изучались на разных фазах геомагнитных бурь разной интенсивности. Временные и пространственные профили потоков электронов в разных энергетических диапазонах ($>0,1$, $>0,3$, $>0,7$ и >2 МэВ) были восстановлены из спутниковых измерений, полученных во время нескольких пересечений радиационного пояса. Для анализа процессов ускорения электронов ВРПЗ были рассчитаны профили плотности электронов в фазовом пространстве в зависимости от параметра Родерера L^* на основе данных КА Van Allen Probes о потоках электронов в зависимости от их локальных питч-углов. Магнитное поле рассчитывалось с использованием параболоидной модели магнитосферы A2000.

В работе рассмотрены три умеренно-слабые магнитные бури, сопровождаемые продолжительной суббуровой активностью: 01-05.02.2015, 6-12.11.2015 и 11-16.10.2017. Восстановлены пространственно-временные профили потоков электронов в максимуме ВРПЗ на высоких широтах (Метеор-М2) и вблизи геомагнитного экватора (Van Allen Probes). При использовании данных Метеор-М2, близких по времени к моментам наблюдений максимальных потоков VAP (не более 30 минут), наблюдается сходная динамика потоков на низких и высоких орbitах.

На главной фазе бурь суббуровые активизации и резонансное взаимодействие частиц с волнами ОНЧ диапазона приводят к ускорению частиц меньших энергий (100-300 кэВ); к концу фазы восстановления растет жесткость энергетического спектра, поток частиц с энергией $E > 2$ МэВ увеличивается примерно на 1.5-2 порядка. Во время главных фаз бурь 06-12.11.2015 и 11-16.10.2017 потоки частиц с $E > 0.3$ МэВ, $E > 0.7$ МэВ, $E > 2$ МэВ уменьшаются, что связано, предположительно, с Dst-эффектом и потерями на магнитопаузе.

Во время события 11-16.10.2017 наблюдается характерный отклик ВРПЗ на суббуровые инъекции в начале события: предположительно повторяющееся многократное воздействие индукционного электрического поля, генерируемого в ходе серии суббурь, на частицы меньших энергий приводит к возрастанию потоков. Для событий 01-05.02.2015 и 06-12.11.2015 подобного явления не наблюдается.

Помимо прочего, в событии 11-16.10.2017 наблюдается формирование «дополнительного» радиационного пояса релятивистских электронов с максимумом на $L \sim 4.8$. Присутствует временная задержка в формировании дополнительного максимума для частиц разных энергий, что связано с разной эффективностью ускорения электронов разных энергий. Двухпиковая структура наблюдается как на высоких широтах, так и вблизи геомагнитного экватора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Моделирование параметров плазмы в магнитослое Земли по данным многолетних наборов спутниковых измерений**Губайдулин Н.Т.¹; Цыганенко Н.А.¹; Семенов В.А.¹; Еркаев Н.В.²¹ СПбГУ² СФУ**email:** nikita.gub22@gmail.com

В работе представлена эмпирическая модель основных скалярных параметров плазмы - объемной плотности и тепловой энергии протонов - в магнитослое Земли, построенная на основе многолетних спутниковых данных за период 2001-2024 гг. Использованы данные ~1,150,000 одноминутных измерений космических аппаратов Themis, Cluster и MMS. Входными параметрами модели служат плотность, скорость и температура протонов солнечного ветра, компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), а также угол наклона геодиполя. Полученные результаты демонстрируют хорошее согласие с теоретическими предсказаниями, включая скачок плотности и температуры на головной ударной волне, а также зависимость моделируемых величин от параметров солнечного ветра. Исследованы асимметрии в распределении параметров магнитослоя, связанные с ориентацией ММП и наклоном геодиполя, отражающие роль пересоединения магнитных полей в формировании полученных структур. Результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения динамики магнитослоя и его реакции на изменения в межпланетной среде.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Соотношение между интенсивностью волн в магнитосфере и потоками высыпающихся энергичных заряженных частиц**

Демехов А.Г.¹; Яхнина Т.А.¹; Попова Т.А.¹

¹ ПГИ

email: andrei@ipfran.ru

Теоретические представления о соотношении потоков высыпающихся энергичных заряженных частиц и интенсивностью электромагнитных волн в магнитосфере сопоставляются с данными наблюдений волн спутниками Van Allen Probes вблизи геомагнитного экватора и потоков высыпающихся частиц, измеряемых низкоорбитальными спутниками NOAA/POES. Рассмотрен интервал геомагнитной бури 10-17.10.2017 г., когда апогей орбит спутников Van Allen Probes находился в утреннем и дневном секторах и они наблюдали хоровые ОНЧ излучения, связанные с суббуровой активностью. По данным об интенсивности ОНЧ волн вычисляется коэффициент питч-угловой диффузии и с использованием данных о потоках энергичных электронов на экваторе делается оценка потоков высыпающихся электронов на малых высотах, которая сравнивается с результатами измерений потоков на низкоорбитальных спутниках. Продемонстрировано неплохое согласие между вычисленными по волновым данным и наблюдаемыми потоками высыпающихся энергичных электронов. При этом для объяснения измеряемых потоков релятивистских электронов (с энергиями > 800 кэВ) нужно предполагать, что свистовые волны достигают больших геомагнитных широт (40°) с сохранением малых углов распространения, т.е. в канализированном режиме.

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

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в период низкой геомагнитной активности 7-24 января 2018 г.**

Зыкина А.А.^{1,2}; Калегаев В.В.^{1,2}; Власова Н.А.¹; Азра-Горская К.Ж.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: anya.zykina@gmail.com

Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли во время трех последовательных периодов пониженной геомагнитной активности 7-13, 14-18 и 19-25 января 2018 года. Проведен сравнительный анализ вариаций параметров межпланетной среды и отклика внешнего радиационного пояса на внешнее воздействие. Работа основана на экспериментальных данных о потоках релятивистских электронов, полученных с геостационарного ИСЗ GOES и с КА Van Allen Probes A (VAP-A), орбита которого проходит через сердцевину внешнего радиационного пояса вблизи экваториальной плоскости.

Показано, что условия в солнечном ветре обусловили разную динамику магнитосферы и потоков захваченных электронов внешнего радиационного пояса: 7-13.01 под воздействием импульса давления солнечного ветра произошло сжатие магнитосферы, что привело к смещению максимума радиационного пояса внутрь и существенному уменьшению потоков электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите; 14-18.01 при южной Bz -компоненте межпланетного магнитного поля развилась слабая геомагнитная буря с суббуровой активностью и на фазе восстановления, в результате образовался новый радиационный пояс электронов с $E \sim 1-2$ МэВ с максимумом на $L \sim 5,7$. Геомагнитные возмущения 19-25 января привели к дальнейшему возрастанию потоков электронов.

Динамика потоков электронов на протяжении трех рассматриваемых периодов сформировалась под воздействием межпланетной среды и суббуровой активности магнитосферы. Приход ускоренных потоков солнечного ветра приводил к развитию слабых магнитных возмущений, вызывающих падение потоков на геостационарной орбите. Суббуровые активации приводили к восстановлению потоков.

Постепенное возрастание потоков энергичных электронов может быть обусловлено ускорением кратковременными импульсами электрического поля, которые возникают наочной стороне магнитосферы при суббуровых активациях [Кропоткин, 2021]. Суббуровая активность возрастала на протяжении всего рассматриваемого периода, что стало одной из причин повышения интенсивности потоков электронов на геостационарной орбите.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 22-62-00048.

Кропоткин А.П. Об ускорении электронов внешнего радиационного пояса локальными электрическими полями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 4. С. 411–417. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021030093>

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Процессы ускорения и высыпания энергичных электронов ВРПЗ во время геомагнитных возмущений разных типов.**

Иванова А.Р.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}, Демехов А.Г.³; Яхнина Т.А.³ Груздов Д.С. ^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

³ ПГИ

email: ivanova.ar20@physics.msu.ru

По данным спутников NOAA POES/МЕТОР была собрана статистика высыпаний энергичных электронов из внешнего радиационного пояса Земли во время геомагнитных возмущений двух типов. Рассматривалось два события: слабая, но продолжительная магнитная буря типа HILDCAA (11-16.10.2017) и мощная, но короткая изолированная магнитная буря (23-30.03.2023). Исследуемым параметром являлся наклон энергетического спектра (как мера соотношения потоков электронов разных энергий) высыпаний, вызванных различными механизмами питч-углового рассеяния.

Такой анализ позволяет определить количество «чистых» (вызванных одним механизмом рассеяния) и «смешанных» (вызванных сразу несколькими механизмами рассеяния) высыпаний электронов. Было установлено, что в событиях типа HILDCAA примерно 50% высыпаний, вызванных взаимодействием с ЭМИЦ волнами, являются «смешанными» (в изолированной буре высыпаний из-за ЭМИЦ волн почти не обнаружено). Вероятно, «смешение» механизмов происходит из-за мощной ОНЧ-активности (генерации хоровых волн) во время продолжительных суббурь, поэтому доля «смешанных» высыпаний максимальна в секторе 0–12 MLT и уменьшается к вечернему сектору.

Также обнаружено, что динамика наклона спектра высыпаний, вызванных рассеянием на кривизне магнитной линии, сильно отличается для двух типов геомагнитных возмущений. По-видимому, во время события типа HILDCAA два конкурирующих процесса уравновешивают друг друга: инжекция энергичных электронов и ускорение электронов последовательными суббурями до релятивистских энергий. Во время изолированной магнитной бури (в отсутствии последовательных суббурь) остается только инжекция энергичных электронов. Высыпания, вызванные рассеянием на кривизне магнитной линии, являются «чистыми».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–62-00048,
<https://rsrf.ru/project/22-62-00048/>.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Протонные и электронные сияния во время магнитной бури
1 января 2025 г. Наземные и спутниковые наблюдения**Иевенко И.Б.¹¹ ИКФИА СО РАН

email: ievenko@ikfia.ysn.ru

Протонные сияния в эмиссиях атомарного водорода возникают как результат высыпаний энергичных протонов и их перезарядки на высотах слоя Е ионосферы. Высыпания протонов происходит из области магнитосферы с изотропным распределением потоков заряженных частиц. Изотропизация может возникать вследствие пинч-углового рассеяния на магнитном экваторе с большой кривизной силовых линий в токовом слое [Сергеев и Мальков, 1988; 1992]. Низкоширотная граница изотропных потоков частиц регистрируется низковысотными спутниками с полярной орбитой. Во время протонного сияния возможна селективная регистрация высыпаний низкоэнергичных электронов в эмиссии 630.0 нм [OI] на высотах области F2 ионосферы (электронных сияний).

В этом сообщении представлены результаты анализа наблюдений динамики протонного и электронного сияний на меридиане Якутска во время магнитной бури с минимумом SYM-H ~ -230 нТл 01 января 2025 г. Буря была обусловлена увеличением электрического поля Еу утром-вечер солнечного ветра до ~12 мВ/м после 0810 UT. Усиление магнитосферной конвекции вызвало возникновение широкой полосы свечения в эмиссии водорода 486.1 нм (H_b) на широтах диффузного сияния в эмиссии 630.0 нм в вечернем секторе MLT. Полоса двигалась от северного горизонта и прошла зенит станции со скоростью ~ 180 м/с. После 1230 UT протонное сияние наблюдалось в интервале геомагнитных широт 53–57° с максимальной интенсивностью эмиссии H_b ~450 Рл. В эмиссии 630.0 нм в это время регистрировались широкие полосы электронных сияний экваториальное и полярное зенита станции наблюдений в интервале широт 51–64° (границы зоны сияний). Три суббури вызвали активизацию электронных сияний по всему небу. С ~18 UT сияния быстро затухают при отрицательном значении Еу.

Спутник NOAA-19 зарегистрировал изотропную границу потоков энергичных протонов и электронов на меридиане оптических наблюдений в ~1151 UT. Широтное распределение потока высыпающихся протонов на границе соответствовало положению дуги в эмиссии H_b. Два прохода спутника SWARM-C вблизи меридиана наблюдений в ~1125 и ~1259 UT показали быстрое смещение к экватору субаврорального пика электронной температуры и, соответственно, положения проекции плазмопаузы во время главной фазы магнитной бури. При этом, изотропная граница находилась на 2–3° полярнее широты проекции плазмопаузы.

Анализ наблюдений дает основание полагать, что изотропизация потоков энергичных частиц в этом событии могла быть вызвана увеличением радиального градиента ионного давления на широтах экваториальной границы зоны сияний.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер госрегистрации № 122011700172-2).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Динамика внешнего радиационного пояса под воздействием потоков солнечного ветра разной природы**

Калегаев В.В.^{1,2}; Власова Н.А.¹; Груздов Д.С.^{1,2}; Иванова А.Р.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

Выполнялось сравнительное исследование динамики внешнего радиационного пояса во время двух геомагнитных возмущений 11-16.10.2017 и 22-27.03.2023. Первое событие (событие 1) представляет собой слабую магнитную бурю, вызванную высокоскоростным потоком солнечного ветра, которая привела к продолжительной авроральной активности на фазе восстановления. Второе, мощное геомагнитное возмущение (событие 2), связано с приходом коронального выброса масс.

Проанализирована возможная роль суббуровой активности в наблюдаемой эволюции внешнего радиационного пояса. Рассмотрены вариации потоков, измеренные на спутниках GOES детекторами высокозэнергичных электронов и электронов средних энергий в диапазоне 50-500 кэВ.

В ходе первого события серия суббурь привела к инжекциям энергичных электронов во внутреннюю магнитосферу. Спутниковые измерения демонстрируют непосредственный отклик частиц средних энергий на суббуровые инжекции. Пониженные потоки частиц с энергиями 700 кэВ и выше не восстанавливаются сразу. Возрастание потоков частиц субрелятивистских и релятивистских энергий обусловлено кумулятивным эффектом при регулярном и последовательном воздействии индукционного электрического поля, которое генерируется в ходе серии суббурь. Продолжающиеся суббури постепенно доускоряют энергичные электроны до более высоких энергий, приводя к возрастанию потоков частиц релятивистских энергий на два порядка на внешних L-оболочках.

Во втором событии на главной фазе бури происходит смещение высокоширотной границы внешнего пояса на более низкие L-оболочки. Происходящие здесь изменения на приводят к возрастанию потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Пульсирующие полярные сияния и оптические микровсплески во время геомагнитной бури на субавроральных широтах**

Климов П.А.^{1,2}; Николаева В.Д.¹; Щелканов К.Д.^{1,2}; Сараев Р.Е.^{1,2}; Котиков А.Л.³; Артемьев А.В.⁴

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

³ СПбФ ИЗМИРАН

⁴ ИКИ РАН

email: pavel.klimov@gmail.com

В последнее время геомагнитная обстановка, зачастую, определяется тем, что мы находимся вблизи максимума цикла солнечной активности. Благодаря этому область возможных наблюдений полярных сияний существенно сдвинулась в область более южных широт. Поэтому, по окончании наблюдательного сезона полярных сияний на Кольском полуострове, было принять решение перебазировать часть аппаратуры проекта PAIPS в Ленинградскую область – обсерваторию ИЗМИРАН «Красное озеро» ($60,53^{\circ}$ с.ш.; $29,72^{\circ}$ в.д.). Установка высокочувствительного изображающего фотометра и узкоугольной камеры была осуществлена 09 апреля 2025 года. Аппаратура проработала в течение 2 недель, пока не наступили белые ночи.

За время наблюдений было обнаружено два события с пульсирующими полярными сияниями (ППС) 15/16 и 16/17 апреля, а также три серии оптических микровсплесков (ОМВ). Оба случая ППС были зафиксированы во время сильных геомагнитных возмущений. Вариация Х-компоненты магнитного поля на станции для первого события 230 нТл, а для второго – 900 нТл. АЕ-индекс 1600 и 1500 нТл соответственно. Вариация Dst-индекса говорит о том, что ППС происходят на главной фазе геомагнитной бури с максимальным значением Dst -150 нТл, произошедшей 16.04.2025. Серии ОМВ были зарегистрированы 18, 19 и 20 апреля 2025 на фазе восстановления геомагнитной бури в вечернем секторе MLT, что согласуется с предыдущими наблюдениями этого явления.

Геомагнитная буря была вызвана корональным выбросом массы 15 апреля 2025 года с усиленiem потока солнечного ветра до 700 км/с. По данным спутника ERG 16 апреля плазмопауза располагалась вблизи $L \sim 2.5 - 3$, что означает, что положение обсерватории ($L \sim 3$) было внутри внешнего радиационного пояса. В этой же области магнитосферы наблюдались мощные свистовые волны. Изотропная граница наочной стороне (внутренняя кромка плазменного слоя) располагалась в районе $L \sim 4 - 5$ по данным спутников POES. Такая картина соответствует полученным ранее сведениям об области генерации ОМВ, вызванными хоровыми волнами. В докладе представлены первые низкоширотные наблюдения ППС и оптических микровсплесков фотометром проекта PAIPS, произведен анализ условий наблюдения, в т.ч. геомагнитная обстановка, данных сопряженных спутниковых наблюдений заряженных частиц, обсуждается как феноменология событий ППС и ОМВ, так и причины их возникновения.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Наблюдение геоэффективных сверхэнергичных плазменных струй магнитослоя в 2009 г.**Коурова Е.А.¹; Дмитриев А.В.²¹ МГУ, физический факультет² НИИЯФ МГУ**email:** kourovaea@my.msu.ru

Проведено исследование динамических структур дневного магнитослоя в период с июля по октябрь 2009 года, который характеризовался аномально спокойными условиями в межпланетной среде. По данным спутников миссии THEMIS и межпланетного монитора WIND регистрировались сверхэнергичные плазменные струи магнитослоя (СПСМ), представляющие интерес в качестве геоэффективных образований. СПСМ идентифицировались по ионным спектрограммам, характерным параметрам солнечного ветра и магнитосферным эффектам, вызванным взаимодействием струй с магнитопаузой. Наблюдалась эволюция струй по мере их перемещения по магнитослою. Зарегистрированные СПСМ разделены на ведущие к проникновению плазмы магнитослоя в магнитосферу и не ведущие. Селекция основана на наличии или отсутствии популяции плазмы магнитослоя на спектрограммах спутников THEMIS, находящихся во внешней магнитосфере. Проведено сравнение полученных результатов с аналогичными данными о СПСМ, наблюдавшимися в 2007-2008 гг, проверены выдвинутые ранее пороговые значения скорости и кинетической беты для проникающих струй: подтверждено пороговое значение только для скорости непроникающих струй. Показано, что, несмотря на минимум солнечной активности, СПСМ все же наблюдаются, однако их количество значительно меньше, чем в предыдущие два года.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Магнитосфера HD 209458 b в параболоидной и МГД моделях**

Кротов А.С.¹; Беленькая Е.С.²

¹ МГУ, физический факультет

² НИИЯФ МГУ

email: a-krotov.2014@mail.ru

В статье Жилкина и Бисикало (2019) описываются магнитосфера горячих юпитеров, находящихся вблизи от альфвеновской точки звездного ветра родительской звезды, в которой альфвеновское число Маха равно 1. В частности, авторы проводят моделирование экзопланеты HD 209458 b, также известной под неофициальным названием Осирис. Поскольку эта экзопланета находится в пограничной зоне между режимами обтекания звездным ветром с альфвеновским числом Маха больше и меньше единицы, рассматриваются, соответственно, сверх-альфвеновский и до-альфвеновский случаи.

Ранее мы проводили моделирование магнитосферы экзопланеты HD 209458 b в параболоидной модели магнитосферы, поэтому логично будет провести сравнение результатов, полученных при помощи параболоидной модели, с результатами, полученными Жилкиным и Бисикало (2019).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Асимметрии импульса внезапного начала магнитной бури утром-вечер и север-юг в зависимости от параметров воздействующей межпланетной ударной волны**

Лаврухин А.С.¹; Капорцева К.Б.^{1,2}; Ширяев А.О.¹; Дмитриев А.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: lavrukhan@physics.msu.ru

Межпланетные ударные волны часто предшествуют межпланетным корональным выбросам массы (МКВМ) и коронирующим областям взаимодействия, воздействующим на Землю, которые затем могут привести к возникновению магнитной бури. В статье [1] при помощи магнитогидродинамического моделирования было показано, что воздействие наклонённой ударной волны приводит к асимметричной реакции магнитосферы. Это может приводить к возникновению существенных асимметрий в системе магнитосфера-ионосфера, а также в величине геомагнитно-индукционных токов в технологических системах.

Основной целью данной работы является выявление зависимости между параметрами межпланетной ударной волны (вектор нормали, альвеновское и магнитозвуковое число Маха) и возникающими импульсами резкого начала магнитной бури, которые измеряются наземными магнитометрами. Для этого используются открытые базы данных межпланетных ударных волн [2] и [3] с определёнными для каждого случая направлениями нормали, открытая база данных магнитных бурь с выявленными моментами внезапного начала магнитной бури [4] и индексы SMR из каталога SuperMAG [5], которые, в отличие от традиционно рассматриваемых индексов SYM-H и Dst, позволяют рассматривать вариации геомагнитного поля для разных локальных времен. Для выявления связанных с МКВМ ударных волн используется объединённый каталог МКВМ НИИЯФ МГУ [6].

В результате было получено, что в большинстве из рассмотренных случаев скачок магнитного поля в вечернем секторе во время внезапного начала бури превосходил скачок в утреннем секторе, несмотря на равномерное распределение направлений прихода ударных волн по локальному времени.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Трехпиковый сверхтонкий токовый слой наблюдаемый в хвосте земной магнитосферы**Леоненко М.В.¹; Григоренко Е.Е.¹; Зелёный Л.М.¹¹ ИКИ РАН

email: makarleonon@gmail.com

Используя спутниковые наблюдения MMS в хвосте земной магнитосферы, исследуется структура и характеристики сверхтонкого токового слоя вблизи нейтральной плоскости плазменного слоя. Обнаруженный слой имеет тонкую структуру состоящую из трех пиков плотности тока достигающих почти 100 nA/m^2 . Центральный пик является параллельным внешнему магнитному полю, краевые пики - перпендикулярны. Благодаря разработанному методу произведено выделение токонесущей популяции электронов. Показано, что ток переносится электронным пучком с энергиями порядка $(5 - 10) \text{ кэВ}$, который составляет $\sim (10 - 20) \%$ от общей концентрации электронов. Функция распределения электронов оказывается гиротропной в центре слоя, на краевых пиках наблюдается негиротропия. Для токонесущей популяции также рассчитаны градиенты тензора давления вдоль нормали к слою с разделением на гиротропную и негиротропную части. Одновременно со слоем, присутствует интенсивное амбиополярное электрическое поле, достигающее $\sim (40 - 50) \text{ мВ/м}$. Показано, что краевые перпендикулярные пики тока хорошо описываются присутствием дрейфа $[E \times B]$ электронов связанного с амбиополярным электрическим полем.

Также наблюдается быстрый плазменный поток $\sim 500 \text{ км/с}$ направленный в хвост. Образование подобных токовых слоев, образуемых из-за распространения ускоренных электронных пучков внутри плазменного слоя, свидетельствует о наличии вторичных областей ускорения электронов вне области первичного магнитного пересоединения. Такими источниками могут быть области вторичных микропресоединений, происходящих на электронных кинетических масштабах. Таким образом, в турбулизованной быстрым плазменным потоком плазме может происходить диссипация энергии посредством множественных каскадных микропресоединений, которые образуются в сверхтонких интенсивных токовых слоях, и, в свою очередь, приводят к ускорению новых электронных пучков, которые образуют новые электронные токовые слои.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (грант РНФ № 25-42-00028).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) во время сильной магнитной бури в октябре 2024**

Любич А.А.¹; Дэспирак И.В.¹; Сахаров Я.А.¹; Селиванов В.Н.²; Сецко П.В.¹

¹ ПГИ

² ЦФПЭС КНЦ РАН

email: lubchich@pgia.ru

Используя прямые измерения ГИТ в нейтралях трансформаторов, расположенных в нескольких точках регистрации на Карело-Кольской линии электропередачи (Выходной, Лоухи, Кондопога), данные сетей магнитометров IMAGE и SuperMAG, данные наблюдений на спутниках проекта AMPERE, данные по солнечному ветру и ММП базы OMNI, проведен детальный анализ появления интенсивных ГИТ на Северо-Западе России во время сильной магнитной бури 10-12 октября 2024 ($Dst = -333$ нТл), одной из самых сильных бурь 25-го солнечного цикла. Эта буря была вызвана быстрым корональным выбросом массы (КВМ), источником которого была сильная вспышка класса X1.8, наблюдавшаяся 9 октября в ~01:50 UT. Этот КВМ распространялся вдоль направления Солнце-Земля и в ~14:45 UT 10 октября ударная волна достигла точки Лагранжа (L1) и на спутнике DSCOVR был зарегистрирован резкий скачок в магнитуде магнитного поля, плотности, давлении и скорости плазмы солнечного ветра. С приходом фронта ударной волны наблюдались усиленные высыпания низкоэнергичных частиц в ионосферу, что, скорее всего, и вызвало красные сияния, широко наблюдавшиеся в Европе на средних широтах. Приход ударной волны и SC вызвал и сильные магнитные возмущения, которые привели к появлению самого сильного ГИТ (~30 A), зарегистрированного во время развития этой бури в ~15:30 UT на станции Выходной. В дальнейшем, на главной фазе развития бури и во время фазы восстановления, ГИТ не превышали ~ 10-15 A. Детальный анализ этого сложного события космической погоды подтвердил, что ГИТ в предполуночном секторе вызваны развитием суббури, тогда как ГИТ в утреннем секторе связаны, в основном, с геомагнитными пульсациями, и, кроме того, может наблюдаться наложение этих источников.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Влияние нормальной магнитной компоненты на формирование токового слоя геомагнитного хвоста**

Малова Х.В.¹; Домрин В.И.¹; Попов В.Ю.²; Калегаев В.В.^{1,2}; Мингалев О.В.³; Григоренко Е.Е.⁴; Зеленый Л.М.⁴

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

³ ПГИ

⁴ ИКИ РАН

email: hmalova@yandex.ru

В работе рассматриваются процессы формирования сравнительно тонкого токового слоя (ТТС), толщиной порядка протонного гирорадиуса, в хвосте магнитосферы Земли в периоды геомагнитных возмущений. Во время геомагнитных суббурь токовый слой хвоста магнитосферы сужается от толщины в несколько радиусов Земли до толщины порядка 1000 км [1], формируя в экваториальной области предельно тонкую структуру, где протоны размагничиваются, а их движение становится квазиадиабатическим [2]. Образовавшийся ТТС является метастабильным: в начале взрывной фазы он может быть триггером суббуровой активности [1]. Однако до сих пор нет ясности в вопросе о том, как зависит формирование ТТС от такого фактора, как нормальная магнитная компонента, всегда присутствующая в хвосте магнитосферы Земли, обусловленная дипольной формой геомагнитного поля. В рамках кинетической модели, описывающей процесс утоньшения токового слоя и установление его квазистационарного состояния, исследованы процессы его формирования в присутствии ненулевой нормальной к слою компоненты магнитного поля B_z (в стандартной геоцентрической GSM системе координат). Показано, что B_z - компонента влияет существенным образом на динамику заряженных частиц, а, следовательно, и на структуру токового слоя. Выявлено критическое отношение нормальной (B_z) и тангенциальной (B_x) магнитных компонент, при превышении которого формирование стационарного ТТС не происходит из-за высокой плотности захваченных в токовом слое протонов на хаотических траекториях, полностью меняющих структуру тока в хвосте. Показано, что отношение B_z/B_x является одним из важнейших факторов, влияющих на квазивесенное состояние всей конфигурации магнитосферного хвоста. Численное моделирование позволило определить диапазон параметров, при которых возможно формирование тонкой квазистационарной структуры ТТС. Результаты моделирования полностью согласуются с оценками параметра аддабатичности [2], определяющего характерный тип движения частиц. При больших значениях этого параметра, пропорционального B_z , размагниченные частицы замагничиваются и массово захватываются в токовом слое, препятствуя образованию ТТС. Работа выполнена В.И. Домриным, Х.В. Маловой, В.В. Калегаевым и В.Ю. Поповым в рамках госпрограммы МГУ. Работа Е.Е. Григоренко и Л.М. Зеленого осуществлялась в рамках госпрограммы ПЛАЗМА.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зелёный и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 2. С. 137–182. (Engl Transl. Zelenyi et al. // Plas.Phys. Rep. 2011. V. 37. No. 2. P. 118-160).
2. Büchner & Zelenyi // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. N 10. P. 11821-11842.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Сравнение коричневых карликов с красными карликами и газовыми гигантами**

Малыгин Г.П.¹; Беленькая Е.С.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: malygin.gp22@physics.msu.ru

В работе проводится сравнение характеристик красных карликов, газовых планет-гигантов и коричневых карликов, лежащих на границе раздела между объектами, носящими название планеты и звезды, для того чтобы лучше понять сходство и различия между ними. Получен график зависимости эффективной температуры от плотности для коричневых карликов, красных карликов и газовых планет-гигантов. Для коричневых карликов отмечены спектральные классы, соответствующие их возрастам, что позволяет косвенно судить о схожести коричневых карликов со звездами или газовыми гигантами в разные этапы их жизни. На этом графике была получена кривая, вдоль которой коричневые карлики движутся в течение своей жизни, путем аппроксимации областей с наибольшим содержанием коричневых карликов. Также по графику зависимости температуры от плотности обнаружено, что после середины жизни, начиная со спектрального класса L, у коричневых карликов начинается уменьшение плотности вместе с ускоренным уменьшением температуры.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Динамика высокоширотной области магнитосферы Земли в период магнитной бури 27.02.2023 г. по данным полярных спутников**

Манина А.С.^{1,2}; Калегаев В.В.^{1,2}; Николаева В.Д.¹; Иванова А.Р.^{1,2}; Власова Н.А.¹; Сараев Р.Е.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: alinmanina73@yandex.ru

Магнитосфера Земли — это динамичная и непрерывно изменяющаяся система, состояние которой меняется под влиянием межпланетной среды: солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля могут быть триггером для развития в магнитосфере геомагнитных бурь. Наиболее яркие проявления можно наблюдать в высокоширотной магнитосфере. Присутствие различных популяций заряженных частиц (солнечных энергичных частиц, энергичных электронов внешнего радиационного пояса и авроральных частиц, высыпающихся в области аврорального овала) создают возможность для исследования структуры и динамики высокоширотной магнитосферы во время магнитной бури.

В период 24.02 - 25.02.2023 г. на Солнце наблюдалась серия взрывных процессов, в результате которых в околоземном пространстве были зарегистрированы два солнечных протонных события. Корональный выброс массы от 24.02 пришел в околоземное пространство 26.02, предшествующая ему ударная волна была зарегистрирована в ~18 УТ. В магнитосфере произошла сильная магнитная буря с |Dst|_{max}~140 нТл.

Представлены результаты исследования во время магнитной бури 27.02.2023 г. динамики высокоширотных границ основных магнитосферных структур: области проникновения солнечных протонов с энергиями 1÷100 МэВ и 3÷10 МэВ; области высыпаний авроральных электронов и ионов с энергиями ~30 эВ÷30 кэВ; положений границ захвата и максимальных потоков электронов с энергиями > 100 кэВ внешнего радиационного пояса Земли. Работа выполнена на основе экспериментальных данных по потокам заряженных частиц, полученных на низкоорбитальных полярных спутниках Метеор-М2 и DMSР в вечернем и утреннем секторах по местному времени. Получено, что границы всех магнитосферных структур смещаются на более низкие широты во время главной фазы магнитной бури, наблюдается утренне-вечерняя асимметрия. Сильное смещение границ к более экваториальным широтам в вечернем секторе связано с образованием частичного кольцевого тока на главной фазе бури. Нахождение солнечных энергичных протонов в полярные области свидетельствует о различных процессах проникновения частиц.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Роль различных процессов вызывающих высыпания энергичных электронов для отклика в атмосфере и ионосфере Земли**

Миронова И.А.¹; Гранкин Д.В.¹; Иванова А.Р.^{2,3}; Доронин Г.Г.¹; Бобров Н.Ю.¹; Миронов А.А.¹; Розанов Е.В.¹; Калегаев В.В.^{2,3}

¹ СПбГУ

² НИИЯФ МГУ

³ МГУ, физический факультет

email: irini.mironova@gmail.com

В данном исследовании отдельно изучаются отклики в средней атмосфере и ионосфере на высыпания энергичных электронов (ВЭЭ) вызванные различными физическими механизмами.

В рамках доклада на основе модельных исследований и наблюдений со спутников будут даны следующие оценки воздействия ВЭЭ на ионосферу/атмосферу:

- оценки воздействия ВЭЭ во время различных фаз геомагнитных бурь;
- оценки вариабельности содержания мезосферного озона и озон-разрушающих компонент атмосферы, вызванные ВЭЭ сопровождающими корональные выбросы масс.
- оценки воздействия ВЭЭ вызванные нарушением первого адиабатического инварианта и ВЭЭ связанных с ЭМИЦ волнами.

Благодарности и финансирование:

Исследование откликов в атмосфере и ионосфере проводилось по договору между СПбГУ и НИИЯФ МГУ «Атмосферные эффекты высыпаний энергичных электронов внешнего радиационного пояса: Часть IV» в рамках гранта Российского научного фонда № 22-62-00048. Работа над одномерной моделью RACOP проводилась в рамках проекта СПбГУ № 116234986.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Зависимости характеристик экзопланет от спектрального класса родительской звезды**

Морозов Г.А.^{1,2}; Беленькая Е.С. ¹;

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: morozov.ga21@physics.msu.ru

Характеристики экзопланет, такие как радиус, масса, плотность и пр. напрямую зависят от того, как формировалась планетарная система. Важной характеристикой системы является спектральный класс родительской звезды. Мы проверяем зависимости характеристик экзопланет от спектрального класса родительской звезды, предполагая, что при формировании планетарных систем важную роль для будущего системы играет количество материала в протопланетном диске и влияние звезды на формирование планет, опираясь на [1]. Данные берутся из каталога экзопланет НАСА.

Показано, что при увеличении температуры звезды (изменении спектрального класса) увеличивается диапазон радиусов и масс, уменьшается диапазон плотностей экзопланет в системах. При больших температурах родительских звёзд увеличивается средний радиус экзопланет, что косвенно свидетельствует о том, что с ростом количества материала для формирования планет и звёзд увеличивается и температура звезды.

Был исследован так называемый разрыв Фултона – в распределении экзопланет по радиусу наблюдается уменьшение количества планет в области 1,5 – 2 радиусов Земли. Даётся возможное объяснение этому явлению. Согласно [2] положение провала должно зависеть от родительской звезды, это утверждение проверяется.

Была исследована частота встречаемости экзопланет с разными спектральными классами родительских звёзд. Сравниваются частоты встречаемости для разных спектральных классов родительских звёзд друг с другом и с общей частотой встречаемости для всех звёзд.

Литература

1. G. D'Angelo and J. J. Lissauer, Handbook of Exoplanets pp. 2319-2343 (2018).
2. B. J. Fulton and E. A. Petigura, Astronomical Journal 156, 264 (2018).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Пространственно-временная динамика захваченных и высыпающихся электронов внешнего РПЗ по данным ИСЗ МЕТЕОР-M2 во время магнитных бурь разной природы**Мягкова И.Н.¹; Калегаев В.В.^{1,2}; Рубинштейн И.А.¹¹ НИИЯФ МГУ² МГУ, физический факультет

email: irina@srd.sinp.msu.ru

В работе приводятся результаты анализа вариаций пространственно-временной структуры внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) во время геомагнитных возмущений разной природы, вызванных приходом к Земле а) корональных выбросов массы (КВМ) и б) высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП СП). Как известно, геомагнитные бури, вызванные КВМ, в большинстве случаев имеют существенно большую амплитуду по сравнению с бурями, источником которых являются ВСП СВ. Естественно, что основная часть проанализированных событий, связанных с КВМ относится к периодам максимума солнечной активности, а с ВСП СВ – к её минимуму.

Потоки и спектры электронов ВРПЗ измерялись в эксперименте на метеорологическом спутнике Метеор-М2. Считалось, что на высоких широтах ($L > 3$) детекторы, ориентированные вдоль силовых линий, регистрировали высыпающиеся частицы, а перпендикулярно силовым линиям – захваченные.

Как показали результаты измерений, широтные профили потоков электронов с энергиями от 100 кэВ до >2 МэВ для захваченных и высыпающихся частиц подобны, но потоки захваченных существенно выше, за исключением областей изотропизации, находящихся ближе к полярной границе ВРПЗ. Что касается изменения локализации ВРПЗ после бурь различной природы, то в настоящей работе показано, что в большинстве случаев локализация максимума потока РЭ ВРПЗ на фазе восстановления в случае ВСП-бури максимум восстановившегося пояса сдвигался на более высокие широты по сравнению с локализацией ВРПЗ до бури. При этом на фазе восстановления ВРПЗ после КВМ-бури гораздо более интенсивный максимум ВРПЗ, формируется, наоборот, на более низких широтах по сравнению с его положением до бури.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Усиление магнитного поля в переходном слое магнитосфер планет-гигантов Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна по данным КА Voyager 2**Невский Д.В.^{1,2}; Алексеев И.И.¹; Лаврухин А.С.¹¹ НИИЯФ МГУ² МГУ, физический факультет

email: nevskii.dv17@physics.msu.ru

На основе модели (Kobel and Flückiger, 1994) проведена разработка модели магнитного поля в переходном слое магнитосферы Меркурия, Земли, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Модель представляет магнитное поле в переходном слое, заключенном между двумя параболоидами вращения, приближенно описывающими головную ударную волну и лобовую магнитопаузу, с учётом внешнего межпланетного магнитного поля. Геометрия данной модели соответствует параболоидной модели магнитосферы (Alexeev et al., 2010). В результате получена зависимость магнитного поля в переходном слое B_x, B_y, B_z от координат x, y, z в солнечно-магнитосферной планетарной системе координат.

По данным КА Voyager 2 определены характерные размеры магнитосфер 4-х планет-гигантов. В приведенной ниже таблице собраны характерные размеры магнитопаузы и лобовой части ударной волны всех 6-ти планет Солнечной системы с собственным магнитным полем. Полученный (Alexeev et al., 1998) для модели (Kobel and Flückiger, 1994) коэффициент усиления магнитного поля при переходе через ударную волну $k_{mod} = B_{down}/B_{up} = (R_{bs} - R_{mp}/2)/(R_{bs} - R_{mp})$, рассчитанный по величине отхода фронта головной ударной волны от магнитопаузы показан в предпоследней строке Таблицы 1;

Магнитосфера Урана во время пролета находилась в аномальном, экстремально сжатом состоянии из-за высокого динамического давления солнечного ветра ($P_d \sim 0.028$ нПа), которое значительно (~20 раз) превышало значения за несколько дней до пролета (Jasinski et al., 2025). Это привело к уменьшению расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы R_{mp} с $28 R_E$ до $18 R_E$.

Продемонстрирована универсальность характеристик переходного слоя для планет Солнечной системы с собственным магнитным полем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 25-22-00468.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Пространственное распределение коэффициента вихревой диффузии в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным MMS**Овчинников И.Л.¹; Найко Д.Ю.¹; Антонова Е.Е.¹¹ НИИЯФ МГУ

email: ilya@psn.ru

Представлены результаты анализа пространственного распределения коэффициента вихревой диффузии в плазменном слое магнитосферы Земли с использованием находящихся в открытом доступе данных Magnetospheric Multiscale Mission (MMS). Для расчета коэффициента вихревой диффузии использованы данные измерений гидродинамической скорости ионов плазмы приборами FPI/DIS с временным разрешением $1/4.5 \text{ с}^{-1}$. 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 использовалась индукция магнитного поля, измеренная приборами FGM. Для оценки положения спутников в поперечном сечении плазменного слоя использовалось значение плазменного параметра β и знак компоненты B_x магнитного поля. Рассматривались области плазменного слоя вне быстрых потоков (BBF). Анализировалось более 20 000 12-минутных интервалов, во время которых спутники MMS находились внутри области с плотностью плазмы более 0.1 см^{-3} и средней энергией ионов более 0.5 кэВ.

Подтверждены результаты, полученные ранее при анализе данных миссии THEMIS. Обнаружена значительная анизотропия коэффициента вихревой диффузии. Проведен анализ зависимости коэффициента диффузии от межпланетного магнитного поля по данным OMNI и от уровня геомагнитной активности. Показано, что во время геомагнитных возмущений или при южной ориентации межпланетного магнитного поля значение коэффициента вихревой диффузии увеличивается в несколько раз. Показано, что в областях с $\beta < 1$ наблюдается рост коэффициента вихревой диффузии с ростом β , а при $\beta > 1$ зависимость коэффициента вихревой диффузии от β исчезает. Данный рост в основном обусловлен увеличением среднеквадратичного значения гидродинамической скорости плазмы, а автокорреляционное время изменяется незначительно. Обсуждена роль процессов переноса в формировании плазменного слоя магнитосферы Земли.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00076.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**О связи вариаций потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с секторной структурой межпланетного магнитного поля**

Оганов С.А.^{1,2}, Калегаев В.В.^{1,2}; Власова Н.А.¹

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: oganov.sa21@physics.msu.ru

Межпланетное магнитное поле (ММП) наряду с солнечным ветром является важным внешним фактором, постоянно воздействующим на магнитосферу Земли. В частности, внешний электронный радиационный пояс представляет собой одну из наиболее динамичных структур магнитосферы, состояние которой напрямую зависит от уровня геомагнитной возмущённости.

Релятивистские электроны внешнего радиационного пояса демонстрируют высокую чувствительность к параметрам межпланетной среды, особенно к направлению ММП. В данной работе исследуется влияние радиальной компоненты B_x ММП на суточные вариации потоков электронов с энергией >2 МэВ. Анализ основан на данных, полученных спутниками GOES на геостационарной орбите в период спада солнечной активности 2016–2019 гг., когда наблюдалась хорошо выраженная секторная структура ММП. Для комплексного исследования также использовались усредненные по часу параметры солнечного ветра и ММП из базы данных OMNI, а также производился расчет угла наклона геомагнитного диполя с использованием библиотеки GEOPACK.

Ключевым элементом исследования стал выбор физически обоснованного критерия оценки геоэффективности направления межпланетного магнитного поля. Этот критерий основан на определении проекции вектора ММП на вектор геомагнитного диполя. В рамках такого подхода были отобраны события с положительной величиной скалярного произведения вектора ММП и магнитного момента Земли. Такая конфигурация межпланетного магнитного поля способствует магнитному пересоединению на дневной стороне магнитопаузы. Важно отметить, что в периоды времени вблизи солнцестояний, когда угол наклона геомагнитного диполя достигает предельных значений около 35 градусов, геоэффективное направление ММП может реализовываться за счет B_x компоненты даже при $B_z > 0$. Анализ вариаций потоков электронов внешнего радиационного пояса в течение зимнего и летнего периодов в северном полушарии показал, что присутствует сезонная асимметрия влияния компоненты B_x : максимальное увеличение потоков происходит при отрицательных B_x летом и положительных B_x зимой.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Ускорение релятивистских электронов УНЧ пульсациями: аргументы за и против**Пилипенко В.А.¹; Белаховский В.Б.²¹ ИФЗ РАН² ПГИ**email:** pilipenko_va@mail.ru

Ультранизкочастотные (УНЧ) волны были предложены в качестве возможного посредника, передающего энергию от высокоскоростных потоков солнечного ветра к магнитосферным электронам. Хотя УНЧ волны не являются единственным средством ускорения электронов до релятивистских энергий, тем не менее, они являются существенным элементом процесса энергизации электронов, хотя их роль окончательно еще не установлена. Среди наблюдательных фактов, касающихся взаимосвязей активности волн Pc5 и динамики электронов, мы обсуждаем следующие факторы «за» и «против», связанные с механизмами ускорения УНЧ пульсациями: Корреляция потоков электронов на геостационарной орбите и индекса мощности волн Pc5; Соответствие азимутальных фазовых скоростей тороидальных и полоидальных волн Pc5 и магнитного дрейфа электронов. Учет этих фактов не позволяет однозначно решить вопросы о роли УНЧ волн в энергизации магнитосферных электронов. Мы предполагаем, что ускорение электронов УНЧ возмущениями может происходить не в режиме «геосерфотрона» с волнами Pc5 при совпадении азимутальных скоростей волн и дрейфующих электронов, а в режиме «геосинхротрона» с пролетным ускорением пульсациями Pi3. Работа поддержана молодежным грантом РНФ №24-77-10012 «Ультранизкочастотные волны в околоземном пространстве как активный фактор космической погоды».

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Механизмы формирования Pi2 пульсаций**Позднякова Д.Д.¹; Пилипенко В.А.¹¹ ИФЗ РАН**email:** pozdnyakova.dd@gmail.com

Удивительным образом энергия солнечного ветра, поступающая в земную магнитосферу, первоначально накапливается в хвостовой части магнитосферы, а лишь спустя какое-то время взрывным образом высвобождается во время своего рода «космотрясений» - суббури. Индикаторами взрывного высвобождения энергии вочной магнитосфере во время начала суббури являются кратковременные квазипериодические (1–3 мин) сигналы Pi2, наблюдавшиеся на обширной части земной поверхности. Каков же физический механизм переноса информации к земной поверхности о начале суббури и возбуждения Pi2 пульсаций? Энергия возмущения может переноситься от эпицентра «космотрясения» к высокоширотной ионосфере вдоль силовых линий геомагнитного поля, вытянутых в хвост магнитосферы, посредством альвеновских волн – всплесков продольных токов. На авроральных широтах Pi2 пульсации появляются синхронно с резким началом магнитной бухты и уярчением полярных сияний во время суббури, что свидетельствует о реальности усиления продольных токов между ночной магнитосферой и ионосферой. Но энергия космического «взрыва» может переноситься и быстрыми магнитозвуковыми (БМЗ) колебаниями, являющимися МГД аналогом звуковых волн в плазме. Такая БМЗ волна будет засвечивать всю ночную магнитосферу. По аналогии с дифракцией звуковой волны на сфере, отклик на БМЗ волны должен прослеживаться вплоть до геомагнитного экватора.

Выявить канал распространения энергии волн из внешней магнитосферы во внутреннюю и, в конечном счете, через ионосферу к Земле, позволяют синхронные наблюдения на спутниках на околоземных орбитах и на наземной сети магнитных станций. Поскольку процесс взаимодействия альвеновской и БМЗ волны с системой ионосфера-атмосфера-земля существенно разный, сопоставление Pi2 пульсаций на земле и на спутнике может определить физическую природу падающих на ионосферу волновых возмущений как на авроральных, так и на средних и приэкваториальных широтах.

Для изучения Pi2 пульсаций были использованы данные спутников SWARM, представляющих собой три идентичных зонда A, B, C, запущенные на почти круговую около-полярную орбиту в следующей конфигурации: аппараты A и C движутся рядом, разнесенные по долготе на ~10° на высоте 460 км; аппарат B движется по своей независимой орбите на высоте 530 км. Для получения наземных данных использовались магнитометры сети MAGDAS, вытянутой вдоль магнитного меридиана 210° от экватора до авроральных широт.

Данные спутников SWARM и наземных низкоширотных магнитометров показали, что в структуру волн Pi2 в верхней ионосфере на низких широтах основной вклад вносит БМЗ мода. Эта мода идентифицируется по наличию продольной магнитной компоненты (компонента сжатия магнитного поля) B_z , направленной вдоль локального геомагнитного поля B_0 . В подавляющем большинстве событий, зарегистрированных спутниками SWARM на низких широтах, Pi2 пульсации наблюдались в продольной B_z и радиальной B_x компонентах с соизмеримыми амплитудами, B_z/B_x . Амплитуда X-компоненты сигнала на наземной станции вблизи проекции орбиты была даже несколько больше (в 1.1–1.8 раза), чем амплитуда продольной компоненты на спутнике. При этом компонента B_z волн Pi2 на спутнике хорошо совпадала по фазе с компонентой X этих пульсаций на Земле. На авроральных широтах вклад компоненты сжатия в структуру поля Pi2 пульсаций на спутнике был мал, и преобладала альвеновская часть возмущения. Эти особенности высокоширотных и низкоширотных Pi2 пульсаций хорошо интерпретируются теоретической моделью, основанной на рассмотрении падения альвеновской и БМЗ волны на плоско-слоистую систему ионосфера-атмосфера-Земля. Таким образом, синхронные спутниковые и наземные наблюденияочных пакетов волн Pi2 позволили подтвердить наличие двух каналов переноса энергии возмущения из области взрывного развития суббури к земной поверхности.

Благодарности. Работа поддержана грантом РНФ №24-77-10012 «Ультранизкочастотные волны в околоземном пространстве как активный фактор космической погоды».

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Анализ свойств высыпаний релятивистских электронов в зависимости от солнечной активности**Попова Т.А.¹; Яхнина Т.А.¹; Демехов А.Г.¹¹ ПГИ

email: tarkada@yandex.ru

В работе исследуется влияние геомагнитной и солнечной активности на высыпания релятивистских (> 700 кэВ) электронов, наблюдавшихся в авроральной и субавроральной зоне на высотах ~ 850 км (по данным спутников NOAA/POES). Для анализа были выбраны два года с низкой (2017 год) и высокой (2023 год) солнечной активностью, которая определялась по полному месячному числу солнечных пятен по данным SIDC (Solar Influences Data Analysis Center, Бельгия). Это число равно 21 для 2017 г. и 125 для 2023 г. Были составлены каталоги событий для этих двух периодов, когда высыпания релятивистских электронов наблюдались в окрестности обсерватории Ловозеро (68° с.ш. 35° в.д.) и сопряженной с ней области в Южном полушарии. Окрестностью обсерватории считалась полоса шириной 75 градусов по магнитной долготе; эта область выбрана для сопоставления высыпаний с наземными наблюдениями ОНЧ волн и геомагнитных пульсаций Pc1. В каталогах была проведена классификация событий по группам, предполагающим разные механизмы формирования высыпаний. Обсуждаются особенности частот наблюдения высыпаний релятивистских электронов и потоков захваченных и высыпающихся электронов в каждой из групп событий в зависимости от параметров солнечного ветра и геомагнитных условий (индексы Kp, Dst, AE) во время высокой и низкой солнечной активности.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Границы аврорального овала на территории РФ во время экстремальных магнитных бурь**Савельева Н.В.¹; Пилипенко В.А.¹¹ ИФЗ РАН

email: nasa2000@yandex.ru

Авроральный электроджет и полярные сияния сосредоточены в авроральном овале. После начала магнитной бури овал полярных сияний расширяется, его нижняя граница опускается до средних широт и ниже в случае сильной магнитной бури. С расширением овала растут уровни потенциально опасных геомагнитных возмущений и, соответственно, повышаются риски для технологических систем от воздействия геоиндукционных токов. Широта экваториальной границы овала является одним из ключевых параметров космической погоды, важным для адекватного описания динамики внешнего радиационного пояса Земли, широтного распределении мощности Pc5 волн диапазона, и др.

Для предсказания границ аврорального овала используются модели, построенные по накопленным наблюдениям. Как правило, базы данных наблюдений не включают экстремальные магнитные бури ($Dst > 400$ нТл). Подобные события случаются крайне редко, за всю историю наблюдений зафиксировано не более десяти экстремальных бурь. Тем не менее, в открытых источниках опубликованы многочисленные свидетельства очевидцев, позволяющие оценить примерные широтные границы овала во время максимума бури. К примеру, Love et al. [2025] построили статистическую модель широты экваториальной границы дискретных сияний (далее L2025) на основе опубликованных в прессе свидетельств наблюдателей о полярных сияниях.

Если рассматривать полярные сияния как показатель положения электроджета, то такая модель позволяет предсказать, до каких широт могут подвергаться риску электроэнергетические системы. Используя модель L2025, мы построили карту возможных рисков на территории РФ для экстремальных значений Dst от 400 до 1000 нТл. Также мы проверили согласуются ли результаты экстраполяции моделей Ovation-prime и АРМ на экстремальные величины геомагнитных возмущений с предсказаниями модели L2025.

Работа поддержана грантом РНФ 21-77-30010.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Сценарий модуляции неструктурированных пульсаций герцового диапазона вариациями ММП**Сафаргалеев В.В.¹¹ СПбФ ИЗМИРАН

email: vladimir.safargaleev@mail.ru

Пульсации Pc1 (диапазон 0- 5 Гц) представляют собой распространяющиеся вдоль магнитного поля альвеновские волны, что делает их потенциально пригодными для дистанционного зондирования магнитосферы с земной поверхности. Этим обусловлен интерес к исследованию Pc1. Форма Pc1 разнообразна. Наиболее частым, а потому и хорошо изученным явлением, являются Pc1 в виде последовательности волновых пакетов с ярко выраженной внутренней структурой («жемчужины»). Менее изучен тип Pc1 в виде последовательность пятен без выраженной внутренней структуры (неструктурированные Pc1). Неструктурированные Pc1 рассматривались преимущественно в контексте отклика магнитосферы на удар по магнитопаузе фронта межпланетной ударной волны (события SI). В дальнейшем было показано, что SI не является необходимым условием генерации этого подкласса Pc1. В данной работе исследованы неструктурированные Pc1 в виде серии пятен, наблюдаемые как до, так и после SI. Используя благоприятное положение спутников GEOTAIL и TNE, показано, что внутри магнитосферы имеют место вариации давления, с которыми синхронизованы пятна Pc1 с периодом следования 12 минут. Вариации давление отсутствуют на спутниках в солнечном ветре. Вместо этого, спутники регистрируют вариации ММП того же периода. На основе наблюдений предложен сценарий явления.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Параметры вне и внутри магнитосферы во время резких усилений потоков электронов с энергиями 40-500 кэВ на геостационарной орбите**

Стуков Д.А.¹; Ягова Н.В.¹

¹ ИФЗ РАН

email: dstkov922@yandex.ru

Работа посвящена вариациям потока электронов с энергиями 40-500 кэВ на геостационарной орбите. Использованы данные дифференциального по энергии потока электронов во внешнем радиационном поясе на спутниках GOES за 2013-2017 годы. Для анализа отобраны резкие усиления потока электронов. Анализируются отличия эффективности возмущений космической погоды и свойства потока электронов накануне усиления для условий перед и после максимума 24 солнечного цикла. Среди отобранных событий выделены случаи, когда усиления происходили вне магнитной бури и сильных суббури. Для этих событий анализируются параметры плазмы, магнитного поля и частиц вне и внутри магнитосферы, включая вариации скорости и динамического давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также энергетические спектры электронов накануне усиления. Значения параметров сравниваются для интервалов, перед отобранными событиями и периодами без усилений потока. Показано, что состояние плазмы и частиц в течение, по крайней мере, нескольких часов накануне усиления, влияет на эффективность воздействия возмущений космической погоды на поток электронов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Ионизационное воздействие квазизахваченных 30-кэВ электронов на низкоширотную ионосферную F область : магнитная буря 1 июня 2013**Суворова А.В.¹¹ НИИЯФ МГУ**email:** alla_suvorova@mail.ru

Спутниковые эксперименты на малых высотах показали, что захваченные энергичные электроны (десятки-сотни кэВ) из радиационного пояса Земли (РПЗ) могут проникать на низких широтах в область квазизахвата, которая находится в верхней ионосфере. Потоки этих электронов, названных *forbidden energetic electrons* (FEE), могут возрастать на 3-4 порядка величины. Значительное воздействие интенсивных потоков этих частиц на низкоширотную F-область ионосферы было убедительно показано в ряде работ, однако до сих пор этому эффекту уделяется недостаточно внимания при интерпретации и моделировании положительных ионосферных бурь. В работе использованы данные измерений энергичных частиц на спутниках NOAA/POES с круговыми орбитами на высоте 850 км и ионосферной плазмы на спутнике C/NOFS с эллиптической орбитой на высотах 350-700 км. На примере умеренной магнитной бури 1 июня 2013 исследуются локальные изменения концентрации ионосферных ионов в областях инжекций >30 кэВ FEE потоков на низких широтах. Исследуемые эффекты наблюдались на фазе восстановления магнитной бури в течение 7 часов. Показано, что увеличение концентрации ионов в F области в дневном секторе на долготах южноатлантической аномалии (ЮАА) связано с дополнительной ионизацией под воздействием энергичных электронов. В ночном секторе над Тихим океаном наблюдались ионосферные неоднородности в виде сильных флуктуаций концентрации ионов (на 2 порядка величины), что также могло быть связано с воздействием FEE в сочетании с процессами рекомбинации в ночной ионосфере.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Высота возникновения авроральных оптических микровсплесков по спектрометрическому анализу их излучения**

Щелканов К.Д.^{1,2}; Климов П.А.^{1,2}; Николаева В.Д.¹; Кириллов А.С.²; Сергеев В.А.³; Белов А.А.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

² ПГИ

³ СПбГУ

email: shchelkanov.kd18@physics.msu.ru

Оптические микровсплески (OMB) аврорального излучения были недавно обнаружены в данных высокосчувствительного фотометра в рамках проекта Pulsating Aurora Imaging Photometer System (PAIPS). Это самое кратковременное свечение в авроральной области, обнаруженное на сегодняшний день. Ключевым вопросом для понимания природы ОМВ является высота свечения, которая зависит от энергии высыпающихся частиц.

PAIPS – это система из двух фотометров, работающих на Кольском полуострове с 2021 года и предназначенных для измерения тонкой пространственно-временной структуры аврорального свечения с микросекундным временным разрешением. Фотометр, установленный в обсерватории ПГИ «Верхнетуломская» ($68,58^\circ$ с.ш.; $31,75^\circ$ в.д.) дополнен спектрометром. В настоящий момент используется 7 светофильтров: узкополосные 265, 337, 390 и 430 нм, а также широкополосные УФС1 (300–400 нм), УФС2 (270–380 нм) и КС11 (600–800 нм).

Был разработан спектрометрический метод оценки высоты возникновения свечения ОМВ. Проведено полное моделирование отклика детектора на спектр эмиссии молекулярного азота, возникающей при высыпании энергичных электронов в атмосферу. Показано, что отношение сигналов в двух широкополосных каналах КС11 и УФС1 зависит от высоты эмиссии. Была произведена оценка высоты излучения для серии микровсплесков с наилучшими метеорологическими условиями наблюдения. Она составила 73–88 км, что соответствует энергии высыпающихся электронов 60–200 кэВ.

Полученный диапазон энергий подтверждается статистическими исследованиями детекторов заряженных частиц низкоорбитальных спутников POES. В большинстве случаев микровсплески измеряются в магнитных трубках внешнего радиационного пояса с электронами 30–300 кэВ или на его внешнем краю. Расположение в конкретном магнитосферном домене и секторе MLT указывает на то, что эти ОМВ, вызванные высыпаниями электронов, могут быть результатом взаимодействия между магнитосферными волнами и электронами.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей**Юшков Б.Ю.¹¹ НИИЯФ МГУ

email: clef@srds.sinp.msu.ru

Одним из факторов, определяющих радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, являются галактические и солнечные космические лучи. Их потоки внутри магнитосферы во многом определяются эффектом геомагнитного обрезания, количественно описываемым величиной эффективной вертикальной жесткости обрезания. Данная величина непосредственно вычисляется численным интегрированием уравнений движения, что даже при современном быстродействии ЭВМ требует значительных затрат машинного времени и использования специальных программ. Поэтому в практических целях используются различные методы интерполяции или аппроксимации. Один из таких методов [1] обеспечивает вычисление эффективной вертикальной жесткости в зависимости от двух параметров – локального времени и Кр-индекса, характеризующего геомагнитную возмущенность. Метод использует базовые таблицы жесткости, рассчитанные в модели IGRF для высоты 450 км, формулу пересчета к произвольной высоте и поправочные коэффициенты, рассчитанные в модели Цыганенко-89. Сравнение рассчитанных жесткостей с другими работами подтверждает корректность результатов. С использованием модели IGRF14 рассчитаны базовые таблицы на эпохи 2025 и 2030. Рассмотрено влияние показателя спектра протонов на величину жесткости обрезания и оценена физическая точность определения жесткости. Дозы радиации, рассчитанные с помощью данного метода, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им.М.В. Ломоносова.

1. Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. Метод расчета вертикальной жесткости обрезания в геомагнитном поле. Космические исследования. Т.47, №3, с.211-218, 2009

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Пространственное распределение и когерентность пульсаций Pc1 в магнитосфере, верхней ионосфере и на Земле**

Ягова Н.В.¹; Федоров Е.Н.¹; Мазур Н.Г.¹

¹ ИФЗ РАН

email: nyagova@yandex.ru

Исследования пространственного масштаба пульсаций диапазона до ~10 Гц в верхней ионосфере и их отклика на Земле показали, что структура наблюдаемых колебаний может быть описана в модели прохождения альвеновского пучка конечной толщины [1] через квазиреальную ионосферу. Пространственное распределение поля волны, полученное в многоточечных измерениях в ионосфере и на Земле, может использоваться для определения параметров падающего пучка, если горизонтальные неоднородности не слишком велики [2]. В настоящей работе анализ измерений на ионосферных спутниках SWARM и наземных станциях дополнены данными магнитосферных спутников. Для отдельных событий, когда колебания диапазона Pc1 регистрируются одновременно в магнитосфере, ионосфере и на Земле, рассматриваются волновые формы пульсаций и их спектральные параметры, чтобы оценить пространственный масштаб волны над и под ионосферой. Восстановленные из данных наблюдений параметры сравниваются с расчетными результатами модели [1].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

Литература

1. Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D. Transmission of a magnetospheric Pc1 wave beam through the ionosphere to the ground // J. Geophys. Res.: Space Phys.— 2018.— Vol. 123.— P. 3965–3982. DOI: 10.1029/2018JA025338.
2. Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Мазур Н.Г. Естественные электромагнитные колебания диапазона 4-12 Гц по наблюдениям на спутниках SWARM и сети магнитометров CARISMA. Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9, № 3. С. 128-137. DOI: 10.12737/szf-93202314

Секция «Магнитосфера Земли и планет, магнитосферно-ионосферные связи»**Потери частиц из внешнего радиационного пояса, связанные с высыпанием релятивистских электронов**Яхнина Т.А.¹; Демехов А.Г.¹; Попова Т.А.¹¹ ПГИ

email: tyahnina@gmail.com

Проведен сравнительный анализ высыпаний релятивистских (>800 кэВ) электронов (ВРЭ), регистрируемых низкоорбитальными (~850 км) спутниками серии NOAA POES. Во-первых, это ВРЭ, определяемые тремя известными механизмами питч-угловой диффузии, а именно: (1) большой кривизной силовых линий геомагнитного поля, (2) взаимодействием со свистовыми волнами и (3) взаимодействием с электромагнитными ионно-циклотронными волнами. Общим свойством этих ВРЭ является локальность их наблюдения по широте ($\sim 1^\circ$) и, соответственно, короткая длительность пролета спутника через их область (4-30 с). Во-вторых, кроме потерь, вызванных перечисленными механизмами, наблюдаются ВРЭ на широтах внешнего радиационного пояса над периферийной областью Южно-Атлантической магнитной аномалии (ЮАА). Это менее интенсивные ВРЭ (на 1-2 порядка), но регистрируемые в более протяженной области по широте ($10\text{--}15^\circ$) (длительность пролета спутника через область высыпаний составляет около 3 минут). Механизм формирования таких ВРЭ предполагает наличие достаточного количества энергичных частиц в радиационном поясе. Энергичные частицы попадают в дрейфовый конус потерь и высыпаются в зоне ослабленного геомагнитного поля. Общий механизм и сходные характеристики дают основание отнести эти высыпания к отдельной четвертой группе, отличающейся от ранее изученных трёх групп высыпаний [Yahnin et al., 2016, 2017]. Поскольку ВРЭ обязаны своим происхождением области ЮАА, то и регистрируются эти высыпания, в основном, в южном полушарии. Они наблюдаются не только во время усиления геомагнитной активности, но и в спокойные периоды, имея при этом меньшую интенсивность, чем во время возмущений. Количество зарегистрированных событий ВРЭ, связанных с ЮАА, в один и тот же период времени по данным одних и тех же спутников в несколько раз превышает количество ВРЭ, вызванных указанными выше тремя механизмами. На основании полученных результатов сделан вывод, что высыпания релятивистских электронов, связанные с ослаблением напряженности магнитного поля в районе ЮАА, могут вносить существенный вклад в потери частиц из радиационного пояса.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 22-62-00048.

Литература

- 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>
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // J. Geophys. Res. SpacePhysics. 2017. V. 122, No.9. P. 9169-9182.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024249>

Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли

Наблюдение транзиентов астрофизического и солнечного про- исхождения на спутниках формата кубсат группировки Мос- ковского университета «Созвездие-270»

Богомолов А.В.¹; Богомолов В.В.^{1, 2}; Васильев Н.А.^{1, 2}; Июдин А.Ф.¹; Кучеренко И.А.¹; Мягкова И.Н.¹; Оседло В.И.¹; Свертилов С.И.^{1, 2}; Яшин И.В.

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: aabboogg@srd.sinp.msu.ru

В настоящее время в рамках космического проекта Московского университета «Созвездие-270» производится развертывание группировки наноспутников формата кубсат, из них 9 продолжают функционировать на околоземных орбитах высотой 400–600 км. В качестве полезной нагрузки на многих из них установлены сцинтиляционные детекторы ДeКoР, специально разработанные в НИИЯФ МГУ для мониторинга космической радиации, а также для наблюдения электромагнитных транзиентов различной природы, в том числе астрофизического и солнечного происхождения. В настоящей работе прежде всего используются данные двух кубсатов: Авион (запущен 27 июня 2023 г.) и Альтаир (выведен на орбиту 5 ноября 2024 г.). Благодаря использованию для телеметрии не только УКВ, но и S-диапазона на этих кубсатах возможно проводить фактически непрерывный мониторинг с секундным временным разрешением, приемлемым для исследования длинных астрофизических гамма-всплесков и солнечных вспышек. Диапазон регистрации гамма излучения составляет от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ. Чувствительность экспериментов при регистрации космических гамма-всплесков находится на уровне $\sim 10^{-7}$ эрг/см².

К настоящему времени кубсатами группировки МГУ зарегистрировано более трех десятков космических гамма-всплесков. Каталог всплесков размещен на сайте https://swx.sinp.msu.ru/models/grb_cat/grb.php, в нем для каждого всплеска указаны время наблюдения, длительность (T90), кривая блеска. Каталог постоянно пополняется. Сведения о наиболее ярких всплесках направляются в мировую сеть GCN (General Coordinates Network) в виде циркуляров, содержащих, кроме упомянутых выше параметров, общее количество фотонов, зарегистрированных во всплеске и соответствующий ему флюенс.

Помимо астрофизических гамма-всплесков на кубсатах МГУ было зарегистрировано в жесткое рентгеновское излучение >30 кэВ от более, чем 30 солнечных вспышек. Каталог солнечных вспышек, наблюдавшихся на кубсатах МГУ, размещен на сайте https://swx.sinp.msu.ru/models/sfc_cat/sfc.php, с указанием класса вспышки по мягкому рентгеновскому излучению, времени наблюдения, длительности вспышки. Самая слабая вспышка, от которой на кубсатах МГУ наблюдалось излучение >30 кэВ, имела класс C9.3. Особенности эксперимента прежде всего позволяют наблюдать короткие вспышки, примерно треть событий в каталоге имеет длительность менее 1 минуты.

В работе также обсуждаются вопросы, связанные с определением направления на источник излучения. Кубсаты МГУ не имеют стабильную ориентацию, а вращение приводит к искаению временных профилей вспышки или всплеска. Сейчас исследуется возможность использования магнитометров, установленных на кубсатах, для учета вращения аппарата, а также использование отношения скоростей счета нескольких детекторов, находящихся в разных частях кубсата, для локализации источника всплеска.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования

космоса», проект №24-Ш01-05 «Созвездие 270», а также в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»**Поиск астрофизических источников гравитационных волн, регистрируемых детекторами LIGO/Virgo, на телескопах-роботах Глобальной сети МАСТЕР МГУ**Власенко Д.М.¹¹ ГАИШ МГУ**email:** leeor@yandex.ru

Последнее десятилетие гравитационно-волновая становится важной областью астрономии (Abbott et al. 2016a,b). Успех гравитационно-волнового эксперимента LIGO/Virgo в немалой степени стал осуществим благодаря оптической поддержке роботизированных обсерваторий, таких как Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ, поскольку позволяет уменьшить область локализации события (в случае успешного обнаружения источника). К примеру, в случае события GW170817 (единственное на момент написания диссертации известное событие от которого найден источник) уменьшает область локализации в 108 раз с 31 кв.град (1σ) до ~1 кв. сек (Abbott et al. 2017a,b). Несмотря на успешный опыт оптической поддержки (Lipunov et al. 2017, 2018) наблюдений полей ошибок первых гравитационно-волновых (ГВ) событий - оптическая локализация источников гравитационных волн событий представляет собой крайне сложную задачу.

За годы своей работы сеть широкопольных телескопов роботов МАСТЕР приобрела достаточный опыт в исследовании больших областей локализации и поиске транзиентов внутри них. Области локализации ГВ событий не имеют «правильную» (круг или квадрат) форму, что усложняет обработку данных, тем не менее сеть МАСТЕР научилась работать с ними (Липунов и др. 2019).

В первые три серии наблюдений (O1, O2, O3) гравитационно-волновыми обсерваториями было зарегистрировано и передано через сеть 76 ГВ событий (Abbott et al. 2019, 2021, 2023, 2024). Из них 54 были подтверждены в качестве гравитационно-волновых транзиентов. В результате постобработки гравитационно-волновой коллаборацией было добавлено еще 36 событий, которые также были упомянуты в соответствующих статьях, но они не распространялись через сеть гсп. Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР МГУ активно участвовала в наблюдениях за всеми 76 ГВ алертными событиями, а также в базе данных МАСТЕР нашлись снимки сделанные внутри областей локализации 36 добавленных позднее. Роботизированные телескопы сети МАСТЕР провели большой обзор неба внутри 3σ полей ошибок общей площадью более 220000 квадратных градусов. И нашли более 1500 оптических транзиентов внутри.

- Abbott B. P., et al., 2016a, Phys. Rev. Lett., 116, 061102
Abbott B. P., et al., 2016b, Phys. Rev. X, 6, 041015
Abbott B. P., et al., 2017a, Nature 551, 85
Abbott B. P., et al., 2017b, Astrophys. J. Lett. 848, L12, 59 pp.
Abbott B. P. et al. 2019, Phys. Rev. X, 9, 031040
Abbott R. et al. 2021, Phys. Rev. X, 11, 021053
Abbott R. et al. 2023, Phys. Rev. X, 13, 041039
Abbott R. et al. 2024, Phys. Rev. D, 109, 022001
Lipunov V. M. et al. 2017, ApJL, 850(1), L1
Lipunov V. M. et al. 2018, New Astronomy, 63, 48-60
Липунов В.М. и др. 2019, Астрономический журнал, 96(4), 288

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»

Поиск источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий среди блазаров

Жирков К.К.¹; Липунов В.М.¹; Часовников А.Р.¹

¹ МГУ

email: zhirkov@sai.msu.ru

В работе представлен анализ оперативных многоканальных наблюдений телескопами-роботами Глобальной сети МАСТЕР МГУ полей ошибок источников нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, регистрируемых детекторами обсерватории IceCube. Среди полученных результатов: обнаружение и интерпретация падения оптической мощности сверх массивной чёрной дыры TXS0506+056 на телескопе-роботе МАСТЕР-Таврида (МГУ, Крым, Россия) через 73 секунды после регистрации нейтрино высокой энергии ($>100\text{TeV}$) антарктической установкой IceCube; обнаружение и интерпретация рекордно яркого состояния блазара PKS 0735+178 в момент алертных наблюдений МАСТЕРом нейтринного события IC-211208A, блазаров PKS 2354-021 для IC-200523A, RGB J2243+203 для IC-210608A, TXS 0239+175 для IC-211125A, PKS 0735+178 для IC-211208A и других. Представлен анализ всех оптических наблюдений телескопами сети МАСТЕР нейтринных алERTов IceCube с 2016 по 2023 годы и сделана выборка из 52 блазаров, которые были обнаружены внутри расширенных полей ошибок. В результате проведенного сравнения с 1744 блазарами, случайно снятыми на телескопах МАСТЕР с 2006 по 2013 годы, выявлено значительное превосходство количества блазаров, находящихся в ярком оптическом состоянии в пользу выборки IceCube.

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»**Пленарный доклад****Метагалактические и Галактические транзиенты наблюдаемые в гамма-излучении высоких и сверхвысоких энергий**Июдин А.Ф.¹; Никулина А.С.²; Стародубцева У.М.²¹ НИИЯФ МГУ² МГУ, физический факультет**email:** aiyudin@srd.sinp.msu.ru**Активные ядра галактик (AGN)**

В центре каждой массивной галактики находится сверхмассивная черная дыра (SMBH). SMBH трудно изучать, поскольку они сами по себе не излучают света и обнаруживаются только благодаря их гравитационному влиянию на близлежащие звезды и/или газ. Однако существует класс объектов, который позволяет нам косвенно судить о свойствах черных дыр, это так называемые активные ядра галактик (AGN).

Встречающиеся в нескольких процентах галактик, AGN является активно аккрецирующей SMBH. AGN чрезвычайно разнообразны по своим наблюдательным и физическим характеристикам. AGN может быть либо радио тихими, либо радио яркими (с сильным радиоизлучением, вызванным релятивистской струей (джетом)). В обоих классах угол, под которым мы рассматриваем центральные области AGN, сильно влияет на наблюдаемое излучение. Особенностью почти всех AGN является то, что они являются многоволновыми объектами. AGN хорошо известны вариациями своих характеристик во времени, изучение которых даёт информацию для физики высоких энергий, включая акрецию, запуск реактивных струй, образование нейтрино высокой энергии, и.т.д. Анализ гамма-излучения от AGN, испускающих струи направленные прямо на наблюдателя, так называемые «блазары», позволяют изучать свойства SMBH на шкале космических времен.

Вспыхивающие туманности пульсарного ветра (PWN)

Пульсары - это сильно намагниченные нейтронные звезды, которые образуются в результате массивной звездной гибели. Они ускоряют лептоны (электроны и позитроны) в релятивистском ветре, который останавливается на ударной волне, создавая диффузные структуры, известные как туманности пульсарного ветра (PWNe). На ранних этапах эволюции, и пульсар, и связанная с ним туманность возникшие в результате взрыва SN, изначально были окружены SNR. Сегодня известно, что PWNe представляют собой одну из крупнейших популяций источников гамма-излучения очень высокой энергии в Галактике. Недавнее обнаружение (и весьма вероятная связь с аналогами PWNe в других случаях) нескольких систем с энергией >100 ТэВ (сверхвысокие энергии, UHEs) показало, что (по крайней мере) часть PWNe являются ускорителями космических лучей ПэВ-нных энергий.

Особенности этих объектов мы подробно рассмотрим в нашем докладе.

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»**Гамма-спектрометр ТГС для исследования атмосферных и космических гамма-всплесков на борту малого спутника Скорпион**

Кучеренко И.А.¹; Богомолов А.В.¹; Богомолов В.В.^{1,2}; Воскресенков Е.Д.²; Июдин А.Ф.¹;
Свертилов С.И.^{1,2}; Яшин И.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: kucherenkoia@my.msu.ru

В рамках программы «Созвездие-270» МГУ им. М.В. Ломоносова разрабатывается малый спутник «Скорпион» формата CubeSat-16U, запуск которого запланирован на осень 2025 года. Спутник оснащён комплексом научной аппаратуры, включая гамма-спектрометр ТГС, оптический и УФ спектрометр-фотометр СОНЭТ, а также детекторы космической радиации. Гамма-спектрометр ТГС предназначен для решения фундаментальных задач в области физики атмосферы и космических исследований. Основной научный интерес представляет изучение атмосферных гамма-всплесков (TGF), природа которых до сих пор полностью не объяснена существующими теориями. Особую ценность представляют одновременные измерения с другими приборами комплекса, что позволит получить комплексную картину изучаемых явлений.

Прибор ТГС состоит из четырёх модулей с общей чувствительной площадью 256 см², обеспечивающих высокое временное разрешение (микросекундный диапазон) и энергетический диапазон от 50 кэВ до 10 МэВ. Каждый из четырех модулей прибора имеет уникальную компоновку детектирующих элементов: Первый модуль содержит 56 кристаллов GaGG:Ce и 8 пластмассовых сцинтилляторов. Второй модуль включает 14 элементов GaGG:Ce, 38 элементов YSO и 12 пластмассовых сцинтилляторов. Два дополнительных модуля выполнены на основе кристаллов CsI(Tl) увеличенного размера. Такая комбинация материалов позволяет оптимизировать прибор для решения различных научных задач, сочетая высокое энергетическое разрешение с большой чувствительной площадью.

В приборе будут формироваться данные как в традиционном формате мониторинга, содержащем скорости счета в нескольких каналах, так и в формате пособытийной записи, позволяющей получить временной профиль вспышки с микросекундной точностью, что необходимо для исследования TGF, имеющих характерную длительность ~200 мкс. Для возможности сложения отклика на TGF всех 4-х модулей они будут синхронизированы с помощью единого синхроимпульса, ежесекундно поступающего с борта спутника. Учитывая большие объёмы данных в первичном (пособытийном) формате, в приборе реализовано несколько режимов их сбора, в том числе формирование триггера всплеска. В этом случае при обнаружении нескольких событий в детекторе за короткое время происходит запоминание предыстории всплеска ~1000 событий, хранящейся в кольцевой памяти, и последующих 1000 событий, произошедших после триггера. Следует отметить, что параметры триггера, а также ряд других параметров накопления данных, таких как пороги мониторинга и интервал его опроса, могут настраиваться с помощью команд с Земли. Также с помощью команд может настраиваться рабочий диапазон прибора путём изменения напряжения на фотоприемниках.

В ходе наземной отработки были получены спектры источника Cs-137 по отдельности для каждого пикселя ПЧД путем анализа данных в пособытийном формате. Разброс положения пика полного поглощения (канал АЦП) не превышает 10%. В спектрах восьми пикселей, изготовленных из пластмассового сцинтиллятора, пик полного поглощения не наблюдался. Таким образом, методические и схемотехнические решения, заложенные в приборе, позволяют измерять энергетические спектры в сочетании с определением точки взаимодействия гамма-квантов. Кроме того, поскольку в приборе заложена возможность выделения парных откликов в ПЧД, существует возможность оценивать поляризацию по асимметрии комптоновского рассеяния. Наблюданное соотношение одиночных и парных откликов ~80% к ~20% для 662 кэВ соответствует результатам компьютерного моделирования.

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»

Оценка высоты пульсирующих полярных сияний по данным эксперимента PAIPS

Сигаева К.Ф.¹; Климов П.А.¹; Сараев Р.Е.¹; Козелов Б.В.²

¹ НИИЯФ МГУ

² ПГИ

email: sigaeva.kf15@physics.msu.ru

С сентября 2021 года благодаря совместным усилиям НИИЯФ МГУ и Полярного геофизического института (ПГИ) начал работу эксперимент PAIPS, установленный на базе двух обсерваторий: «Верхнетуломская» (VTL) и «Ловозеро» (LOZ), а с сентября 2023 года стало возможным вести стереометрические измерения. Эксперимент, представляет собой два фотометра, разнесенных в пространстве на 153 км, и направленных в одну область атмосферы. Фотометр VTL направлен в зенит, а LOZ – под углом к горизонту в направлении на VTL. Такая конфигурация эксперимента позволяет проводить стереометрические измерения в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) с высоким временным разрешением (1 мс в мониторинговом режиме) на высотах от 30 до 300 км, а следовательно, производить оценку энергий высывающихся частиц.

В данной работе будет представлен метод оценки высоты пульсирующих полярных сияний на основе поиска максимального двумерного коэффициента корреляции скалограмм сигнала выделенного пикселя фотометра VTL и сигналов пикселей LOZ, расположенных вдоль луча зрения пикселя VTL. Положение максимума коэффициента корреляции на матрице детектора LOZ дает оценку высоты свечения над VTL. Методика расчета учитывает геометрические особенности взаимного расположения полей зрения детекторов, угловых размеров пикселей и мертвых зон между ними. В докладе будет рассмотрен результат работы вышеописанного метода на примере отдельных компактных пульсирующих пятен, как наиболее простого объекта наблюдения, а также приведено сопоставление полученного результата с оценкой высоты ППС по данным камер всего неба.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»**Исследование карликовых новых звезд, открытых сетью роботов-телескопов МАСТЕР, по данным TESS**Тарасенков А.Н.¹¹ ГАИШ МГУ**email:** t9005780498@gmail.com

Вспышки карликовых новых являются наиболее распространенными оптическими транзитами, которые обнаруживаются широкопольными обзорными телескопами. Они связаны с нестабильностью дисковой аккреции на белый карлик в тесной двойной системе. В случае карликовых новых типа SS Cyg (UGSS) вспышки выглядят имеют быструю фазу подъёма блеска на 2-6 звездных величин и монотонный спад. Карликовые новые типа SU UMa (UGSU) помимо обычных вспышек демонстрируют так называемые супервспышки - они больше по амплитуде и в фазе спада демонстрируют сверхгорбы - периодические колебания блеска с периодом на несколько процентов дольше орбитального. Появление сверхгорбов связано с прецессией аккреционного диска.

За время работы сети роботов-телескопов МАСТЕР были обнаружены тысячи подобных вспышек. Однако, учитывая их распространенность и быстрое время угасания, многие из них остаются неисследованными.

Чтобы решить эту проблему, мы использовали архив обзорных наблюдений космической миссии TESS для извлечения фотометрии каждой карликовой новой, обнаруженной сетью МАСТЕР. Стратегия обзора TESS позволяет получить непрерывные кривые блеска длительностью около 27 суток для любого объекта. В случае, если во время наблюдений TESS происходит супервспышка на карликовой новой типа SU UMa, то можно получить период сверхгорбов с высокой точностью, а также проследить их эволюцию. Если карликовая новая имеет короткий вспышечный цикл, то он может быть измерен по данным TESS.

В настоящем докладе рассматривается ряд карликовых новых с коротким вспышечным циклом из архива сети МАСТЕР, для которых удалось получить кривые блеска TESS. Обсуждается эволюция сверхгорбов и обнаруженные периодичности (периоды сверхгорбов и значения вспышечного цикла).

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»

Прекурсор и килоновая при слиянии нейтронной звезды и черной дыры на примере GW S250206dm

Тополов В.В.¹; Липунов В.М.¹; Панченко И.Е.¹; Часовников А.Р.¹

¹ ГАИШ МГУ

email: topolev-tver@yandex.ru

Первая регистрация гравитационных волн (Abbott et al. 2016), а также наблюдение слияния нейтронных звезд GW170817 (Abbott et al. 2017) связанное с гамма-всплеском (Connaughton et al. 2017), килоновой и рентгеновским излучением (Abbott et al. 2017; Troja et al. 2017), открыли новую веху в многоканальной астрономии. Обнаружение слияния в смешанной паре “нейтронная звезда – черная дыра” (NS-BH) стало бы новым важным шагом. Одним из кандидатов такого слияния является GW S250206dm, локализованное коллаборацией LIGO/Virgo/KAGRA в O4. В настоящей работе мы представляем анализ теоретически ожидаемых электромагнитных сигналов, сопровождающих слияние NS-BH на различных стадиях, и обсуждаем возможную связь с зарегистрированными кандидатами: оптическим транзиентом AT2025bb (Smart et al. GCN 39244) и быстрым радиовсплеском FRB 20250206A (CHIME, GCN Circular 39216).

Секция «Астрофизические транзиенты и транзиентные энергичные процессы в атмосфере Земли»

Ограничения на оптическое излучение быстрых радиовсплесков

Часовников А.Р.¹; Власенко Д.М.¹; Жирков К.К.¹

¹ ГАИШ МГУ

email: chasovnikov@sai.msu.ru

Быстрые радиовсплески – короткие высокоэнергетические события в радиодиапазоне, для которых до сих пор не было зарегистрировано ни одного аналога в оптическом диапазоне. Однако количество FRB достаточно велико, поэтому вероятность случайного попадания в поле зрения оптического телескопа не является бесконечно малой. В докладе рассматривается возможность установления ограничений на оптическое излучение быстрых радиовсплесков на телескопах глобальной сети МАСТЕР. Благодаря большому суммарному полю зрения сети, а также способности наблюдать двумя трубами сразу, телескопы МАСТЕР идеально подходят для установления таких пределов. В работе использовались пределы, полученные за последние 20 лет, а далее методом Монте-Карло оценивалась вероятность случайного попадания FRB в поле зрения телескопа и вероятность его идентификации.

Литература

1. Lorimer D.R., Bailes M., McLaughlin M.A., Narkevic D.J., Crawford F. A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin // *Science*. — 2007. — Vol. 318, no. 5851. — P. 777–780.
2. Andersen B.C., Bandura K.M., Bhardwaj M., [et al.]. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar // *Nature*. — 2020. — Nov. — Vol. 587, no. 7832. — P. 54–58. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2863-y>.
3. Zhang C.F., Jiang J.C., Men Y.P., [et al.]. A highly polarised radio burst detected from SGR 1935+2154 by FAST // *The Astronomer's Telegram*. — 2020. — May. — Vol. 13699. — P. 1.
4. Li C., Lin L., Xiong S., [et al.]. Identification of a non-thermal X-ray burst with the Galactic magnetar SGR 1935+2154 a fast radio burst with Insight-HXMT // *Nature Astronomy*. — 2021. — Vol. 5. — P. 378–384.
4. Du C., Huang Y.-F., Zhang Z.-B., [et al.]. A thorough search for short-timescale periodicity in four active repeating Fast radio bursts // *Astrophys. J.* — 2024. — Dec. — Vol. 977, no. 1. — P. 129.
5. Lipunov V.M., Panchenko I.E. Pulsars revived by gravitational waves // *Astronomy and Astrophysics*. — 1996.
6. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E., [et al.]. Master Robotic Net // *Advances in Astronomy*. — 2010. — Vol. 2010, no. 1. — P. 349171. — eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2010/349171>. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2010/349171>.
7. Lipunov V.M., Kornilov V.G., Zhirkov K., [et al.]. MASTER Real-Time Multi-Message Observations of High Energy Phenomena // *Universe*. — 2022. — Vol. 8, no. 5. — URL: <https://www.mdpi.com/2218-1997/8/5/271>.
8. Shin K., Masui K.W., Bhardwaj M., [et al.]. Inferring the energy and distance distributions of Fast radio bursts using the first CHIME/FRB catalog // *Astrophys. J.* — 2023. — Feb. — Vol. 944, no. 1. — P. 105.
9. Chen G., Ravi V., Lu W. The Multiwavelength Counterparts of Fast Radio Bursts // *The Astrophysical Journal*. — 2020. — July. — Vol. 897, no. 2. — P. 146. — URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab982b>.
10. Beloborodov A.M. Blast waves from magnetar flares and fast radio bursts // *Astro-phys. J.* — 2020. — June. — Vol. 896, no. 2. — P. 142.
11. Gaia Collaboration, Prusti T., Bruijne J.H.J. de, [et al.]. TheGaiamission // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Nov. — Vol. 595. — A1.

Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе

The statistics of the extreme GICs and dB/dt during observations on n the North-West of Russia and in Scandinavia

Vladimir Belakhovsky¹; Slava Pilipenko²; Vasiliy Selivanov³; Yaroslav Sakharov¹; Alexander Losev¹

¹ Polar Geophysical Institute

² Institute of Physics of the Earth

³ Northern Energetics Research Centre, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

email: belakhov@mail.ru

Events with extreme magnitudes of geomagnetically induced currents (GICs) in the power transmission lines on the Kola Peninsula for the quasi-solar cycle 2012-2022 are analyzed. Independently extreme values of dB/dt (>100 nT/min) were considered. GIC recordings from the Vykhodnoy (VKH) and Kondopoga (KND) sub-stations together with data from near-by magnetometers (LOZ, LOP, MEK) have been examined. Extreme bursts of GIC are mainly observed in the pre-midnight and post-midnight magnetic local time sectors. From the total 92 extreme events at auroral sub-station VKH (GIC >20 A), ~51.1% were caused by CME magnetic storms, 36.9% occurred during CIR magnetic storms, 3.3% are caused by SC/SI and 8.7% occurred without magnetic storms. From 31 extreme events (GIC >5 A) at subauroral sub-station KND ~80.6% were observed during CME storms, 12.9% occurred during CIR storms, and 6.5% took place without a magnetic storm. Therefore, when predicting the impact of space weather on power lines, not only CMEs but also CIR storms and even non-storm intervals should be taken into account. Maximal observed GIC magnitude grows with an increase of geomagnetic field variability dB/dt, but for many events the actual GIC is less than the maximal possible value due to a localized nature of magnetic field disturbance. There is no clear linear dependence of the GIC amplitude on the parameters of the interplanetary medium (V, V·Bs, ε) and geomagnetic indices (IE, AE, SYM-H), which indicates the difficulty of predicting the GICs value based on these data. Although a positive trends are observed for the |GIC|/SYM-H dependence.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-17-20038, <https://rscf.ru/project/25-17-20038>, and a grant from the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»**Разработка системы «СИВИЛЛА»: поддержка разработки методик прогнозирования космической погоды с помощью машинного обучения**

Владимиров Р.Д.¹; Широкий В.Р. ¹; Мягкова И.Н. ¹; Доленко С.А. ¹

¹ НИИЯФ

email: vladimirov.rd16@physics.msu.ru

В докладе описывается программная реализация новой версии системы прогнозирования «СИВИЛЛА» (Система Исследования Взаимосвязей Интеллектуальная Легкообучаемая Лабораторная Адаптивная). Система позволяет эффективно проводить вычислительные эксперименты по разработке новых методик прогнозирования временных рядов с помощью нейронных сетей и других методов машинного обучения (МО) с использованием реальных данных наземных и спутниковых измерений для прогнозирования космической погоды.

Основным назначением данной системы является разделение трёх процессов:

1. Написание программного кода, позволяющего осуществлять необходимые виды прогнозирования;
2. Осуществление «на столе» (на экспериментальном стенде) объёмных вычислительных экспериментов, включающих подбор оптимальных алгоритмов для осуществления прогнозирования, их параметров, состава и временных диапазонов входных данных, способов разделения данных на обучающую выборку и тестовые данные. Результатом этого процесса должно стать построение оптимальных моделей прогнозирования. Поддерживается запуск в пакетном автоматическом режиме большого количества экспериментов с сохранением и агрегацией результатов моделирования для дальнейшего сравнения моделей с различными параметрами и различными данными в качестве обучающих.
3. Перенос новых созданных моделей на сервер с целью работы в режиме в составе системы онлайн прогнозирования космической погоды, доступной для использования через интернет.

Система «СИВИЛЛА» реализует механизм переноса моделей МО между экспериментальной и промышленной средами через Docker-контейнеры. Данный подход обеспечивает:

- Изоляцию зависимостей: Все компоненты системы (Python-библиотеки, версии фреймворков, системные утилиты) инкапсулируются в контейнер, устранив конфликты версий и обеспечивая воспроизводимость результатов.
- Кросс-платформенность: Контейнеры развертываются на любых ОС (Linux, Windows, macOS) и инфраструктурах (локальные серверы, облака, гибридные среды).
- Быстрое развертывание: Готовые образы контейнеров с моделями передаются между командами или системами через Docker Registry (например, Docker Hub, приватные репозитории).

Система в её нынешней реализации позволяет использовать для прогнозирования следующие алгоритмы машинного обучения:

- линейную и логистическую регрессию с регуляризацией и без;
- градиентный бустинг;
- полно связные нейронные сети типа многослойный персептрон.

Система работает в режиме одиночных экспериментов и пакетном режиме, позволяющем запускать серию экспериментов для сравнения между собой качества решения задачи в зависимости от:

- моделей машинного обучения,
- архитектур одной модели
- временных периодов для входных данных
- подходов к предобработке входных данных.

По окончании эксперимента система сохраняет в качестве артефактов модели:

- конфигурационный файл с полным описанием эксперимента

- трениров и тестовый наборы данных, на которых обучалась модель
- метрики качества, на всех данных, к которым модель применялась
- непосредственно прогнозные значения, соответствующие указанным периодам данных
- саму модель, для воспроизведения результатов, либо переноса на сайт

Целевые переменные и входные признаки для прогнозирования устанавливаются при конфигурировании системы, и с технической точки зрения могут быть любыми (например, геомагнитные индексы, потоки заряженных частиц на орбите Земли и др.) В докладе приводятся результаты тестирования системы «СИВИЛЛА» на реальных данных при прогнозировании геомагнитного индекса Dst.

После завершения разработки система «СИВИЛЛА» сможет использоваться широким кругом исследователей-физиков, которые смогут при разработке методик прогнозирования сосредоточиться на физической стороне вопроса с сохранением широкого круга возможностей методов МО, однако без необходимости программирования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) во время суперсуббури

Дэспирарак И.В.¹; Сецко П.В.¹; Любчич А.А.¹; Сахаров Я.А.¹; Селиванов В.Н.²

¹ ППИ

² Центр Физико-Технических Проблем Энергетики Севера, КНЦ РАН

email: despirak@gmail.com

Проведен детальный анализ появления интенсивных ГИТ на Северо-Западе России во время очень интенсивных суббури, так называемых суперсуббури. Используя прямые измерения ГИТ в нейтралах трансформаторов, расположенных в нескольких местах регистрации на Карело-Кольской линии электропередачи (Выходной, Лоухи, Кондопога), удается проследить появление интенсивных ГИТ на разных геомагнитных широтах. Развитие сильных возмущений в магнитном поле контролировалось по данным сетей магнитометров IMAGE и SuperMAG, планетарное распределение ионосферных электроджетов и продольных электрических токов было исследовано по данным наблюдений на спутниках проекта AMPERE, данные по солнечному ветру и ММП были взяты из базы данных OMNI. Проанализированы возможные причины появления и отсутствия интенсивных ГИТ во время 4 событий суперсуббури наблюдавшихся в ходе развития супербури 10–12 мая 2024 ($Dst \sim -412$ нТл). Два события произошли на главной фазе магнитной бури 10 мая в интервале 19–22 UT и два – в восстановительную фазу бури 11 мая в интервале 08–14 UT. Показано, что развитие суперсуббури не всегда является причиной интенсивных ГИТ на подстанциях Северо-Запада России, так как интенсификация токов может происходить как в другом MLT секторе, так и на других широтах. Но с другой стороны, интенсивные ГИТы в дневном секторе наблюдались во время развития суперсуббури над Аляской, через интенсификации восточного электроджета.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»**Использование пятиминутных данных для характеристик межпланетного магнитного поля и солнечного ветра с целью улучшения качества прогнозирования индекса Кр**

Гаджиев И.М.¹; Мягкова И.Н.²; Баринов О.Г.²; Доленко С.А.²

¹ МГУ, физический факультет

² НИИЯФ МГУ

email: ismailgadzhievff@gmail.com

В докладе рассматривается задача прогнозирования геомагнитного индекса Кр с помощью машинного обучения. Показано, что использование пятиминутных данных для характеристик межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ) в качестве входных признаков улучшает качество прогноза по сравнению с более ранними моделями, использующими только часовое разрешение данных входных признаков.

Прогнозирование Кр-индекса имеет важное практическое значение, поскольку сильные геомагнитные возмущения приводят к нежелательным эффектам, таким как возникновение гео-магнитно-индуцированных токов (сила которых во время магнитных бурь может достигать десятков ампер) в протяжённых проводниках с низким сопротивлением – линиях связи и электропередач, трубопроводах, рельсах железных дорог; сбои в системах радиосвязи и спутниковых навигационных системах. В докладе рассматривается прогнозирование с горизонтом до 24 часов, а так как Кр-индекс имеет трехчасовую частоту, задачу можно формализовать как прогнозирование восьми следующих значений индекса (восемь горизонтов прогнозирования). Задача решается с помощью методов машинного обучения, таких как градиентный бустинг и нейронные сети.

Ранее авторами в качестве данных, на которых обучались модели, использовались часовые данные для параметров ММП и СВ. Такой подход широко распространен, так как не требует большого количества ресурсов для обучения модели. Однако как интерпретация результатов прогнозирования с помощью полученных моделей, так и физика магнитосферных процессов подсказывают, что более результативными предикторами геомагнитных возмущений могут служить характеристики ММП (в частности, B_z компонента) и СВ с более подробным временным разрешением.

В докладе обсуждаются результаты, полученные при использовании пятиминутных данных ММП и СВ для обучения моделей машинного обучения. Выводы делаются отдельно для двух используемых типов моделей – градиентного бустинга и многослойных персепtronов на каждом из горизонтов прогнозирования. Исследуется влияние учета истории переменных на качество прогноза. Результаты сравниваются с метриками, полученными при использовании часовых данных.

Производится интерпретация моделей – насколько и каким образом каждая из исходных переменных вносит вклад в результат прогнозирования. Исследуется изменение качества прогноза в зависимости от уровня геомагнитных возмущений. Делается вывод о применимости полученных моделей для практического использования на разных горизонтах прогнозирования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»**Зависимость качества прогнозирования геомагнитных индексов методами машинного обучения от фазы солнечного цикла**

Доленко С.А.¹; Владимиров Р.Д.¹; Баринов О.Г.¹; Мягкова И.Н.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: dolenko@srd.sinp.msu.ru

Прогнозирование геомагнитных возмущений представляет собой важную задачу, так как сильные геомагнитные возмущения способны оказывать негативное влияние на функционирование технических устройств - вызывать помехи радиосвязи и сбои навигационных систем, индуцировать сильные токи в протяжённых проводниках (трубопроводы, линии электропередач, рельсы), а также, возможно, оказывать влияние на самочувствие людей.

Магнитосфера Земли представляет собой сложную динамическую систему, состояние которой зависит как от внешнего воздействия со стороны солнечного ветра (СВ), так и от его собственной предыстории. Помимо этого, эффективность передачи энергии от СВ в магнитосферу зависит от направления и амплитуды межпланетного магнитного поля (ММП). В связи с тем, что на данном этапе общепринятых физически обоснованных моделей, которые могли бы позволить осуществлять надёжное прогнозирование состояния магнитосферы, не существует, прогнозирование часто осуществляется с помощью методов машинного обучения (ММО), которые для построения прогнозирующих моделей используют обучение на исторических данных. Как правило, данные для обучения моделей ММО представляют собой многомерные временные ряды, компонентами которых являются параметры СВ и ММП (измеренные в точке Лагранжа L1 между Землёй и Солнцем), а также значения геомагнитных индексов. Дополнительно может использоваться информация о фазах вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.

При этом хорошо известно, что динамика СВ и ММП, их свойства и характер взаимодействия с магнитосферой Земли в значительной степени зависят от солнечной активности, в частности – от фазы 11-летнего солнечного цикла. Следствием этого является существенная зависимость качества прогнозирующих моделей от того, какие временные диапазоны используются для обучения моделей ММО и для их тестирования. Это не только сильно затрудняет сравнение моделей, построенных разными авторами, но и ставит в повестку дня вопрос о выработке оптимальной методики построения моделей, которая могла бы обеспечить наилучшее качество прогнозирования в каждый текущий момент времени с учётом горизонта прогнозирования.

Настоящая работа направлена на разработку такой методики. Рассматривается зависимость качества прогноза нескольких моделей машинного обучения (линейная регрессия, градиентный бустинг, нейронные сети типа многослойный персептрон) от длительности и положения во времени как тренировочного набора данных (на котором обучается модель), так и тестового набора (на котором проверяется качество полученной модели). Для построения моделей использовалась специальная программная система для разработчика моделей прогнозирования космической погоды «СИВИЛЛА», разработанная в НИИЯФ МГУ.

По результатам работы формулируются рекомендации по оптимальному выбору наборов данных для обучения моделей.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Учет температурного эффекта атмосферы в данных регистрации подземных мюонных телескопов Якутского спектрографа космических лучей по данным наземных измерений температуры

Зверев А.С.¹; Григорьев В.Г.¹; Гололобов П.Ю.¹; Стародубцев С.А.¹; Герасимова С.К.¹

¹ ИКФИА СО РАН

email: a_zverev@mail.ru

Использование данных мюонных детекторов при исследовании вариаций космических лучей требует исключения метеорологических эффектов (барометрического и температурного), что позволяет корректно анализировать экспериментальные данные. Если с введением поправки на барометрический эффект проблем не возникает, то для исключения температурного эффекта необходимы данные аэрологического зондирования атмосферы вблизи места расположения детекторов. Однако такие данные, как правило, либо отсутствуют, либо собираются крайне редко. Поэтому в последнее время для оценки температуры на различных стандартных уровнях атмосферы и последующего исключения температурного эффекта в данных подземных детекторов используется информация, получаемая из глобальных атмосферных моделей. Однако в настоящее время эти данные стали недоступны для российских ученых. В связи с этим целью данной работы является исследование возможности учета температурного эффекта для Якутского спектрографа космических лучей с использованием исключительно данных непрерывных часовых наземных измерений температуры. Сравнение результатов учета температурного эффекта в подземных наблюдениях на основе наземных температурных данных с данными, полученными с использованием глобальных атмосферных моделей, показывает, что такой подход может давать вполне приемлемые результаты.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Взаимосвязь амплитуды УНЧ волн (пульсаций Pc5/Pi3) с потоком электронов с энергиями порядка сотен кэВ в зависимости от питч-угла.

Зворыгина Е.С.¹; Ягова Н.В.²

¹ МФТИ

² ИФЗ РАН

email: zvorygina@phystech.edu

Работа посвящена исследованию взаимосвязи между потоком электронов с энергиями от 40 кэВ до 475 кэВ и амплитудой геомагнитных пульсаций Pc5/Pi3 в зависимости от питч угла. Использовались данные измерений магнитного поля и дифференциального по направлению и энергии потока электронов на геостационарном спутнике GOES-15. Проведен анализ зависимости ковариационных функций между временными рядами часовых значений амплитуды пульсаций миллигерцового диапазона (Pc5/Pi3) компонент магнитного поля и потока электронов.

Выполненный в предыдущей работе анализ зависимости от энергии [1] показал, что для всех сочетаний компонент поля и энергии электронов наблюдается устойчивая положительная корреляция между потоком и амплитудой. После подавления суточного хода вид зависимости корреляции от времени задержки при в области имеет фазу быстрого роста и фазу медленных вариаций вблизи максимума. В качестве интегральных параметров описывают характер ковариационной функции используются значения максимума и время его достижения. Значение максимума мало меняется с энергией и находится в диапазоне 0.6-0.7, а время достижения максимума растет с ростом энергии, достигая нескольких суток на больших энергиях. Вероятным механизмом в этом случае является взаимодействие электрона с МГД волной на частотах первых гармоник дрейфового резонанса.

В настоящей работе исследуется зависимость от питч-угла для каждой энергии электронов и компоненты магнитного поля. Для узкого интервала питч углов значения максимума корреляции возрастают относительно значений, полученных без разделения по питч углам, а качественный вид зависимости при этом сохраняется. Обсуждаются возможная роль области аврорального ускорения электронов в корреляции между электронами с малыми питч углами и амплитудой УНЧ волн.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Памяти М.И. Панасюка: Отдел космических наук в 2023-2025 годы

Калегаев В.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: klg@sinp.msu.ru

Отдел космических наук создан в 2015 году по инициативе директора НИИЯФ МГУ профессора М.И. Панасюка. Отдел объединил девять отделов НИИЯФ, выполняющих исследования в области астрофизики и космической физики. В настоящее время в отделе ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические исследования в области физики космических лучей, наземной и внеатмосферной гамма-астрономии, физики Солнца и гелиосферы, физики радиационных поясов, физики магнитосфер Земли и планет, электродинамики магнитосферы, космического материаловедения. Сотрудниками лаборатории радиационного мониторинга ведется разработка приборов для серийных российских космических аппаратов, а также, для малых космических аппаратов в формфакторе CubeSat. В отделе созданы Центр управления полетами и Центр космической погоды. В докладе приведены основные результаты НИР отдела космических наук в 2023-2025 гг.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»**Исследование корреляций солнечной активности и параметров распадов ядер Fe-55 и Co-60**Майбуров С.Н.¹¹ ФИАН

email: mayburov@mail.ru

Темпоральные вариации параметров распада радиоактивных ядер широко изучаются в последние годы, их наблюдение может быть сигналом о новых физических эффектах космического происхождения, в частности, вызванных влиянием солнечной активности. В ряде экспериментов зафиксированы годовые и суточные осцилляции скорости α - и β -распадов нестабильных ядер на уровне 0,05 % [1-2]. Также сообщалось о корреляции скорости обратного β -распада Mn-54 с солнечной активностью, в частности, с вспышками рентгеновского и γ -излучения [1]. Коллаборация БГТУ – ФИАН – ИЯФ СОАН -ИТЭФ изучает корреляции скорости счёта β -распада Co-60 и обратного β -распада Fe-55 с солнечной активностью [3]. В этих экспериментах гамма-кванты с энергией 1,1 и 1,3 МэВ от β -распада Co-60, регистрируются германиевым полупроводниковым детектором. Рентгеновские кванты с энергией 5,9 и 6,5 КэВ от распада Fe-55, регистрируются полупроводниковым Si-Pin детектором.

Возможное влияние солнечной активности на скорости распада данных ядер изучалось в течение 2014–2025 г.. Было обнаружено четырнадцать значительных отклонений скорости счёта распада от ожидаемой скорости порядка ~ 0,5 % с длительностью от 50 до 188 часов [3-4]. Показано, что такие отклонения скорости в сторону уменьшения происходят за 20 – 80 часов до солнечных вспышек наивысшей интенсивности - класса X с достоверностью на уровне 90% [3-4]. Три синхронных отклонения скорости счёта распадов Fe-55 и Co-60, аналогичным образом коррелирующие с солнечными вспышками класса X, были одновременно зарегистрированы в 2023 – 2024 гг. на установках установленных в ФИАН и ИТЭФ на расстоянии 3 км [4].

Рентгеновское и γ -излучение, образующееся во время солнечных вспышек, может представлять прямую опасность радиационного поражения для космонавтов и аппаратуры космических аппаратов, поэтому разработка системы предупреждения о солнечных вспышках может повысить радиационную безопасность космических полетов [4,5]. Проект «Распад» предполагает проведение одновременных измерений скорости счёта распада ядер Fe-55, Co-60 на Международной Космической Станции и в наземных условиях и изучение их корреляций с солнечной активностью.

1. E. Fischbach et al. , Rev. Space Sci. 145, 285 (2009); ibid., Astrop. Phys. 59,47 (2008)
2. E. Alekseev et al. , Phys. Part. Nucl. 47, 1803 (2016); ibid., 49, 557 (2018)
3. S. Bogachev et al. J. Phys.: Conf. Series 1690, 012028-012035 (2020)
4. С.Н. Майбуров и др. ЭЧАЯ 56, 861 (2025)

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Моделирование прохождения солнечных протонов через атмосферу Земли

Маурчев Е.А.¹; Диценко К.А.¹

¹ ИЗМИРАН

email: maurchev1987@gmail.com

Потоки галактических космических лучей (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ), состоящих в основном из протонов, постоянно присутствуют на границе магнитосферы и атмосферы Земли. В то время как поток ГКЛ является изотропным, а энергии в его спектре могут превышать порядок ТэВ, характеристики СКЛ зависят от солнечной активности и их энергии редко превышают несколько ГэВ. При этом абсолютная величина потока СКЛ может значительно превышать величину потока ГКЛ, вплоть до нескольких порядков. Первичные частицы, как ГКЛ, так и СКЛ, в зависимости от их энергии, могут достигать верхней границы атмосферы Земли (в данном исследовании она условно принята как 100 км) и взаимодействовать с атомами вещества (в основном это кислород и азот). В этой работе нами было проведено моделирование прохождения космических лучей через атмосферу Земли при помощи собственной программы, реализованной на GEANT4 SDK. В качестве входных параметров использовались параметризация атмосферы Земли при помощи модели NRLMSISE-00 и дифференциальные энергетические спектры, полученные при помощи спутника GOES. Приведены примеры высотных профилей ионизации для различных значений жесткости геомагнитного обрезания. Особое внимание уделяется значениям жесткостей ниже 0,65 ГВ, что соответствует высоколатитным областям (географическим).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038,
<https://rscf.ru/project/25-17-20038/>

Применение лазерной абляции для управления отражательной способностью поверхности алюминия

Муртазов А.К.¹; Трегулов В.В.¹

¹ РГУ имени С.А. Есенина

email: akmurtazov@gmail.com

Цель работы – исследование связи отражательной способности и параметров облучения поверхности алюминиевых пластин наносекундным лазером для управления визуальными характеристиками космических аппаратов.

Секция «Медико-биологические проблемы космических полетов»**Космофизические и аэрономические аспекты вирусных пандемий**Рагульская М.В.¹¹ ИЗМИРАН

email: ra_mary@mail.ru

Обсуждается синхронизирующая роль космогеофизических факторов в биосферах процессах. Рассмотрен космофизический аспект мутаций вирусов, а также системообразующая роль космогеофизических факторов и солнечной активности в динамике вирусных пандемий. Подчеркнута роль атмосферных процессов в перемещении вирусов в приповерхностных слоях Земли, в первичной локализации и интенсивности развития вирусных пандемий. Обсуждается неэффективность введения жестких локдаунов при вирусных пандемиях за счет беспрепятственного перемещения вирусов с воздушными массами на атмосферных высотах до 7- 20 км от поверхности Земли, и на расстояния до тысячи километров.

Перемещения вирусов с пылью и воздушными массами, на крыльях самолетов, с аэропланктоном, увеличение скорости их мутаций по мере ослабления с высотой анти-радиационных защитных свойств атмосферы, а также возможность существования компактных атмосферных локализаций вирусов и динамические параметры таких локализаций, зависящих от геомагнитного поля и аэрономических свойств атмосферы на разных высотах, могут стать новым интересным направлением исследований. Изучение взаимодействия вирусной и бактериальной биосферы Земли с факторами космической погоды, солнечной активности, аэрономической динамикой слоев атмосферы и геомагнитным полем представляет особую ценность при моделировании возможных биосфер экзопланет.

Автор выражает глубокую благодарность академику РАН А. Ю. Розанову и В. Н. Снытникову за полезные обсуждения гипотезы динамики вирусов в атмосфере.

Литература

Рагульская М.В. Циклы СА и парадоксы пандемии Covid-19. Геомагнетизм и аэрономия, 2023, т 63, №7, с 122, DOI: 10.1134/S0016793223070198

Рагульская М. В. Пандемия SARS-COV-2 как система «хищник-жертва»: биофизические, социальные и гелиофизические факторы развития локальных эпидемий. Биофизика. 2023. Т. 68. № 4. с. 780-788.

Обридко В. Н., Рагульская М.В., Храмова Е.Г., Раннее Солнце, физические условия на ранней Земле и происхождение жизни. Геомагнетизм и аэрономия. Т.58. №7, С. 871. 2018.

Belisheva N, Lammer H, Biernar H, Vashenyuk E. The effect of cosmic rays on biological systems. ASST 8, 7-17 (2012).

Gromozova E. at al. Cosmic rays as bio-regulator of deep time terrestrial ecosystems // Sun and Geosphere. T. 7. V.2. P. 117-120. 2012

Sesartic, U. Lohmann, T. Storelvmo. Modelling the impact of fungal spore ice nuclei on clouds and precipitation. Environ. Res. Lett. 8 (2013) 014029 DOI:10.1088/1748-9326/8/1/014029

Андреева Н. С. и др. Спорообразующие бактерии во время переноса воздушных масс. Вестник НВГУ, 2018, н.3, стр 123

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

О прогнозе мощности солнечного протонного события в реальном времени с использованием нейросетевых методов

Рославцев С.В.^{1,2}; Власова Н.А.¹; Калегаев В.В.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, Физический факультет

email: roslavtcev.sv22@physics.msu.ru

Солнечное протонное событие (СПС) – одно из основных проявлений солнечной активности, а также радиационно-опасный фактор космической погоды, что делает прогноз мощности СПС актуальной проблемой. Основными источниками потоков солнечных энергичных частиц считаются две составляющие взрывного процесса на Солнце: солнечные вспышки и корональные выбросы массы. В реальном времени пока доступны экспериментальные данные по характеристикам солнечной вспышки: мягкому рентгеновскому излучению Солнца (0,05-0,4 мм и 0,1-0,8 мм) и потокам протонов с энергией >10 МэВ, полученные с геостационарных спутников серии GOES.

Цель работы заключается в создании системы прогноза в реальном времени максимального потока солнечных протонов с энергией >10 МэВ и времени его наступления. Для решения поставленной задачи созданы три модели, использующие алгоритмы машинного обучения: линейной регрессии, случайного леса, градиентного бустинга. Обучение моделей производилось по данным каталогов СПС 23 и 24 циклов солнечной активности, представленных на сайте центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ в разделе «Космическая погода» [https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php]. Были отобраны СПС, в которых поток протонов с энергией >10 МэВ превышал 10 pfu. В качестве входных параметров использовались рентгеновский класс солнечной вспышки и интервал времени между началом вспышки и началом возрастания потока солнечных протонов. Выполнена валидация моделей, приведены результаты моделирования и оценки целесообразности использования алгоритмов машинного обучения для решения поставленной задачи.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»**Анализ эффективности моделей типа трансформер для прогнозирования состояния магнитосферы Земли**

Семенов М.В.¹; Доленко С.А.²; Мягкова И.Н.²

¹ МГУ, физический факультет

² НИИЯФ МГУ

email: marksemenov979@gmail.com

В работе проведено исследование различных методов прогнозирования временного ряда (ВР) геомагнитного индекса Dst, характеризующего состояние магнитосферы Земли.

Для обработки ВР используется так называемое погружение (топологическое вложение) ВР, смысл которого – включение информации о нескольких предыдущих значениях каждой компоненты ВР в каждый пример данных.

Исследования последних лет в области машинного обучения показали, что одним из эффективных методов прогнозирования ВР является модель с архитектурой типа трансформер [1]. Ключевым свойством данной архитектуры является использование механизма внимания, позволяющего в процессе обучения осуществлять адаптивное выделение наиболее существенных входных признаков (в случае ВР – участков анализируемого ВР).

Одним из преимуществ данной архитектуры над другими, например, над многослойным персепtronом (МСП), часто используемым для прогнозирования геомагнитных индексов [2, 3], является возможность эффективной обработки последовательностей большой длины. Это достигается, в частности, за счет наличия блока позиционного кодирования, который позволяет вычислять расстояние между точками временного ряда. Данное преимущество дает возможность обрабатывать ВР с большей величиной погружения.

В настоящей работе проведены исследования качества прогнозирования нейросетевых моделей с архитектурами трансформер и МСП в зависимости от глубины погружения ВР, а также изучены реализации модели трансформер с различными блоками позиционного кодирования. Для проверки эффективности моделей используются такие показатели качества прогнозирования, как коэффициент детерминации R² и среднеквадратичная ошибка.

В результате работы было показано, что модель трансформер является более эффективной для решения рассматриваемой задачи, чем модель МСП. При этом увеличение глубины погружения ВР не приносит заметного прироста качества прогнозирования. Было показано, что рассмотренный метод усовершенствования механизма позиционного кодирования по сравнению с работой [1] приводит к увеличению вычислительных затрат, однако также не приводит к повышению качества прогнозирования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова.

Литература

1. A Vaswani, N Shazeer, N Parmar, J Uszkoreit, L Jones, AN Gomez, Ł Kaiser, I Polosukhin Attention is all you need //Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)
2. Myagkova I.N., ShirokiiV R., Vladimirov R.D., Barinov O.G., Dolenko S.A. Prediction of the Dst Geomagnetic Index Using Adaptive Method // Russian Meteorology and Hydrology 46, № 3, p. 157-162 (2021)
3. Vladimirov R.D., Shirokiy V.R., Barinov O.G., Dolenko S.A., Myagkova I.N. Forecasting the State of the Earth's Magnetosphere Using a Special Algorithm for Working with Multidimensional Time Series // Moscow University Physics Bulletin 79, № Suppl.2, p. S805-S813 (2024)

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Динамика ГИТ во время супербури 10-12 мая 2024 года: суббури, пульсации, скачки давления солнечного ветра

Сецко П.В.¹; Дэспирак И.В.¹; Любичч А.А.¹; Сахаров Я.А.¹; Селиванов В.Н.²

¹ ПГИ

² Центр Физико-Технических Проблем Энергетики Севера, КНЦ РАН

email: setsko@pgia.ru

В работе проанализированы источники геомагнитно-индукционных токов (ГИТ), зарегистрированных в глухозаземленной нейтрали трансформаторов Карело-Кольской линии электропередач в период мощной геомагнитной бури 10-12 мая 2024 года. В течение главной фазы бури (~17:15 UT 10 мая – ~04:30 UT 11 мая) на южной станции сети регистрации EURISGIC – Кондопога (KND) – значение ГИТ было в разы выше по сравнению с северной станцией – Выходной (VKH). Затем, во время фазы восстановления, ситуация изменилась: максимальные значения ГИТ регистрировались уже на северной станции – Выходной (VKH). Такая пространственно-временная динамика обусловлена смещением к экватору и расширением аврорального овала во время главной фазы бури с последующим возвратом на высокие широты во время фазы восстановления бури.

Показано, что ГИТ в вечернем и ночном секторах MLT были связаны с суббурами и суперсуббурами, совпадая с интенсификациями и движением по широте западного электроджета. ГИТ в утреннем секторе MLT были индуцированы пульсациями типа Pc5/Pi3, обычно регистрируемые на фазе восстановления суббури. А ГИТ в дневном секторе возникали одновременно с усилением восточного электроджета во время развития суперсуббури в ночном секторе MLT. Максимальные значения ГИТ (50-65 A) во время этого события наблюдались при наложении нескольких геомагнитных источников: суббури, Pc5 пульсаций и скачков динамического давления солнечного ветра.

Полученные результаты подчеркивают сложный, нелинейный характер геомагнитной природы ГИТ и свидетельствуют о том, что их интенсивность не обязательно масштабирует с интенсивностью суббури. Тем не менее, интенсивные суббури, такие как суперсуббури, способны вызывать существенное усиление ГИТ даже в дневном секторе MLT.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Влияние солнечных вспышек на шумановские резонансы и распространение СДВ волн

Сурков В.В.¹

¹ ИФЗ РАН

email: surkovvadim@yandex.ru

В докладе исследуется теоретическая модель воздействия рентгеновского излучения (РИ) солнечной вспышки на частоты шумановских резонансов и сдвиг фаз сверхдлинных волн (СДВ), распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера. Рассматривается нестационарный плоский поток рентгеновских фотонов, падающих на Землю. Находится высотное распределение скорость ионизации воздуха под действием РИ в предположении, что коэффициент поглощения энергии фотонов зависит от их энергии и плотности воздуха. Распределение фотонов по их энергиям оценивается в планковском приближении на основе данных спутников серии GOES. Изменения концентраций электронов и ионов в ионосфере описываются системой дифференциальных уравнений, которые учитывают скорость образования и рекомбинации частиц, а также присоединение электронов к нейтральным молекулам. Высотные профили всех констант реакций, а также подвижность электронов и ионов аппроксимируются с помощью табличных данных. Решение этих уравнений используется для расчета возмущений распределения по высоте проводимости ионосферы, вызванных РИ солнечной вспышки. Эти процессы влияют как на изменение эффективной высоты нижней границы ионосферы, так и на глубину проникновения низкочастотного электромагнитного поля из волновода Земля-ионосфера в проводящую ионосферу. Теория объясняет взаимосвязь между интенсивностью РИ солнечной вспышки и изменением средневзвешенной частоты резонансов Шумана, которое наблюдалось для ряда солнечных вспышек различных классов. Приводятся оценки изменения фазы СДВ волн в точке приёма во время солнечных вспышек, которые сравниваются с данными измерений.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»**РС индекс как стандарт оценки мощности магнитных суббурь**Трошичев О.А.¹¹ ААНИИ

email: olegtro@aari.ru

Индекс магнитной активности в полярных шапках (РС индекс) считается показателем интенсивности воздействия солнечного ветра на магнитосферу Земли (IAA Resolutions, 2013, 2021). Это означает, что РС индекс может использоваться в качестве стандарта для оценки изменений различных магнитосферных и ионосферных параметров в ходе магнитосферных возмущений. В данной работе демонстрируется возможность мониторинга развития магнитных суббурь по данным о РС индексе.

Для анализа были использованы SuperMAG данные (<https://supermag.jhuapl.edu>) о магнитных отклонениях δH и δD на 95 станциях, расположенных в полосе широт от 60° to 85° CGLat. 1-минутные SuperMAG величины δH и δD рассчитываются (в единицах нТ) с учётом медленных изменений геомагнитного поля и геомагнитных вариаций, обусловленных суточными и сезонными изменениями ионосферной проводимости и, таким образом представляют изменения магнитного поля (магнитные возмущения), связанные с воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли. Как результат, δH и δD отклонения характеризуют величину магнитных возмущений, вызываемых эквивалентными ионосферными токами, текущими, соответственно, вдоль и поперёк геомагнитной широты. В нашем анализе по данным измерений за 2013-2014гг ($N = 40\,460\,016$) было получено распределение медианных величин δH и δD во всей высоколатитной области (карты пространственно-временного распределения δH и δD на сетке с размером 1° MLat и 15° MLong при различных значениях РС индекса). Особенности поведения δH и δD на различных широтах и секторах MLT сделали возможным разделить DP12 возмущения, вызываемые системой продольных токов R1/R2 FAC, действующей во внутренней (замкнутой) магнитосфере, и DP11 вызываемые системой SCW FAC (токовый клин магнитной суббури), связывающей токи плазменного слоя хвоста магнитосферы с ночной авроральной зоной. originating in the magnetotail plasma sheet. Таким образом, показана возможность мониторинга развития магнитных возмущений в любой точке авроральной зоны и полярной области по оперативным данным о РС индексе как индикаторе поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра. Информация об 1-мин РС индексах в северном и южном полушариях (PCN и PCS) предоставляется в открытом доступе в реальном времени на сайте (<http://pcindex.org>).

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Эльфолокация: новый подход к изучению грозовой атмосферы

Шаракин С.А.¹; Сараев Р.Е.^{1,2}

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: sharakin@mail.ru

Грозовые разряды, кроме прочего, являются источниками многочисленных процессов в верхней атмосфере. Действие электромагнитного импульса разряда на ионосферу на высоте около 90 км приводит к повышенной ионизации и свечению с характерным пространственно-временным паттерном в виде быстро расширяющегося кольца, получившего в литературе название “эльфа” (от англ. ELVES,...). Такие события многократно регистрировались как с земли, так и при помощи орбитальных изображающих детекторов.

Анализ кинематики изображения эльфа позволяет восстановить положение разряда, см. [1]. Если же дополнить данные фотометрией, то может быть построена динамическая модель события, параметрически связанная не только с локализацией, но и с ориентацией разряда, и даже с функцией его тока. Фактически, речь идет о получении важной информации о разрядных процессах в грозовой туче опосредовано по их “ионосферным отпечаткам” – эльфам.

В настоящей работе предложена байесовская модель реконструктора эльфов, реализованная средствами вероятностного программирования библиотеки PyMC-5. Модель использована для реконструкции событий, зарегистрированных орбитальными детекторами “ТУС” и “УФ атмосфера”.

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Геомагнитные пульсации Рс5-6/Рi3 во внешней магнитосфере и ограничения возможности прогноза потенциально опасных возмущений космической погоды

Ягова Н.В.¹

¹ ИФЗ РАН

email: nyagova@yandex.ru

Наиболее опасными для технологических систем проявлениями космической погоды являются резкие возрастания потоков быстрых заряженных частиц в магнитосфере, а для наземных систем – наведение геоиндуцированных токов в наземных проводниках. Это ставит вопрос о прогнозе таких возмущений, и библиография по теме прогноза насчитывает сотни работ.

Принципиальная возможность прогноза основана на конечном времени распространения возмущения от точки либрации, где постоянно происходит мониторинг параметров межпланетной среды, до магнитосферы. Ограничения прогноза связаны с тем, что магнитосфера способна накапливать энергию и эффективность внешнего возмущения зависит от состояния магнитосферы. Вопрос частично решается увеличением горизонта прогнозирования, но при любом увеличении остается неустранимый разброс, связанный, прежде всего с волновой составляющей космической погоды, в том числе нелинейной. В целом прогноз работает тем лучше, чем больше амплитуда возмущения, пространственный масштаб и время осреднения выходных параметров.

Понимание принципиальных ограничений прогноза позволит правильно распределить усилия между развитием измерительной сети и методами обработки. Кроме прогноза, в приложениях стоит задача апостериорной оценки причин сбоев. «Прогнозно-индексный» подход приводит к ошибочным оценкам возможных причин произошедших сбоев, как заведомо не связанных с возмущениями космической погоды, если они произошли вне сильных возмущений.

В настоящем исследовании анализируются отдельные события и статистические закономерности для длиннопериодных геомагнитных пульсаций во внешней магнитосфере и в высоких широтах на Земле во время и вне геомагнитных бурь и сильных суббурь. Показано, что для внешней магнитосферы основной формой волновой активности являются пульсации, отличающиеся от Рс и классических Рi, что связано с не малым изменением параметров магнитосферы на периоде волны. Оценивается вероятность появления нелинейных колебаний для разных районов магнитосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Пленарный доклад

Состояние и перспективы развития мюонографии

Яшин И.И.¹

¹ НИЯУ МИФИ

Секция «Прикладные аспекты космических исследований: космическая погода, космическая радиация, материалы в космосе»

Триггерный механизм генерации геомагнитных пульсаций ионизирующим излучением солнечных вспышек

Ященко А.К.¹; Сорокин В.М.¹

¹ ИЗМИРАН

email: alexey_yaschenko@mail.ru

Рассмотрена модель генерации колебаний геомагнитного поля с периодами (5 – 10) минут, которые наблюдаются во время воздействия на ионосферу ионизирующего излучения солнечных вспышек. Показано, что ионизация ионосферы в проводящей области изменяет в ней электрический ток. Это приводит к выделению тепла и появлению силы Ампера, которые генерируют акусто-гравитационные волны (АГВ). Выделяющаяся энергия в нижней ионосфере, необходимая для генерации АГВ, значительно превышает поглощенную энергию излучения солнечной вспышки. Энергия излучения солнечной вспышки является триггером для выделения энергии электрического тока, протекающего в ионосфере. Проведен расчет концентрации электронов и проводимости в нижней ионосфере, а также характеристик источника тепла и силы Ампера, возникающих в результате изменения электрического тока. Развита модель формирования АГВ, возникающих в результате поглощения ионизирующего излучения солнечных вспышек в нижней ионосфере. Распространение этих волн в проводящей ионосфере сопровождается возмущением электрического тока и магнитного поля с периодами 5 – 10 мин. Проведен расчет временной зависимости магнитного поля, результаты которого сопоставлены с магнитограммами. Величина ее периода совпадает с периодом колебаний АГВ. Расчеты показали, что амплитуда колебаний убывает с ростом длительности импульса излучения. Проведен анализ магнитограмм на различных расстояниях от подсолнечной точки на поверхности Земли, на которых наблюдается колебательный режим возмущения геомагнитного поля. Анализ магнитограмм и их динамических спектров показал, что поглощение ионизирующего излучения солнечных вспышек классов X2.2 и X1.5 сопровождается колебаниями магнитного поля с периодами порядка (5-10) минут. На примере двух вспышек с различной длительностью показано, что чем короче вспышка, тем сильнее выражен колебательный характер возмущения. Эффективность их генерации возрастает в случае, когда длительность действия источника составляет величину порядка периода колебаний АГВ. Результаты расчетов, проведенных в рамках рассмотренной модели, согласуются с наблюдениями колебаний магнитного поля во время солнечных вспышек.

Медико-биологические проблемы космических полетов

Дозиметр «Тритель-Б» для измерения ЛПЭ-спектров ионизирующего космического излучения внутри космического аппарата Бион-М» № 2

Иванова О.А.¹; Карцев И.С.¹; Лишневский А.Э.¹; Шуршаков В.А.¹

¹ ГНЦ РФ – ИМБП РАН

Планируемая на июль 2025 г. миссия космического аппарата (КА) – биологического спутника - «Бион-М» №2 будет проходить на высокоширотной орбите с наклонением 97°, на которой в дальнейшем будет функционировать Российская орбитальная станция (РОС). Планируемая продолжительность полета биологического спутника – 30 сут. Для обеспечения дозиметрического сопровождения биологических объектов, распределенных по всему объему КА, наряду с другими пассивными и активными средствами доз контроля, предусмотрено использование дозиметра «Тритель-Б» российской разработки.

Ранее в Служебном модуле МКС в рамках космического эксперимента «Матрешка-Р» успешно использовался дозиметр «Тритель» - совместная разработка ученых российской и венгерской академии наук. В дозиметре «Тритель» с помощью трех блоков взаимно ортогональных телескопов кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД), работающих в режиме совпадений (с возможностью получения данных также и от одиночного режима функционирования), были получены данные о динамике мощности дозы и коэффициента качества от частиц радиационных поясов Земли и галактического космического излучения на орбите МКС.

Для миссии «Бион-М» № 2 в детекторном блоке дозиметра «Тритель-Б» также предусмотрено три телескопа, всего используется 6 ППД. Однако, они расположены на одной линии один за другим и разделены защитным материалом. Это позволит с помощью одного прибора получить динамику накопления поглощенной дозы, а также коэффициенты качества излучения для трех разных толщин защиты внутри КА «Бион-М» № 2, т.е. для условий облучения практически по всему объему биологического спутника. Коэффициенты качества вычисляются на основе измеренных ЛПЭ-спектров по зависимости, рекомендованной МКРЗ.

Дозиметр Тритель-Б прошел в полном объеме наземную отработку. Кроме того, проведенные испытания на протонном пучке с энергиями от 100 МэВ до 250 МэВ медицинского комплекса «Прометеус» (г. Обнинск), подтвердили правильность выбранной концепции.

Реализованная в дозиметре «Тритель-Б» конфигурация линейного расположения детекторных блоков дает возможность проводить также оценку дозовой нагрузки на критические органы человека и организма в целом, необходимые для прогнозирования уровня опасности для экипажа при длительном пребывании в условиях космического пространства.

Секция «Медико-биологические проблемы космических полетов»**Синхронные реакции живых и неживых систем на солнечную активность**Кашулин П.А.¹; Калачёва Н.В.¹¹ Полярно-Альпийский ботанический сад-институт**email:** falconet1@yandex.ru

Многодневные наблюдения физиологического состояния оранжерейных растений чувствительных к климатическим факторам выявили их достоверные реакции в периоды значительных солнечных вспышек 2024-2025 гг. и образования корональных дыр, ориентированных к Земле. Для исключения возможного участия наземных климатических и экологических влияний параллельно с растениями использовали неживые механические и электронные системы. Анализировали реакции растений на геокосмические события года, совпадающие с «аномальными» флуктуациями статистических показателей неживых систем. Неустойчивые системы чувствительны к внешним влияниям, исходы критического момента пребывания монеты «на ребре» могут определять самые слабые воздействия. У растений *Marantha leosoneura* ежедневно измеряли суточный ритм настических движений листовых пластинок. Одновременно фиксировали результаты генерации случайных чисел на базе калькуляторов SRP285II "CITIZEN" и др. а также статистику распределения результатов бросания монет и правильных шестигранников, которые рассматривали как «бернуллиевские» случайные величины с двоичным и шестизначным выбором, соответственно. Проводили анализ серий выпадения одинаковых сторон монет или граней в геофизически спокойные дни и в периоды высокой СА. Анализ многодневной динамики статистических и параметров неживых систем и физиологических индексов растений указывает на присутствие полунедельной и около недельной цикличности. Обнаружена суточная цикличность отклонений статистики ожидаемого числа выпадений граней шестигранников в спокойные периоды. Наблюдали два основных вида реакций изучаемых объектов на значительные усиления СА, сопровождаемые образованием корональных дыр, вспышками: класса X или M: значительное усиление амплитуды наблюдаемых параметров, отклонения от статистически ожидаемых значений или сбой суточных ритмов растений. Эффекты наблюдали в 2024 г., а также в начале 2025 г. Солнечные вспышки из региона 3947 класса X, корональные дыры 29 декабря 2024 г. и 16 января 2025 г. вызвали синхронный сбой суточных ритмов движений листьев растений и числа генерации разных случайных цифр у трёх калькуляторов на несколько суток. Синхронные реакции живых и неживых систем, ассоциированные с крупномасштабными событиями на Солнце, указывают на их общую геокосмическую обусловленность.

Секция «Медико-биологические проблемы космических полетов»**Дозиметрия нейтронов на борту высокоширотной орбитальной станции: проблемы и аппаратный комплекс для измерений**

Рябева Е.В.¹; Ибрагимов Р.Ф.¹; Кугавда В.А.¹; Архангельский А.И.¹; Шуршаков В.А.²

¹ НИЯУ МИФИ

² ГНЦ РФ ИМБП РАН

email: eryabeva@yandex.ru

Экспериментальные исследования по измерению доз нейтронов, проведенные в отсеках среднеширотных орбитальных станций («Мир», МКС, угол наклона орбиты 51.6 градус) показали, что вклад нейтронного компонента может составлять от 10 до 40% от дозы заряженных частиц. Вторичные нейтроны образуются в отсеках станции при взаимодействии протонов радиационного пояса Земли (РПЗ) и частиц галактических космических лучей (ГКЛ) со стенками и оборудованием станции, при этом их энергетический спектр простирается до примерно 100 МэВ, а нейтроны с энергией больше 20 МэВ дают более 60% в полную дозу от нейтронов.

Для Российской орбитальной станции (РОС, наклонение орбиты 97 градусов), совершающей пролет над приполярными и полярными областями, ожидаемый вклад нейтронов в полную дозу будет больше, чем для среднеширотных станций. Это обусловлено увеличением потока и средней энергии вторичных нейтронов, образующихся в отсеках станции легко проникающими на эту орбиту ГКЛ.

Штатный дозиметр нейтронов для РОС, выполняющий роль монитора радиационной обстановки для обеспечения радиационной безопасности экипажа, по сравнению с дозиметрами нейтронов на предыдущих станциях должен регистрировать вклад в дозу от нейтронов высоких (> 20 МэВ) энергий. В докладе рассматриваются требования к характеристикам детекторов, техническое решение по составу аппаратного комплекса для дозиметрии нейтронов с учетом радиационных условий на борту РОС и, соответственно, оцениваются возможные погрешности при мониторировании дозы. Показано, что для достижения приемлемой точности необходимо измерять и спектрометрировать в обязательном порядке нейтроны с энергией от 20 до 100 МэВ, дающие основной вклад в дозу нейтронов.

В качестве штатного дозиметра для РОС предлагается использовать спектрометр нейтронов на основе органического сцинтиллятора размером не менее 3 дюймов. Спектрометр-дозиметр нейтронов должен быть окружен антисовпадательной защитой от протонов. Разделение по нейтронам и гамма-квантам происходит по форме импульса в органическом сцинтилляторе. Сигналы с сцинтилляторов снимаются либо классическим ФЭУ, либо SiPM. Для обработки сигнала и разделения сигналов по форме импульса применяется специально разработанный блок обработки информации с АЦП. Сцинтиллятор может регистрировать и спектрометрировать нейтроны в области энергий 1 - 100 МэВ, что составляет практически 100% дозы от нейтронов. При выборе в качестве сцинтиллятора пластика EJ-276 антисовпадательной защиты можно придать простые геометрические формы, что обеспечит компактность аппаратуры и возможность размещения штатного дозиметра нейтронов в разных отсеках РОС.

Отметим в заключении, что дозиметрия нейтронного излучения, которой до последнего времени уделялось недостаточное внимание на среднеширотных орбитальных станциях, будет актуальна и при лунных миссиях, и для Лунной базы, в том числе при использовании атомных источников энергии.

Секция «Медико-биологические проблемы космических полетов»**Использование дополнительной защиты для снижения дозовых нагрузок в каюте Служебного модуля МКС**Шуршаков В.А.¹; Толочек Р.В.¹; Иванова О.А.¹; Карташов Д.А.¹; Карцев И.С.¹¹ ГНЦ РФ - ИМБП РАН**email:** shurshakov@inbox.ru

Доза в отсеках Служебного модуля (СМ) МКС изменяется от 0.5 до 0.8 мЗв/сут в зависимости от условий полета и космической погоды. В пересчете на годовой полет это может дать от 180 до 290 мЗв, что уже приближается к нормативному уровню 300 мЗв/год, установленному в новых (2021 г.) более жестких дозовых нормативах космонавтов при орбитальных полетах. Наиболее защищенным в СМ является место в салоне большого диаметра около санузла, что связано со сложившейся компоновкой космической станции. К сожалению, по имеющимся данным (расчетным и экспериментальным) каюты космонавтов в СМ являются наименее защищенным отсеком. Такая компоновка с более слабой защищенностью кают сложилась исторически на начальном этапе разработки и создания космических станций, когда влиянию космической радиации не уделялось должного внимания, да и сами нормативы, ограничивающие ее воздействие на космонавтов, были менее жесткие, чем сейчас.

В период 2010 – 2025 гг. в правой каюте СМ МКС находилась специальные накопители, называемые «Шторка защитная», обеспечивающие дополнительную защиту космонавта. В качестве наполнителей использовались укладки средств личной гигиены космонавтов (СЛГ), используемые ими в качестве салфеток и полотенец, – пропитанные водой тканевые материалы, запакованные в полиэтиленовые пакеты. Общая масса такой защиты составила 67 кг, дополнительная толщина – 6 г/см². Анализ полученных данных (в том числе и международных партнеров по МКС) за весь период наблюдения, свидетельствует о возможности снижения дозы в каюте на 20-40%. При этом не требуется доставка на МКС дополнительной массы защитного вещества. Полученные в результате обработки данные хорошо согласуются с теоретическими оценками и свидетельствуют о практической возможности и эффективности использования дополнительной водной защиты в отсеках станции. Альтернативным защитным материалом, используемым в спальном месте астронавта, являются полиэтиленовые плиты толщиной 5 см, скомпонованные в специальный защитный контур. Перспективным является также и использование композитных материалов с правильно подобранным составом, что может позволить получить тот же защитный эффект при меньшем полезном объеме самой защиты.

В настоящее время эксперимент со «Шторкой защитной» закончен, и она будет удалена из каюты космонавта, а дозовые нагрузки вернутся к своему первоначальному уровню. Однако, хочется надеяться, что полученный опыт и знания пригодятся для модулей будущих орбитальных станций. Использование дополнительной защиты отсеков в перспективных космических аппаратах позволит снизить дозу, получаемую членами экипажа за полет, и таким образом увеличить дальность и длительность пилотируемых космических полетов. Авторы выражают свою благодарность специалистам-энтузиастам отрасли, без участия которых этот эксперимент не мог бы состояться, и, конечно же, космонавтам МКС, мужественно «терпевшим» нашу «Шторку защитную» в своей каюте в период космической миссии.

Научно-образовательные космические проекты

Создание прибора МАДИЗ

Ефимкин А.Н.¹; Антонюк Г.И.²; Горбач Е.Ю.²; Фокин В.А.³; Золотарев И.А.²

¹ МГУ, ФКИ

² НИИЯФ МГУ

³ МГТУ, Информатика и система управления

email: s24d_efimkin@179.ru

Матричный детектор излучения — это образовательный проект, научной задачей которого является изучение возможности детектирования радиации с помощью фотоматриц. Проект начал создаваться летом 2023 года в рамках проектной смены «Большие вызовы 2023» в Сириусе. Измерение радиации является важным направлением исследования космического пространства, особенно на полярной орбите. Прибор МАДИЗ запущен на эту орбиту. Он проводит наблюдения радиационного фона во время максимума солнечной активности. Важной особенностью прибора является простота детектирующей части. Это матрица фотокамеры. Схожие сенсоры установлены на многих кубсатах, поэтому алгоритмы, используемые на приборе, можно использовать на уже запущенных спутниках, и измерять радиацию сразу в разных точках орбиты в одно время. Наш прибор фиксирует пролеты отдельных частиц через матрицы. Особый интерес представляют солнечные протоны высоких энергий, так как они составляют значительную часть радиационного фона. Также их количество на околоземной орбите сильно меняется со временем.

Когда протон пролетает через сенсор камеры, он «возбуждает» пиксели и оставляет след на фотографии. Это мы называем треками. На снимке может быть огромное число этих частиц, так как сенсор состоит из 12 миллионов пикселей, а артефакт из 10-100 пикселей. Для того чтобы найти эти треки прибор обрабатывает изображение. На приборе МАДИЗ установлено 2 сенсора на расстоянии 2 мм Общее количество артефактов говорит о радиационном фоне в этой точке орбиты. Это первый параметр, который измеряет наш прибор. Вторым параметром является направление прилета отдельных частиц. Если частица оставит след сразу на двух сенсорах, то можно отследить ее путь в пространстве между матрицами.

МАДИЗ запущен в ноябре на кубсате 6U «Альтаир» на полярную орбиту. Прибор состоит из двух основных частей. Это детекторная часть, которая состоит из двух Raspberry pi HQ camera, и вычислительная часть. Она состоит из Raspberry pi CM4. Эти части крепятся на спутник через алюминиевые пластины. Прибор имеет уменьшенную копию, она имеет меньший вес, меньшее потребление и одну камеру, но, как и основной прибор, будет измерять радиационный фон. Этот прибор был запущен на кубсате 3U «Рузаевка-390» в ноябре. Были проведены пробные включения прибора МАДИЗ. В первый раз была проверена способность прибора передавать данные с вычислителя на бортовой компьютер спутника. Во втором включении были включены оба сенсора и запущен алгоритм по поиску частиц. Прибор успешно передал результаты работы программы. Во время включения в области Южно-Атлантической аномалии было зарегистрировано 200 частиц в верхнем сенсоре, 81 частица в нижнем сенсоре и 16 совпадений за 20 секунд. Дальнейшая работа предполагает больше включений прибора и анализ данных, полученных с него.

Секция «Научно-образовательные космические проекты»**СОНЭТ – система оптических наблюдений энергичных транзиентов для кубсатов МГУ**

Кудрявцев В.Д.¹; Белов А.А.¹; Климов П.А.¹; Мурашов А.С.¹; Чернов Д.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ

Научная аппаратура СОНЭТ является перспективной разработкой детекторов спутникового базирования для регистрации пространственно-временной структуры УФ-излучения атмосферы Земли. Разработка ведется на основе опыта, полученного при проектировании и эксплуатации проборов АУРА (англ., AURA – atmospheric Ultraviolet RAdiation) на спутниках «ВДНХ-80», «ДЕКАРТ» и «САТУРН». Важным результатом этих предварительных экспериментов является то, что показана надежность предлагаемых измерительных схем на основе кремниевых фотоумножителей в условиях работы в открытом космосе и неориентированном полете.

СОНЭТ позволит проводить исследования свечения атмосферы Земли геофизической и космофизической природы, такие как транзиентные атмосферные явления (ELVES, BLUES, jets и др.), транзиентное авроральное свечение (пульсирующие полярные сияния, оптические микровсплески и пр.), внегрозовые транзиентные явления.

СОНЭТ состоит из трех основных частей: 1) Широкоугольный телескоп. Оптическая ось направлена в nadir. Оптическая система представлена линзой, выполненной из УФ-прозрачного пластика, которая фокусирует входящее УФ-свечение на фокальную плоскость, где расположен фотоприемник. Фотоприемник – матрица кремниевых фотоумножителей. Временное разрешение телескопа 1 мкс. 2) Четырехканальный спектрометр на основе кремниевых фотоумножителей с интерференционными фильтрами. Полосы пропускания светофильтров: два в ближнем УФ-диапазоне: (337±10) нм, (391±10) нм и два в красном: (760±10) нм и (777±10) нм. Поле зрения спектрометра совпадает с полем зрения телескопа. Предназначен для определения высоты и типа транзиентного явления. 3) Лимбовая камера – это камера-обскура, направленная на лимб и предназначенная для исследования высотной структуры свечения атмосферы.

На сегодняшний день проведено изготовление летного образца аппаратуры, лабораторные испытания и калибровочные измерения. Назначение и состав аппаратуры СОНЭТ, а также результаты предполетной подготовки и испытаний будут представлены в докладе.

Секция «Научно-образовательные космические проекты»**В космос по ступеням «Воздушно-инженерной школы»**Радченко В.В.¹¹ НИИЯФ МГУ

email: vrad1950@yandex.ru

Проект «Воздушно-инженерная школа» возник в 2011 году как инициатива нескольких энтузиастов из НИИЯФ МГУ имени М.В.Ломоносова и Мемориального музея космонавтики. Причиной создания проекта была ситуация в космической отрасли, когда «прервалась связь времён», а у подрастающего поколения был практически утрачен интерес к инженерной и конструкторской деятельности. В 2016 году проект получил поддержку Фонда национального интеллектуального резерва (Иннопрактика), а с 2017г – Госкорпорации Роскосмос.

За 14 лет проект превратился в массовое движение, объединяющее десятки творческих коллективов и групп, приобрёл своё уникальное лицо, сформировал структуру и разработал собственную образовательную методику. Целевой аудиторией проекта являются школьники 6-11 классов, заинтересованные в изучении точных наук, студенты ССУЗов и ВУЗов, обучающиеся на факультетах и кафедрах инженерно-технической направленности преимущественно в сфере аэрокосмических технологий. В настоящее время в проекте присутствуют два направления: «Аппараты» (конструирование «спутников») и «Носители» (конструирование ракет-носителей и БПЛА).

Каждое направление состоит из нескольких лиг, различающихся возрастом участников и сложностью выполняемых ими задач. Переходя из лиги в лигу, то есть из класса в класс, поднимаясь по ступеням Школы, участники решают всё более сложные инженерные задачи, становясь мотивированными абитуриентами и студентами. Таким образом, в проекте реализуется непрерывная траектория дополнительного инженерного образования.

По статистике около 60% выпускников Школы выбирают для дальнейшего обучения профильные аэрокосмические вузы и специальности, а многие участники уже успешно работают на предприятиях космической индустрии, или в смежных высокотехнологичных отраслях. В последние годы резко увеличилось количество студенческих команд, участвующих в проекте

Проект существует в форме ежегодных всероссийских чемпионатов Воздушно-инженерной школы

До 2017г. финалы чемпионатов проходили в Дубне, на базе филиала НИИЯФ МГУ, а старты в Талдомском районе Московской области. В связи с ростом числа участников и повышению требований к полигону для стартов с 2018 года финальные мероприятия проходят во Владимирском государственном университете, а полёты на аэродроме Каменово в Камешковском районе Владимирской области.

Осенью на старт чемпионата «Воздушно-инженерной школы» выходят от 200 до 250 школьных и студенческих команд. Затем, с ноября по февраль работает «Учебная часть» Школы, а именно, проводятся дистанционные циклы лекций, вебинаров и консультаций по основам конструирования, программирования и работе с электроникой для команд и наставников, как опытных, так и впервые участвующих в чемпионате. Следующий важный этап - очно-заочная отборочная сессия в феврале, на которой команды защищают теоретическую проработку проектов и получают замечания и комментарии от экспертов. В мае участники демонстрируют готовность своих изделий, предоставляя экспертным комиссиям записи видеопрезентаций. Команды, прошедшие все этапы, приглашаются на финал в июле, где проводят запуски своих изделий. Так в финале 13-го чемпионата в июле 2024 года участвовало 76 команд. Кроме того, во время проведения финала чемпионата организуются курсы повышения квалификации для команд и наставников, желающих участвовать в проекте, но не имеющих достаточной квалификации.

В проекте представлены команды из более чем 40 регионов РФ и ближнего зарубежья, причём это далеко не только города-миллионники (Москва, Санкт-Петербург, Самара, Новосибирск, Пермь) и аэрокосмические наукограды (Королёв, Химки, Калуга...), но и команды школьников из небольших городов, посёлков и даже сёл от Владивостока, Якутска и Алматы до Калининграда, Луганска и Минска. Команды формируются предприятиями космической отрасли, ведущими профильными вузами, кванториумами, центрами работы с одарёнными

детьми (ЦОД), домами детского технического творчества. Однако немало примеров успешного участия в проекте команд из общеобразовательных школ и даже «семейных» команд. Тенденция последних лет - развитие системы региональных чемпионатов. Так в сезонах 2023-2025 гг прошли чемпионаты в Курской, Самарской, Владимирской областях, Республике Башкортостан и Луганской Народной Республике, 1-й и 2-й Евразийские чемпионаты в Республике Казахстан.

Стартовав как локальный образовательный проект, Школа превратилась в распределённую сеть творческих коллективов, групп, команд и отдельных энтузиастов инженерно-космического образования, объединяющую преподавателей-наставников, организаторов, экспертов, волонтёров и помощников. Большую, если не основную, организационную и методическую работу сейчас ведут воспитанники Школы, пришедшие в проект десять и более лет назад, закончившие или заканчивающие профильные вузы и уже работающие на предприятиях отрасли. Так ракетные старты «аппаратных» лиг обеспечивает СКБ RocketLAV Самарского национального исследовательского университета имени С.П. Королева, Там же, в Самаре, разработаны электронные конструкторы для Регулярной лиги. Конструкторы для Лиги Юниор разработаны студентами Юго-западного госуниверситета в Курске.

Студенты, аспиранты и выпускники этих университетов, а также МГТУ имени Н.Э.Баумана и БГТУ имени Д.Ф.Устинова (ВОЕНМЕХ) успешно проводят занятия в Учебной части Школы и на курсах повышения квалификации преподавателей-наставников.

Основную оргработу на массовых очных мероприятиях проекта ведёт волонтёрский корпус, в котором работают бывшие и будущие участники, а также все, кому интересно и не жаль потратить своё личное время, чтобы помочь проекту.

Важным инструментом Школы являются Экспертные комиссии, которые формируются из преподавателей профильных вузов, сотрудников предприятий космической отрасли и наиболее авторитетных руководителей команд, участвующих в проекте.

В первые годы Школа столкнулась с проблемой «средств выведения», вызванной в первую очередь, полным отсутствием отечественных твёрдотопливных двигателей для ракет-носителей. По заказам Школы студенческая лаборатория Real Rockets из Кирова с каждым годом разрабатывала для всё более мощные двигатели, которые теперь используются многими коллективами любительского ракетостроения. К сожалению, за это время в стране так и не возникло промышленное производство таких двигателей и Real Rockets, ставшая уже серьёзной компанией, остаётся монополистом в России. Уже в финале 3-го чемпионата Школы состоялись первые запуски аппаратов, разработанных участниками, в стратосферу с помощью гелиевых шаров-зондов только что созданной компании СТРАТОНАВТИКА. Сейчас это направление стало популярным и стратосферные старты активно используются в конкурсах «Стратосферный спутник», «Дежурный по планете», «Большие вызовы». Развитие проекта потребовало изменения его юридического статуса. В 2023 году было зарегистрирована НКО «Ассоциация Воздушно-инженерная школа», объединившая руководителей коллективов и команд, представителей экспертного сообщества, волонтёрского корпуса, компаний и организаций, сотрудничающих со Школой. Ассоциация заключила Соглашения о сотрудничестве с Госкорпорацией Роскосмос, компанией Иннопрактика, рядом университетов, и уже получила несколько грантов на развитие своих проектов. Финал очередного 14-го российского чемпионата пройдёт с 5 по 11 июля. Необходимая информация находится на сайте www.roschartsat.com, а также на ресурсах Воздушно-инженерной школы в соцсетях и Телеграмм.

Секция «Научно-образовательные космические проекты»**Моделирование отклика детекторной системы КОДИЗ-2 на потоки электронов (50 кэВ - 5 МэВ) и протонов (2 - 200 МэВ)**

Садыков А.М.¹; Золотарев И.А.¹; Бенгин В.В.¹; Нечаев О.Ю.¹; Антонюк Г.И.¹; Оседло В.И.¹; Сазонова А.В.¹; Лебедев М.О.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: sadykov.am19@physics.msu.ru

В рамках настоящей работы было проведено моделирование отклика детекторной системы КОДИЗ-2 (КОмбинированный Детектор Излучения) на потоки высокоэнергетических электронов (от 50 кэВ до 5 МэВ) и протонов (от 2 до 200 МэВ). В состав детекторной системы КОДИЗ-2 входят 2 полупроводниковых и 1 сцинтилляционный детектор из кристалла CsI. Для анализа была использована модель детектора, созданная в программе AutoCAD, с последующим преобразованием её в формат GDML, используемом для работы в программной среде Geant4.

Основной целью исследования было подтверждение возможности разделения потоков электронов и протонов, что является ключевым аспектом для разработки высокоэффективных детекторных систем. В ходе моделирования с числом частиц порядка 109 для каждого типа частиц было проведено исследование отклика системы, что позволило определить ключевые параметры, влияющие на разделение этих потоков.

Результаты моделирования подтвердили возможность точного различия потоков электронов и протонов с высокой точностью, что открывает перспективы для применения детектора КОДИЗ-2 в задачах, требующих высокой чувствительности. Дополнительно, была проведена оценка зависимости отклика системы от начальной энергии протонов, что позволило предложить методику определения энергии протонов по результатам измерений в детекторе.

Секция «Научно-образовательные космические проекты»**Регистрация потоков заряженных частиц в околоземном пространстве на малом космическом аппарате «Монитор-1»**

Сazonova A.B.¹; Садыков А.М.^{1,3}; Бентгин В.В.^{2,3}; Оседло В.И.³; Антонюк Г.И.³; Золотарев И.А.³; Нечаев О.Ю.³

¹ МГУ, физический факультет

² ИМБП

³ НИИЯФ МГУ

email: sazonovaav@my.msu.ru

9 августа 2022 года на околоземную орбиту высотой около 500 км был запущен малый космический аппарат типа CubeSat размером 3U, получивший наименование «Монитор-1». Полезной нагрузкой этого аппарата стал прибор КОДИЗ. В состав его детекторной системы вошли 2 полупроводниковых и 2 нейтронных детектора, а также черенковский детектор и компактный сцинтилляционный детектор. В качестве сцинтилляционного детектора использовался кристалл CsI, просматриваемый двумя полупроводниковыми фотодиодами. В аппаратуре был предусмотрен режим измерения потоков частиц, регистрируемых детекторами и режим регистрации энерговыделений в детекторах прибора. Спутник сошел с орбиты 27 марта 2024 года. Общее время проведения эксперимента составило примерно 1 год и 8 месяцев, за это время с прибора было получено 13 мегабайт информации.

В ходе полета спутника были зарегистрированы планетарные распределения потоков частиц, как в спокойной геомагнитной обстановке, так и в периоды значительных геомагнитных возмущений, а также возрастания солнечных космических лучей. Полученные данные иллюстрируют применимость малых космических аппаратов контроля параметров радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

Секция «Научно-образовательные космические проекты»**Памяти М.И. Панасюка: Космическая программа Московского университета. Современный статус**Свертилов С.И.^{1,2}¹ МГУ, физический факультет² НИИЯФ МГУ**email:** sis@coronas.ru

В настоящее время развитие космической программы Московского университета связано с проектом «Созвездие-270». В ходе реализации этого проекта на околоземных орbitах осуществляется развертывание группировки нано-спутников формата кубсат. Основной задачей является мониторинг космической радиации и электромагнитных транзиентов, то есть всплесков в различных диапазонах электромагнитного спектра астрофизического и атмосферного происхождения.

На сегодняшний день запущено 20 космических аппаратов с научными приборами, разработанными и созданными в НИИЯФ МГУ специально для использования в качестве полезной нагрузки на спутниках формата кубсат. Среди этих приборов детекторы энергичных заряженных частиц, гамма-квантов, а также аппаратура для изучения ультрафиолетового (УФ) свечения атмосферы. В результате экспериментов на космических аппаратах (КА) группировки Московского университета получена разнообразная информация о динамике потоков электронов субрелятивистских энергий, в том числе о природе кратковременных (с характерными временами порядка секунд) вариаций потоков, обусловленных высыпаниями, что имеет большое значение для понимания механизмов ускорения и потерь захваченных и квазизахваченных электронов. Были зарегистрированы вспышки УФ излучения из атмосферы Земли, а также всплески жесткого рентгеновского и гамма излучения как астрофизического происхождения, так и обусловленные солнечными вспышками. В перспективе предполагается расширить тематику экспериментов, которые наряду с космофизическими и геофизическими задачами должны охватить исследования в области астробиологии, межспутниковой связи, контроля движения самолетов и морских перевозок и др. Особенno следует отметить возможности создаваемой мультиспутниковой группировки в плане обеспечения различных проектов по освоению Арктического региона.

Помимо развертывания орбитальной группировки проект «Созвездие-270» предполагает создание сети приемных станций, распределенных по меридианам. На первом этапе реализации проекта предполагается развернуть не менее 5 наземных приемных пункта с использованием антенн, работающих в УКВ, S и X диапазонах. Таким образом, будет создана единая система КА и наземных приемных станций, которые должны быть установлены в регионах от Калининградской области до Камчатки таким образом, чтобы обеспечить управление КА, а также регулярный прием данных со спутников группировки, находящихся в разных точках околоземного пространства, что позволит существенно увеличить объем передаваемой информации.

Важнейшей задачей проекта является образовательная составляющая. Образовательный компонент проекта направлен на вовлечение школьников и студентов в космические исследования. В рамках этой работы планируется существенно увеличить число наземных приемных пунктов, которые могут устанавливаться в школах и других образовательных учреждениях. Предполагается участие школьников и студентов в подготовке и проведении космических экспериментов, приеме и обработке научной и телеметрической информации, получаемой с помощью антенн, устанавливаемых непосредственно на территории школ, участвующих в проекте. Таким образом, школьники будут привлечены к созданию электронных узлов приборов, в частности, к проведению их наземной экспериментальной отработки, к получению и систематизации калибровочных данных. Школьники должны будут участвовать в пополнении баз данных, используемых для прогноза космической погоды, обработке и анализе данных, получаемых в ходе реализации космического эксперимента.

Результаты летной эксплуатации наноспутников формата кубсат и проводимых на них экспериментов показали, что группировка малых КА представляет собой эффективную систему, позволяющую получить текущую картину и прогнозную оценку радиационных условий в значительной области околоземного пространства, а также осуществлять мониторинг атмосферных и астрофизических транзиентных явлений с помощью однотипной аппаратуры., что способствует решению как научных, так и прикладных задач, необходимых для осуществления космической деятельности нашего государства.

Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года

Об особенностях большого Форбуш-эффекта во время экстремальной геомагнитной бури в мае 2024 г.

Абунина М.А.¹; Шлык Н.С.¹; Белов С.М.¹; Белов А.В.¹; Абунин А.А.¹

¹ ИЗМИРАН

email: abunina@izmiran.ru

В работе исследуются особенности поведения плотности и анизотропии галактических космических лучей и их связь с солнечными источниками, межпланетными и геомагнитными возмущениями с 8 по 13 мая 2024 г. За это время были зарегистрированы мощные солнечные вспышки и быстрые корональные выбросы массы, что привело к регистрации экстремальной геомагнитной бури и одного из самых значимых Форбуш-эффектов за весь период наблюдений. Все расчеты характеристик космических лучей выполнены с использованием данных сети нейтронных мониторов. Используются уникальные методы, созданные в ИЗМИРАН – метод глобальной съемки и метод кольца станций.

Установлено, что величина исследуемого Форбуш-эффекта составила 15,7% (для частиц с жесткостью 10 ГВ), а при регистрации экстремальной геомагнитной бури в данных нейтронных мониторов наблюдался значительный магнитосферный эффект (~4%).

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»**Событие в солнечных космических лучах GLE74 (11.05.24)**

Балабин Ю.В.¹; Германенко А.В.¹; Гвоздевский Б.Б.¹

¹ ПГИ

email: alex.germanenko@gmail.com

В мае 2024 года во время сильной геомагнитной бури и форбуш-эффекта произошло событие GLE. Возрастание в космических лучах было зарегистрировано мировой сетью нейтронных мониторов. Сильная магнитная буря явилась следствием прихода коронального выброса масс, произошедшего за несколько дней до этого во время предыдущей вспышки на Солнце. Этот выброс достиг Земли к концу суток 10.05.2024 и произвел значительное форбуш-понижение. Генерация солнечных космических лучей происходила в активной области АО 13664 типа Beta-Gamma-Delta с координатами S17W47, вспышка имела класс X5.8, максимум излучения достигнут в 01:39 UT 11.05.2024.

Магнитная буря и форбуш-эффект осложняют анализ GLE74. На момент начала GLE74 на Земле бушевала магнитная буря, Dst-индекс опустился ниже -400 нТл, а в космических лучах в конце предыдущих суток начался форбуш-эффект, вызванный приходом плазменного облака от предыдущей. Понижение потока космических лучей в следствие форбуш-эффекта на полярных нейтронных мониторах составило ~10%. Небольшая амплитуда GLE также осложняет выделение собственно возрастания на фоне общего понижения уровня счета. На нейтронных мониторах в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) возрастание потока космических лучей составило 4-5% по пятиминутным данным. Наибольшую амплитуду показала станция Кергелен: 6%. (Имеется в виду нормализованная к уровню моря амплитуда возрастания.)

Данных мировой сети достаточно для решения обратной задачи: определение параметров потока солнечных космических лучей. Для используемой методики прямого решения обратной задачи требуется вычисление асимптотических конусов приема нейтронных мониторов. Неопределенность состояния магнитосферы вносит основную ошибку при решении, поэтому важно точное задание состояния магнитосферы. Обычно используется модель Цыганенко-01, хорошо описывающая магнитосферу в спокойном и возмущенном состоянии, однако, в случае сильных магнитных бурь она неприменима. Для задания состояния магнитосферы в буревых условиях подходит модель Цыганенко-03, которая ранее использовалась в событии GLE66 и показала хорошие результаты. Результатом выполнения решения являются энергетические спектры и питч-угловое распределение потока солнечных космических лучей на протяжении максимальной фазы события с шагом в 5 минут с 02:30 до 04:00 UT.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038, <https://rscf.ru/project/25-17-20038/> и гранта Министерства образования и науки Мурманской области

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Некоторые особенности развития восточного электроджета во время супербури 10-11 мая 2024

Громова Л.И.¹; Клейменова Н.Г.²; Громов С.В.¹; Малышева Л.М.²

¹ ИЗМИРАН

² ИФЗ РАН

email: ligromova@yandex.ru

Супербурия 10 мая 2024 г. была одной из самых сильных магнитных бурь текущего 25 цикла солнечной активности, которая развивалась при сильных и быстрых вариациях в межпланетном магнитном поле (ММП), которые привели к значительным изменениям в конфигурации ионосферных электроджетов, что отразилось, в том числе, в появлении нескольких интервалов больших значений (до ~1600 нТл) в AU-индексе, показавших максимумы интенсивности восточного электроджета (ЕЕ), при которых, однако, согласно значениям AL-индекса, западный электроджет (WE) был слабым. Мы изучали влияние резких и быстрых изменений ММП на развитие ионосферных электроджетов и продольных токов (FACs) в дневном и вечернем секторах (09-18 MLT) по картам их планетарного распределения, построенных по данным магнитных измерений на 66 одновременных низко орбитальных (~780 км) спутников проекта AMPERE. Показано, что интенсивный ЕЕ, наблюдался как при отрицательных, так и при положительных значениях Bz-компоненты ММП. Резкие изменения By-компоненты ММП (от -50 to +70 нТл) привели к значительной интенсификации ЕЕ и его расширению (в секторе 13-17 MLT от 55 до 78°, что может свидетельствовать о развитии частичного кольцевого тока. При этом в следствие резкого изменения Bz-компоненты (от -40 to +50 нТл) значительно ослаб WE, наблюдавшийся в после полуночном и утреннем секторах на широтах 50-75° MLAT. В тоже самое время FACs в дневном секторе высоких широт значительно усилились и расширились к полярным широтам. С ростом By-компоненты при Bz < 0 ЕЕ стал более интенсивным, область его распространения увеличилась от 52-76° до 55-78° MLAT, что, как предполагается, связано с развитием магнетосферной конвекции (системы DP-2), развитие которой совпало с появлением очень интенсивных локальных вытекающих продольных токов.

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»**Явления в D-компоненте геомагнитного поля в мае 2024 года по данным физического экспериментального полигона ВлГУ**

Грунская Л.В.¹; Золотов А.Н.¹; Нургалиев И.Д.¹

¹ ВлГУ имени А.Г.Столетова и Н.Г.Столетова

email: ivan.nurgaliev.2002@mail.ru

На физическом экспериментальном полигоне Владимирского государственного университета с 1972 года осуществляется мониторинг электрического и геомагнитного полей в инфракрасочастотном диапазоне. Работы связаны с изучением ряда геофизических и астрофизических процессов: атмосферное электричество; лунно-солнечные приливные воздействия; предвестники сейсмических процессов; исследование воздействия приливных сил гравитационно-волнового астрофизического происхождения; влияние солнечной активности на электрическое и геомагнитное поля. Создана уникальная система мониторинга, позволяющая: осуществлять удаленный доступ к базам данных и возможность контролировать параметры системы мониторинга; возможность использования системы на передвижных установках. В данной работе представлены результаты мониторинга D-компоненты геомагнитного поля за период с 1 апреля по 16 мая 2024 года, а также график изменения Чисел Вольфа за этот период (графические результаты мониторинга приложены). Выделены: магнитная буря с 10 по 12 мая с максимальным уровнем G5; магнитная буря уровня G2 - 2 мая 2024г.; Магнитная буря уровня G1 - 6 мая 2024г. В результате анализа данных мониторинга записей геомагнитного поля D-компоненты были выявлены следующие факторы: резкое изменение характера записей в виде скачков и выбросов до плюс-минус 400 мкТл при стандартном уровне вариаций D-компоненты 100 мкТл; нарушение «синусоидального -периодического» характера записи D-компоненты за все периоды возникновения магнитных бурь; отмечается увеличение периода вариаций D-компоненты в течение нескольких дней после завершения магнитной бури. В электрическом поле характер результата воздействия магнитной бури иной. Для примера приведен результат мониторинга электрического и геомагнитного полей за 24 марта 2004 года в период геомагнитной бури уровня G4. Отмечается изменение характера записи электрического поля за несколько часов до возникновения магнитной бури – как бы предвестник магнитной бури, и обычный характер записи вертикальной составляющей напряженности электрического поля во время самой бури. Анализ результатов воздействия магнитных бурь на геомагнитное и электрические поля осуществляется регулярно.

Список литературы

1. Грунская Л.В., Золотов А.Н., Бушуев А.С., Лукьянов В.Е. Программно-аппаратный комплекс мониторинга электромагнитного поля Земли // Труды Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром 2020. ID: 43149498. С. 428-433.
2. Грунская Л.В., Золотов А.Н., Хакимов М.Ф., Тихомиров С.М. Система мониторинга электрического и геомагнитного поля Земли в инфракрасочастотном диапазоне // Материалы IX Всероссийской научной конференции по атмосферному электричеству, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского. 2023. Санкт-Петербург 26-28 сентября 2023. С. 341-352.
3. Электромагнетизм земной атмосферы: учеб. пособие /Л. В. Грунская; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. –Владимир:Владимирский государственный университет, 2019. – 209 с.
4. Лаборатория солнечной астрономии и гелиофизического приборостроения (ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН) (https://xras.ru/forecast_activity.html).

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Пересечения дневной магнитопаузы во время бури 10 мая 2024

Дмитриев А.В.,¹ Суворова А.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: dalexav@mail.ru

Главная фаза геомагнитной бури 10-11 мая 2024 г. длилась около 9 часов, достигнув максимального значения SYM-H индекса -518 нТ. Геостационарные пересечения магнитопаузы наблюдались практически в течение всей главной фазы геомагнитной бури, начиная с прихода межпланетной ударной волны в 17:06UT на КА GOES-16 и КА GOES-18. Геостационарный КА GOES-16, находящийся в полуденном секторе, вышел в магнитослой в 17:06UT сразу после прихода межпланетной ударной волны, и вернулся в магнитосферу в ~21:01UT, находясь в вечернем секторе. КА GOES-18 вышел в магнитослой в 17:20UT в предполуденном секторе и вернулся в магнитосферу в ~22:33UT в послеполуденном секторе. Сравнительный анализ моделей магнитопаузы по совокупности данных с КА GOES-16 и GOES-18 показал, что модели удовлетворительно предсказывают пересечения магнитопаузы. Наилучшую точность демонстрируют модели, показатель степени при давлении у которых составляет 1/5.2 Высокоапогейные КА THEMIS-A и THEMIS-E вышли в магнитослой в послеполуденном секторе в 17:06UT и вернулись в магнитосферу в 19:12UT, находясь на геоцентрическом расстоянии ~5 Re. КА THEMIS-A наблюдал магнитопаузу в 19:14UT 10 мая на расстоянии 5.4 Re вблизи экваториальной плоскости в послеполуденном секторе (MLT~14.7) при необычно слабых условиях ($P_{sw} \sim 30$ нПа, $B_z > 0$, $Dst \sim -170$ нТл), что указывает на необходимость уточнения данных об условиях в межпланетной среде в этот период.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»**Сверхинтенсивные суббури в магнитной буре 10-11 мая 2024**

Клейменова Н.Г.¹; Громова Л.И.²; Дэспирак И.В.³; Громов С.В.²; Малышева Л.М.¹

¹ ИФЗ РАН

² ИЗМИРАН

³ ПГИ

email: ngk1935@yandex.ru

Исследованы наблюдаемые в ходе развития этой экстремально большой магнитной бури четыре очень интенсивных (более 3000 нТл) суббури, которые могут быть отнесены к категории суперсуббури. Две таких суббури были зарегистрированы в главную фазу магнитной бури (10 мая в интервале 19–21 UT) при отрицательных значениях Ву ММП и две в восстановительную фазу бури (11 мая в интервале 08–10 UT) при положительных значениях Ву ММП. По данным наблюдений на 66 одновременных низкоорбитальных (780 км) спутников проекта AMPERE было исследовано планетарное распределение ионосферных электроджетов и продольных электрических токов во время анализируемых суперсуббури. Общей особенностью суперсуббури было то, что их максимум наблюдался не в ночном секторе, а в утреннем. Более того, в полуночной области высоких широт практически не регистрировалось значительных магнитных возмущений. Первые две суперсуббури (10 мая) сопровождались развитием огромного магнитного вихря в утреннем секторе с центром около 08–09 MLT. Во время двух вторых суперсуббури (11 мая) наблюдалось два больших конвективных вихря (в утреннем и вечернем секторах). При этом в первой из них наблюдался очень протяженный западный электроджет (от 23 до 08 MLT), а вечерний вихрь с центром около 20 MLT был значительно слабее утреннего. Во второй суббуре отмечалось два очень интенсивных вихря с центрами около 06 и 18 MLT. На наземных обсерваториях максимальная геомагнитная активность во время всех 4-х суперсуббури отмечалась в американском секторе Земли. Морфологические особенности анализируемых суперсуббури и сопровождающих их геомагнитных пульсаций диапазона Pi2 свидетельствуют о различных механизмах генерации исследуемых суббури. Обсуждены возможные магнитосферные (или межпланетные) драйверы суперсуббури.

Секция «Солнце и солнечная активность»**Прогноз экстремальных событий в мае 2024 г. в реальном времени. По данным мировой сети полярных станций космических лучей**

Козлов В.И.¹

¹ ИКФИА СО РАН

email: cosmoprognoz@mail.ru

Представлены результаты мониторинга космических лучей (КЛ) во время активной фазы нового 25 цикла солнечной активности. Фаза максимума солнечной активности, когда велика вероятность проявлений спорадических явлений (вспышек, ударных волн и т. д.) можно определить как «кризисный» период в активности Солнца. И потому вполне естественно при анализе флуктуаций КЛ применить идеологию кризисных явлений для описания процесса в целом. В этом случае, для анализа используются высшие моменты функции распределения. В конечном счете, по данным мировой сети полярных станций (<http://www.nmdb.eu>) рассчитывался параметр флуктуаций КЛ.

В итоге, нами был получен предвестник (<https://www.forshock.ru/predlong.html>) начала максимума нового 25 цикла солнечной активности. С учетом, величины заблаговременности

прогноза $\Delta\tau=2(\pm 1)$ оборота Солнца, начало максимума 25 цикла прогнозировалось на оборот 2599 (± 1 оборот), т.е. на февраль-апрель 2024 г. Индикатором – маркером начала максимума нового 25 цикла является значимо низкое значение параметра флюктуаций КЛ на обороте № 2599, в марте 2024 г.

Среднесрочный прогноз максимума 25 цикла (начиная с марта 2024 г.) подтверждается результатами оперативного (<https://www.forshock.ru/pred.php>) прогноза 5-6 мая, а также 4-5 и 7-8 октября 2024 г., регистрацией «штормовых» частиц (предваряющих приход ударных волн на орбиту Земли) и факта прохождения ударных волн по регистрации маркера, экстремально низкого - диагностического значения параметра флюктуаций КЛ 10-11 мая, а также 5-6 и 10-11 октября 2024 г. Большая мощность события 10-11 мая обусловлена, вероятнее всего, кумулятивным эффектом, по зарубежной терминологии: «каннибал-эффект». В октябре 2024 г. (оборот 2607) регистрируется МАКСИМУМ нового 25 цикла. Это хорошо согласуется с данными: <https://www.swpc.noaa.gov/news/joint-solar-maximum-announcement-nasa-and-noaa> различных видов измерений осуществленных в Космических центрах NASA и NOAA (США).

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Анализ реакции магнитосферы Земли на последовательные МКВМ во время магнитной бури 10-12 мая 2024 г.

Лаврухин А.С.¹; Азра-Горская К.Ж.^{1,2}; Вахрушева А.А.^{1,2}; Капорцева К.Б.^{1,2}; Невский Д.В.^{1,2}; Оганов С.А.²; Ширяев А.О.¹; Калегаев В.В.^{1,2}; Алексеев И.А.¹

¹ НИИЯФ МГУ

² МГУ, физический факультет

email: lavrukhan@physics.msu.ru

В работе рассматривается состояние магнитосферы Земли во время экстремально сильной геомагнитной бури 10-12 мая 2024 года с использованием данных наземных и многоспутниковых наблюдений. Множественные, взаимодействующие между собой КВМ вызвали геомагнитную бурю с минимальным значением Dst в -412 нТл, что привело к развитию шестой по мощности магнитной бури с 1957 года. При этом дневная магнитосфера сжималась до 4-5 RE, а головная ударная волна на некоторое время пересекала геостационарную орбиту. Проведено моделирование распространения КВМ, наблюдавшихся в коронографе 8-9 мая, с помощью двумерной Drag Based Model, и получены расчетные времена прихода в точку L1 и на КА STEREO-A. Мы изучаем геометрию фронта межпланетной ударной волны по данным нескольких космических аппаратов и реакцию магнитосферы в ответ на её воздействие во время резкого начала бури. Показано, что межпланетная ударная волна пришла с южной и вечерней стороны магнитосферы, что может быть причиной сильной наблюдающейся асимметрии магнитного импульса по данным индексов SUPERMAG SMR-06 и SMR-18. При помощи данных космических аппаратов внутри магнитосферы мы изучаем динамику кольцевого тока и токового слоя хвоста. Наблюдавшаяся асимметрия утро-вечер в момент главной фазы бури возникла в результате западного электроджета, опускавшегося до низких широт.

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Участие приборного комплекса ГГАК в наблюдениях магнитосферы Земли во время крупной магнитной бури в мае 2024

Свертилов С.И.^{1,2}

¹ МГУ, физический факультет

² НИИЯФ МГУ

email: sis@coronas.ru

В мае 2024 года произошла магнитная буря с редкой для 21-го века амплитудой $|Dst|=400$ нТл; – окружающее Землю магнитное поле бурно перестраивалось, ускорялись и наполняли пространство потоки заряженных частиц. В наблюдениях участвовали приборы комплекса ГГАК, установленного на космических аппаратах (КА) РосГидромета АРКТИКА-М1, АРКТИКА-М2, ЭЛЕКТРО-Л4 и МЕТЕОР-М2.4. Приборы этих КА измеряют вектор магнитного поля (кроме М2.4) и потоки электронов и протонов в двух (кэВном и МэВном) диапазонах энергии частиц. Орбиты аппаратов открывают доступ ко всей толще магнитосферы: МЕТЕОР – низкая высота (850 км), ЭЛЕКТРО – геостационарный КА (36 Мм), АРКТИКА – наклонённый эллипс (1×38 Мм, $i=63^\circ$). Методически ценно использовать анализ крупного природного события для уточнения приборных калибровок и оценки адекватности получаемых данных, т.к. притягивается интерес многих и открывается и проверяется много параллельных измерений. Физически ценно привлечь параллельные измерения и получить сколь возможно полную пространственную и временную картину буревых процессов. То и другое делается и представляется. В анализе приоритет отдаётся рассмотрению поведения магнитного поля, исходя из чего, если возможно, интерпретируется и рассматривается время и место появления энергичных частиц и их характеристики.

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Возрастания потоков энергичных электронов в запрещенной области и дневные супер-суббури в мае 2024 и январе 2005

Суторова А.В.¹; Дмитриев А.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ

email: alla_suvorova@mail.ru

Во время геомагнитной супербури 10 мая 2024 по данным спутников NOAA/POES наблюдалась возрастания потоков квазизахваченных электронов с энергиями 30-300 кэВ в запрещенной области на дрейфовых оболочках $L < 1.2$. Приход межпланетной ударной волны в ~17 UT вызвал сильное сжатие магнитосферы, что наблюдалось в наземных магнитных данных как сигнал SSC. Экстремальное сжатие продолжалось и после SSC. Отметим интересную особенность этой мощной бури. Через 2 часа после SSC, в ~19 UT произошло резкое падение динамического давления солнечного ветра с 50 до 35 нПа длительностью порядка 1 часа, что привело к быстрому расширению дневной магнитосферы. Спустя 10-20 минут на низких и высоких широтах дневной магнитосферы наблюдались два явления: возрастание потоков энергичных электронов (инжеекция) в области квазизахвата под внутренним радиационным поясом и мощная суббурия с $AL \sim -4000$ нТл (супер-суббурия). Первое возрастание потоков >30 кэВ и >100 кэВ электронов и супер-суббурия (по данным Supermag) произошли почти одновременно в 9 ч локального времени на главной фазе магнитной супербури.

Дневные супер-суббури наблюдаются редко и пока не получили своего объяснения. Аналогичная дневная супер-суббури наблюдалась 21 января 2005 на начальной фазе умеренной магнитной бури. Супер-суббурия с $AL \sim -4000$ нТл началась через 30 минут после SSC в ~17 UT. Наблюдалась также и инжеекция электронов в запрещенную область. Однако, в этом случае оба явления были разнесены по времени на 1.5 часа и наблюдались в дневном (супер-суббурия) и утреннем (инжеекция частиц) секторах. Анализ солнечного ветра указывает на связь дневных суперсуббурь и глубоких инжеекций электронов пояса с резкими падениями давления после экстремальных сжатий магнитосферы. Наше исследование показывает важную роль отрицательных скачков давления солнечного ветра в возникновении данных редких явлений.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

Секция «Явления на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере Земли в мае 2024 года»

Возмущения в ионосфере в мае 2024 года: динамика и причины их вызывающие

Шейнер О.А.¹; Выборнов Ф.И.¹

¹ НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

email: rfj@nirfi.unn.ru

Проведен анализ данных вертикального зондирования ионосферы, полученных из регулярных наблюдений в мае 2024 года на нескольких ионосферных станциях, расположенных в Европе.

В качестве параметра ионосферы рассматривается поведение во времени критической частоты f0F2 слоя F2 ионосферы. Использовался метод, основанный на отклонении частоты от средней за месяц, предложенный авторами ранее.

Исследуется зависимость параметров ионосферы от мощных явлений, возникающих на Солнце: корональных выбросов масс (CME) и высокоскоростных потоков солнечного ветра (HSS).

Работа выполнена по проекту FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Особенности микроволновых предвестников солнечных корональных выбросов масс, зарегистрированных в мае 2024 года

Шейнер О.А.¹; Фридман В.М.¹

¹ НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

email: rfj@nirfi.unn.ru

Представлены результаты исследований связи между зарегистрированными на LASCO C2 в мае 2024 года корональными выбросами массы, возникновением спорадического микроволнового излучения, предшествующего явлению корональных выбросов массы (CME), и поведением окружающей среды с целью развития ранее предложенного и разработанного метода краткосрочного прогноза регистрации СМЕ, основанного на использовании динамических характеристик солнечного радиоизлучения в широком спектральном интервале.

Приводится сопоставление динамики магнитного поля во вспышечной активной области с зарегистрированными за 2 часа до события микроволновыми предвестниками в виде подобного поведения спорадической компоненты радиоизлучения на различных частотах. Основное внимание уделено рассмотрению динамики широкополосных микроволновых предвестников в период 08-11 мая 2024 года.

Подтверждены основные положения предложенного ранее способа краткосрочного прогноза времени регистрации СМЕ: для последующих геоэффективных событий радиоизлучение на стадии СМЕ-предвестников корональных выбросов массы – широкополосное и продолжительность радиопредвестников превышает 10 мин.

Показано, что использование микроволновых предвестников может повысить эффективность прогноза событий СМЕ, как за счет большего количества событий СМЕ, так и временных границ использования метода.

Работа выполнена по проекту FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.