



III Симпозиум
Физические основы прогнозирования
гелиогеофизических процессов и событий
«ПРОГНОЗ-2026»

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Москва, Троицк, 2026

Оглавление

Секция 1. Прогнозирование солнечной активности и нестационарных процессов в гелиосфере.....	9
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИБЫТИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА HELIOPANDA	10
КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК	11
ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА НА СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛА И ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ.....	12
ДИНАМИКА ЦЕНТРОВ АКТИВНОСТИ ВО ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНОЙ ГРУППЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН.....	13
СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ NHR ИЗЛУЧЕНИЯ: УТОЧНЕНИЯ ПРОГНОЗА GLE СОБЫТИЙ НА ПРИМЕРЕ 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ.....	14
МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК.....	15
ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА В МАЕ-ИЮНЕ 2024 ГОДА.....	16
СОЛНЕЧНЫЕ АКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТРУКТУРЫ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ	17
ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ	18
ЧЕМ ОБЪЯСНЯЕТСЯ ПАДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВНУТРИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ?	19
КАК УСТРОЕН ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ДИНАМО МОДЕЛИ, УПРАВЛЯЮЩЕЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ И ЭФФЕКТА ОТРИЦАТЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДАВЛЕНИЯ	20
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА	21
ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ ПО ДИНАМИКЕ ЦИКЛОВ ЭТИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	22
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОЩНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И КВМ	23
СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОГО РАДИОПОТОКА НА ДЛИНАХ ВОЛН 10,7 И 30 СМ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА.....	24
ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ПРОТОННОГО СОБЫТИЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	25
ПРЕДЕЛЫ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ: РОЛЬ МНОГОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА.....	26
ОБ УСИЛЕНИИ H-ALPHA И СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПЕРЕД СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ.....	27
СИНХРОНИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ЗАДАЧЕ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО	28

ПОЧТИ КРИТИЧЕСКОЕ МГД ДИНАМО СОЛНЦА.....	29
ПОЛЯРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЧИСЛО СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И МОДУЛЯЦИЯ ГКЛ: «ПРОГНОЗ-2024» ДВА ГОДА СПУСТЯ.....	30
СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТРИКИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ	31
ОЦЕНКИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ СИНОПТИЧЕСКИХ КАРТ СОЛНЦА.....	32
ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИНИИ ЛАЙМАН-АЛЬФА.....	33
НАБЛЮДЕНИЯ В ЛИНИИ К CaII В 1905-2025 ГОДАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЛЯРНОЙ И НИЗКОШИРОТНОЙ АКТИВНОСТИ	34
ТОРОИДАЛЬНАЯ И ВИНТОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ДИАГНОСТИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКОВЫХ ЖГУТОВ В КОРОНЕ СОЛНЦА	35
ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ВРЕМЕНИ РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА КОРОНОГРАФЕ	36
ПОСТРОЕННАЯ ПО СНИМКАМ SDO/AIA ДВУХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕЛИОСФЕРЫ.....	37
ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ, ОТКЛОНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАТНОГО ПОТОКА В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ	38
Секция 2. Прогнозирование состояния ионосферы и условий распространения радиоволн	39
ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НАГРЕВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	40
ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК ДЛЯ ЭТАЛОННОЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ	41
ДИАГНОСТИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ GIM TES.....	42
ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ИНИЦИИРОВАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ТРОПОСФЕРЕ	43
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОВОЛН.....	44
ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ 12–13 НОЯБРЯ 2025 Г.: ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК И ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ	45
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛОС 1NG N_2^+	46
АСИММЕТРИЯ СУТОЧНОГО ХОДА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ E НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ.....	47
ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК	48
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЧ РАДИОВОЛН В ГОДЫ МАКСИМУМА 25-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ	49

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА НА ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ: УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ.....	50
ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА ИНДЕКСА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ ЯКУТСК И ТИКСИ.....	51
ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ ПГО ТИКСИ ЗА ПЕРИОД С 1969 ПО 2000 ГГ.	52
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЁННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДАМИ ГНСС РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ В ЛИНИИ 630 НМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УНУ СТЕНД СУРА В 2021-2025 ГГ.	53
СВЯЗАННЫЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ НА СОЛНЦЕ И В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ.....	54
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН.....	55
ЭВОЛЮЦИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 10–12 МАЯ И 10–12 ОКТЯБРЯ 2024 ГОДА	56
ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X-КЛАССА.....	57
ОЖИДАЕМЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ В ОСОБЕННОСТЯХ ДИСПЕРСИИ ВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ МОД.....	58
СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕКОВ МОД НА ИОНОГРАММАХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ	59
ПРОЕКТ FENICS-ИОНОСФЕРА: ВОЗБУЖДЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ УНЧ-КНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ	60
МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ	61
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КНЧ ШУМЫ В ОБЛАСТИ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ ИОНОСФЕРА-М.....	62
ИОНОСФЕРНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	63
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СПОРАДИЧЕСКОГО Е-СЛОЯ НАД КАЛИНИНГРАДСКИМ РЕГИОНОМ	64
ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ШИРОТНО-ДОЛГОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ	65
АСИММЕТРИЯ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ.....	66
ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ТРОПОСФЕРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ.....	67
О ВОЗРАСТАНИЯХ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ (30-300 КЭВ) НА НИЗКИХ ШИРОТАХ И ИОНОСФЕРНОМ ВОЗМУЩЕНИИ В ОБЛАСТИ ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ ВО ВРЕМЯ МАЙСКОЙ БУРИ 2024.....	68
ПОЛЕ ПЛОТНОСТИ ВОДОРОДА НА ВЫСОТЕ КА «МЕТЕОР» В ЯНВАРЕ 2025 Г.	69

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ 2022 Г НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОНЧ-РАДИОСИГНАЛОВ И ИОНОСФЕРУ	70
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АНОМАЛИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ОБСЕРВАТОРИЙ КАЛИНИНГРАДА И ИРКУТСКА...	71
ЭФФЕКТ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА В ТЕС ИЗМЕРЕНИЯХ : СОБЫТИЕ МАРТ 2018 И СЕНТЯБРЬ 2021 ГОДА	72
ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ В ЯНВАРЕ 2026 ГОДА	73
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ GDMI И GDMTEC МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С GIM-TEC JPL В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ	74
МЕТОДИКА СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ ДИФфуЗИОННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОЛУЧЕВОСТИ.....	75

Секция 3. Прогнозирование вариаций геомагнитного поля и геомагнитной активности 76

К ВОПРОСУ О ДОЛГОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ.....	77
ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ.....	78
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП	80
СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНОГО БУХТООБРАЗНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ И ПУЛЬСАЦИЙ P13 НА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ФАЗЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ СУББУРЬ.....	81
ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХ СОБЫТИЙ	82
К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЛОКАЛЬНЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ ПЕРЕМЕННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	83
ГЛОБАЛЬНЫЕ ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НАЧАЛЕ БОЛЬШОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 10 ОКТЯБРЯ 2024 г.	84
ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ ..	85
СУПЕРСУББУРИ ВО ВРЕМЯ 24 И 25 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ	86
ГИТ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ БУРИ 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ	87
ОСОБЕННОСТИ SC-СОБЫТИЙ С 1-СЕК РАЗРЕШЕНИЕМ, ВЫЗВАННЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИМИСЯ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ ОТНОСИТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЯ «СОЛНЦЕ-ЗЕМЛЯ»	88
АВРОРАЛЬНОЕ КИЛОМЕТРОВОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ КАК ИНДИКАТОР ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ.....	89
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ФОРШОКЕ С ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЗЕМЛИ: ГЛОБАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ.....	90
КОГНИТИВНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ И НАБЛЮДЕНИЙ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ В ПЕРИОД СОБЫТИЙ 9-13 НОЯБРЯ 2025 Г.....	91
ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ИОНОВ В ХОДЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ.....	92

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕРВИСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ STORMFOCUS	93
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДОМЕННОЙ АДАПТАЦИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ МЕЖДУ ДАННЫМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	94
МОЖНО ЛИ ДОВЕРЯТЬ WEB-РЕСУРСУ OMNI?	95
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ 4-Х ИСТОРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗА И ЭПИГНОЗА	96
ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МАСШТАБ КОГЕРЕНТНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ ДИАПАЗОНА Pc5-6/Pi3 ВБЛИЗИ МАГНИТОПАУЗЫ	97
РАЗЛИЧНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА «ШУМАН»	98
ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ PC1-3 В МАГНИТОСФЕРЕ, ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ	99
ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ СРЕДНЕ- И НИЗКОШИРОТНЫХ PC3-4 ПУЛЬСАЦИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ	100
ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ЦУНАМИ	101

Секция 4. Прогнозирование вариаций потоков частиц в гелиосфере и магнитосфере Земли 102

ПРОГНОЗ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГСО ПО ДАННЫМ ИСЗ GOES-15, 17 И 18 МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	103
ГАРМОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВЕСТНИКОВ ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО МЕТОДУ КОЛЬЦА СТАНЦИЙ	104
ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ИЗМЕРЯЕМУЮ ОКОЛО ЗЕМЛИ СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА	105
ГЕОМАГНИТНОЕ ОБРЕЗАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ	106
КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ НАЧАЛА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ	107
ВАРИАЦИИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ 10-100 КЭВ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc5/Pi3 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПИТЧ-УГЛА	108
ПРОТОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИЯНИЯ. НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ	109
ВОЗРАСТАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 21 НОЯБРЯ 2024 ГОДА (GLE76): СПЕКТРЫ И АНИЗОТРОПИЯ	110
ОСОБЕННОСТИ СВЕРХОПАСНЫХ ВОЗРАСТАНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ	111
КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ	112
ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА НИЗКИХ ПОЛЯРНЫХ ОРБИТАХ	113
СПЕКТРЫ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ НОЯБРЯ 2025 ГОДА ПО ДАННЫМ GOES И КАЛИБРОВКА НХР-ДЕТЕКТОРОВ ART-XC	114

ФОРБУШ-ЭФФЕКТ 19-25 ЯНВАРЯ 2026 ГОДА: АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА И КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ	115
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ И ДЛИНЫ НАБОРОВ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ "СИВИЛЛА"	116
ПАРАМЕТРЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ.....	117
ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЯ И ШТОРМОВЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ — ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА	118
МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ФЛЮЕНСА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ О МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ	119

Секция 5. Прогнозирование изменений климата и атмосферных процессов 120

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВТОРИЧНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВОЛН В ТЕРМОСФЕРЕ	121
СПЕКТРЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗРАСТАНИЯХ, ИЗМЕРЕННЫЕ В ТРЕХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ	122
АНАЛИЗ ВНУТРИСЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ 22-23 И 24-25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ	123
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ИЗ КОСМОСА.....	124
О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ АНОМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ	125
ГЛОБАЛЬНАЯ ФОТОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ CHARM-DE АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ДЛЯ ВЫСОТ 0-130 КМ	126
ДОЛГО-ПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА C14: ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ	127
ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕЗОННЫЙ ХОД ПОЛЯРНОГО МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА (60 КМ).....	128
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР В АТМОСФЕРЕ..	129
ОТКЛИК СРЕДНЕЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСЫПАНИЯ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ	130
ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ.....	131
СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПРОГНОЗАХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И КЛИМАТОЛОГИИ, ЭКОНОМИКЕ, МЕДИЦИНЕ: ДОСТОВЕРНОСТЬ	132

Секция 6. Обсерватории, детекторы и базы данных 133

МАГНИТНЫЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ХРОМОСФЕРНЫХ ВОЛОКОН	134
--	-----

СИСТЕМА ИОНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ И РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ	135
НАБЛЮДЕНИЕ И АНАЛИЗ GLE77	136
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 17-19 МАРТА 2015 г. ОБЪЕДИНЕННЫМ КОДОМ ГСМ ТИП – GAMERA.....	137
РЕГИСТРАЦИЯ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ 19 ЯНВАРЯ 2026 Г. НА УСТАНОВКАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НЕВОД.....	138
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙКИ ПРИЕМНИКОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ СПУТНИКОВОЙ ЛУЧЕВОЙ ТОМОГРАФИИ	139
ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБСЕРВАТОРИИ МОСКВА (ИЗМИРАН) И ЕЁ ПУНКТАХ НАБЛЮДЕНИЯ	140
ИЗОБРАЖАЮЩИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ	141
КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ ПО ДАННЫМ РАМЕЛА.	142
КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ИНФРАКРАСНЫХ СПЕКТРОГРАФОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЗОПАУЗЫ	143
АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ СИНОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА В КРАО РАН: ВЫБОР ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ	144
МАГНИТНО-ИОНОСФЕРНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ КФ ИЗМИРАН: СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ.....	145
МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЗМИРАН И БОРТОВЫХ ИОНОЗОНДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ИОНОСФЕРА-М».....	146
НАБЛЮДЕНИЕ СУБАВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ STEVE И RICKET FENCE НА МЕРИДИАНЕ ЯКУТСКА ТРИ ДНЯ ПОДРЯД.....	147
ИНДЕКСЫ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ.....	148
МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	149
АВРОРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ТИПА АНДУЛЯЦИЙ НА ОПУСТИВШЕЙСЯ В ОБЛАСТЬ СУБАВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ КРОМКЕ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА	150
МЕТОДИКА СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ	151
ОПЫТ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ГЕНЕРАТИВНО-СОСЯЗАТЕЛЬНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ	152
РЕГИСТАЦИЯ GLE 77 НЕЙТРОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ЭК НЕВОД.....	153
МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НОВЫМ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ - СОЛНЕЧНЫЙ РАДИОСПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР (СРСП).....	154

Секция 1.

Прогнозирование солнечной активности и нестационарных процессов в гелиосфере

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИБЫТИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА HELIOPANDA

Абу-Шаар З.¹, Подладчикова Т.В.¹, Верониг А.², Думбович М.³,
Хофмайстер Ш.⁴

¹Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

²Университет Граца, г. Грац, Австрия

³Обсерватория Хвара, Загребский университет, г. Загреб, Хорватия

⁴Колумбийский университет, г. Нью-Йорк, США

Zaina.Abushaar@skoltech.ru

Прогнозирование времени прихода корональных выбросов массы (КВМ) критически важно для защиты спутников, энергосистем и пилотируемых полётов. Представлен метод HELIOPANDA (Heliospheric Observer for Predicting CME Arrival via Nonlinear Drag Assimilation) — фреймворк для прогнозирования прихода КВМ, основанный на интеграции системы прогнозирования прибытия КВМ, основанная на интеграции модели торможения солнечным ветром (Drag-Based Model, DBM) с данными наблюдений космических аппаратов посредством итеративной оценки параметров и ассимиляции данных с помощью фильтра Калмана [1].

Предложен алгоритм оценки скорости солнечного ветра w и параметра торможения γ — двух ключевых, как правило заранее неизвестных параметров модели DBM — через прямое решение её уравнений. Верификация на 4480 синтетических профилях КВМ (скорости КВМ 200–3500 км/с, скорости солнечного ветра 250–800 км/с и $\gamma = 0,1–1,0 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$) показала ошибку прогноза времени прихода 0.6–1 ч. При наблюдении с расстояния 30 млн км. от Солнца. Ассимиляция 160 почасовых измерений на основе фильтра Калмана обеспечила прогноз прихода КВМ к Земле и Марсу с точностью 1–2 ч.

Метод апробирован на реальном событии КВМ 2 июня 2008 г. по данным гелиосферного телескопа на борту аппарата STEREO-B. Было показано, что фильтра Калмана в режиме реального времени выполняет сглаживание зашумлённых измерений расстояния, оценку мгновенной скорости и ускорения КВМ. По результатам ассимиляции восстановлены параметры солнечного ветра $w \approx 460 \text{ км/с}$ и $\gamma \approx 1,4 \times 10^{-7} \text{ км}^{-1}$. Средняя ошибка прогноза составила 1,1 ч при ассимиляции от начального положения r_0 и 1,8 ч — при скользящей схеме. Метод HELIOPANDA перспективен для оперативного прогнозирования космической погоды в эпоху миссий Solar Orbiter, Parker Solar Probe, PUNCH и планируемых аппаратов в точках L4/L5.

Литература

1. Abu-Shaar Z. et al. Coronal mass ejection arrival forecasting with the drag-based assimilation of satellite observations // ApJS. 2025. DOI: 10.3847/1538-4365/ae0d8a.

КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**Абрамов-Максимов В.Е.¹, Бакунина И.А.²**¹ ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия² НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россияbeam@gaoran.ru

Под предвестниками мы понимаем явления (в данном случае квазипериодические флуктуации (КПФ)), которые, как правило, предшествуют другим событиям (вспышки, корональные выбросы массы). При этом мы предполагаем, что между предвестником и последующей вспышкой существует какая-то пока нам неизвестная физическая связь. Такие предвестники, как эффект усиления мощности КПФ микроволнового излучения перед вспышкой, были обнаружены более 50 лет назад, однако общепринятой интерпретации этого эффекта до сих пор нет. Под краткосрочными предвестниками мы понимаем такие явления, которые наблюдаются перед вспышками за интервал времени от нескольких минут до нескольких десятков минут [1].

В наших предыдущих работах мы обнаружили, что по данным корреляционных кривых, полученных по наблюдениям на радиогелиографе Нобеля, у 50-75% рассмотренных событий разной мощности наблюдаются предвспышечные флуктуации микроволнового излучения. Предвспышечные КПФ были выявлены в 75% мощных событий (M5 и мощнее) и в 50% более слабых событий (слабее M5) [2]. Детальный анализ нескольких событий показал, что наиболее сильно КПФ проявлялись в компактной зоне в активной области, которая совпадает с областью максимальной яркости микроволнового излучения во время вспышки [3].

Целью данного исследования является продолжение начатой нами работы по исследованию КПФ в радио и рентгеновском диапазонах перед вспышками, в частности, по выявлению возможной связи параметров КПФ и мощности последующих вспышек, а также с целью поиска ответа на вопрос, можно ли рассматривать предвспышечные КПФ как предвестники вспышек.

Литература

1. Abramov-Maximov V.E., Gelfreikh G.B., Shibasaki K. Quasi-periodic Oscillations of Solar Active Regions in Connection with Their Flare Activity - NoRH Observations // Solar Physics. V. 273. I. 2. P.403-412. 2011.
2. Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. The Frequency of Occurrence of Pre-Flare Fluctuations in Microwave Radiation of Active Regions // Geomagnetism and Aeronomy. V. 63. I. 7. P. 916-919. 2023.
3. Abramov-Maximov V.E., Bakunina I.A. Signs of Preparation of Solar Flares in the Microwave Range // Geomagnetism and Aeronomy. V. 62. I. 7. P. 895-902. 2022.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА НА СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛА И ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

Биленко И.А.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

bilenko@sai.msu.ru

При прогнозировании отдельных явлений корональных выбросов массы (КВМ) и их воздействия на космическую погоду и геомагнитную активность необходимо детальное изучение конкретных событий, их предвестников, состояния и эволюции фотосферных магнитных полей и сопутствующих явлений, таких как вспышки и эрупции волокон/протуберанцев. Тогда как для получения среднесрочного и долгосрочного прогнозов требуется знание общих закономерностей поведения КВМ и их зависимости от солнечных и межпланетного магнитных полей, параметров плазмы и характеристик солнечного ветра на масштабах Кэррингтоновских оборотов и солнечных циклов.

С целью построения модели среднесрочного прогнозирования КВМ было проведено исследование влияния локальных и глобального магнитных полей Солнца на вариации числа и параметров КВМ в 23–25 циклах. Рассмотрены особенности их воздействия на КВМ на разных фазах циклов солнечной активности. Построены и проанализированы зависимости КВМ с различными параметрами от циклических изменений магнитных полей разного пространственно-временного масштаба и напряженности, которые являются характеристиками локальных и глобального магнитных полей Солнца. Выделены группы КВМ, связанные с циклическими вариациями локальных магнитных полей активных областей и динамикой глобального магнитного поля. Сопоставлены особенности КВМ этих групп и их вариации в периоды смены знака полярных магнитных полей в максимумах солнечной активности.

Отдельное внимание уделено рассмотрению изменения числа и параметров КВМ в периоды реорганизации крупномасштабных магнитных полей, которые происходят при доминировании секторной структуры глобального магнитного поля.

На основе полученных результатов предложен метод прогноза числа и средних за Кэррингтоновский оборот параметров КВМ, учитывающий особенности циклических вариаций локальных магнитных полей активных областей и глобального магнитного поля Солнца.

ДИНАМИКА ЦЕНТРОВ АКТИВНОСТИ ВО ВСПЫШЕЧНО- ПРОДУКТИВНОЙ ГРУППЕ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Головко А.А.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

golovko@iszf.irk.ru

В активной области 12673, давшей самые мощные солнечные вспышки 24-го солнечного цикла в сентябре 2017 г., выявлены центры активности, являющиеся очагами вспышек [1]. Они проявляются как места инициирования вспышечных арочных структур, а также показывают сильные турбулентные движения, которые видны на фильмах распределений доплеровских скоростей по наблюдениям HMI SDO. Ранее в работе [2] были обнаружены различия условий в нижней фотосфере перед вспышками и без них. В интервале времени от 3-4 часов до 1 часа перед вспышками наблюдалось уменьшение избытка температуры и плотности со временем, турбулентная скорость увеличена.

Центры активности выявляются как мозаичные паттерны на сегментированных изображениях для интервалов фрактальных размерностей от 0 до 0,4 при математической обработке карт магнитного поля и скорости микроканоническим методом мультифрактального анализа [3]. С целью изучения динамики участков усиленной турбулентности в активной области 12673 в течение 6 сентября 2017 г. проанализированы временные вариации площадей мозаичных паттернов. Получено, что в 3 час UTC, за 6 часов до вспышки балла X2.2, за которой спустя 3 час следовала вспышка балла X9.3, площадь паттернов ступенчатым образом изменилась, а в магнитном поле начались всплески величины максимальной магнитной индукции. После вспышек изменялась конфигурация расположения паттернов, в особенности после вспышки X9.3, что можно связать с изменением общей конфигурации магнитного поля. Мониторинг активных областей с подобным анализом может быть полезен при краткосрочном прогнозе мощных вспышек.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (проект 0278-2026-0001).

Литература

1. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. Features of the structure and dynamics of the active region 12673 associated with flares. // Geomagnetism and Aeronomy. V.63. No.7. pp.113-121.2023.
2. Аликаева К.В. и др. О характере изменения во времени физического состояния фотосферных слоев перед вспышками // Известия КрАО. Т. 92. С. 52-56. 1995
3. Макаренко Н.Г., Князева И.С. Мультифрактальный анализ цифровых изображений. Известия высших учебных заведений // Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. №5. С. 85-98.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НХР ИЗЛУЧЕНИЯ: УТОЧНЕНИЯ ПРОГНОЗА GLE СОБЫТИЙ НА ПРИМЕРЕ 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

irina.2014.irina@mail.ru

Протонные возрастания и их источники в 24-ом цикле солнечной активности сильно отличаются от наблюдавшихся в 23-ем цикле [1], в частности, число высокоэнергичных событий с регистрацией наземных возрастаний (GLE, Ground Level Enhancement) меньше в 8 раз (2 vs 16). При этом только за пройденную (к апрелю 2026) часть 25-го цикла уже произошло 5 GLE событий. Заметим, что GLE(73-76) напоминают по своим характеристикам subGLE 24-го цикла (27 января 2012 и 6 января 2014) [2], а характеристики жесткого рентгеновского (HXR) излучения вспышек-источников GLE72 и subGLE 7 марта 2012 — HXR GLE77 11 ноября 2025. Изменения физических условий на Солнце возможны, например, после прохождения точки бифуркации полярного магнитного поля [3], о чем, по-видимому, свидетельствует реализация GLE77.

В докладе для событий GLE 25-го цикла анализируются спектральные и временные характеристики темпа счета детекторов ACS SPI/INTEGRAL и ART ХС/Спектр-РГ от первичного (солнечного) и вторичного НХР излучения (рожденного в результате взаимодействия протонов космических лучей). Рассматриваются протонные возрастания и делаются оценки времен первого прихода протонов, необходимых условий ускорения в пяти GLE по данным ACS SPI, ART ХС и сети наземных нейтронных мониторов. Обсуждается, что должно было измениться в ноябре 2025. Показана возможность уточнения прогноза GLE событий в реальном времени по сигналу ART ХС солнечного НХР излучения.

Авторы благодарят Арефьева В.А., Штыковскую А.Е., Самородову А.Д. и Ожередова В.А. (ИКИ РАН) за предоставление и обработку данных ART ХС/Спектр-РГ.

Литература

1. Mewaldt, R. A., et al. Why is the Sun No Longer Accelerating Particles to High Energy in Solar Cycle 24? // AGU. Fall Meeting. abstract id. SH33D-03. 2015.
2. Struminsky A.B., et al. Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than $4 \cdot 10^{-4}$ V/cm // Adv. Space Res. V. 76. I. 12. P. 7564-7577. 2025.
3. Григорьева И.Ю. и др. Толкование правила Гневнышева-Оля и модуляция галактических космических лучей солнечной активностью // ГиА. Том 65. №8. с. 1183-1194. 2025.

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**Зимовец И.В.¹, Шарыкин И.Н.¹**¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*ivanzim@cosmos.ru

Представлены модифицированные (относительно опубликованных в [1]) версии моделей краткосрочного прогноза солнечных вспышек, полученные с использованием базы данных о характеристиках активных областей [2].

Литература

1. Zimovets I.V., Sharykin I.N. Models for Short-Term Forecast of Maximum X-ray Class of Solar Flares Based on Magnetic Energy of Active Regions // Geomagnetism and Aeronomy. V. 64. N. 5. P. 603-614. 2024.
2. Zimovets I.V., Sharykin I.N., Gan W.-Q. Magnetic Energies (and Some Other Parameters) in Solar Active Regions of Different Hale and McIntosh Classes: Statistical Analysis for 2010–2024 // Cosmic Research. V. 63. N. 4. P. 352-378. 2025.

ВСПЫШЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ СОЛНЦА В МАЕ-ИЮНЕ 2024 ГОДА**Исаева Е.С.¹, Иванов К.И.¹, Томозов В.М.², Язев С.А.^{1,2}**¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*²*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*ele3471@yandex.ru

Выполнен анализ вспышечной активности Солнца в мае-июне 2024 г. В период с 1.05 по 13.06 6 активных областей (АО) №№ 13654, 13663, 13664, 13685 и 13723 произвели 38 вспышек рентгеновских классов > M5.0. Наибольший вклад внес комплекс активности (КА), включавший в себя в мае АО 13664, в июне – АО 13697. Анализ изображений и магнитограмм Солнца, полученных космической обсерваторией «Solar Orbiter» [1] на обратном по отношению к Земле полушарии Солнца позволяет сделать вывод, что АО 13697 – результат непрерывной эволюции АО 13664, а не новая АО на том же месте. Суммарное количество вспышек в данном КА N = C127M88X18 без учета вспышек во время пребывания на обратном полушарии, что является нетипично высоким значением. Площадь S и суммарный магнитный поток В данного КА в мае нарастали отдельными порциями. Сначала возникли две сравнительно простые биполярные АО, затем между ними появилась еще одна АО, в результате сформировался единый протяженный пятенный комплекс со сложной топологией магнитного поля, для которого были характерны 1) тесная «упаковка» областей противоположной полярности, и 2) протяженная линия раздела полярностей сложной формы, что обычно связано с высокой вспышечной активностью [2]. В АО 13664 отмечены необычное соотношение вспышек разных классов C39M61X12 (вспышек класса M больше, чем C) а также нетипично высокая частота вспышек класса X (4 события в течение суток). Это результат эффективной «подпитки» АО магнитной энергией, что подтверждается ростом свободной магнитной энергии в АО в этот период. Отмечено, что 1) почти все вспышечные АО располагались в узком интервале долгот от 340° до 40° (активная долгота); 2) перед началом вспышечного периода изменился характер распределения пятенной активности на поверхности Солнца (переход от симметрии относительно экватора к выраженной асимметрии); 3) на местах будущего возникновения вспышечных АО на протяжении 1-3 оборотов Солнца полностью отсутствовали пятна. Отмеченные закономерности могут быть использованы для совершенствования методики прогноза крупных вспышечных событий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278, а также госзадание FZZE 2026-0006).

Литература

1. <https://soar.esac.esa.int/soar/>
2. Dhakal, S. K. et al. What Are the Causes of Super Activity of Solar Active Regions? // *The Astrophysical Journal*, 960(1), 36, 2024.

СОЛНЕЧНЫЕ АКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СТРУКТУРЫ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

ishkov@izmiran.ru

Проведён обзор методов прогноза активных солнечных явлений и их воздействия на состояние околоземного пространства по последним работам (2023 – 2026 г.). Принятое в 2008 г. современное определение явления космическая погода – «физическое и феноменологическое состояние естественной космической среды, исследования которой направлены на то, чтобы посредством наблюдения, мониторинга, анализа и моделирования понять и предсказать состояние Солнца, межпланетной и планетарной среды, а также возмущений, влияющие на них и оперативный прогноз возможных воздействий на биологические и технологические системы».

К настоящему времени общепринято, что именно солнечные активные явления являются источниками возмущений в гелиосфере и в областях, прилегающих ко всем планетам солнечной системы, наиболее эффективными из них – солнечные вспышечные события, сами вспышки и выбросы солнечных волокон. В наиболее полном виде большие солнечные вспышечные события включают в себя практически все электромагнитные, корпускулярные и динамические явления, сопровождающие внезапное выделение большей части магнитной энергии, находящейся в данный момент в активной области (АО), принесённой новым всплывающим магнитным потоком. Работы по прогнозу вспышек продолжают безуспешные попытки привлечь нейросети и искусственный интеллект в предположении о возможности накопления энергии внутри самой АО. Самыми мощными проявлениями вспышечного события являются выбросы коронального вещества и сопровождающие их межпланетные ударные волны и высокоскоростные потоки заряженных частиц, основных транспортных агентов, переносящих выделенную вспышечную энергию в окружающее межпланетное пространство к околопланетным областям и, в частности, к околоземному космическому пространству. В данном разделе прогноза геоэффективности (магнитных бурь и их эффектов) достигнуто понимание роли кластеров (последовательности) выбросов коронального вещества с различными скоростями от Солнца, причём их геоэффективность значимо повышается, если последние из них по времени распространяются с большей скоростью. Прогноз солнечных протонных по характеристикам порождающего их источника пока не принёс успеха и сводится к их диагностике по сопутствующему радиоизлучению и первой реакции на их приход соответствующих приборов. Идёт интенсивное изучение планетарных явлений во всех слоях, как Земле, так и на других планетах.

**ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ В КОНТЕКСТЕ ИЗУЧЕНИЯ
СТРУКТУРЫ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ****Каламанов В.Г., Садовский А.М.***ИКИ РАН, г. Москва, Россия*VGKalamanov@cosmos.ru

При исследовании эволюции коронального выброса массы возникает вопрос о его структуре. На исследование влияет множество факторов, в числе которых особенности работы приборов и качество полученных изображений, поэтому для обработки снимков и поиска закономерностей целесообразно применять компьютерные методы.

Из возможных для использования компьютерных методов в исследовании структуры коронального выброса массы следует выделить механизм выделения границ и цепной код. Механизм выделения границ (к примеру, метод Канни [1]) позволяет выявить границы события на изображении, а цепной код (такой как цепной код Фримена [3]) позволяет закодировать найденные границы для дальнейшего анализа. Анализ изменения найденных границ события в динамике, на наш взгляд, способен объяснить многие особенности, присущие эруптивной структуре коронального выброса массы.

В качестве примера был выбран обычный КВМ (см. обзор Chen, 2011 [2]) имеющий характерную структуру. С помощью компьютерной программы, были найдены границы события, которые затем были закодированы с помощью цепного кода для дальнейшего анализа. На основе полученных изображений, была прослежена эволюция эруптивной структуры коронального выброса массы. Был сделан вывод о возможностях вышеописанных компьютерных методов и о целесообразности их использования в дальнейшем.

Литература

1. Canny, J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. PAMI-8. I. 6. P. 679–698. 1986. <https://doi.org/10.1109/tpami.1986.4767851>
2. Chen, P. F. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis // Living Reviews in Solar Physics. V. 8. 2011. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2011-1>
3. Freeman, H. On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations // IEEE Transactions on Electronic Computers. V. EC-10. I. 2. P. 260–268. 1961. <https://doi.org/10.1109/tec.1961.5219197>

ЧЕМ ОБЪЯСНЯЕТСЯ ПАДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВНУТРИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ?

Кислов Р.А., Хабарова О.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.

Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Россия, Москва, Троицк,

rkislov@izmiran.ru

Гелиосферный плазменный слой (ГПС) – аналог плазменного слоя хвоста магнитосферы, область вокруг гелиосферного токового слоя – ГТС (продолжения дипольного магнитного экватора Солнца), образованная вытянувшимся поясом корональных стримеров и токовыми слоями, образовавшимися непосредственно в солнечном ветре. ГПС пересекается на орбите Земли от минут до суток, в зависимости от текущей магнитной конфигурации системы ГПС-ГТС. На МГД масштабах ГПС представляет собой толстый токовый слой. Наблюдения его пересечений на разных расстояниях от Солнца с помощью космического аппарата Ulysses показывают эффект падения температуры внутри ГПС. Однако при моделировании солнечного ветра в данной области практически во всех МГД моделях возникает локальный максимум плотности и, как следствие уравнивания политропы, температуры.

В данной работе мы объясняем данный парадокс в рамках одножидкостной МГД и показываем, что температура внутри ГПС определяется её распределением в области источника на Солнце и соотношениям плотностей потоков вещества в данной точке и на Солнце. Плотность потока вещества убывает по мере удаления от Солнца. Поскольку линии магнитного поля вытягиваются вдоль нейтральной линии ГПС, градиент логарифма плотности потока поперёк слоя в солнечном ветре больше, чем вблизи Солнца. В результате даже при наличии нерезкого максимума температуры в источнике, вблизи нейтральной линии ГПС температура может быть минимальной. Конечный результат зависит от вида функций магнитного потока на Солнце. Таким образом, проблемы МГД моделирования температуры внутри ГПС могут быть решены за счёт аккуратного выбора граничных условий и их корректного транслирования в область моделирования без усложнения и без того сложных МГД моделей.

**КАК УСТРОЕН ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ
ДИНАМО МОДЕЛИ, УПРАВЛЯЮЩЕЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ И ЭФФЕКТА
ОТРИЦАТЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ДАВЛЕНИЯ**

**Клиорин Н.И.^{1,3,2}, Кузаннян К.М.^{2,3}, Обридко В.Н.^{2,3}, Поршневу С.В.⁴,
Сафиуллин Н.Т.⁴, Рогачевский И.В.^{1,5}**

¹*Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel*

²*ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия*

³*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

⁴*Уральский Федеральный Университет им. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

⁵*КТН, Stockholm, Sweden*

nat@bgu.ac.il

Рассмотрено состояние текущего прогноза числа солнечных пятен в 25 цикле солнечной активности с помощью модели состоящей из (1) осесимметричной упрощённой динамо модели среднего солнечного магнитного поля с учетом сохранения магнитной спиральности, магнитной плавучести; и (2) управляемой этой моделью нейронной сети. Метод прогноза был разработан в результате совместной работы Университета им. Бен-Гурион (Израиль) и УрФУ им. Ельцина (Россия) в 2013-17 гг. С 2017 г. начались ежемесячные прогнозы числа солнечных пятен, усреднённых скользящим 13-месячным окном, на горизонтах 6-18 месяцев. В работе [1] показана возможность улучшения прогноза путем построения серии моделей нелинейного динамо среднего магнитного поля Солнца. В этой работе впервые на основе теории спирального динамо и неустойчивости, связанной с эффектом отрицательного магнитного давления, рассчитан с приемлемой точностью весь ряд Вольфа (1745 – 2016). Дальнейшие исследования [2,3] позволили превратить теоретическое знание в реальный практический инструмент прогнозирования солнечной активности. Мы показываем, какие значения наш прогноз давал за последние годы и демонстрируем статистическую его достоверность.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 21-72-20067п).

Литература

- 1 Kleeorin & all, 2016, MNRAS, 2016, v. 460, 3960-3967.
- 2 Safiullini & all, 2018 J. Plasma Phys. v. 84, 735840306.
- 3 Kleeorin & all, 2024 AAp Tr., v. 34, pp. 371 - 388.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ
СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА****Кодуков А.В.¹, Павлов Д.А.^{1,2}, Субботин М.О.¹**¹СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россияdapavlov@etu.ru

В работе исследована предсказательная способность МГД-модели солнечного ветра и корональных выбросов массы (КВМ) на основе библиотеки PLUTO [1, 2, 3, 4]. Ежедневные граничные условия предоставляются NOAA/NCEP с использованием магнитограмм GONG и данных коронографов SOHO/LASCO и STEREO-A. Исследовано влияние параметров моделей нижней короны и различных способов внедрения КВМ в граничные условия модели.

Протестированы различные способы вычисления индекса магнитной активности Кр на основе эмпирических функций связи модельных характеристик солнечного ветра между собой, произведено сравнение с наблюдательными данными базы данных OMNI [5] и прогнозами службы SWPC [6]. Рассмотрены сильнейшие геомагнитные бури 2024–26 годов (уровни G3–G5). Установлено, что PLUTO предсказывает время прихода ударных волн КВМ с точностью, близкой к модели ENLIL от SWPC.

В итоге продемонстрировано, что открытый код PLUTO пригоден для оперативного прогнозирования космической погоды, а включение в службу анализа функций связи «солнечный ветер – магнитосфера» закладывает базу для комплексного прогностического инструмента.

Литература

1. Arutyunyan S., Kodukov A., Subbotin M., Pavlov D. // Space Weather. 2025. V. 23. №. 12. С. e2025SW004403.
2. Арутюнян С.Н., Кодуков А.В., Субботин М.О., Павлов Д.А. // Космические исследования. 2023, Т. 61, № 6, С. 447–453.
3. <https://solarwind.entroforce.ru/>
4. Mignone A. et al. // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2007. V. 170. №. 1. P. 228.
5. <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>
6. <https://www.swpc.noaa.gov/>

ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ ПО ДИНАМИКЕ ЦИКЛОВ ЭТИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Крайнев М.Б.

ФИАН, г. Москва, Россия

mkrainev46@mail.ru

Для понимания 11-летней и 22-летней цикличности характеристик активности Солнца, включая гелиосферу как его наружный слой, важно изучение корреляции между различными параметрами прошедших циклов. Собственно, именно наличие такой тесной корреляции и понимание, чем она обусловлена, и лежит в основе надёжного прогноза, необходимого для практических целей. Из солнечных характеристик наиболее надёжные данные за последние полтора века существуют для площади групп солнечных пятен, S_{ss} . В огромной и плохо исследованной прямыми измерениями гелиосфере характеристикой, наиболее полно отражающей глобальные свойства этого слоя, является интенсивность ГКЛ, J_{GCR} , по данным на орбите Земли за последние семьдесят лет.

В докладе изучается корреляция между значениями S_{ss} и J_{GCR} в максимуме и минимуме солнечного цикла и их значениями в соответствующих точках перегиба циклов в этих характеристиках ($dP/dt = 0$ для характеристики P ; примерно за 2-3 года до соответствующего экстремума, [1]). Кроме того, будет кратко рассмотрена зависимость характеристик гелиосферы (a , значит, и интенсивности ГКЛ) от обеих ветвей (тороидальной и полоидальной) солнечной активности [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Крайнев М.Б. О характеристиках активности Солнца и интенсивности галактических космических лучей в максимуме и точках перегиба солнечного цикла. // Краткие сообщения по физике ФИАН // 2013, № 1, 3-9
2. Крайнев М.Б. Проявления в гелиосфере и в интенсивности ГКЛ двух ветвей солнечной активности // Солнечно-земная физика // 2019. Т. 5, № 4. С. 12–25. <https://doi.org/10.12737/szf-54201902>.
3. M. Krainev, M. Kalinin, O.P.M. Aslam, D. Ngoben, M. Potgieter, On the dependence of maximum GCR intensity on heliospheric factors for the last five sunspot minima, *Advances in Space Research*, Volume 68, Issue 7, 1 October 2021, Pages 2953-2962; <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.05.021>

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ
КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОЩНЫХ
СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И КВМ****Нечаева А.Б.¹, Зимовец И.В.¹, Шарыкин И.Н.¹, Анфиногентов С.А.^{1,2}**¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*²*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*nechaeva.workspace@gmail.com

В данной работе рассматриваются незатухающие изгибные колебания солнечных корональных петель и исследуются изменения их поведения в активных областях (АО) перед мощными вспышками (М-, Х-класса), а также при отсутствии мощных вспышек. Для этого мы провели анализ 14 АО с мощными вспышками и 14 АО без мощных вспышек. Для каждого события загружены и проанализированы изображения, полученные в каналах 171 Å и 94 Å AIA/SDO с шагом в 12 секунд, для 4 часов перед вспышкой. Для АО без мощных вспышек были рассмотрены аналогичные по длительности произвольные интервалы времени. Поскольку незатухающие колебания имеют очень низкую амплитуду (1–2 пикселя AIA/SDO), мы использовали технику Motion Magnification для усиления амплитуды этих колебаний. По обработанным изображениям в канале 171 Å были построены диаграммы время-расстояние, из которых “вручную” извлечены колебательные паттерны. Для проверки наличия изменений в периоде осцилляций был проведен вейвлет-анализ. Систематических изменений обнаружено не было. Также не выявлено явных различий в поведении колебаний в АО со вспышками и без них. Дополнительно получена информация о корональных выбросах массы (КВМ) из АО в окрестности рассматриваемых интервалов времени. Опираясь на результаты анализа небольшой выборки событий, мы пришли к предварительному выводу, что регистрация и анализ незатухающих колебаний высоких (~100–600 Мм) корональных петель на основе данной методики малоперспективны для прогнозирования мощных вспышек и КВМ.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект No 20-72-10158). Работа опубликована в журнале ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2025, том 65, No 8, с. 1151–1166.

СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОГО РАДИОПОТОКА НА ДЛИНАХ ВОЛН 10,7 И 30 СМ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Подладчикова Т.В.¹, Абу-Шаар З.¹, Петрукович А.А.²

¹Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

t.podladchikova@skoltech.ru

Потоки солнечного радиоизлучения на длинах волн 10,7 и 30 см (индексы F10.7 и F30) служат прокси-показателями ультрафиолетового излучения Солнца, нагревающего верхнюю атмосферу Земли. Они используются в большинстве моделей термосферы и ионосферы для уточнения орбит спутников, прогноза времени схода с орбиты, манёвров предотвращения столкновений и моделирования эволюции космического мусора. Представлен метод RESONANCE (Radio Emissions from the Sun: ONline ANalytical Computer-aided Estimator) для прогноза 13-месячных сглаженных среднемесячных значений индексов F10.7 и F30 с упреждением от 1 до 24 месяцев [1].

Алгоритм RESONANCE включает три шага. Во-первых, для подавления шумов в данных о радиопотоке применяется оптимизированное 13-месячное скользящее среднее. Во-вторых, на его основе строится начальный прогноз F10.7 и F30 методом Макниша–Линкольна. В-третьих, этот прогноз уточняется с помощью адаптивного фильтра Калмана с идентификацией статистики ошибок. Среднеквадратичная ошибка прогноза составляет 5–27 sfu для F10.7 и 3–16 sfu для F30 при заблаговременности 1–24 месяца, что статистически превосходит существующие алгоритмы. Верификация на данных 602 архивных кампаний ESA по прогнозированию схода с орбиты подтвердила, что RESONANCE систематически улучшает точность прогноза времени схода по сравнению с использованием постоянного значения F10.7.

Метод также расширен на заблаговременность 5–7 лет за счёт использования долгосрочных прогнозов солнечного цикла, что соответствует масштабу половины цикла солнечной активности. Это открывает возможности для долгосрочного планирования спутниковых миссий и управления популяцией космического мусора.

Литература

1. Petrova E. et al. Medium-term Predictions of F10.7 and F30 cm Solar Radio Flux with the Adaptive Kalman Filter // ApJS. 2021. V. 254. 9. DOI: 10.3847/1538-4365/abef6d.

ПРОГНОЗ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ПРОТОННОГО СОБЫТИЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

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

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия,

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

E-mail: 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 только по характеристикам вспышки, а именно, по мягкому рентгеновскому излучению Солнца (0,1-0,8 нм) во время вспышки: начало вспышки и максимальная плотность потока излучения (рентгеновский балл вспышки). Максимальный поток солнечных протонов в основном достигается через несколько часов после начала регистрации в околоземном пространстве первых протонов, поэтому для прогноза в реальном времени мощности СПС может быть использовано время начала события. Экспериментальные данные с геостационарных спутников серии GOES доступны каждые 5 мин.

Цель работы заключается в создании системы прогноза в реальном времени двух характеристик СПС: максимального потока протонов с энергией >10 МэВ и времени его наступления (длительности фазы нарастания потока). Для решения поставленной задачи созданы три модели, использующие алгоритмы машинного обучения: линейной регрессии, случайного леса и градиентного бустинга. Обучение моделей производилось по данным каталогов СПС 23, 24 и 25 циклов солнечной активности, представленных на сайте Центра Космической Погоды МГУ [https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/]. Отобраны СПС, в которых поток протонов с энергией >10 МэВ превышал 10 част./($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$). В качестве входных параметров для моделей использовались рентгеновский балл солнечной вспышки или половина флюенса плотности мягкого рентгеновского излучения Солнца (от начала вспышки до максимума) и интервал времени между началом вспышки и началом возрастания потока солнечных протонов. Выполнена валидация моделей, получены предварительные результаты прогнозирования, обсуждается целесообразность использования данных алгоритмов машинного обучения для решения поставленной задачи.

ПРЕДЕЛЫ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ: РОЛЬ МНОГОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

m.riazantseva@cosmos.ru

Доклад посвящен многомасштабной динамике солнечного ветра как одному из ключевых факторов, ограничивающих эффективность прогнозов космической погоды. Несмотря на значительный прогресс в понимании физики процессов солнечно-земных связей, краткосрочные (1-3 суток) прогнозы геомагнитных возмущений сохраняют вероятностный характер и характеризуются сравнительно невысоким уровнем надежности, тогда как сверхкраткосрочные прогнозы (1-3 часа), основанные на прямых измерениях параметров солнечного ветра в точке либрации L1, демонстрируют существенно более высокую достоверность. Это различие указывает на то, что ключевые источники неопределенности связаны с эволюцией корональных структур в межпланетной среде на пути от Солнца к Земле, а также с турбулентностью плазмы солнечного ветра и высокой степенью перемежаемости потока. Существенную роль играет также нелинейное взаимодействие возмущенных потоков, приводящее к формированию структур с качественно иными свойствами и перераспределением энергии в турбулентной среде. Процессы на околоземной ударной волне и внутри магнитослоя, где происходит дальнейшая трансформация потенциально геоэффективных структур, приводят к дополнительному усложнению интерпретации наблюдаемых явлений и их прогноза. В работе предлагается рассматривать указанные эффекты не как совокупность отдельных факторов, а как проявление единой многомасштабной динамики солнечного ветра, формирующей пределы прогнозируемости и в ряде случаев определяющей рамки применимости различных классов моделей, используемых для прогнозов. В отличие от традиционного подхода, ориентированного преимущественно на выявление физических механизмов наблюдаемых явлений, в докладе делается акцент на анализе роли неопределенностей, возникающих на различных этапах переноса возмущений. Рассматриваются возможные сценарии эволюции событий в рамках цепочки "Солнце - межпланетная среда - магнитосфера Земли" и обсуждаются подходы к учету этих эффектов при построении прогнозов космической погоды.

**ОБ УСИЛЕНИИ H_α И СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПЕРЕД СОЛНЕЧНЫМИ ВСПЫШКАМИ****Смирнова В.В.¹, Цап Ю.Т.¹, Моторина Г.Г.^{2,3}, Моргачев А.С.²**¹ФГБУН Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым, Россия²ФГБУН ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия³ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россияvvsvid.smirnova@yandex.ru

Представлены результаты анализа усиленного субтерагерцового (суб-ТГц) и H_α излучения активных областей, наблюдаемого перед солнечными вспышками. Согласно стандартной модели, вспышечное энерговыделение происходит в короне, откуда ускоренные частицы распространяются вниз и нагревают хромосферу. В этом случае, излучение хромосферы является вторичным процессом, включающим испарение горячей хромосферной плазмы. Однако, наблюдения некоторых вспышек в предимпульсной фазе обнаруживают усиление излучения в суб-ТГц диапазоне и линии H_α, что иногда совпадает по времени с рентгеновскими предвестниками [1] и свидетельствует о процессах энерговыделения в хромосфере Солнца.

Литература

1. Hudson H.S., Simoes P.J.A., Fletcher L., Hayes L.A., Hannah I.G. Hot X-ray onsets of solar flares // MNRAS. V. 501. I. 1, P. 1273–1281. 2021

СИНХРОНИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ЗАДАЧЕ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

Соколов Д.Д.^{1,2}

¹*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

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

Sokoloff.dd@gmail.com

В последние годы появилась возможность продлить на основании изотопных данных последовательность циклов солнечной активности на тысячи и даже десять тысяч лет. В связи с этим в литературе обсуждается возможность того, что точность вычисления даты начала солнечных циклов не уменьшается по мере удаления в прошлое. Эта возможность кажется, на первый взгляд, маловероятной, однако ее авторы аргументируют свою идею тем, что роль синхронизирующего фактора играет периодическое воздействие на Солнце планет Солнечной системой. Эту мысль, вне зависти от субъективной оценки ее правдоподобности, приходится проверять. В докладе рассказывается о том, что имеющие данные о периодическом воздействии на солнечное динамо говорят о возможности синхронизации солнечного цикла. Оказывается, что в целом эта опция действительно оказывается малореальной, хотя некоторые варианты ее реализации действительно трудно исключить. Например, можно представить, что без учета влияния планет солнечное динамо было в слегка подкритическом режиме, а слабое возмущения, связанное с приливными силами, делает солнечное динамо слегка надкритическим. Эта возможность выглядит маловероятной и трудно проверяемой.

ПОЧТИ КРИТИЧЕСКОЕ МГД ДИНАМО СОЛНЦА**Старченко С.В.**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) Троицк, Москва, Россия
e-mail: sstarchenko@mail.ru*

Получена интегральная динамическая система для среднеквадратичной скорости $u(t)$ и магнитного поля $b(t)$ во всей конвективной зоне Солнца (КЗ).

Равновесные значения (далее с индексом “s”) системы зависят от относительной светимости a , масштаба H и времени диффузии T .

Для генерации магнитного поля требуется $a > H^2/T^3$. При равенстве же известные $a=8\text{мВт/кг}$ и $u_s \approx 100\text{м/с}$ дают критические $H_c=(u_s)^3/a = 125\text{Мм}$ (полутолщина КЗ) и $T_c=(u_s)^2/a = 1.25\text{Мс}$ (среднее время жизни пятен и половина периода вращения Солнца). Таким образом, показывается, что глобальное динамо близко к критическому и поэтому почти линейно.

При этом кинетическая энергия преимущественно доминирует над магнитной. Это позволяет найти точное аналитическое решение этой почти критической проблемы, пренебрегая, в первом приближении, влиянием магнитного поля на течение, а в последующих приближениях определяется полностью асимптотически корректное решение.

Кинетическая энергия $2.5 \cdot 10^{32}\text{Дж}$ задана, а магнитная пропорциональна отклонениям от критических значений. Так при $T=1.1T_c$ и $H=H_c$ – магнитная энергия $5 \cdot 10^{31}\text{Дж}$, чего достаточно для миллиона вспышек Кэррингтона. Соответственно среднеквадратичное магнитное поле 900 Гс.

**ПОЛЯРНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ЧИСЛО СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И
МОДУЛЯЦИЯ ГКЛ: «ПРОГНОЗ-2024» ДВА ГОДА СПУСТЯ****Струминский А.Б.¹, Григорьева И.Ю.², Ожередов В.А.¹**¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия² ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россияastrum@cosmos.ru

На симпозиуме «ПРОГНОЗ-2024» была высказана гипотеза о наличии точек бифуркации полярного поля (B_{pol}) в нечетных циклах через ~ 5.5 лет и ~ 7.5 лет после предыдущего максимума ГКЛ [1]. Поэтому следующий цикл после минимума 25-26 может быть как сильным (если B_{pol} окажется большим, как в 21-ом), так и слабым (если B_{pol} малым, как 24-ом). Был сделан качественный прогноз возможных пределов изменения B_{pol} в числе солнечных пятен (SSN) и в потоке ГКЛ на фазе спада 25-го цикла и в минимуме 25–26 циклов. Возникающие неопределенности связаны с хаотическим развитием цикла в модели Бэбкока-Лейтона. Нечетные циклы, по сравнению с четными, большее время находятся в динамичном состоянии наработки поля новой полярности и меньшее время — в состоянии максимального по модулю полярного поля.

Несимметрия четных и нечетных циклов, обнаруженная в [1], возможно, отражает правило Гневывшева-Оля (ПГО) [2] — сумма солнечных пятен в предшествующем четном цикле меньше, чем в последующем нечетном. В работе [3] была введена «эффективность» ПГО — прямая для нечетных и обратная для четных циклов (ПГО на временных отсечках). Прямая эффективность ПГО показывает три особенности на отсечках ~ 4.2 , ~ 5.6 и ~ 7.3 года, а обратная две на отсечках ~ 2.9 и ~ 5.3 лет [3]. На апрель 2026 года, который соответствует 2002 году 23-го цикла, прогноз [1] подтверждается. Две первые особенности прямой эффективности ПГО уже пройдены и отразились в частоте появлений вспышек и КВМ, а третья еще не наступила. Поэтому, вполне вероятно, что в 25-м цикле у нас впереди периоды аналогичные 2003 году (7 год 23-го цикла) и 2005 году (9 год 23-го цикла).

Литература

1. Струминский А.Б., Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г., Григорьева И.Ю. Оценка прогноза модуляции галактических космических лучей в 25-ом цикле солнечной активности // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 65. № 3. С. 324–334. 2025.
2. Гневывшев М.Н., Оль А.И. О 22-летнем цикле солнечной активности. // Астрон. Ж. Т. 25. № 1. С. 18–20. 1948.
3. Григорьева И.Ю., Ожередов В.А., Струминский А.Б. Толкование правила Гневывшева-Оля и модуляция галактических космических лучей солнечной активностью // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 65. № 8. С. 1183–1194. 2025.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТРИКИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

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

¹физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²НИИЯФ им Д.И. Скобелева МГУ, г. Москва, Россия

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

SuharevaNA@my.msu.ru

Космические явления оказывают значительное влияние на жизнедеятельность человека. Для прогноза обстановки в околоземном космическом пространстве обычно используют вероятностные подходы, основанные на анализе трендов развития изучаемых стохастических систем, к которым относятся межпланетное магнитное поле, векторные поля солнечного ветра, коронарные выбросы солнечного вещества, самосогласованные структуры магнитных облаков, магнитные суббури, бури и суперштормы.

В нашей работе разработаны и протестированы количественные меры контроля состояния таких многомерных систем и протекающих в них процессов. Так, представлен новый метод анализа вариации структуры межпланетного магнитного поля (ММП), основанный на статистических характеристиках тензора третьего ранга, описывающего распределение населенности состояний в пространстве компонент проекций магнитного поля и компонент проекций векторов скорости потоков плазмы [1].

Тестирование предлагаемых методов проведено на основе экспериментальных данных о ММП и солнечном ветре центра Годдарда (миссия WIND). Интервал наблюдения составил более 25 лет (с 2001.01.01 по настоящее время) при дискретизации 1 мин. Пространственные статистические моменты младших и старших порядков позволяют выделить на интервале времени наблюдения собственные значения времен квазистационарности, дрейфа, диффузии, и иных физических характеристик потоков электронов и протонов. Представлены примеры анализа эволюции трендов наблюдаемых вариаций младших пространственных статистических моментов методом кубической сплайн-интерполяции.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий МГУ, НИИЯФ МГУ, ИФЗ РАН, и частичном финансировании от Программы развития МГУ, проект No 23-Ш03-03.

Литература

1. Проекционные отображения для 3D-матрицы числа реализаций межпланетного магнитного поля и потоков солнечной плазмы, Журнал «Космические исследования» 2026, том 64, No 1, с. 47–69 (в печати)

ОЦЕНКИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ СИНОПТИЧЕСКИХ КАРТ СОЛНЦА

А.В. Тертышников^{1,2}, Д.С. Обельченко³

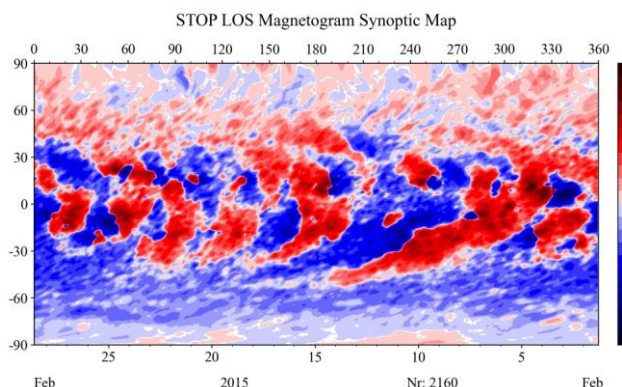
¹ОБУ «Новгородская облветлаборатория»,

²ФГБУ «ИПГ», Москва, Россия

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия.

Atert@mail.ru

В наземных наблюдениях магнитных полей Солнца используются сеть магнитографов и спектрогелиографов (Солнечные телескопы оперативного прогноза - «СТОП», телескопы-магнитографы американского аналога GONG [1], и др.). По наблюдениям формируются синоптические карты магнитных полей (рис. 1).



Магнитная активность северной (верхней) части карты – это признак максимума 24-го 11-летнего цикла солнечной активности и начала переполюсовки магнитного поля Солнца.

Для анализа сложности рельефа синоптических карт использовалась оценка фрактальной размерности (D) их рельефа. Для анализа карты преобразовывались в бинарный формат.

Перегиб трубки вариаций D пришелся на осень 2019 г., когда начался очередной 25-й «одиннадцатилетний» цикл солнечной активности. Эта оценка с учетом закона Шпёрера и закона Швабе – Вольфа [3], имеющихся данных наблюдений солнечной цикличности, соответствует минимуму 24 «одиннадцатилетнего» цикла солнечной активности, который был пройден весной 2019 года. Квартальная оценка минимума D более корректна в отношении экспертизы NASA и NOAA о начале 25 цикла солнечной активности в декабре 2019 года.

Благодарности. Авторы благодарят Сергея Геннадиевича Губина, Андрея Георгиевича Тлатова и Ивана Александровича Березина за предоставленные карты и полезные дискуссии.

Литература

1. GONG. <https://nso.edu/telescopes/nisp/gong/>.
2. Индексы солнечной активности. <http://solarstation.ru/sun-service/indices>.
3. Тертышников А.В. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент № 2023135791, 27.12.2023. Дата регистрации: 23.07.2024. Бюл. № 21.

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ
РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛИНИИ ЛАЙМАН-АЛЬФА****Титова А.В.^{1,2}, Измоленов В.В.^{1,2,3}**¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*²*НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия*³*МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*avtitova@hse.ru

Межзвёздные атомы водорода, проникающие в гелиосферу благодаря достаточно большой длине свободного пробега, рассеивают солнечное излучение в линии Лайман-альфа. В результате формируется диффузное свечение, которое регистрируется прибором SWAN, установленным на борту космического аппарата SOHO. Такие наблюдения позволяют строить глобальные карты интенсивности рассеянного излучения. Эти карты содержат информацию не только о распределении межзвёздного водорода в пределах гелиосферы, но и о характеристиках самого Солнца. В частности, активные области на Солнце, обладающие повышенной яркостью в линии Лайман-альфа, существенно влияют на наблюдаемую картину. Их вклад может быть обнаружен даже в случае, когда они расположены на невидимой с Земли стороне Солнца.

В данной работе представлены результаты моделирования карт интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения с учётом влияния активных областей. Расчёты проведены для различных наборов параметров, описывающих характеристики активных областей, включая их яркость, пространственные размеры и положение на солнечной поверхности.

Кроме того, предложен метод решения обратной задачи, позволяющий по наблюдаемым картам интенсивности восстанавливать параметры активных областей, такие как их координаты и уровень излучения. Разработанный подход открывает возможности для мониторинга солнечной активности на обратной стороне Солнца на основе наблюдений в линии Лайман-альфа.

**НАБЛЮДЕНИЯ В ЛИНИИ К CaII В 1905-2025 ГОДАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ПОЛЯРНОЙ И НИЗКОШИРОТНОЙ АКТИВНОСТИ****Тлатов А.Г., Березин И.А., Тлатова К.А.***Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия
Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, Элиста, Россия
tlatov@mail.ru*

Выполнена обработка долговременных рядов наблюдений хромосферы Солнца в линии CaII К. В том числе данные обсерваторий: Kodaikanal (Индия) 1905-2000, Mount Wilson (США) 1915-1985, Sacramento Peak (США) 1962-2002, Meudon (Франция) 1980-2025, Кисловодск (2002-2025). Методика обработки изображений Солнца включала в себя следующие основные шаги: поиск диска Солнца, изменение формы, если необходимо, наложение гелиографической сетки, определение Р-угла, вычитание потемнения к краю, и выделение флоккул и ярких кальциевых точек. Для идентификации объектов активности мы используем адаптивную методику, основанную на методе выделения с помощью «зародышей». Для этого выбираются начальные точки (семена/зародыши), и алгоритм начинает «присоединять» к ним соседние пиксели, если они похожи яркости. Начальные точки выбираются нами по градиенту интенсивности.

Мы реконструировали индексы активности в линии CaII К, в том числе индекс активности, связанной с солнечными пятнами и активными областями, а также индексы полярной и низкоширотной активности. Проведено сравнение индексов полярной и низкоширотной активности для прогнозирования циклов активности. Рассмотрены свойства расширенных циклов активности по данным долговременных наблюдений.

Работа выполнена при частичной поддержке в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ от 16.01.2026 г. № 075-03-2026-375.

**ТОРОИДАЛЬНАЯ И ВИНТОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ДИАГНОСТИКА
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКОВЫХ ЖГУТОВ В КОРОНЕ СОЛНЦА****Цап Ю.Т.¹, Степанов А.В.², Копылова Ю.Г.²**¹*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия*²*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*yur_crao@email.ru

В основе стандартной модели солнечных вспышек, а также петельных корональных выбросов массы (КВМ) лежат представления о токовых жгутах. Несмотря на это, до сих пор нет ясных представлений об относительной роли наиболее легко возбуждаемых МГД неустойчивостях в жгутовых корональных структурах – тороидальной и винтовой. В связи с чем нами рассмотрена проблема эрупции магнитных жгутов в результате развития тороидальной неустойчивости, обусловленной, в первую очередь, уменьшением внешнего магнитного поля с высотой как для контурной модели, так и модели «изолированного» магнитного жгута. В основе контурной модели лежат представления о баллонной силе и внешнем магнитном поле, тогда как «изолированного» жгута – градиент магнитного поля, связанный с азимутальной компонентой. Показано, что в последнем случае условие равновесия предполагает приблизительное равенство азимутальной и полоидальной компоненты, и, соответственно, сильную закрутку магнитных силовых линий вокруг оси жгута (эффективное число оборотов должно превышать несколько десятков). При этом учет внешнего магнитного поля не оказывает существенного влияния на устойчивость. Полученные оценки свидетельствуют в пользу контурной модели солнечных вспышек и КВМ. Однако в этом случае для стабилизации винтовой неустойчивости полоидальная компонента магнитного поля должна быть на порядок больше азимутальной, поэтому ее значения в корональном жгуте могут достигать сотен гаусс. В свете полученных результатов обсуждается влияние индекса убывания на темп ускорения КВМ с высотой.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (грант № 22-12-00308-П).

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗА ВРЕМЕНИ РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА КОРОНОГРАФЕ

Шейнер О.А.

НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

rff@nirfi.unn.ru

Способ краткосрочного прогноза времени регистрации коронального выброса массы (КВМ) на коронографе [1] создан на основе анализа временных и спектральных данных микроволнового солнечного излучения в диапазоне частот от сотен МГц до 15000 МГц в период, предшествующий явлению коронального выброса массы.

Полная реализация способа предусматривает схему, использующую связанные процедуры: наличие и рост амплитуды долгопериодных ($T > 20$ мин) пульсаций микроволнового излучения за 2-3 суток до события; наличие устойчивых узкополосных (шириной до 1 МГц) особенностей радиоизлучения за 8-5 часов до события и регистрацию на интервале за 2 часа до события широкополосных микроволновых предвестников в виде подобного поведения спорадической компоненты радиоизлучения на различных частотах микроволнового диапазона.

С целью развития методов краткосрочного прогнозирования КВМ по радиоданным нами были предложены и продемонстрированы возможности расширения применения указанного способа прогноза для источников КВМ, расположенных на краю солнечного диска или за ним.

В данной работе на основе анализа данных за май 2024г. обсуждается связь метровых радиовсплесков II и III типов с выбросами КВМ на двухчасовом интервале до их регистрации на коронографе.

Используются данные о радиоизлучении Солнца, приведенные на сайте Мировой службы Солнца, и результаты наблюдений на спектрографах, доступные на сайте International Network of Solar Radio Spectrometers (e-CALLISTO).

Показана возможность использования радиоизлучения метрового диапазона в качестве радиопредвестников корональных выбросов массы.

Работа выполнена по проекту FSWR-2026-0011 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

1. Фридман В.М., Шейнер О.А. Способ краткосрочного прогноза времени регистрации явления коронального выброса массы (КВМ) // Патент на изобретение RU 2630535. 11.09.2017. Заявка № 2016100808 от 12.01.2016.

**ПОСТРОЕННАЯ ПО СНИМКАМ SDO/AIA ДВУХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ
ГЕЛИОСФЕРЫ****Ширяев А.О.^{1,2}, Капорцева К.Б.¹, Шугай Ю.С.¹**¹НИИ ядерной физики им. Скобелева, МГУ, Москва²Факультет космических исследований МГУ, Москваanton.o.shiryayev@gmail.com

Высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП) являются источником рекуррентных геомагнитных возмущений и могут влиять на распространение и геоэффективность межпланетных корональных выбросов массы. Точность прогнозирования параметров ВСП зависит как от надёжности идентификации корональных дыр, так и от предположений и методологии моделирования распространения солнечного ветра в гелиосфере. Ассоциация ВСП с корональными дырами позволяет давать эмпирическую оценку скорости солнечного ветра на основании площадей и расположения на Солнце наблюдаемых КД.

На сайте Space Weather Exchange НИИЯФ МГУ реализован такой алгоритм, использующий пороговый алгоритм для выделения КД на снимках $193 \text{ \AA}$ с космического аппарата (КА) SDO и эмпирическую модель для связи площади КД и скорости солнечного ветра, позволяющую предсказывать скорости СВ у Земли. В данной работе мы представляем результат расширения этого подхода до 2D-модели, захватывающей всю гелиосферу, и оценку его эффективности по данным КА STEREO-A, КА в точке L1 и Parker Solar Probe.

В работе также рассмотрены методы улучшения качества выделения КД на изображениях Солнца в длине волны $193 \text{ \AA}$ путём борьбы с ошибочным определением корональных волокон как КД с привлечением магнитограмм SDO/HMI, наземных наблюдений и снимков SDO/AIA в других длинах волн.

**ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ, ОТКЛОНЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И
ФОРМИРОВАНИЕ ОБРАТНОГО ПОТОКА В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ****Якунина Г.В.***ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия*yakunina45@yandex.ru

Солнечный зонд «Паркер» (Parker Solar Probe, PSP) был запущен 12 августа 2018 года для изучения структуры коронального магнитного поля, углубления понимания процессов нагрева короны и формирования солнечного ветра. Основная цель миссии PSP — определить динамику и структуру плазмы и магнитного поля в источниках солнечного ветра. Ни один из космических аппаратов не подлетал так близко к Солнцу. Это дало возможность получить новые результаты с временным разрешением недоступным для космических аппаратов Helios, Ulysses и Wind.

Одним из ранних открытий PSP является наблюдение разворотов магнитного поля (от 30° до $>120^\circ$) в околосолнечном солнечном ветре, которые теперь называются switchbacks (обратные переключения). Эти кратковременные явления характеризуются резким отклонением вектора магнитного поля от направления окружающего магнитного поля и возвращением в исходное положение. Switchbacks сопровождаются ускорением солнечного ветра и повышением температуры. Согласно одной из часто использованных теорий, «переключения» возникают в нижних слоях солнечной короны в результате магнитного пересоединения и тесно связаны с солнечными струями. Как в корональных дырах, так и на спокойном Солнце можно наблюдать множество явлений, в том числе plumes, джеты и яркие точки.

Благодаря наблюдениям Parker Solar Probe (PSP) и Solar Orbiter (SolO) большое внимание уделяется вопросам, связанным с явлениями и структурами солнечной короны и их измерениями. Среди этих нерешенных вопросов - возможная связь между событиями, подобными корональным струям, и обратными переключениями в солнечном ветре (switchbacks).

Секция 2.

Прогнозирование состояния ионосферы и условий распространения радиоволн

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ НАГРЕВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А.

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

nv_bakhm@nirfi.unn.ru

При планировании экспериментов, связанных с воздействием на ионосферу мощным КВ радиоизлучением и последующей трактовке результатов, важнейшая роль принадлежит прогнозу параметров ионосферы и ее реальному состоянию в период проведения измерений. В докладе приведены результаты экспериментов по исследованию отклика ионосферы на высокочастотный нагрев, выполненных на нагревном стенде СУРА в 2024-2025 гг. в отличных друг от друга ионосферных условиях. Использовался метод вертикального зондирования возмущенной области ионосферы с помощью специализированной приемной установки, регистрирующей в цифровом формате квадратурные составляющие ионосферных сигналов как рассеянных, так и зеркально отраженных. На основе результатов измерений сделан вывод о том, что основными внешними факторами, влияющими на характер отклика ионосферы на высокочастотный нагрев кроме регулярного изменения электронной концентрации в ионосферных слоях и его модификации во время воздействия на ионосферу, являются динамические явления в виде атмосферных волн, спорадических слоев ионизации и состояния межслоевой E-F впадины (долины). Проведено сравнение нагревных эффектов в условиях существования спорадического слоя E (слоя E_s) и в его отсутствие.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта № 25-27-00031.

Литература

1. Bakhmetieva N.V., Frolov V.L., Vyakhirev V.D , et al. The lower ionosphere response to its disturbances by powerful radio waves // *Advances in Space Research*. 2018. V.61. No. 7. P. 1919–1930.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.022>
2. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А. Отклик ионосферы на воздействие на нее необыкновенной радиоволной при зондировании возмущенной области на частоте, близкой к нагревной // *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11. № 3. С. 88–99. DOI: 10.12737/szf-113202510.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК ДЛЯ ЭТАЛОННОЙ ИЗОЛИРОВАННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

**Белюченко К.В.¹, Клименко М.В.¹, Клименко В.В.¹, Ратовский К.Г.²,
Веснин А.М.², Бессараб Ф.С.¹**

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова Российской академии наук, Калининград, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

kdei@list.ru

Доклад представляет сравнительный анализ ионосферных откликов на геомагнитные события, идентифицированные по АЕ-индексу (АЕ-бури), в минимуме и максимуме солнечной активности. Анализ включает в себя идентификацию геомагнитных событий на основе АЕ-индекса и расчет “эталонного” ионосферного отклика. “Эталонный” отклик представляет собой динамику среднего ионосферного возмущения, полученную методом наложенных эпох с ключевыми моментами, соответствующими максимуму АЕ для зимних, весенних, летних осенних АЕ-бурь. В качестве ионосферной характеристики мы использовали региональное электронное содержание (REC), представляющее собой среднее значение полного электронного содержания (TEC) по всем долготам для выбранной широтной зоны. Ионосферное возмущение представляет собой относительное (процентное) отклонение наблюдаемых значений от 27-дневного скользящего среднего значения REC. Разделение геомагнитных событий в минимуме и максимуме солнечной активности осуществлено по следующему критерию: события, произошедшие в годы со среднегодовым значением индекса $F10.7 < 110$ с.е.п., относились к минимуму солнечной активности (193 события), а остальные события были отнесены к максимуму солнечной активности (363 события).

На основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) были проведены расчеты отклика REC) для изолированной эталонной геомагнитной бури. Моделирование было проведено для высокой и низкой солнечной активности. Модельный отклик REC сопоставлялся с наблюдаемым эталонным откликом REC.

По результатам сравнения было выявлено, что отклик REC при низкой солнечной активности превосходит по интенсивности положительных возмущений отклик при высокой солнечной активности, как для эксперимента, так и по результатам моделирования. Для отрицательного отклика REC ситуация не однозначна и зависит от времени года.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №25-27-00217).

ДИАГНОСТИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ GIM TEC

Бессараб Ф.С.¹, Васильев П.А.¹, Борчевкина О.В.¹, Карпов И.В.¹

¹Калининградский Филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

bessarabf@wdizmiran.ru

Планетарные волны (ПВ) играют важную роль в формировании крупномасштабной структуры атмосферы и влияют на её динамику на всех высотах. Генерируемые в нижней атмосфере ПВ не могут напрямую проникнуть в F2-область ионосферы, но их воздействие может осуществляться косвенно, например, через модуляцию приливов. Так, в наблюдениях параметров ионосферы неоднократно фиксировались квазипериодические осцилляции с периодами, характерными для ПВ, особенно во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

Исследования планетарных волн традиционно затруднены из-за ограниченности экспериментов, которые охватывают лишь отдельные области Земли. В последние десятилетия для изучения крупномасштабных процессов в ионосфере используются глобальные карты полного электронного содержания (GIM TEC).

В работе представлены результаты исследования планетарной активности, полученные с помощью анализа GIM TEC для периода июнь - август 2025 г. Выбранный период был интересен тем, что с середины июня до середины августа в северном полушарии наблюдались серебристые облака с отчетливой 5-дневной периодичностью. Анализ лимбовых измерений на спутнике Aura показал, что данный эффект в мезосфере может быть связан с планетарной волной Россби [1]. Выделение планетарных волн из карт TEC, выполненный с помощью разработанного нами метода [2] показал преобладание планетарной активности в южном полушарии. В северном полушарии выделяются ПВ с периодами близкими к 6 суткам. Анализ спектра планетарных волн показал усиление планетарной волны с зональным числом 1 (ПВ1) и ослабление планетарной волны с зональным числом 2 (ПВ2) в течение июля и восстановление их амплитуд в августе.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25-27-00213).

Литература

1. Ugolnikov O.S. Noctilucent clouds: Trends and Anomalies in 2020s // Physics of Auroral Phenomena. Proc. 49th Annual Seminar. Apatity. P. 84. 2026
2. Vasiliev P.A., Bessarab F.S. Karpov I.V. et al. Tidal and Planetary Waves in the Lower Thermosphere and Ionosphere Simulated with the EAGLE Model for the January 2009 Sudden Stratospheric Warming Conditions // Izvestiya-Atmospheric and Oceanic Physics. N. 55. N. 2. P. 178-187. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0001433819020130>

**ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ИНИЦИИРОВАННЫХ
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В ТРОПОСФЕРЕ**

**Борчевкина О.П., Курдяева Ю.А., Носиков И.А., Бессараб Ф.С.,
Карпов И.В., Носикова В.В., Тимченко А.В.**

Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

olga.borchevkina@mail.ru

Представлен комплексный анализ воздействия шторма "Лаура", который наблюдался над Европой и Балтийским морем 11–12 марта 2020 года, на систему термосфера–ионосфера. Исследование возмущений ионосферы, вызванных метеорологическим штормом, проводилось с использованием комбинированного подхода к моделированию, включающего региональную модель AtmoSym и глобальную модель термосферы и ионосферы ГСМ ТИП. Данные моделирования сравнивались с экспериментальными данными, полученные в обсерватории КФ ИЗМИРАН.

Результаты моделирования показали, что над областью метеорологического шторма формируется область повышенной температуры, которая оказывает значительное влияние на меридиональную составляющую термосферного ветра и изменение полного электронного содержания (ТЕС). Сравнение модельных и экспериментальных карт ТЕС показало хорошее соответствие [1].

Анализ динамики параметров ионосферы по данным ионозонда вертикального зондирования с использованием методики построения амплитудно-временных, высотно-временных и частотно-временных характеристик выявил изменения параметров ионосферы, которые выражаются в активизации спорадического слоя Es, аномалиях критической частоты F2-слоя (foF2) и усилении амплитуды отраженных радиосигналов [2].

Такой комплексный подход к исследованию события позволил выделить эффекты атмосферных гравитационных волн, распространяющихся из области метеорологического возмущения, влияющие на систему термосфера–ионосфера, а также оценить изменение характеристик радиоволн во время события.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23–77–10004).

Литература

1. Borchevkina O.P. et al. Regional Total Electron Content Disturbance During a Meteorological Storm // Atmosphere. V. 16. P. 690. 2025.
2. Тимченко А.В. и др. Ионосферные эффекты во время метеорологических возмущений в тропосфере по данным вертикального зондирования в Калининграде // Геомагнетизм и аэрномия. Принято в печать.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ
РАДИОВОЛН****Вилутис А. Р.^{1,2}, Носиков И. А.²**¹БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия²КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россияvaleksandr1@gmail.com

В настоящее время увеличение объема данных внешнего и трансionoсферного зондирования актуализирует задачи интерпретации наблюдаемых ионосферных явлений. Эффективным подходом к их решению является имитационное моделирование радиотрасс. В данной работе представлены возможности численной модели распространения радиоволн в ионосфере [2], разрабатываемой в Калининградском филиале ИЗМИРАН. Особое внимание уделяется расчету поглощения радиоволн при моделировании дисперсионных характеристик (ДЧХ), что позволяет более точно воспроизводить условия прохождения сигнала и анализировать энергетические потери в различных ионосферных слоях. Разработанная модель применима как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-77-00033
(<https://rscf.ru/project/25-77-00033/>).

Литература

1. Pulinets S. et al. // Adv. Space Res. 2025.
2. Nosikov I. A. et al. // Radio Sci. 2025. V. 60. №. 3. P. e2024RS008092.

ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ 12–13 НОЯБРЯ 2025 Г.: ИОНОСФЕРНЫЙ ОТКЛИК И ВЫСОКОТОЧНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ

Данильчук Е.И.^{1,2}, Ясюкевич Ю.В.^{1,2}, Чернышов А.А.³, Падохин А.М.^{4,5},
Ратовский К.Г.¹, Веснин А.М.¹

¹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³ Институт космических исследований, г. Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет, г. Москва, Россия

⁵ ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

danilchuk.k@mail.ru

Геомагнитная буря G4-класса 12–13 ноября 2025 года, третья по интенсивности в 25-м солнечном цикле, была вызвана процессами в активной области на Солнце NOAA 14274. Межпланетные корональные выбросы массы, связанные со вспышками X1.7, X1.2, X5.1, были зарегистрированы в точке Лагранжа L1 в 22:15 UT и 23:38 UT 11 ноября и в 18:53 UT 12 ноября. Индекс Dst достиг –217 нТл (индекс SYM-H достиг –254 нТл), максимальный индекс Kp составил 9-. Для всестороннего анализа причин геомагнитной бури и последствий ее воздействия на околоземное космическое пространство мы использовали мультиинструментальный набор данных, включающий данные спутниковых миссий, сетей ГНСС, ионозонда, оптических приборов, высокочастотных радаров и мониторов космических лучей. Анализ показал значительные глобальные ионосферные возмущения. Авроральный овал расширился в сторону экватора (до ~35° с.ш. в американском секторе). Зарегистрированный экваториальный плазменный суперпузырь практически достиг границы аврорального овала. Гребни экваториальной аномалии усилились до 175 TECU и сместились к полюсу. В средних широтах критическая частота слоя F2 характеризовалась сильным отрицательным возмущением (–50%) во время главной фазы магнитной бури, за которым последовало необычное продолжительное и интенсивное положительное возмущение (более +100%). Ошибки высокоточного GPS-позиционирования увеличились до 2–3 м в высоких широтах и в регионах, где наблюдался суперпузырь [1]. Полученные результаты показывают сложную цепочку процессов от солнечной бури до геомагнитных и ионосферных реакций, подчеркивая риски для спутниковых систем навигации и связи.

Литература

1. Yasyukevich Y.V. et al. The 12 November 2025 Ugly Duckling Geomagnetic Storm: From the Sun to the Earth // Sensors. V. 26. P. 1490. 2026 <https://doi.org/10.3390/s26051490>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛОС 1NG N₂⁺

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.

Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область, Россия
zhanna@pgia.ru

Оценка параметров потока авроральных электронов представляет собой одну из актуальных задач в области диагностики состояния ионосферной плазмы, поскольку во время полярных сияний высыпавшиеся электроны являются главными поставщиками энергии в ионосферу.

В докладе представлены методики оценки средней энергии высыпавшегося потока электронов $E_{\text{ср}}$ по фотометрическим наблюдениям излучений полос первой отрицательной системы молекулярного азота 1NG N₂⁺ на примере эмиссии $\lambda 427.8$ нм. Полосы 1NG N₂⁺ возникают вследствие возбуждения ионов молекулярного азота только высыпавшимися первичными электронами и рожденными в ионосфере электронами ионизационного каскада, поэтому высота максимума высотного профиля эмиссий 1NG N₂⁺ соответствует области максимальной диссипации энергии высыпавшихся электронного потока.

Первая методика показывает возможность оценки $E_{\text{ср}}$ по интенсивности лишь одной эмиссии $\lambda 427.8$ нм - $I_{427.8}$. В основу методики положена экспериментальная зависимость отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от $I_{427.8}$, которая демонстрирует непрерывное уменьшение отношения с увеличением $I_{427.8}$. Результаты модельных расчетов показали, что форма энергетического спектра авроральных электронов, вариации содержания атомарного кислорода нейтральной атмосферы и концентраций окиси азота слабо влияют на зависимость $E_{\text{ср}}$ от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$. Из смоделированной зависимости средней энергией $E_{\text{ср}}$ от $I_{630.0}/I_{427.8}$ и экспериментальной зависимости $I_{630.0}/I_{427.8}$ от $I_{427.8}$ установлена связь между $E_{\text{ср}}$ и $I_{427.8}$. Аналитическая аппроксимация полученной зависимости может быть использована в разработке методик оперативной диагностики.

Вторая методика предлагает определение $E_{\text{ср}}$ по высоте максимального свечения эмиссии $\lambda 427.8$ нм - h_{max} . Моделирование эмиссии $\lambda 427.8$ нм показало, что h_{max} слабо зависит от формы энергетического спектра и pitch-углового распределения потока и определяется средней энергией высыпавшихся электронов. Смоделирована зависимость $E_{\text{ср}}$ от h_{max} , которая может быть использована для быстрой диагностики средней энергии авроральных электронов.

АСИММЕТРИЯ СУТОЧНОГО ХОДА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ E НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Деминов М.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

deminov@izmiran.ru

Под асимметрией суточного хода критической частоты слоя E, f_oE , понимают разницу в f_oE до и после полудня для одинаковых зенитных углов Солнца. Представлены первые результаты анализа свойств этой асимметрии на средних широтах как для низкой ($A_p < 9$), так и повышенной ($A_p > 15$) геомагнитной активности. Для этого использованы часовые данные f_oE станций Boulder, Moscow и Slough за 1958-1995 годы. Для этого построены локальные эмпирические модели f_oE для низкой геомагнитной активности как зависимости f_oE от индекса солнечной активности $F_{10.7}$ для каждого месяца и часа мирового времени. На основе этих моделей получено, что для низкой геомагнитной активности суточная асимметрия, в основном, отрицательна (в среднем $dfoEs < 0$, т.е. пред полднем значения f_oE меньше, чем после полудня) и максимальна для Boulder летом. При повышенной геомагнитной активности для всех сезонов, включая зиму, $dfoEs < 0$. Общие тенденции суточной асимметрии для низкой и повышенной геомагнитной активности сохраняются: отрицательные значения $dfoEs$ летом или в равноденствие больше, чем зимой; эти значения не превышают 1% по абсолютной величине. Разница между f_oE для низкой и повышенной геомагнитной активности обусловлена не только (и не столько) суточной асимметрией, сколько почти симметричными относительно полудня уменьшениями f_oE при повышенной геомагнитной активности.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Зинкин Д.В.¹, Сурков В.В.¹, Пилипенко В.А.¹, Рябова С.А.^{1,2}

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

zinkin.deniz@yandex.ru

Важным аспектом солнечно-земных взаимодействий является комплекс явлений, связанных с воздействием ультрафиолетового (УФ) и рентгеновского излучений (РИ) от солнечных вспышек (СВ) на ионосферу Земли [1]. Это излучение проникает во все слои ионосферы, затрагивая даже стратосферу. Для изучения воздействия РИ и УФ излучения СВ на ионосферу были созданы упрощённые модели. С их помощью получены аналитические выражения, которые описывают частоту образования электронов в единице объёма и изменения концентраций электронов и ионов в зависимости от высоты и времени.

Так же на основе моделей было рассчитано, как излучение от СВ влияет на полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере. В качестве исходных данных для моделей использовались данные измерений УФ излучения, полученные на борту космической станции SOHO, и данные измерений РИ, полученные с детекторов фотонов, установленных на спутниках GOES.

В качестве примера рассмотрена СВ класса X9.0, произошедшая 3 октября 2024 г. Согласно модели под действием УФ излучения ПЭС плавно возрастает и изменение ПЭС становится максимальным спустя несколько минут после максимума УФ излучения и достигает приблизительно 1.05 TECU. А изменения ПЭС, обусловленные РИ, максимальны во время максимума РИ и достигают примерно 0.34 TECU. Таким образом построенные модели показывают, что максимальный вклад в изменение ПЭС вносит УФ излучение.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25-27-00539).

Литература

1. Лысенко А.Л. и др. Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 8. – С. 878-894.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЧ РАДИОВОЛН В ГОДЫ МАКСИМУМА 25-ГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ким В.Ю., Браницкий А.В., Горохов Ю.В., Лебедев Н.И.,
Лебедев М.Н., Щирий А.О.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

vkim@izmiran.ru

lebedev@izmiran.ru

mlebedev@izmiran.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния солнечных вспышек X-класса на ионосферное распространение ВЧ радиоволн в период с 2024 по 2026 год. Наблюдения проводились в ИЗМИРАН методом наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы на трассе Кипр-Москва, а также методом доплеровского вертикального зондирования ионосферы путем регистрации сигналов точного времени станции РВМ (Москва). Это позволяло исследовать влияние вспышек на Солнце на модовую структуру ионограмм НЗ, а также регистрировать быстрые изменения ионосферных параметров. На рис. 1 представлены две последовательные ионограммы НЗ, полученные в дневные часы 2024 г. На рис. 1а представлена ионограмма, зарегистрированная в момент 12:10 UT, на которой видна сложная многомодовая структура отраженных от ионосферы радиосигналов. После этого в момент $\sim 12:18$ UT произошла солнечная рентгеновская вспышка X-класса и результат воздействия этой вспышки на ионосферу представлен на ионограмме, полученной в 12:10 UT, рис. 1б.

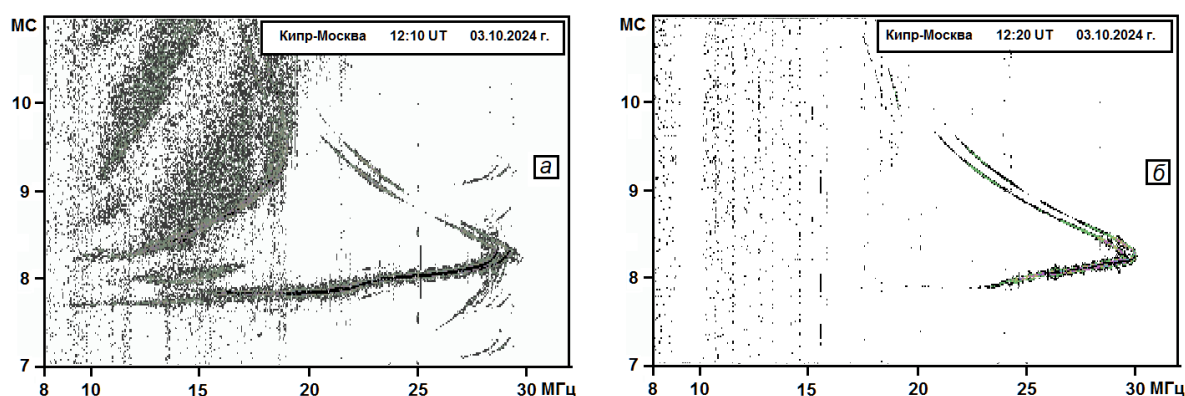


Рис. 1

Видно, что модовая структура ионограммы значительно изменилась - наблюдаются только однократные отражения от F_2 -слоя ионосферы, с максимальной наблюдаемой частотой около 30 МГц, а многоскачковые отражения на частотах ниже минимально наблюдаемой частоты ~ 21 МГц исчезли. Эти эффекты связаны с резким ростом ионизации плазмы в нижней ионосфере и соответствующим сильным ростом омического поглощения радиоволн.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА НА ГЕОМАГНИТНЫЕ
БУРИ: УСПЕХИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Клименко М.В.¹, Ратовский К.Г.², Бессараб Ф.С.¹, Клименко В.В.¹,
Белюченко К.В.¹, Шубин В.Н.³**

¹*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*

²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

³*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. А.В.
Пушкова РАН, Москва, Россия*

mvklimenko@wdizmiran.ru

Геомагнитные бури оказывают значительное влияние на ионосферу Земли и соответственно на условия распространения радиоволн через ионосферу. Исследования ионосферного отклика на геомагнитные бури на основе статистического анализа показали, что, несмотря на то, что общие закономерности в поведении ионосферных параметров во время геомагнитных возмущений известны, ионосферные возмущения от события к событию могут значительно отличаться. Причин у этого факта множество, поскольку ионосферные возмущения во время бурь зависят от многих факторов: сезона, времени суток, солнечной активности, сценария магнитосферного возмущения, атмосферных условий, и т.д. В докладе представлены возможности использования эмпирических моделей для прогноза и их ассимиляции для воспроизведения ионосферного отклика на геомагнитные бури. Модельные расчеты выполнены с использованием Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (GSM TIP) и эмпирической Глобальной динамической модели ионосферы (GDMI). Для сравнения наблюдений и модельных расчетов мы использовали значения максимума электронной концентрации ($NmF2$) и высоты максимума ($hmF2$). GDMI воспроизводит наблюдаемые отрицательные возмущения максимума электронной концентрации лучше, чем GSM TIP. Обе модели в целом воспроизводят наблюдаемый dusk-эффект в поведении максимума электронной концентрации и не воспроизводят dusk-эффект в поведении высоты максимума. Обе модели воспроизводят положительные возмущения высоты максимума в ночное время. Обе модели не воспроизводят положительные возмущения максимума электронной концентрации в начале бури. Обсуждаются вопросы перспективы использования данных спутников Ионосфера-М для улучшения прогностических моделей ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №26-12-00513.

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА ИНДЕКСА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ ЯКУТСК И ТИКСИ

Кобякова С.Е., Гололобов А.Ю., Каримов Р.Р., Степанов А.Е.

Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера

ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия

s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru

На основе анализа вариаций среднегодовых значений критической частоты слоя F2 (f_oF2) на субавроральной ионосферной станции Якутск ($62,01^\circ$ с.ш., $129,43^\circ$ в.д.) за период 1957–2017 гг. и на высокоширотной станции — Полярной геокосмофизической обсерватории (ПГО) Тикси ($71,5^\circ$ с.ш., $128,5^\circ$ в.д.) за период 1969–2001 гг., проведено исследование влияния выбора индекса солнечной активности на величину и знак долговременных трендов f_oF2 . Сравнивались результаты расчетов для шести индексов: F10.7, F30, Mg II, He II, SSN и Lyman- α .

Для станции Якутск наилучшие результаты показали индексы F30 и Mg II, за ними следуют F10.7 и Lyman- α . Индексы SSN и He II оказались менее пригодными для анализа трендов. При этом отрицательные тренды, полученные с использованием F30 и Mg II, примерно в 2–3 раза превышают по величине тренды, рассчитанные для F10.7 и Lyman- α .

Для ПГО Тикси предпочтительность какого-либо одного индекса солнечной активности выражена слабее, что обусловлено ослаблением роли солнечной активности в ионизации высокоширотной ионосферы из-за доминирования других источников, связанных с геомагнитной активностью. В данном случае величина и знак тренда существенно зависят от выбора индекса солнечной активности. Так, при использовании SSN рассчитанный тренд f_oF2 равен 4.352 кГц/год, а при использовании F30 он равен -5.773 кГц/год. Тем не менее, по совокупности критериев наилучший результат показал индекс F30.

Таким образом, при исследовании долговременных вариаций f_oF2 как для субавроральной станции Якутск, так и для высокоширотной станции ПГО Тикси, в качестве оптимального индекса солнечной активности рекомендуется использовать F30.

Работа выполнена в рамках госзадания: проект FWRS-2026-0058.

**ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ ПГО ТИКСИ
ЗА ПЕРИОД С 1969 ПО 2000 ГГ.****Кобякова С.Е., Гололобов А.Ю., Каримов Р.Р., Степанов А.Е.***Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера**ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия*s.e.kobyakova@ikfia.ysn.ru

В работе исследованы тренды критической частоты слоя F2 по данным вертикального зондирования ионосферы с высокоширотной станции – Полярной геокосмофизической обсерватории (ПГО) Тикси (71.5 N°, 128.5° E) за период с 1969 по 2000 год. Проанализированы вариации критической частоты в зависимости от солнечной активности, сезона и времени суток. Показано, что в дополнение к ранее полученным для станции Якутск [1] отрицательным трендам foF2 (с пиками до –11 кГц/год в равноденственные полуденные часы), анализ данных более высокоширотной станции ПГО Тикси выявил существенно более сильные отрицательные тренды для 12 LT. Зафиксированы ярко выраженные сезонные и суточные особенности: максимальные отрицательные тренды наблюдаются в осенне-зимние полуденные часы, что может указывать на усиленное влияние авроральных процессов и изменений термосферной циркуляции в высоких широтах.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25-17-20002).

Литература

1. Кобякова С.Е., Гололобов А.Ю., Каримов Р.Р., Степанов А.Е. Тренды критической частоты слоя F2 по данным ионосферной станции «Якутск» за период с 1956 по 2017 г. // Солнечно-земная физика. 2025, т. 11, № 4, с. 55–63. DOI: 10.12737/szf-114202505.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЁННОЙ ОБЛАСТИ
ИОНОСФЕРЫ МЕТОДАМИ ГНСС РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И
РЕГИСТРАЦИИ ИСКУССТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ В ЛИНИИ
630 НМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УНУ СТЕНД СУРА В 2021-2025 ГГ.**

**Когогин Д. А.¹, Емельянов В. В.¹, Максимов Д. С.¹, Насыров И. А.¹,
Белецкий А. Б.², Грач С. М.³, Шиндин А. В.³, Дементьев В.О.¹,
Ткачев И.Д.², Загретдинов Р. В.¹**

¹ КФУ, г. Казань, Россия

² ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

denis.kogogin@gmail.com

В работе представлены результаты исследования возмущенной мощным радиоизлучением УНУ стенд СУРА области ионосферы на основе методики сопоставления карт полного электронного содержания (ПЭС) и снимков ночного неба с выделенными областями искусственного оптического свечения (ИОС) / подавления фонового свечения в линии 630 нм по данным экспериментов 2021-2025 гг.

Установлено, что увеличение яркости ИОС соответствует уменьшению вариаций ПЭС, но с задержкой в ~ 40 -50 с. При преобладании подавления фона свечения над ИОС в линии 630 нм, знаки изменения яркости свечения и величины вариаций ПЭС совпадают, соответственно имеет место корреляция между уменьшением значений вариаций ПЭС и подавлением фонового свечения. Общая динамика изменения интенсивности вариаций ПЭС при регистрации ИОС оказывается качественно и в общем количественно схожей с динамикой при регистрации подавления фонового свечения. Полученная динамика вариаций ПЭС в целом сохраняется для различных интервалов излучения волны накачки, варьирующихся от 2.5 до 8 минут, в то время как интенсивность ИОС достигает насыщения при излучении волны накачки более 3 мин. Таким образом на статистически значимом объеме экспериментальных данных регистрации ИОС и подавления фонового свечения, достоверно показано, что искусственное свечение в линии 630 нм генерируется в основном внутри крупных полостей ионосферной плазмы т.е. в областях с пониженной электронной концентрацией.

Экспериментальные данные получены с использованием УНУ Стенд СУРА и оборудования УНУ Оптические инструменты. Обработка данных подавления фонового свечения была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-72-20019. Разработка методики, расчёт карт ПЭС, анализ данных и их интерпретация выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-77-10029.

**СВЯЗАННЫЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ НА СОЛНЦЕ И В
ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ****Костина П.В.¹, Пилипенко В.А.¹, Сурков В.В.¹, Рябова С.А.¹**¹*Институт физики Земли РАН, Москва, Россия*kostina.pv@yandex.ru

Квазипериодические пульсации (КПП) с периодами от долей секунды до нескольких десятков минут являются особенностью солнечных вспышек, и могут как следовать за вспышкой, так и предшествовать ей. Проблема КПП представляется важной не только для фундаментальной, но и для прикладной науки, из-за возможного повышения геоэффективности вспышек с КПП и возможных резонансов с магнитосферными колебаниями.

Такие пульсации вспышек наблюдаются в широком диапазоне электромагнитного излучения, от радиоволн до гамма-лучей. В таком случае УФ часть солнечного излучения ионизирует верхнюю ионосферу, и КПП, проявляющиеся в УФ излучении, могут вызывать соответствующий последующий периодический отклик в ионосфере. В данной работе рассмотрено несколько событий с пульсациями в УФ излучении и полном электронном содержании (ПЭС) ионосферы и проанализированы соотношения между пульсациями в интенсивности УФ излучения и ПЭС.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант РНФ №25-27-00539 «Воздействие солнечных вспышек на электромагнитные процессы в системе атмосфера-ионосфера»).

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО
ПОЛЯ В ИОНОСФЕРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН****Крашенинников И.В., Митин О.В.***ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*krash@izmiran.ru

Электромагнитный шум в декаметровом диапазоне радиоволн проявляет себя как принципиальный ограничивающий фактор в работе радиотехнических систем, использующих ионосферное прохождение радиоволн, так и сам по себе является элементом окружающей среды (частично, космической погоды) [1]. Соотношение сигнал/шум (SNR – Signal to Noise Ratio), т.е. отношение напряженности поля, создаваемое излучателем, к среднеквадратичной напряженности поля фонового электромагнитного шума в точке приема определяет ключевые параметры современных радиосистем: скорость и надежность передачи информации в системах связи или точность местоопределения в задачах навигации или пеленгации. В практике прогнозирования и планирования работы ионосферных радиосистем расчет SNR основан на следующих положениях:

а) на глобальной модели ионосферы, включающей в себя наряду с пространственным распределением электронной плотности базовый ионосферный параметр – частоту упругих соударений электронов с молекулами и ионами газов атмосферы и

б) модель фоновых электромагнитных шумов, разработанную в 60-70-х годах на основе мировых данных их регистрации по стандартизированной процедуре. Итоговая модель фонового ЭМ (электромагнитного) шума предусматривает разделение шумовых компонент по механизму их формирования: атмосферного, галактического и антропогенного происхождений [Рекомендация МСЭ-R P.372-17 (2024)].

В 2024-2025 гг. в ИЗМИРАН создан экспериментальный комплекс по регистрации энергетических характеристик волнового поля, используя излучение станции точного времени RWM (Москва). В докладе представлены результаты сопоставления прогноза (расчета) и регистрация SNR на частоте 4996 кГц в максимуме солнечной активности (2024-2025 гг.) на ст. ИЗМИРАН в спокойных ионосферных условиях в летний и зимний сезоны.

Литература

1. Goodman J. M. Operational communication systems and relationships to the ionosphere and space weather. — Adv. Space Res., 2005, vol. 36, pp. 2241-2252. DOI: 10.1016/j.asr.2003.05.063

**ЭВОЛЮЦИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ВО
ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 10–12 МАЯ И 10–12
ОКТАБРЯ 2024 ГОДА**

**Кривохлябина М.Я.^{1,2}, Синевич А.А.^{1,3}, Чернышов А.А.¹, Чугунин Д.В.¹,
Могилевский М.М.¹**

¹ИКИ РАН, Москва, Россия

²РТУ МИРЭА, Москва, Россия

³ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

revanstears37@gmail.com

В работе подробно исследуется эволюция экваториальной границы (ЭГ) аврорального овала во время экстремальных геомагнитных бурь 10–12 мая 2024 г. и 10–12 октября 2024 г. Положения ЭГ определены по данным спутников Swarm A и Swarm B в ночном и вечернем секторах магнитного локального времени (MLT), также определены рекордно низкие геомагнитные широты ЭГ для обеих бурь (42° и 44° соответственно). Проведен анализ связи положения ЭГ с геомагнитным индексом SMR и рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена между ними: 0.85 и 0.87 для Майской и Октябрьской бурь 2024 г. соответственно. Выявлено, что эволюция ЭГ в разных секторах и полушариях различается, что может быть связано с сезонными эффектами и сложной структурой солнечного ветра.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-12-00059.

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ
ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X-КЛАССА**

**Лобанова В.С., Ряховский И.А., Корсунская Ю.А., Поклад Ю.В.,
Сапунова А.И.**

ИДГ РАН, г. Москва, Россия

lobanova_vs@mail.ru

Вспышки на Солнце сопровождаются резким возрастанием потоков ионизирующего излучения, что приводит к интенсивному росту электронной концентрации в ионосфере, влияющему на распространение электромагнитных волн. Таким образом, прогнозирование состояния ионосферы во время солнечных вспышек, в частности динамики электронной концентрации, является актуальной задачей при разработке систем позиционирования и навигации.

В настоящей работе приводятся оценки высотных профилей скорости ионизации в диапазоне от 60 до 600 км во время вспышек X-класса. Для расчетов применялись данные эмпирической модели солнечного излучения FISM2 Flare [1] и модели состава нейтральных компонент ионосферы NRLMSISE-00 [2]. В ходе исследования была оценена оптическая толщина ионосферы, вертикальные профили скорости ионизации для трех основных компонент атмосферы (атомарного кислорода и молекулярных азота и кислорода), а также было учтено влияние процессов рекомбинации с использованием модели IRI-2020 [3].

Полученные оценки прошли верификацию с помощью экспериментальных данных, полученных в геофизической обсерватории «Михнево». Представленные результаты хорошо согласуются по порядку величины и точкам локальных экстремумов с данными о приращении полного электронного содержания.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ 122032900175-6). Данные были получены с использованием уникальной научной установки «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» (ИДГ РАН) [4].

Литература

1. Chamberlin P.C. et al. The flare irradiance spectral model-version 2 (FISM2) // Space Weather. V. 18. P. e2020SW002588. 2020.
2. Picone J.M. et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // Journal of Geophysical Research. V. 107. I. A12. P. 1468. 2002.
3. Bilitza D. et al. The International Reference Ionosphere model: A review and description of an ionospheric benchmark // Reviews of Geophysics. V. 60. P. e2022RG000792. 2022.
4. Кочарян Г.Г. и др. Уникальная научная установка «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» // Геодинамика и тектонофизика. Т.13. №2. С. 0590. 2022.

ОЖИДАЕМЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ В ОСОБЕННОСТЯХ ДИСПЕРСИИ ВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ МОД

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г.о. Троицк, Россия

boblundin@mail.ru

Появление молекулярных и/или пылевых конгломератов с высоким сродством к электронам приводит к адгезии электронов ионосферы с коррекцией критических параметров исходного плазменного фона. Для условий приземной плазмы умеренной плотности развит аналитический подход к исследованию эволюции дисперсионных свойств волн с частотами много меньшими электронной плазменной. Удалось получить единое количественно адекватное дисперсионное уравнение для описания электронных и ионных свистов при известных значениях характерных частот плазмы в трех разнесенных частотных диапазонах без детальных данных по ионному составу [1,2]. Учтено, что для типичных условий приземной плазмы ионные плазменные частоты заметно превышают частоты ионной отсечки, оставаясь существенно меньшими гирочастот электронов. Найден метод вычисления величин относительной зарядовой плотности для двух типов ионов плазменного фона с наибольшими удельными зарядами (включая отрицательные) по частотам ионной отсечки [2]. Эти две величины адекватно определяются без бортовых масс-спектрометров, если их гирочастоты существенно превышают гирочастоты остальных. Уменьшение доли свободных электронов приводит к росту нижней границы диапазона прозрачности электронных свистов вплоть до нижнегибридной частоты. Оценены частоты возможного сближения кривых дисперсии электронных и ионных свистов вблизи частот отсечки с учетом высотной эволюции совокупного ионного состава ионосферы. Возможно формирование волноводов разряжения вдоль геомагнитных силовых трубок и зон/«линз» прозрачных лишь для волн вблизи локальных ионных плазменных частот. Проявление таких эффектов будет заметнее с ростом величин удельных зарядов присущих процессам адгезии свободных электронов для загрязнений различной природы [3].

Литература

1. Lundin B.V., Krafft C. Modified electron whistler dispersion law // J. Plasma Physics. V. **67**. № 2-3. P. 149-161. 2002.
2. Лундин Б., Краффт К. О минимальном наборе плазменных параметров для определения закона дисперсии электронных свистовых волн // Физика плазмы. Т. **35**. N 6. С. 551-558. 2009.
3. Lundin B.V., Krafft C. On the dispersion features of whistler waves in almost pure ion plasmas // Phys. Plasmas. V. **18**. P. 102114(1-9). 2011.

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ТРЕКОВ МОД НА ИОНОГРАММАХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Масюченко С.В.¹, Щирий А.О.²

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

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

stiwwin@gmail.com

Автоматическая обработка ионограмм радиозондирования ионосферы необходима как для оперативного мониторинга ионосферы, так и при анализе массивов архивных данных радиозондирования. Центральное место в этой задаче занимает автоматическое обнаружение и классификация треков – следов отражённых мод радиосигнала на ионограммах [1]. В настоящей работе приведены результаты и сравнительный анализ применения нейросетевых моделей (нейросетевых архитектур) для инстанс-сегментации Mask RCNN и YOLO. Наиболее успешными оказались модели семейства YOLO, которые обеспечивают как высокую точность, так и вычислительную эффективность. При этом точное попиксельное совпадение масок не является критичным – ключевым требованием является корректная локализация полезного сигнала.

В дальнейшем планируется представить систему, построенную на основе методов искусственного интеллекта, которая будет решать комплекс задач по обработке ионограмм: локализацию сигнала на ионограмме и его классификацию. Для решения задачи локализации сигнала будет использоваться доработанная модель инстанс-сегментации, позволяющая выделять области отдельных треков мод радиосигнала. На этапе классификации будет задействована модель Vision Transformer (ViT), которая анализирует выделенные сегменты и определяет тип моды распространения радиосигнала или состояние ионосферы.

В систему планируется встроить большую языковую модель (Large Language Model, LLM), дополненную механизмом генерации с дополненным поиском (Retrieval-Augmented Generation, RAG), для внедрения априорной информации по физике распространения радиоволн. RAG позволяет перед генерацией ответа выполнять поиск релевантных фрагментов в специализированной базе знаний, после чего LLM формирует ответ на естественном языке с опорой на найденный контекст.

Литература

1. Щирий А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолний // Журнал радиоэлектроники. 2022. №10.

ПРОЕКТ FENICS-ИОНОСФЕРА: ВОЗБУЖДЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ УНЧ-КНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

**Пилипенко В.А.¹, Савельева Н.В.¹, Колобов В.В.², Ивонин В.В.²,
Чугунин Д.В.³, Цзин Ву⁴**

¹ *Институт физики Земли, Российская академия наук, Москва*

² *Центр физико-технических проблем северной энергетики, Апатиты*

³ *Институт космических исследований, Российская академия наук, Москва*

⁴ *Бэйханский университет, Пекин*

pilipenko_va@mail.ru

Представлена концепция нового типа активного эксперимента по регистрации УНЧ-КНЧ-ОНЧ сигналов от протяженных наземных антенн как на сети наземных станций, так и на низкоорбитальных спутниках. Временно отключенные линии электропередачи будут использоваться в качестве излучающих диполей. В рамках программы, скоординированной со спутниковыми пролётами, мощный генератор будет подавать ток на антенну ночью на частотах от долей Гц до нескольких десятков Гц, с возможностью расширения частотного диапазона до 5 кГц на более коротких линиях (аналогичные эксперименты FENICS ранее проводились в Мурманской области). Успешность проведения спутниково-наземного эксперимента подтверждается численной моделью для расчета электромагнитного отклика в ионосфере от заземленного линейного тока конечной длины над высокоомной поверхностью Земли. Предварительно полученные результаты продемонстрировали перспективность этого типа активных экспериментов для проведения магнитотеллурического зондирования на большой территории с использованием искусственных УНЧ-КНЧ сигналов. Эффективность горизонтальных мега-антенн для ионосферного зондирования была продемонстрирована успешной регистрацией излучения передатчика ЗЕВС с несущей частотой 82 Гц на спутниках DEMETER, CSES-1 и Ионосфера-М. Спутниковые и наземные наблюдения, а также накопленный опыт экспериментов FENICS, показывают хорошие перспективы нового типа активных экспериментов по воздействию на околосферную плазму с помощью искусственных сигналов и стимуляции высыпания релятивистских электронов из радиационных поясов до уровня, безопасного для спутниковой электроники.

МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Павлов А.В.

ИКИР ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

oksanam1@mail.ru, polozov@ikir.ru

Исследован новый автоматизированный метод оценки состояния ионосферы по данным наземного вертикального радиозондирования и региональной сети приемников ГНСС. Построенные на основе метода численные решения используются в интерактивной системе Аврора (<https://lsaoperanalysis.ikir.ru/lsaoperanalysis.html>, система разработана в ИКИР ДВО РАН). Результатами работы метода являются данные о состоянии ионосферы (спокойное/возмущенное) и параметры ионосферных неоднородностей, в случае возмущенного состояния. В докладе будут представлены результаты метода в периоды сильных магнитных бурь за 2023-2024 гг., сильного эксплозивного извержения вулкана Шивелуч 10–12 апреля 2023 г. и в период очень сильного землетрясения 29 июля 2025 года с магнитудой $M=8.8$ (рис. 1).

Работа выполнена за счет Гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

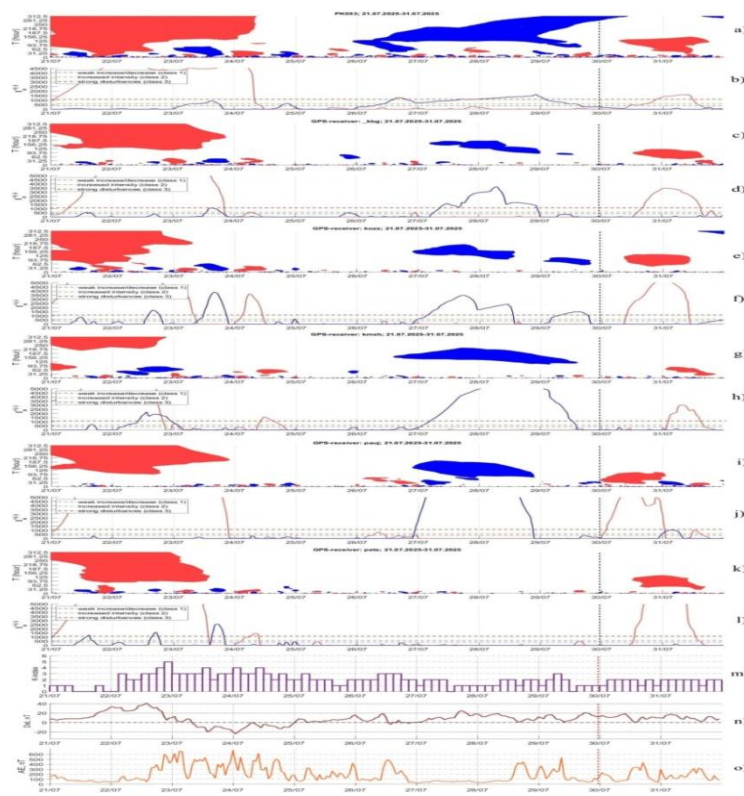


рис. 1

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КНЧ ШУМЫ В ОБЛАСТИ АВРОРАЛЬНОГО
ОВАЛА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ ИОНОСФЕРА-М**

**Савельева Н.В.^{1,2}, Пилипенко В.А.^{1,3}, Пулинец С.М.³, Ягодкина О.И.⁴,
Позднякова Д.Д.¹**

¹ Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

² Геофизический Центр РАН, Москва, Россия

³ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴ Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия

nasa2000@yandex.ru

Широта экваториальной границы овала полярных сияний является одним из ключевых параметров космической погоды, поэтому космическое сообщество прикладывает немало усилий для построения моделей, позволяющих предсказать положение аврорального овала. С запуском семейства российских спутников Ионосфера-М появилась возможность детально исследовать данную область, так как орбиты всех четырех спутников пересекают ее по несколько раз в день. В данной работе апробирована возможность определения текущего положения границ аврорального овала по данным регистрации электрической компоненты шумов на низкоорбитальных спутниках Ионосфера-М. Уровень ионизации и турбулентность ионосферной плазмы в авроральной области кратно увеличиваются во время магнитных бурь и суббурь. При переходе спутника из средних широт в авроральные наблюдается резкий всплеск электрических шумов, что позволяет определить границы области, где происходит переход от невозмущенной ионосферы средних широт к возмущенной авроральной. В докладе представлены результаты анализа данных спутников семейства Ионосфера-М, собранные при пролетах над Северным полушарием во время магнитной бури 14-15 сентября 2025 г. с умеренной интенсивностью ($Dst \sim -75$ нТл) и слабой суббуревой активностью ($AL < -1000$ нТл). Результаты определения границ аврорального овала по данным спутников семейства Ионосфера-М сравниваются с данными по продольным токам на спутниках семейства SWARM. Также проводится сравнение границ аврорального овала, полученных по спутниковым данным, с границами, рассчитанными по модели OvationPrime и моделей APM/APM_GEO, разработанных в Полярном Геофизическом Институте. Тем самым, проведена взаимная апробация разных методов определения положения аврорального овала.

Работа частично поддержана грантом РНФ 21-77-30010-П.

ИОНОСФЕРНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Сафьянов К.Р.^{1,2}, Борчевкина О.П.²

¹*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия*

²*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*
olga.borchevkina@mail.ru

В работе исследуется изменчивость параметров ионосферы во время умеренной геомагнитной бури 3–4 февраля 2022 года, сопровождавшуюся значительными вариациями параметров термосферы и приведшую к потере части спутниковой группировки Starlink на основе спутниковых наблюдений. Актуальность исследования обусловлена существенным влиянием геомагнитных возмущений на функционирование спутниковых систем, радиосвязи и навигации. В работе используются данные спутниковой миссии ICON, обеспечивающей глобальное покрытие и измерения параметров ионосферной плазмы и нейтральной атмосферы, включая скорость и направление ветров, плотность и температуру.

Проведен анализ вариаций критической частоты f_oF2 по данным вертикального зондирования в Калининграде и выявлены характерные отклонения, согласующиеся с периодами повышенной геомагнитной активности. Аномалии параметров ионосферы определялись как отклонения текущих значений от сглаженного фонового уровня, рассчитанного методом скользящего среднего. Показано, что изменения параметров ионосферы происходят синхронно с вариациями геомагнитных индексов, что свидетельствует о влиянии внешних факторов космической погоды. Наблюдаемые эффекты интерпретируются в рамках процессов переноса энергии в системе «магнитосфера – ионосфера – термосфера». Отдельное внимание уделено применению программного пакета *pySat*, обеспечивающего унифицированный доступ к спутниковым данным и возможность многоспутникового анализа. Использование данного инструмента позволяет повысить воспроизводимость исследований и эффективно интегрировать разнородные данные в рамках единого методологического подхода. Полученные результаты подтверждают необходимость комплексного анализа спутниковых наблюдений для изучения ионосферной изменчивости и подчеркивают важность учета даже умеренных геомагнитных бурь при прогнозировании условий космической погоды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23–77–10004).

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СПОРАДИЧЕСКОГО Е-СЛОЯ НАД КАЛИНИНГРАДСКИМ РЕГИОНОМ**Сенягин Е.Д.^{1,2}, Тимченко А.В.², Бессараб Ф.С.², Клименко М.В.²**¹*БФУ имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия*²*КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*senaginegor@gmail.com

Ионосфера Земли играет ключевую роль в распространении радиоволн, спутниковой связи и навигационных системах. Важной частью ионосферы является спорадический Е-слой, который представляет собой тонкие, высокоплотные области ионизации, возникающие на высотах 80–140 км. Е-слой оказывает значительное влияние на радиосвязь, как способствуя, так и препятствуя распространению радиоволн.

На характеристики Es-слоя существенное влияние оказывает солнечная активность, изменения которой напрямую воздействуют на ионосферу через вариации ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Кроме того, важным фактором является геомагнитная активность, которая может вызывать кратковременные возмущения в ионосфере.

Целью данной работы является статистический анализ сезонных и суточных особенностей характеристик Es-слоя (критической частоты, виртуальной высоты и вероятности появления) над Калининградским регионом в период между максимумами 24–25 солнечных циклов. Был проведен статистический анализ вариаций foEs и h_vEs, который показал сезонность этих характеристик. Исследование вероятности появления Es в различных частотных интервалах показало, что разные частотные интервалы имеют разную природу формирования Es-слоя.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

**ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ШИРОТНО-ДОЛГОТНОЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ****Сидорова Л.Н.***ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*lsid5@yandex.com

Исследован характер изменчивости широтно-долготных распределений вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей (equatorial plasma bubbles, EPB) с ростом высоты наблюдения. Для этого использованы данные спутников ISS-b (~972–1220 км), ROCSAT-1 (~600 км), AE-E (~300 км, ~350–475 км) и CHAMP (~300–450 км) на разных орбитальных высотах. Рассматривались разные сезоны в годы повышенной и максимальной солнечной активности. Показано, что широтные распределения вероятности наблюдения EPB на высотах их генерации в основных чертах повторяются на высотах верхней ионосферы (~972–1220 км). Обнаружено, что в широтных распределениях вероятности наблюдения EPB с ростом высоты наблюдения (от ~600 км до ~1200 км) помимо центрального (экваториального) максимума развиваются дополнительные среднеширотные максимумы. Эта особенность наиболее ярко проявляется в обоих полушариях в периоды равноденствий и в зимних полушариях. Получено, что глобальные долготные максимумы вероятности наблюдения EPB (ESF), выявленные по данным указанных спутников в период равноденствия и зимой, развиваются приблизительно в одном и том же долготном секторе: в регионе Бразильской магнитной аномалии, Атлантики и западной части экваториальной Африки.

**АСИММЕТРИЯ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ**

Сорокин В.М., Яценко А.К.
ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
sova@izmiran.ru

Основной причиной возникновения среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМПИВ) является распространение в ионосферу внутренних гравитационных волн (ВГВ). На их свойства оказывает существенное влияние геомагнитное поле и ветер в ионосфере. Ветер в проводящей ионосфере приводит к появлению силы Ампера, которая модифицирует свойства ВГВ. Получены уравнения ВГВ в ионосфере с учетом силы Ампера, возникающей под действием ветра в геомагнитном поле [1]. Найдены дисперсионные соотношения плоских волн, импульсные функции линейного и точечного источников и коэффициенты трансформации и отражения ВГВ на границе подвижной ионосферы при распространении волн из атмосферы. Показано, что с ростом частоты увеличивается рост/затухание ВГВ, которое определяется направлением ветра. Направление максимального роста амплитуды ВГВ определяется проводимостями Холла и Педерсена ионосферы. Линейный источник излучает ВГВ в область в виде клина, ограниченного плоскостями под углом к оси источника. Излучение точечного источника ограничивается конической поверхностью. Падение ВГВ на границу движущейся ионосферы сопровождается ее трансформацией и отражением. Для выделенных углов коэффициент трансформации равен единице, а коэффициент отражения обращается в нуль. При падении ВГВ из атмосферы на движущуюся ионосферу под этими углами сила Ампера не оказывает влияния на распространении волны в ионосфере. Для других углов происходит частичное их отражение. Рост амплитуды ВГВ при распространении в ионосферу происходит в направлении нормально к направлению ветра. Так как СМПИВ являются результатом воздействия атмосферных ВГВ на ионосферу, то выводы теории могут быть использованы для объяснения сезонной асимметрии движения СМПИВ.

Работа выполнена в рамках ГР № 1021060808637-6-1.3.8

Литература

1. Сорокин В.М., Яценко А.К. Внутренние гравитационные волны в движущейся ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т.65. №6. С.894-911. 2025. DOI: 10.7868/S3034502225060082

ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В ТРОПОСФЕРЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Степанов И.Г.¹, Дмитриев А.В.², Бычков В.Л.³, Дьяков Ю.А.¹,
Голубков М.Г.¹

¹ФИЦ ХФ РАН, г. Москва, Россия

²НИИЯФ им. Д.В. Скобельцина, МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

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

ilyastep91@mail.ru

В докладе рассмотрены процессы образования ионов во влажном тропосферном воздухе под действием космических лучей и радиоактивного γ -излучения поверхности Земли. Целью работы является определение высотной зависимости концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере в условиях спокойной геомагнитной обстановки. Актуальность исследования обусловлена важной ролью тропосферных ионов в формировании электрических свойств ионосферы, управления процессами формирования слоистых грозовых облаков и искусственного стимулирования выпадения осадков.

Для решения задачи разработана кинетическая модель, включающая 55 компонентов и 161 реакцию, и проведены расчеты с использованием программного пакета KINET. Показано, что ионизация воздуха космическими лучами в диапазоне высот 5–35 км приводит к формированию плазмы, состоящей преимущественно из кластерных ионов, таких как $\text{NH}_4^+ \cdot \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{H}^+ \cdot (\text{H}_2\text{O})_4$ и $\text{O}_2^- \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$. Максимальные концентрации ионов наблюдаются на высотах 10–15 км. Обнаружено также, что в нижней тропосфере значительное влияние на состав положительных ионов оказывает аммиак, приводящий к образованию устойчивых кластеров аммония [1]. На больших высотах возрастает вклад реакций с участием гидратированных ионов водорода. Полученные результаты существенно отличаются от аналогичных оценок для сухого воздуха [2]. Данные проведенных расчетов могут быть использованы для построения моделей реальной атмосферной плазмы, а также для разработки методов искусственного стимулирования выпадения осадков и уточнения моделей навигации и радиолокации в тропосфере.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 125012200611-5).

Литература

1. Stepanov I.G., Bychkov V.L., Golubkov M.G. Formation of ions under the action of cosmic rays in humid air // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. V. 262. 106332: 1–4. 2024. doi: 10.1016/j.jastp.2024.106332
2. Чэнсюнь Ю., Чжицзянь Л., Бычков В.Л. и др. Распределение концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере // Химическая физика. Т. 41, № 10. С. 28–37. 2022. doi: 10.31857/S0207401X22100041

**О ВОЗРАСТАНИЯХ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ (30-300 КЭВ) НА НИЗКИХ
ШИРОТАХ И ИОНОСФЕРНОМ ВОЗМУЩЕНИИ В ОБЛАСТИ ЮЖНО-
АТЛАНТИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ ВО ВРЕМЯ МАЙСКОЙ БУРИ 2024****Суворова А.В., Дмитриев А.В.***НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*suvorova@dec1.sinp.msu.ru

Экстремальная геомагнитная буря 10-13 мая 2024 г. дала возможность наблюдать ряд экстраординарных явлений в ионосфере и внутренней магнитосфере. В работе исследуется ионизирующее воздействие энергичных электронов радиационного пояса Земли (РПЗ) на нижнюю и верхнюю ионосферу в области Южно-Атлантической аномалии (ЮАА) во время этой экстремальной бури. Измерения энергичных электронов (десятки – сотни кэВ) на низкоорбитальных спутниках NOAA показали возрастание их потоков в запрещенной области на низких дрейфовых оболочках $L < 1.2$. Измерения вертикального полного содержания электронов (VTEC) на глобальной сети приемников GNSS позволили обнаружить существенное возрастание ионизации над Тихим океаном и в ЮАА в максимуме и на фазе восстановления экстремальной бури. На основе оценок скорости долготного дрейфа частиц сделан вывод, что время необходимое электронам, чтобы пройти до центра области ЮАА и спуститься вдоль дрейфовых оболочек до высоты 100 км, хорошо согласуется со временем наблюдения повышенной ионизации, включая возникновение спорадических Es слоев аврорального типа [1]. Достаточно быстрая трансформация внутреннего радиационного пояса на $L < 2$ во время бури указывает на действие механизма быстрого радиального переноса частиц внутреннего РПЗ в скрещенных магнитном и электрических полях, что приводит к инжекции энергичных электронов под нижнюю кромку РПЗ на низкие высоты в области дрейфовых оболочек $L < 1.2$ [2].

Работа выполнена в рамках госзадания Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова.

Литература

1. Resende L.C.A. et al. Extra ionization causing the anomalous auroral sporadic E layer (Es_a) over the equatorial Brazilian region during the recovery phase of the magnetic storm on 10 May 2024 // Space Weather. V. 23. e2025SW004669. 2025.
2. Суворова А.В., Дмитриев А.В. О внешних драйверах внезапного возрастания энергичных электронов в запрещенной зоне во время супербури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 65, № 5. С. 861–886. 2025.

**ПОЛЕ ПЛОТНОСТИ ВОДОРОДА НА ВЫСОТЕ КА «МЕТЕОР» В ЯНВАРЕ
2025 Г.****Тертышников А.В.**^{1,2}¹ ОБУ «Новгородская облветлаборатория», ² ФГБУ «ИПП», Москва, РоссияAtert@mail.ru

С 2010 г. в составе бортового научного оборудования КА серии "Метеор" функционируют масс-спектрометры для измерения газового состава атмосферы [1, 2]. За истекшее время накоплены большие массивы инструментальных измерений плотности ионов.

Разработана технология восстановления среднесуточного поля плотности ионов по результатам повитковых измерений на высоте КА "Метеор-2-4". Для интерполяции данных в узлы регулярной географической сетки используется разложение в ряд по сферическим функциям по всем измерениям плотности каждого иона за сутки и алгоритм LSQR (Least Squares, QR разложение). Он аналогичен методу сопряженных градиентов для решения разреженных систем уравнений типа $Ax = b + C$, где A — матрица с m строками и n столбцами, b — m -вектор, C — скаляр.

Приведены примеры применения технологии при восстановлении карт плотности иона H^+ . В морфологии карт выявлены структуры планетарного и регионального масштабов, межсуточная эволюция восстановленного поля плотности H^+ , основание водородного пояса в атмосфере Земли над магнитным экватором, влияние Южно-Атлантической магнитной аномалии, потенциальные зоны формирования плазменных пузырей («Bubbles») в экваториальной ионосфере.

Предложены показатели возмущенности диагностируемых полей. Обсуждаются причины формирования выявленных аномалий и влияние гелиогеофизических условий [3] на поле плотности водорода.

Благодарности. Автор благодарен Сергею Геннадиевичу Губину за помощь в работе и полезные дискуссии.

Литература

1. Tertyshnikov A.V. The Beginning of the 25th Cycle of Solar Activity in Variations of the Oxygen Ion Density in the Orbit of the Meteor Spacecraft//Cosmic Res. 63, 276–283 (2025). <https://doi.org/10.1134/S0010952525601380>.
2. Тертышников А.В. Масс-спектрометр космический. Патент № 2726186 по заявке № 2019121111/20(041262) в реестре ФИПС от 05.07.2019.
3. Тертышников А.В. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент. Заявка: 2023135791, 27.12.2023. Дата регистрации: 23.07.2024. Бюл. № 21.

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ШТОРМОВ 2022 Г НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОНЧ-РАДИОСИГНАЛОВ И ИОНОСФЕРУ

**Тимченко А. В.¹, Ряховский И. А.^{1,2}, Борчевкина О.П.¹, Поклад Ю.В.²,
Голубков М.Г.³, Носикова В.В.¹**

¹*Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (КФ ИЗМИРАН),
Калининград, Российская Федерация*

²*Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН), Москва,
Российская Федерация*

³*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Российская Федерация*
timchenko.leks@gmail.com

Рассмотрены возникающие возмущения в ионосфере во время метеорологических штормов в Европе в феврале 2022 г. Ионосферные возмущения фиксировались с помощью сигналов очень низкой частоты (3–30 кГц) на трассах от двух передатчиков, расположенных в Великобритании и приемником в КФ ИЗМИРАН, а также с помощью ионозонда «Парус-А», расположенного в обсерватории КФ ИЗМИРАН. Динамика ионосферных параметров в рассматриваемые периоды исследовалась с использованием методики построения амплитудно-временных, высотно-временных и сводных амплитудных характеристик (А-, Н-, А_Σ-карты) по данным ионозонда в Калининграде. Построенные таким образом характеристики позволяют анализировать динамику ионосферы по всему спектру излучения ионозонда во времени.

Результаты анализа амплитуд и фаз ОНЧ-сигналов на радиотрассах GBZ-KGD и /GQD-KGD во время метеорологически активных дней в феврале 2022 года показывают явные аномалии в амплитуде в ночное время, превышающее 3σ по сравнению с метеорологически спокойных днем. При анализе ионосферных параметров было обнаружены аномалии в F-области, усиление амплитуды сигнала и влияние на критические частоты F1- и F2-слоя.

Рассмотренные события служат дополнительными свидетельствами взаимосвязи крупномасштабных метеорологических процессов и возмущений в верхней ионизированной части атмосферы, оказывающих влияние на работу радиотехнических средств, радиосвязи и навигации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 23–77–10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004>.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АНОМАЛИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЯДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ОБСЕРВАТОРИЙ КАЛИНИНГРАДА И ИРКУТСКА

Хамов И.В.^{1,2}, Борчевкина О.П.², Бессараб Ф.С.²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

²Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия
olga.borchevkina@mail.ru

Рассмотрена задача выявления аномалий критической частоты F2-слоя ионосферы (foF2) в длительных рядах измерений в Калининградской (1964-2024 гг.) и Иркутской (1957-2023 гг.) обсерваториях. Исходные данные были приведены к единому формату, рассчитаны среднесуточные значения с учетом имеющихся пропусков в данных и применена процедура детрендирования методом скользящего среднего с окном 27 суток. Выявление аномалий осуществлялось по критерию «двух сигм»: отклонение текущего значения foF2 от 27-дневного оконного среднего считалось аномальным, если его абсолютная величина превышала два стандартных отклонения. Выполнена классификация аномалий по знаку и признаку геомагнитной возмущенности, которая определялась по величине индекса Dst. Проведен анализ аномалий и их сопоставление для двух обсерваторий.

Показано, что большинство аномалий foF2 являются отрицательными и преимущественно связаны с геомагнитными бурями, тогда как положительные аномалии в половине случаев возникают при спокойных условиях. Выявлена сезонная зависимость появления аномалий: отрицательные аномалии чаще наблюдаются в периоды весеннего и осеннего равноденствий, а положительные - зимой. Анализ межгодовой изменчивости показал наличие зависимости амплитуды отрицательных аномалий от солнечного цикла. Для положительных аномалий однозначной зависимости от фазы солнечного цикла не выявлено, их характеристики демонстрируют более сложное поведение и, вероятно, определяются совокупностью факторов.

Проведенный статистический анализ позволил выявить различия в характеристиках положительных и отрицательных аномалий foF2, а также установить их зависимость от геомагнитных условий, сезонных факторов и фазы солнечного цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-77-10004).

**ЭФФЕКТ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА В ТЕС ИЗМЕРЕНИЯХ :
СОБЫТИЕ МАРТ 2018 И СЕНТЯБРЬ 2021 ГОДА****Шагимуратов И.И., Ефишов И.И., Якимова Г.А., Тепеницына Н.Ю.***Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*shagimuratov@mail.ru

Дан сравнительный анализ проявления поляризационного джета (ПД) в ТЕС вариациях в условиях равноденствия для 2018 и 2021 года. Вероятность появления поляризационного джета высока в периоды равноденствия. Определяющим фактором формирования ПД являются геомагнитные возмущения. Известно, что частота проявления и широтно-временные характеристики ПД коррелируют с K_p , Dst, AE индексами [1].

Минимальное значение Dst составляло около -50 nT 18 марта и -60 nT 17 сентября соответственно. Индекс авроральной активности для обоих событий достигал ~1000 nT в интервале 18-23UT. Столь высокая авроральная активность является признаком вероятности появления поляризационного джета. Джет регистрировался по измерениям спутников DMSP. В качестве данных по ТЕС вариациям использовалась база Мадригал, на основании которых формировались карты ТЕС на долготах Европы.

Поляризационный джет проявился на ТЕС картах, в европейском секторе, в виде узкого по широте вытянутого по долготе провала. Провал располагался на субавроральных широтах. В целом, для обоих событий провал располагался на магнитных широтах 58-60°N. Смещение провала к экватору на интервале 19-22UT (21-24MLT) составило около 4°. В марте 2018г. глубина провала составляла около 1.0 TECU и 2.5 TECU в сентябре 2021г. В целом характеристики ТЕС провала ассоциированного с проявлением поляризационного джета для обоих событий весьма похожи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson P.C. et al. The Ionospheric Signatures of Rapid Subauroral Ion Drifts // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № A4. P. 5785–5792.

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ В ЯНВАРЕ 2026 ГОДА

**Шагимуратов И.И., Лещенко Л.Н., Ефишов И.И., Якимова Г.А.,
Тепеницына Н.Ю.**

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

shagimuratov@mail.ru

В работе представлены предварительные результаты по эффектам магнитной бури в измерениях ТЕС на европейской сети ГНСС станций и данных вертикального зондирования ионосферы на станциях Москва и Калининград. В вечернее время 19 января 2026 г. около 22 UT зарегистрирована экстремально высокая величина индекса Dst (+60nT), с которым ассоциировался экстраординарный всплеск ТЕС на всех рассматриваемых широтах. Величина ТЕС в это время превышала даже дневную величину. На авроральных широтах превышение было более чем в 2 раза по сравнению слабо-возмущённым днем 18 января, на средних широтах более 3 раз, соответственно. По данным ионозондов превышение электронной концентрации в F-области 20-22UT не было столь значительным.

Экстремально высокий всплеск авроральной активности (AE более 2000 nT) регистрировался 19 января в 20-21 UT. На этом интервале экваториальная граница флуктуаций GPS сигналов опускалась до широт 36°N что является косвенным признаком проявления экваториальной аномалии со смещением северного гребня до широт 30°MLAT . Экваториальная граница аврорального овала 21-22UT смещалась на широты ниже 56°MLAT . В это время ионозондовые измерения демонстрируют интенсивное рассеяние на высотах области F и усиление поглощения в нижней ионосфере на обеих станциях, а также появление отражений от спорадического слоя Es, более характерного для высоких широт.

Положительное возмущение наблюдалось в дневной ионосфере 20 января. Эффект в ТЕС ярко выражен на низких широтах, где превышение составляло более чем в 2 раза относительно 18 января. В тоже время превышение в foF2 составило фактор менее 1.5. Отрицательная фаза бури проявилась 21 января, которая более выражена на широтах выше 60°N . Предварительные результаты свидетельствуют, что во время бури ионосфера подверглась существенной модификации вплоть до субавроральных широт. Особенно это касается интервала 19-21UT 19 января 2026г.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ GDMI И GDMTEC МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С GIM-TEC JPL В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Шубин В.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

shubin@izmiran.ru

Развитие сети наземных приемных станций международной службы IGS (International GNSS Service) позволяет получать глобальные карты полного электронного содержания (GIM-TEC), интегрального параметра, описывающего общее количество электронов (TEC) в ионосферном столбе единичной площади. Такие карты в настоящее время являются одними из основных источников информации о состоянии ионосферы в реальном времени. В исследовании представлены сравнения Глобальной Динамической Модели Ионосферы (GDMI) и Глобальной Динамической Модели Полного Электронного Содержания (GDMTEC), которые недавно были созданы в ИЗМИРАН, с GIMs-TEC, построенными в центре обработки ионосферных данных лаборатории реактивного движения NASA (JPL). Сравнения этих моделей с GIM-TEC (JPL) были проведены для спокойных геомагнитных условий, низкой и высокой солнечной активности. Для анализа глобальной эффективности моделей были использованы дни, соответствующие зимнему и летнему солнцестоянию, весеннему и осеннему равноденствию. Для количественной оценки качества моделей для каждого выбранного дня были рассчитаны среднеквадратичные отклонения вертикального полного электронного содержания (VTEC) и средние смещения отношений $VTEC_{mod}/VTEC_{GIM}$ относительно единицы. В результате проведенного сравнительного анализа было получено, что в большинстве случаев GDMTEC демонстрирует лучшую глобальную эффективность по сравнению с GDMI.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ ДИФфуЗИОННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МНОГОЛУЧЕВОСТИ

Щирий А.О.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

sao@izmiran.ru

Результат наклонного зондирования ионосферы коротковолновыми (КВ) радиосигналами обычно представляется в виде ионограммы, показывающей зависимость амплитуды принятого сигнала от частоты и времени группового запаздывания. Для систематизации результатов исследования эффектов многолучевого распространения КВ в ионосфере в [1] был предложен подход классификации по т.н. эмпирическим моделям многолучевости (ЭММЛ), когда диапазон распространения разбивается на интервалы по числу и типам мод распространения сигнала, а ось частот нормирована относительно максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ). В результате обработки 5500 ионограмм НЗИ среднеширотных радиолиний Хабаровск – Йошкар-Ола, Великобритания – Йошкар-Ола и Кипр – Йошкар-Ола за 2001-2010 гг. были решены задачи выявления ЭММЛ, установление частотей ЭММЛ, а для наиболее вероятных (частых) ЭММЛ сбора различных статистических характеристик [2]. Собранная информация позволяет синтезировать схематичную («скелетную») ионограмму для заданных условий распространения (заданных, конечно, в пределах собранной статистики).

В то же время известно, что диффузионные нейросети обладают такими способностями как «добавление диффузности», т.е. размытия и шума. Для этих целей лучше всего использовать архитектуру ControlNet поверх Stable Diffusion, она позволяет наложить на «скелет» ионограммы (черно-белые линии): размытие (fuzziness), диффузность, шум и характерные для ионограмм артефакты. Что интересно, диффузионная нейросеть, обученная «добавлять шум», будет обладать симметричной способностью «убирать шум», таким образом появляется еще один способ очистки ионограммы от помех. Задачами дальнейших работ являются реализация и тестирование методики, оценка качества, а также сопоставление синтезированных ионограмм с реальными.

Литература

1. Хмельницкий Е. А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в ДКМ диапазоне. – М.: Связь, 1975. – 232 с.
2. Щирий А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. СПб., 2007. – 19 с.

Секция 3.
Прогнозирование вариаций геомагнитного
поля и геомагнитной активности

К ВОПРОСУ О ДОЛГОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

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

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

abunina@izmiran.ru

На основе разработанного автоматического алгоритма выделения геомагнитных бурь (Абунина и др., 2026) составлен каталог возмущений магнитного поля Земли с 1932 по 2025 гг. Были рассчитаны основные характеристики бурь (длительность, средние и медианные значения различных индексов геомагнитной активности), а также указано, было ли зарегистрировано SSC/SI в начале бури. Рассматривались геомагнитные бури разных классов (малые, умеренные, большие, очень большие, экстремальные) в разные периоды (по циклам солнечной активности). Показано, что в среднем длительность малых бурь ($K_{pmax} = 5$) составляет 12 часов, умеренных ($K_{pmax} = 6$) – 25 часов, больших ($K_{pmax} = 7$) и очень больших ($K_{pmax} = 8, 9$) – 35 часов, а экстремальные бури ($K_{pmax} = 9$) длятся около двух суток. Также было получено, что процентное соотношение бурь разных классов в циклах солнечной активности практически неизменно: малых бурь – больше половины, а очень больших и экстремальных – 5-7% (см. рисунок). Полученные результаты можно использовать для долгосрочного прогнозирования количества и длительности геомагнитных возмущений.

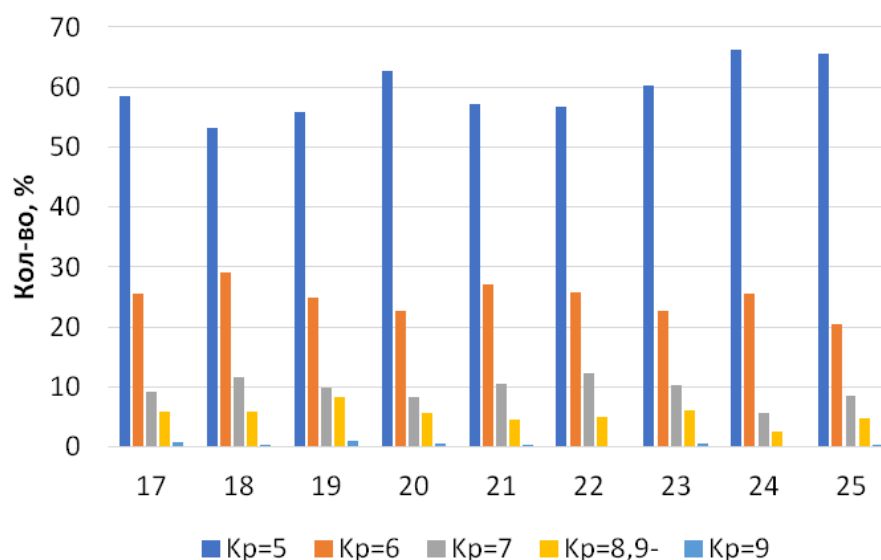


Рисунок. Процентное соотношение геомагнитных бурь разных классов по циклам солнечной активности.

Литература

1. Абунина М.А., Маурчев Е.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунин А.А. Автоматический алгоритм выделения геомагнитных бурь // Russian Journal of Earth Sciences, 2026, в печати

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

**Антонова Е.Е.^{1,2}, Степанова М.В.³, Кирпичев И.П.², Овчинников И.Л.¹,
Воробьев В.Г.⁴, Ягодкина О.И.⁴, Антонюк Г.И.¹**

¹*НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова*

²*Институт Космических Исследований РАН*

³*University of Santiago de Chile*

⁴*Полярный Геофизический институт*

elizaveta.antonova@gmail.com

Эффективный прогноз Космической погоды должен быть основан на учете всех известных факторов геомагнитной активности и построении адекватных моделей магнитосферной динамики. Однако, несмотря на длительный период исследований пока не удалось построить более-менее самосогласованную картину магнитосферных процессов, включающую постоянно наблюдаемые флуктуации магнитосферных параметров, возникновение сравнительно спокойных периодов и кратковременных взрывных процессов, в ходе которых изменяется магнитосферная топология и происходит интенсивное ускорение частиц. Серьезные изменения устоявшихся представлений включают доказательства локализации источника крупномасштабной магнитосферной конвекции внутри магнитосферы во внешних областях кольцевого тока, а не в турбулентном геомагнитном хвосте [1]. Прояснена локализация начала взрывной фазы изолированной суббури на геоцентрическом расстоянии $\sim 5 R_E$ (см. [2]), что очень хорошо стыкуется с результатами первых классических исследований суббури S.I. Akasofu в 1964 г. Было также экспериментально доказано, что ускорение электронов-киллеров происходит в моменты суббуревых диполизаций глубоко внутри магнитосферы, где одновременно формируется максимум давления горячей магнитосферной плазмы (см. [3] и ссылки в данном обзоре). Теоретическое обоснование наблюдаемой картины явлений сформировалось после анализа вклада обычно отбрасывавшихся членов в обобщенный закон Ом в горячей магнитосферной плазме (см. [4] и ссылки в данной работе). Определялся усредненный масштаб ионной холловской длины внутри кольцевого тока и в геомагнитном хвосте в зависимости от параметров солнечного ветра и геомагнитной активности. Было показано, что эта величина превышает масштаб области кольцевого тока и масштаб магнитосферного хвоста в Z и Y направлениях GSM, что делает неприменимым условие вмороженности поля в плазму при описании данных областей. При этом, главным направлением исследований становится возникновение и нарушение условия магнитостатического равновесия. Проведен анализ возможности использования полученных результатов для улучшения прогнозов геомагнитной активности в рамках программ по предсказанию Космической погоды.

Литература

1. Kirpichev I. P., Antonova E. E., Stepanova M. V. On the relationship between regions of large-scale field-aligned currents and regions of plateau in plasma pressure observed in the equatorial plane of the Earth's magnetosphere // *Geophysical Research Letters*. V. 50. e2023GL105190. <https://doi.org/10.1029/2023GL105190>
2. Воробьев В. Г., Ягодкина О. И., Антонова Е. Е., Кирпичев И. П. Широтное распределение характеристик ночных авроральных высыпаний в спокойные периоды и в периоды начала суббурь // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 65. № 2 С. 143–158. doi:10.31857/S0016794025020012
3. Marina Stepanova, Victor Pinto, Elizaveta Antonova. Regarding the relativistic electron dynamics in the outer radiation belt: a historical view // *Reviews of Modern Plasma Physics*. V. 8. article number 25. 2024. <https://doi.org/10.1007/s41614-024-00165-4>
4. Antonova E.E., Kirpichev I., Stepanova M. Hall Scale in the Earth's Magnetosphere and Magnetospheric Substorm // *Geophysical Research Letters*. V. 52. e2024GL114315. 2025. <https://doi.org/10.1029/2024GL114315T>

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП

Белаховский В.Б.¹, Пилипенко В.А.², Селиванов В.Н.³, Сахаров Я.А.³

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

²Институт физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

belakhov@mail.ru

В работе проведен сравнительный анализ влияния геомагнитных пульсаций P_g и низкочастотных пульсаций P_c5-6, P_i3 типа на рост геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линии электропередач (ЛЭП) Мурманской области с использованием данных магнитометра в обсерватории ПГИ «Лопарская» (LOR) и данных с подстанции «Выходной» (VKH). P_g пульсации относятся к P_c4 частотному диапазону и имеют период ~1.5-2.5 минут, они представляют собой резонансную волновую структуру в магнитосфере, возбуждаемую протонами кольцевого тока в результате развития кинетических неустойчивостей. В наземных данных P_g-пульсации более ярко выражены в Y-компоненте геомагнитного поля. P_g-пульсации благодаря своей монохроматичности могут быть использованы в качестве маркера для оценки влияния частоты геомагнитных возмущений на рост ГИТ.

Проанализировано порядка десяти событий. Несмотря на то, что P_g пульсации приводили к большему скачку вариабельности геомагнитного поля dB/dt , чем P_c5-6/P_i3 пульсации, амплитуда ГИТ во время регистрации пульсаций P_g была меньше. Амплитуды пульсаций были сопоставимы (10-20 нТл), а частоты отличались в 5-8 раз. Таким образом, при уменьшении частоты геомагнитных пульсаций (примерно с 8 до 1.5 мГц) амплитуда ГИТ растет.

Предполагается, что в результате скин-эффекта низкочастотные сигналы (P_c6-пульсации) проникают на большую глубину в литосфере Земли. Это приводит к увеличению площади контура и созданию большего магнитного потока, что приводит к большей ЭДС индукции и соответственно большему ГИТ в ЛЭП. Проведенные оценки толщины скин-слоя для P_g и P_c6-пульсаций показывают согласие данного механизма с экспериментальными наблюдениями.

Таким образом, при прогностической оценке ГИТ в технологических линиях необходимо учитывать не только вариабельность геомагнитного поля dB/dt , но и частотный состав сигнала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038 и гранта Министерства образования и науки Мурманской области.

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНОГО БУХТООБРАЗНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ И ПУЛЬСАЦИЙ $Pi3$ НА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ФАЗЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ СУББУРЬ

Бондаренко А. М.^{1,2,3}, Ягова Н. В.¹, Пилипенко В. А.¹

¹ИФЗ РАН; ²ИСЗФ СО РАН; ³НИУ ВШЭ

bondarenkoam@ifz.ru

В магнитном поле авроральная суббурия представляет собой резкое непериодическое бухтообразное возмущение, на которое могут быть наложены квазипериодические вариации в широком диапазоне частот, наиболее интенсивными из которых являются иррегулярные длиннопериодные пульсации $Pi3$. Задача описания волновой составляющей возмущения до сих пор не решена. Открытым остается также вопрос о наличии кластеризации суббурь по уровню волновой части и об оптимальном параметре для описания этого отклика. Так как суббуревые $Pi3$ являются эффективным источником геоиндуцированных токов (ГИТ), вопрос о наличии связи между неволновыми параметрами суббури и $Pi3$ является важным и для прикладных задач, о мониторинге ГИТ и апостериорной оценке сбоя в работе электрооборудования и о возможности прогноза связанных с пульсациями ГИТ. Данная работа является продолжением работы [1], в которой попытка классификации и кластеризации суббурь по отношению амплитуды $Pi3$ к амплитуде основного бухтообразного возмущения выполнялась для всех суббурь, зарегистрированных на станции сети IMAGE в 2017-2019 гг. В настоящей работе исследуются только суббури, развившиеся на слабовозмущенном фоне и имеющие единственное главное возмущение. Рассматриваются только $Pi3$, развивающиеся на восстановительной фазе. Рассматриваются временная вариация амплитуды и спектральный состав пульсаций, и их связь с параметрами бухтообразного возмущения.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №24-77-10012).

Литература

1. Бондаренко А.М., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. О существовании двух групп суббурь по интенсивности пульсаций $Pi3$ -волнового отклика в диапазоне 1-5 мГц. Физика плазмы в Солнечной системе. Двадцатая ежегодная конференция, ИКИ РАН, Москва, Россия, 10-14 февраля 2025.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕХ СОБЫТИЙ

Гнитеева О.С., Белинская А.Ю

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия
gniteevaos@ipgg.sbras.ru*

В настоящей работе рассмотрены пространственно-временные вариации геомагнитного поля, ассоциированные с подготовкой и реализацией крупных сейсмических событий. Анализ проведен для трех землетрясений: на Тайване (2024, М 7.4), в Мьянме (2025, М 7.5) и на Камчатке (2025, М 8.8). Разработана автоматизированная система обработки магнитограмм сети INTERMAGNET, включающая анализ низкочастотных трендов, статистическое обнаружение аномалий, непрерывное вейвлет-преобразование и фильтрацию космической погоды по индексам Kp и Dst.

Анализ временных рядов в частотной области показал отклик, представляемый резким ростом мощности излучения в диапазоне периодов 10-600 сек (Pc3-5) [1]. Для разграничения ионосферного шума применялись спектральное отношение и индекс поляризации, подтвердившие преобладание вертикальной структуры литосферной эмиссии.

Показаны интенсивность предсейсмических импульсов и выраженная пост-сейсмическая депрессия Z-компоненты, регистрируемых на станциях вдоль оси простираания разлома. Анализ трансконтинентальных данных показал способность вертикально-поляризованного сигнала преодолевать дистанции свыше 3000 км. Извлеченные многомерные характеристики формируют оптимальное признаковое пространство для последующего внедрения алгоритмов машинного обучения, в частности архитектур класса LTSM-Autoencoder, с целью автоматизированного выявления литосферных аномалий.

Литература

1. Рябова С.А., Шалимов С.Л. Об ионосферном отклике землетрясений на Филиппинах с ноября по декабрь 2023 г. // Физика земли. №6. С. 52-63. 2024.

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЛОКАЛЬНЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ ПЕРЕМЕННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Григорян¹ А.Г., Канониди² К.Х.

¹ИФЗ, г. Москва, Россия, ag-grig@ifz.ru

²ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия, kkkh@izmiran.ru

Исследованиям, связанным с проблемой прогноза землетрясений, посвящена весьма обширная литература, отечественная и зарубежная. Но исчерпывающее освещение проблемы прогноза до сих пор не получено, и вряд ли возможно при сложившемся обилии и многосторонности ее компонентов.

Известно, что к разрушению горных пород приводят изменение физических свойств и напряженно-деформационное их состояние. Наблюдения за изменениями физических полей, таких как: магнитного, гравитационного, силы тяжести, электрического и т.д., дает возможность обнаружить аномальные изменения, которые могут быть предвестниками землетрясения. И нет среди этих полей ни одного поля, аномалии которого более предпочтительны для прогноза землетрясения. Только комплексное изучение может служить в качестве основания при оценке процесса подготовки землетрясения. Необходим системный подход для решения этой сложной задачи.

В данной работе магнитометрическими методами, изучаются солнечно-суточные Sq-вариации и более высокочастотные вариации переменного геомагнитного поля δT с целью выявления аномального изменения в процессе подготовки сильных землетрясений ($M \geq 5$).

Геомагнитные солнечно-суточные Sq- вариации, создаваемые солнцем, содержат в себе важную информацию о процессах в земной коре. Известна методика [1, 2], позволяющая оценить пространственно- временные изменения в локальном отклике геомагнитного поля. Методика использовалась и показала хорошие результаты для землетрясений: Спитакского (Армения, 1988г., $M=7.0$), Л'Акуили (Италия, 2009г., $M=6.3$) и Турецкого (Турция, 2023г., $M=7.8$).

Предложена новая методика, использующая гармоники этих вариаций для выявления аномальных изменений локального отклика геомагнитного поля, отражающих активизацию различных геодинамических процессов в земной коре и верхней мантии в пределах исследуемой территории.

Проведены сравнения расчетов по старой и новой методикам для землетрясения в Петрине, Хорватия (2020г. $M=6.4$).

Литература

1. Сковородкин Ю.П. Изучение тектонических процессов методами магнитометрии. -М.: ИФЗ АН СССР, 1985.
2. Григорян А.Г. Изменения локального геомагнитного поля внешнего происхождения на примере Армении.// «Физика Земли», 2007, №6.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НАЧАЛЕ БОЛЬШОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 10 ОКТЯБРЯ 2024 г.

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

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

gromova@izmiran.ru

Рассмотрены нетипичные полярные геомагнитные возмущения, связанные с подходом к магнитосфере Земли обширной области сжатой плазмы (*Sheath*) на переднем крае магнитного облака, вызвавшего экстремально большую магнитную бурю 10 октября 2024 г.

На основе анализа данных регистрации магнитометров планетарных сетей IMAGE, SuperMAG, INTERMAGNET и глобальных карт распределения ионосферных и продольных токов, полученных при измерениях 66 низко-орбитальных спутников проекта AMPERE, а было обнаружено несколько необычных геомагнитных эффектов в высоких широтах: (1) Внезапное начало бури (SC), произошедшее при положительных B_z - и B_y -компонентах ММП, сопровождалось развитием интенсивного левовращающегося вихря полярных ионосферных токов с центром вблизи полюса, что свидетельствует о резком локальном усилении вытекающего продольного тока в этой области широт, что было подтверждено измерениями на 66 низко-орбитальных спутников проекта AMPERE. (2) Смена знака B_z - и B_y -компонент ММП привела к развитию огромного бухтообразного отрицательного геомагнитного возмущения с амплитудой до ~ -4000 нТл в утреннем (07-08 MLT) секторе высоких широт. Оно сопровождалось возникновением двух крупномасштабных ионосферных вихрей с центрами на широте ~ 75 MLAT в утреннем и вечернем секторах, свидетельствующих об усилении конвективных токов. (3) В околополуденном секторе полярных широт направление электроджета быстро менялось с восточного на западное, следуя за изменениями знака B_y ММП. Сделан вывод, что рассмотренное выше магнитное возмущение, представляло собой не классическую (*Akasofu-type*) суббурю, а являлось конвективной магнитной бухтой, источником которой может быть отрицательная B_z -компонента ММП на фоне очень большого динамического давления солнечного ветра. Показано, что направление токов в полуденном секторе полярных широт контролируется знаком B_y -компоненты ММП. Таким образом, было установлено, высокоширотные геомагнитные эффекты, вызванные подходом к Земле области высокого давления солнечного ветра (*Sheath*), определяются направлением и величиной B_y - и B_z -компонент межпланетного магнитного поля.

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Гуляева Т.Л.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

gulyaeva@izmiran.ru

При возмущениях на Солнце и в межпланетной среде ионосферные возмущения часто опережают проявления геомагнитной бури [1-2]. Целью данной работы является использование ионосферных предвестников для прогноза интенсивности геомагнитной бури, выраженной минимальным значением долготно–симметричного SYM–H индекса, эквивалентного Dst индексу. Ионосферные возмущения обычно характеризуются отклонением регулярных параметров (максимальной плотности плазмы NmF2, высоты максимума hmF2 и полного электронного содержания, TEC) от спокойного фонового уровня. В данной работе мы расширим список ионосферных предвестников геомагнитных бурь, включив в него максимальное за сутки значение TECmax, наблюдающееся в пике экваториальной аномалии в ионизации и демонстрирующее эффект насыщения при высокой солнечной активности [3].

Модель SYM–Hmin строится по данным 84х минимальных наблюдаемых значений SYM–H за каждый месяц в 25м солнечном цикле за 2019–2025гг. Для построения прогностической модели SYM–Hmin мы используем максимальное за предыдущие сутки значение TECmax по картам jplr, uqrg и uadg GIM-TEC, ежедневное значение потока солнечного радиоизлучения F10.7, и максимальное значение планетарного ионосферного индекса Wp за 24ч, предшествующие моменту SYM–Hmin.

По методу наименьших квадратов построена дву–параметрическая модель SYM–Hmin(TECmax, Wp) с высокой степенью коэффициента определенности $R^2 \cong 0.85$. Модель может быть использована для прогноза оперативной обстановки при запусках космических аппаратов, для предупреждения внештатных ситуаций в телекоммуникации и радиосвязи.

Литература

1. Данилов А.Д. и др. Изменчивость F-области до магнитных бурь (обзор) // Геомагн. аэрономия. Т. 63, В. 6, С. 671-685. 2023. DOI:10.31857/S0016794023600801.
2. Gulyaeva T.L. Sequence of space storm effects in ionospheric anomalies and geomagnetic activity // J. Atm. Solar-Terr. Phys., 2026. DOI: 10.1016/j.jastp.2025.106710.
3. Cafolla M.A. et al. The non-linear dependence of daily maximum ionospheric total electron content on F10.7 // Space Weather. 2026. DOI: 10.1029/2025SW004745.

СУПЕРСУББУРИ ВО ВРЕМЯ 24 И 25 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Дэспирак И.В.¹, Клейменова Н.Г.², Любчик А.А.¹, Громова Л.И.³

¹ ПГИ, г. Анапаты, Россия

² ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³ ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия

despirak@gmail.com

Несмотря на то, что суббури достаточно интенсивно исследуются как экспериментально, так и теоретически, до сих пор нет четкой формулировки морфологических характеристик суббури, нередко возникают дискуссии, какие магнитные возмущения относятся к суббурям, а какие нет. Это свидетельствует как о сложности этого явления, так и о том, что в различных условиях космической погоды могут иметь место разные виды магнитосферных суббурь, вызванные различными драйверами или их взаимодействием. В данной работе мы исследуем особенности развития очень интенсивных суббурь (суперсуббурь) и их возможную связь с циклами солнечной активности. Термин «суперсуббуря» был впервые предложен в работе [1]. Суперсуббуря определяется как суббуря с индексом SML < -2500 нТл. Следует отметить, что это значение является произвольным и использовано в качестве оценки, поскольку количественное описание явления важно для исследования очень интенсивных суббурь. Было установлено, что суперсуббури — относительно редкое явление, наблюдаемое главным образом во время интенсивных магнитных бурь и супербурь, вызванных выбросами корональной массы (СМЕ), когда регистрируются высокие значения южного межпланетного магнитного поля и динамического давления солнечного ветра [2]. Было показано, что суперсуббури имеют иную эволюцию авроральной зоны и специфический характер магнитных возмущений, связанный с развитием очень протяженного интенсивного западного электроджета [3]. В докладе рассмотрены особенности суперсуббурь во время последних супербурь 25-го солнечного цикла, в мае и октябре 2024 года, обсуждаются их особенности, отличия от суперсуббурь во время 24 цикла солнечной активности, а также возможные межпланетные факторы, которые могли привести к иному развитию возмущений.

Литература

1. Tsurutani B.T. et al. Extremely intense ($SML \leq -2500$ nT) substorms: Isolated events that are externally triggered? // *Ann. Geophys.* V. 33. I. 5. P. 519–524. 2015.
2. Дэспирак И.В., А.А. Любчик, Н.Г. Клейменова. Суперсуббури и условия в солнечном ветре. *Геомагнетизм и Аэрономия*. Т. 59, № 2, С. 183–190. 2019.
3. Дэспирак и др. Суперсуббури во время бурь 7–8 сентября 2017г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. №3. С. 308–317. 2020.

ГИТ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ БУРИ 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

**Дэспирак И.В.¹, Сецко П.В.¹, Любчик А.А.¹, Сахаров Я.А.¹,
Селиванов В.Н.²**

¹ ПГИ, г. Апатиты, Россия

² ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

despirak@gmail.com

Опасность геоиндуцированных токов (ГИТ) заключается в том, что эти интенсивные токи представляют угрозу для работы ЛЭП, поскольку приводят к сбоям в работе трансформаторов на электрических подстанциях, а также нарушают работу систем катодной защиты нефтепроводов и автоматики железных дорог [1]. ГИТ возникают, когда происходят сильные магнитосферные возмущения, которые связаны с быстрыми изменениями магнитного поля (dB/dt), при этом причиной ГИТ может быть практически любой ток, возникающий при развитии магнитосферного возмущения, как при развитии импульса внезапного начала бури (SC), резком усилении кольцевого тока, усилении аврорального электроджета, генерации низкочастотных пульсаций. В авроральной и субавроральной областях основными источниками являются электроджеты, связанные с суббурями и сопутствующими магнитными пульсациями в диапазоне Pc5/Pi3 [2]. Используя прямые измерения ГИТ в нейтралях трансформаторов, расположенных в нескольких точках регистрации на Карело-Кольской линии электропередачи (Выходной, Ревда, Лоухи), проведен детальный анализ возможных источников ГИТ для сложного события космической погоды, наблюдавшегося 12-13 ноября 2025 года. Во время этого события на подстанциях Северо-Запада России был зафиксирован один из самых сильных пиков ГИТ ~ 75 (100) А, зарегистрированный на станции Выходной (VKH) в $\sim 00:40$ UT 12 ноября 2025 года во время главной фазы бури. Кроме того, ГИТ ~ 25 А наблюдался на VKH немного позже $\sim 03:00$ UT 12 ноября. Во время фазы восстановления интенсивные ГИТ ~ 15 А также были зарегистрированы в $\sim 00:30$ UT 13 ноября. По данным сети магнитометров IMAGE и базе данных OMNI были проанализированы межпланетные и геофизические источники этих интенсивных ГИТ. Было показано, что самый сильный ГИТ 12 ноября, вероятно, был связан с развитием так называемой «расширенной» суббури, которая обычно наблюдается при высокой скорости солнечного ветра.

Литература

1. Rajput V.N. et al. Insight into Impact of Geomagnetically Induced Currents on Power Systems: Overview, Challenges and Mitigation // Electric Power Systems Research, V.192, 106927. 2021.
2. Despirak I. et al. Geomagnetically induced currents (GICs) during strong geomagnetic activity (storms, substorms, and magnetic pulsations) on 23–24 April 2023 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 261, 106293, 2024.

ОСОБЕННОСТИ SC-СОБЫТИЙ С 1-СЕК РАЗРЕШЕНИЕМ, ВЫЗВАННЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИМИСЯ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ ОТНОСИТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЯ «СОЛНЦЕ-ЗЕМЛЯ»

Загайнова Ю.С.¹, Громов С.В.¹, Громова Л.И.¹, Файнштейн В.Г.²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИСЗФ СО РАН (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск, Россия

yuliazag@izmiran.ru

На примере SC-событий, вызванных межпланетными ударными волнами (МУВ) с малым углом отклонения нормали к их фронту к линии «Солнце-Земля», исследованы зависимости регистрации внезапного начала (SC) и главного импульса (MI) как функций географических координат и Всемирного времени t . Всего отобрано 9 SC-событий: 1 - 06.05.2015, 2 - 09.11.2016, 3 - 16.06.2012, 4 - 17.03.2013, 5 - 19.07.2016, 6 - 19.08.2022, 7 - 19.12.2015, 8 - 22.01.2012, 9 - 22.06.2012. Для определения моментов SC и MI взяты данные с 1-сек временным разрешением с разных магнитных станций сети INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>). Выявлены станции, первыми зарегистрировавшими SC и MI в каждом рассмотренном SC-событии. Показано, что линейные проекционные скорости $\mathcal{A}_{in}$ связанных с SC-событиями KBM вблизи Солнца ($r < 8R_{Sun}$), а также скорости межпланетных KBM $\mathcal{A}_{ICME}$ и связанных с ними МУВ $\mathcal{A}_{SS}$, заметно различаются, что обеспечило также заметное различие разницы моментов регистрации SC Δt_{SC} и MI Δt_{MI} между первой и последней станциями в каждом SC-событии. В среднем, чем больше $\mathcal{A}_{in}$, $\mathcal{A}_{ICME}$ и $\mathcal{A}_{SS}$, тем меньше Δt_{SC} и Δt_{MI} . На Рис. 1а приводится зависимость Δt от $\mathcal{A}_{ICME}$. Также выявлено, что, чем позже станция регистрирует SC и MI относительно станции, первой зарегистрировавшей внезапное начало бури, тем меньше временной интервал между регистрацией SC и MI $\Delta T = |\Delta t_{SC} - \Delta t_{MI}|$ (см. пример для SC-события от 19.12.2015 на Рис. 1б). На Рис. 1в приведены линейной аппроксимации для зависимостей ΔT от времени t_N регистрации SC станцией с порядковым номером N относительно первой станции для исследуемых SC-событий.

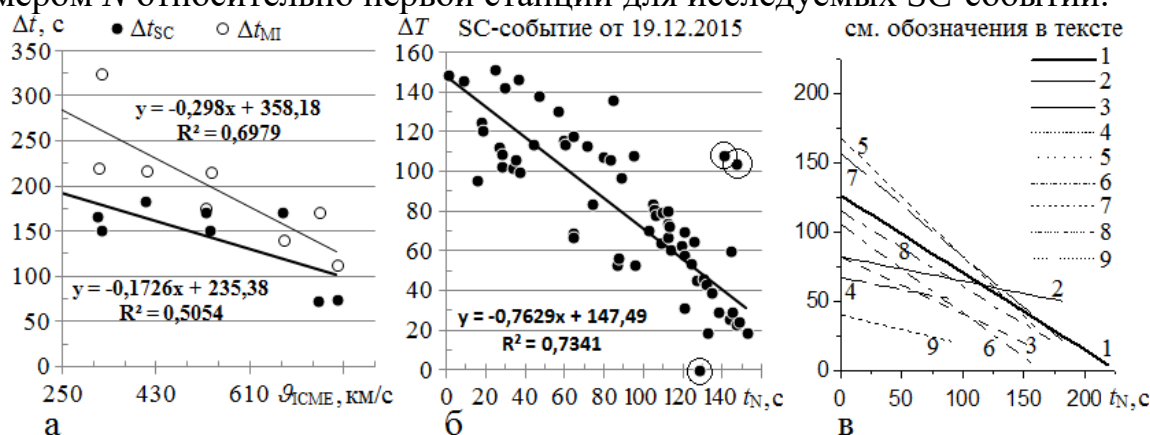


Рисунок 1

АВРОРАЛЬНОЕ КИЛОМЕТРОВОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ КАК ИНДИКАТОР ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Колпак В.И.^{1,2}, Могилевский М.М.¹, Чугунин Д.В.¹, Чернышов А.А.¹,
Моисеенко И.Л.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия

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

lera.kolpak@yandex.ru

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) формируется в высокоширотных областях магнитосферы Земли в результате развития циклотронной мазерной неустойчивости [1]. Ранее было установлено, что интегральный поток мощности АКР коррелирует с геомагнитными индексами АЕ, К_p и Dst при слабой и умеренной активности. Следует отметить, что при $K_p \geq 4$ и $Dst < (-50)$ такая зависимость ослабевает из-за ограничения ускорения электронов [2]. В работе [3] вводится понятие АКР-индекса, который определяется как интегральный поток мощности аврорального километрового излучения в диапазоне частот от 50 до 800 кГц. Этот интегральный показатель применялся для сравнения с индексом аврорального электроджета АЕ, в результате чего была замечена хорошая корреляция двух индексов, при условии, когда спутник находится внутри конуса излучения. Зависимость АКР от геомагнитной активности, позволяет рассматривать это излучение в качестве чувствительного индикатора геомагнитной активности. Однако в работе [4] было показано, что по длительным наблюдениям излучений на спутнике WIND частота регистрации АКР находится в противофазе с циклом солнечной активности: в период слабой солнечной активности в среднем АКР наблюдается ~25 дней в месяц, а в период сильной солнечной активности частота регистрации АКР уменьшается в 3 раза. Такая зависимость может быть связана с изменениями условий распространения АКР в неоднородной плазме солнечного ветра, что стоит учитывать при использовании АКР в качестве индикатора геомагнитной активности.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 25-12-00059).

Литература

1. Wu C.S., Lee L.C. A theory of the terrestrial kilometric radiation // *Astrophys. J.* V. 230. P. 621. 1979.
2. Murata T. et al. Correlations of AKR index with K_p and Dst indices // *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.* V. 10, P. 64-68. 1997.
3. Kurth W. S. et al. Auroral kilometric radiation and the auroral electrojet index for the January 1997 magnetic cloud event // *Geophys. Res. Lett.* V. 25. N 15. P. 3027-3030. 1998.
4. Колпак В. И. и др. Парадоксальная зависимость аврорального километрового излучения от солнечной активности // *Доклады РАН. Физика, технические науки.* Т. 519. № 6. С. 26-29. 2024.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ФОРШОКЕ С ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЗЕМЛИ: ГЛОБАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ

Кропотина Ю.А.¹, Быков А.М.¹

¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*

julieta.k@gmail.com

Рассмотрены свойства электромагнитной турбулентности, возникающей перед фронтом головной ударной волны (УВ) Земли в глобальной гибридной модели. Рассмотрены случаи межпланетного магнитного поля, направленного радиально от Солнца к Земле, а также под небольшим углом к плоскости эклиптики. В обоих случаях в области, где головная УВ продольна, образуется форшок, заполненный отраженными от фронта надтепловыми частицами и возникающими в результате раскачки неустойчивостей косыми сжимаемыми волнами. Возникающие участки повышенной плотности сносятся солнечным ветром к ударному фронту, на время прогибая его в точках взаимодействия. Таким образом формируется сложная структура фронта, приводящая к неоднородности потоков отраженных ионов. Неоднородности плотности, проникая в область за фронтом, дополнительно уплотняются из-за сжатия и вызывают появление вытянутых вихрей повышенного поля в магнитослое.

Для обеих рассмотренных конфигураций поля построены спектры флуктуаций магнитного поля в нескольких областях форшока. Форма спектров значительно варьируется в зависимости от координаты, но в большинстве случаев в коротковолновой части может быть аппроксимирована степенной функцией.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №25-72-20007).

КОГНИТИВНЫЙ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ И НАБЛЮДЕНИЙ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ В ПЕРИОД СОБЫТИЙ 9-13 НОЯБРЯ 2025 Г.

**Мандрикова О.В., Полозов Ю.А., Мандрикова Б.С., Хомутов С.Ю.,
Гвоздарев А.Ю.**

ИКИР ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия

oksanam1@mail.ru

Изучен период 9-13 ноября 2025 г., содержащий сильную расширенную суббурю (9-10 ноября), GLE-событие (11 ноября, GLE 77) и сильную геомагнитную бурю (11-13 ноября). На основе когнитивной вейвлет-методики проанализированы секундные магнитные данные обсерваторий северо-восточного сегмента России (ИКИР ДВО РАН) и наблюдения сети наземных нейтронных мониторов [nmdb.eu]. Выявлены заметные корреляционные связи между параметрами магнитного поля (АЕ-индексом, межпланетным магнитным полем B) и характеристикой интенсивности вариаций данных нейтронных мониторов I (полученной на основе когнитивной вейвлет-методики) (рис.1). Полученные на основе методики характеристики интенсивности обеспечили более точную оценку корреляционных связей с временными задержками на несколько часов (рис.1). Результаты подтверждают эффективность предлагаемой методики для раннего обнаружения аномалий (GLE и геомагнитных бурь). Работа выполнена за счет ГЗ ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

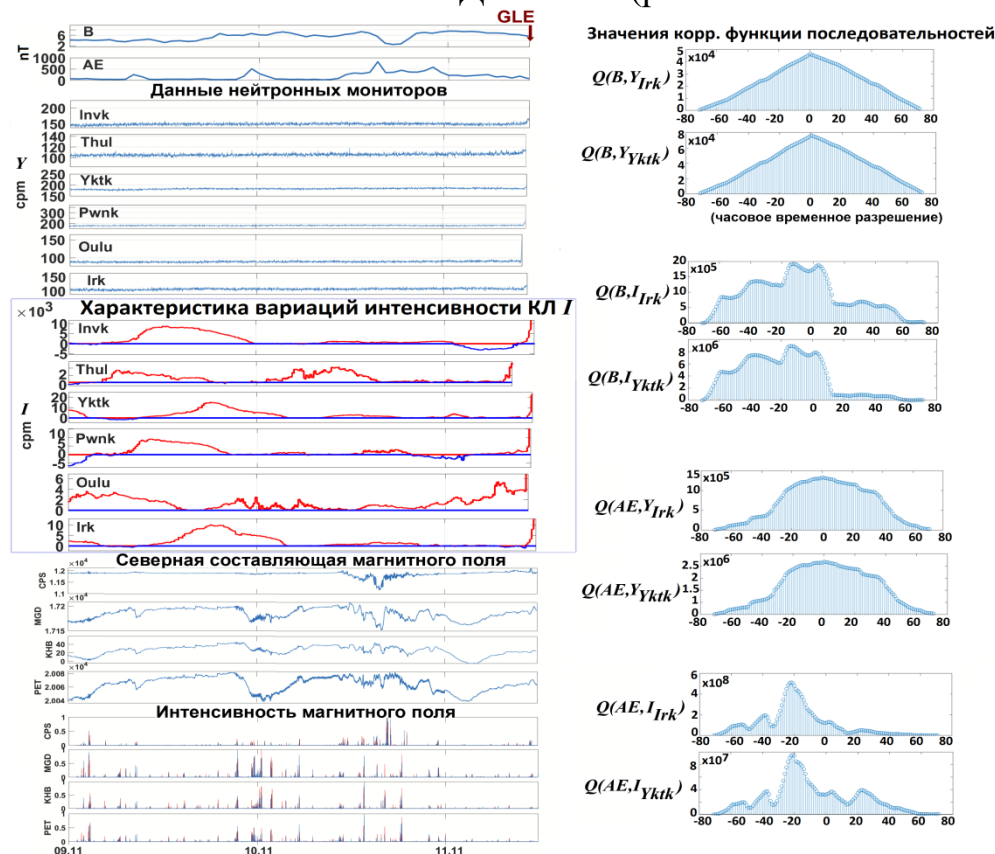


рис.1

ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ИОНОВ В ХОДЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ

Парамоник И.П.¹, Дивин А.В.¹, Чжун Д.¹, Семенов В.С.¹

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

igorparamonik@gmail.com

Магнитное пересоединение является фундаментальным плазменным процессом, отвечающим за быструю трансформацию энергии магнитного поля в кинетическую энергию частиц и нагрев плазмы. В магнитосферной физике его изучение критически важно для понимания механизмов возникновения геомагнитных суббурь, полярных сияний и ускорения частиц радиационных поясов Земли, а также для интерпретации процессов передачи энергии от солнечного ветра к внутренней магнитосфере.

При бесстолкновительном магнитном пересоединении разделение движения ионов и электронов формирует многомасштабную диффузионную область. Ионная диффузионная область (IDR) включает в себя меньшую по размерам электронную диффузионную область (EDR), что приводит к возникновению токовой системы Холла и связанного с ней холловского электрического поля. Это поле эффективно ускоряет ионы вблизи диффузионной области и сепаратрис, особенно в режимах с наличием холодных ионов, существенно деформируя их функцию распределения по скоростям (VDF).

С помощью 2.5D кинетического моделирования методом «Частица-в-ячейке» (Particle-in-Cell, PIC) мы исследуем эволюцию ионной VDF по мере её прохождения через области эффективного ускорения: диффузионную область и сепаратрису. Наблюдаемое повышение температуры в этих областях сопровождается возникновением отдельных ускоренных пучков, по отдельности более холодных, чем вся популяция. Уменьшение теплового разброса частиц в пучках может быть объяснено простой энергетической моделью одномоментного приращение кинетической энергии в выделенном направлении для каждой частицы, представленной в работе. Такой механизм демонстрирует статистическое охлаждение ионов по сравнению с начальной температурой в области втекания и подтверждается численным моделированием с использованием тестовых частиц.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕРВИСА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ STORMFOCUS

Подладчикова Т.В.¹, Петрукович А.А.²

¹Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

t.podladchikova@skoltech.ru

Геомагнитные бури представляют серьёзную угрозу для спутниковых систем, энергосетей и радиосвязи, что делает их оперативный прогноз одной из приоритетных задач космической погоды. Представлен сервис StormFocus, функционирующий на портале SpaceWeather.Ru с 2011 г. и обеспечивающий прогноз ожидаемой интенсивности геомагнитной бури по индексу Dst за несколько часов до её наступления [1, 2]. Входными данными служат измерения солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) в точке либрации L1; прогноз обновляется ежечасно.

В основе метода лежит экстраполяция модели Dst типа Бёртона при допущении о постоянстве функции накачки солнечного ветра [2]. Прогноз запускается при первых признаках буреопасных условий в солнечном ветре. Для «резких» бурь — при отчётливом скачке произведения VBs — сервис выдаёт верхний и нижний пределы ожидаемого пикового значения Dst_p ; для «постепенных» бурь формируется единственная оценка Dst_p . Алгоритм был настроен на исторических данных 1995–2010 гг.

Проведён анализ работы сервиса за период работы в реальном времени с 2011 г. В режиме реального времени 87% бурь были верно предсказаны; при реанализе с использованием финальных данных OMNI этот показатель достигает 97%. Средняя ошибка прогноза пикового Dst_p составляет около 10%, а предупреждение выдаётся в среднем за 5–6 часов до достижения пика бури. Установлено, что основной источник ошибок реального времени — расхождение между оперативными и финальными данными по Dst, солнечному ветру и ММП, обусловленное особенностями калибровки и пропусками данных. Полученные результаты подтверждают надёжность алгоритма в реальном времени и перспективность его дальнейшего развития.

Литература

1. Podladchikova T., Petrukovich A., Yermolaev Yu. Geomagnetic storm forecasting service StormFocus: 5 years online // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. A22. DOI: 10.1051/swsc/2018017.
2. Podladchikova T.V., Petrukovich A.A. Extended geomagnetic storm forecast ahead of available solar wind measurements // Space Weather. 2012. V. 10. S07001. DOI: 10.1029/2012SW000786.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ДОМЕННОЙ АДАПТАЦИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ МЕЖДУ ДАННЫМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Пятикоп А.В.¹, Гаджиев И.М.¹, Мягкова И.Н.², Баринов О.Г.²,
Доленко С.А.²

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова:

¹*Физический факультет г.Москва, Россия,*

²*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
(НИИЯФ МГУ)*

jkorqr@gmail.com

Геомагнитные возмущения являются значимым фактором космической погоды, способным нарушать работу космических аппаратов, радиосвязи и линий электропередач, что делает задачу их прогнозирования практически значимой. Прогноз геомагнитного индекса Dst [1] основывается на параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, измеряемых космическими аппаратами в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем. Однако различия в измерениях космических аппаратов ACE [2] и DSCOVR [3] приводят к снижению качества моделей прогнозирования при прямом переносе обучения – перекрёстном применении моделей.

В работе рассматриваются методы доменной адаптации, сглаживающие различия между спутниковыми данными через отображение одного домена в другой. Используются временные ряды параметров межпланетной среды и значений Dst с учетом временных задержек. Для прогнозирования применяются линейные модели, градиентный бустинг, нейронные сети, а для адаптации – линейные методы, градиентный бустинг, метод проекции на латентные структуры и доменно-состязательные нейронные сети [4].

Анализируются сценарии адаптации DSCOVR→ACE и ACE→DSCOVR, ориентированные на использование исторических данных и обеспечение устойчивости прогноза; проводится сравнение моделей для различных горизонтов прогнозирования и периодов солнечной активности с целью выбора оптимального подхода. Показано, что совместное использование данных обоих космических аппаратов и доменной адаптации позволяет повысить качество прогнозирования.

Литература

1. Geomagnetic Data Service. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstidir/>.
2. Real-Time Solar Wind Data. <https://www.nasa.gov/ace/>.
3. DSCOVR Space Weather Data Portal. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/DSCOVR/in-depth/>.
4. Ganin Y., Ustinova E., Ajakan H., Germain P., Larochelle H., Laviolette F., Marchand M., Lempitsky V. Domain-Adversarial Training of Neural Networks // Journal of Machine Learning Research. – 2016. – Vol. 17, № 1. – P. 1–35.

МОЖНО ЛИ ДОВЕРЯТЬ WEB-РЕСУРСУ OMNI?**Сафаргалеев В.В.**

Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (СПб ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия

vladimir.safargaleev@izmiran.spb.ru

Солнечно-земные связи являются важным звеном в исследованиях космической погоды, поскольку через них осуществляется воздействие солнечного ветра и ММП на околоземное космическое пространство. Мониторинг солнечного ветра проводится на расстоянии 200-250 RE от дневной магнитосферы, так что пересчет возмущения от точки регистрации на магнитопаузу сопряжен с ошибками, которые могут быть критическими для исследуемого вопроса. Если другие спутники (THEMIS или Geotail) находятся в неблагоприятном положении, приходится прибегать к онлайн процедуре OMNIWeb, результатам расчета по которой безоговорочно верить нельзя. Проведено статистическое исследование времени запаздывания наземного отклика на быстрое увеличение давления солнечного ветра (события SI) на лобовой точке фронта ударной волны, рассчитанное онлайн по программе OMNIWeb. За период с 2001 по 2023 гг было проанализировано 104 события SI. В 42% из них продемонстрировано аномальное время запаздывания, когда сигнал на Земле регистрировался раньше, чем на фронте ударной волны, что формально выглядит как нарушение причинно-следственных связей. Средняя величина аномального времени запаздывания ~ 10 минут. Детальный анализ показал, что ошибка возникает из-за большой величины скорости изменения скорости солнечного ветра на фронте неоднородности. Результат следует иметь в виду при исследованиях отклика магнитосферы на быстрые изменения компонент межпланетного магнитного поля, когда OMNI является единственным способом привлечь к исследованию данные по ММП на фронте ударной волны.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ 4-Х ИСТОРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПРОГНОЗА И ЭПИГНОЗА

Старченко С.В., Яковлева С.В.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) Троицк, Москва, Россия
sstarchenko@mail.ru; svyakov@inbox.ru*

Использованные самые популярные модели геомагнитного поля: BIGMUD1h.1 (1400-1920) – M1, GUFM1 (1590-1990) – M2, COV_OBS.x2 (1840-2020) – M3 и IGRF (1900-2025) – M4. Величина геомагнитной энергии получена интегрированием квадратов коэффициентов разложения по сферическим гармоникам от границы мантия-ядро. Обозначаем E – всю энергию, E_1 – ее дипольную компоненту, E_2 – квадрупольную и т.д.

Сравнение эволюции E по модели M2 показало хорошее согласование с эволюцией E для M1 с начала XIX, а для M3 с начала XX века. В M1 и M3 наблюдается небольшой диапазон согласования в начале XX века. Эволюция E_1 взаимно согласована для всех моделей лишь в диапазоне от середины XVIII до начала XX века, а для более поздних времен наблюдается резкая несогласованность из-за искусственного представления диполя в модели M2. Эволюция недипольных компонент $E-E_1$ для моделей M1 и M2 хорошо согласуются, а для M3 наблюдается чрезвычайно существенная несогласованность с 1850 по 1900.

Среднее, медиана и наиболее вероятностная мода для всех моделей находятся в узком диапазоне от 6.74 до 7.18 Эдж. Поэтому все вероятностные распределения близки к нормальным с небольшой асимметричностью ~ 1 . Существенно различаются только эксцессы. У M2 эксцесс мал, для M1 – существенно отрицателен (тяжелые хвосты) и для M3 еще более существенно положителен (пиковые моды).

Таким образом, на относительно коротких временных интервалах мы вполне можем получать достаточно хорошее описание геомагнитной энергии, которое статистически малосущественно отличается от представлений на более длительных интервалах. Это дает возможность использовать наш сравнительный анализ как потенциальную основу для прогноза и эпигноза. Наиболее адекватным временным интервалом является XIX-XX века, где все модели сходятся. Вместе с тем, для более отдаленных временных интервалов наблюдается значительное рассогласование рассмотренных моделей, которое может быть скорректировано посредством упомянутого эпигноза.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МАСШТАБ КОГЕРЕНТНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ ДИАПАЗОНА Pc5-6/Pi3 ВБЛИЗИ МАГНИТОПАУЗЫ

Стуков Д.А.^{1,2}, Ягова Н.В.¹

¹ ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

² ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

dstkov922@yandex.ru

Исследование вариаций магнитного поля в диапазоне нескольких миллигерц в окрестности ночной магнитопаузы необходимо для оценки вклада в вне- и внутримagnetосферных источников и определение источников геомагнитных пульсаций Pc5-6/Pi3, которые наблюдаются практически постоянно во внешней магнитосфере и высокоширотных областях на Земле. Настоящая работа продолжает исследование масштабов когерентности длиннопериодных вариаций магнитного поля вблизи магнитопаузы, начатое в [1], где рассматривалась зависимость когерентности Pc5-6/Pi3 от длины временного интервала. Работа посвящена пространственному масштабу когерентности Pc5-6/Pi3 в ближнем magnetосферном хвосте и прилегающих областях magnetослоя. Исследуется зависимость когерентности от расстояния между спутниками (меняются в диапазоне $[0.1, 10] R_E$), положения пар спутников относительно магнитопаузы (оба в magnetослое, оба в хвосте), параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра, включая интенсивность флуктуаций в том же частотном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 24-77-10012).

Литература

1. Стуков Д.А., Ягова Н.В. Временные масштабы когерентности длиннопериодных УНЧ-вариаций магнитного поля в окрестности ночной магнитопаузы. Солнечно-земная физика. 2025, т. 11, № 3, с. 132–142. DOI: 10.12737/szf-114202513.

РАЗЛИЧНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА «ШУМАН»

Шибаетов И.Г.¹, Теодосиев Д.²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

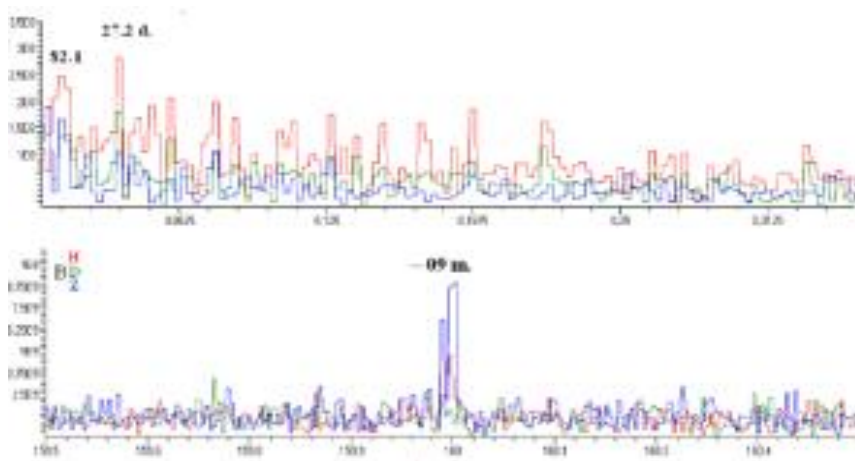
²ИКИТ БАН, г. София, Болгария

ishib@izmiran.ru

Работа продолжает исследования проекта "Шуман" выполнявшийся в рамках российско-болгарского сотрудничества (завершился в 2018 г.) [1]. Фиксировались три магнитные компоненты, две электрические и огибающая акустического канала, время квантования 0.5 сек.

Качество полученных данных было продемонстрировано при регистрации как эпизодических событий (солнечные вспышки разного класса, прохождение грозных облаков), так и длительных регулярных наблюдений (влияние светового дня и Луны на динамику суточных компонент). Были отмечены периоды ~9 и 18 минут в высокочастотной части спектра годовых массивов В-компонент. Показана возможность совместного анализа как минутных, так и годовых интервалов: лунный период и 9-минутную гармонику иллюстрирует рисунок ниже.

Также была продемонстрирована возможность использования данных мониторинга в прикладных исследованиях – сопоставлена временная динамика суточных значений геомагнитных компонент с показаниями пульса и артериального давления человека.



Данная работа продолжает эти исследования на расширенном материале, упор делается на анализ откликов в диапазоне 5 - 20 минут.

Литература

1. Kuksa Y., Shibaev I., Teodosiev D., Vojta J. Dynamics of regular and incidental events according to the magnetometric complex: materials of the "Schuman" project // Aerospace Research in Bulgaria. V. 28. P. 59-66. 2016.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc1-3 В МАГНИТОСФЕРЕ, ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ

Ягова Н. В., Федоров Е. Н., Мазур Н. Г.

ИФЗ РАН, Москва, Россия

nyagova@ifz.ru

Исследуются частоты появления и спектральные параметры пульсаций Pc1-3 от магнитосферы до поверхности Земли по данным спутников MMS, SWARM и наземных станций. Для пар точек, расположенных в разных локациях, исследуется спектральная когерентность и разность фаз. Результаты, полученные из наблюдательных данных, сравниваются с расчетами прохождения альвеновского пучка конечной толщины через квазиреальную ионосферу [1]. В плазмосфере вблизи плазмопаузы частота появления пульсаций Pc1 и Pc3 выше, чем на Земле и в ионосфере. Во внешней плазмосфере доминируют Pc3 на частоте около 50 мГц, что выше, чем в сопряженных областях на Земле. Кроме типичных Pc1 и Pc3, в этой области возникают также пульсации диапазона Pc2 (около 100 мГц), которые могут быть как высшими гармониками «классических» Pc3, так и самостоятельным видом колебаний [2]. Обсуждается влияние параметров пульсаций и распределения ионосферной проводимости на их распространение от приэкваториальной области к Земле.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

Литература

1. Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D. // J. Geophys. Res.: Space Phys.— 2018.— Vol. 123.— P. 3965–3982. DOI: 10.1029/2018 JA025338.
2. Yagova, N., Heilig, B., and Fedorov, E. Pc2-3 geomagnetic pulsations on the ground, in the ionosphere, and in the magnetosphere: MM100, CHAMP, and THEMIS observations // Ann. Geophys. 2015. Vol. 33, pp. 117-128, doi:10.5194/angeo-33-117-2015.

ФАЗОВЫЕ И АМПЛИТУДНЫЕ СООТНОШЕНИЯ СРЕДНЕ- И НИЗКОШИРОТНЫХ РСЗ-4 ПУЛЬСАЦИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ

Ягова Н.В.

ИФЗ РАН, Москва, Россия

nyagova@ifz.ru

Естественные вариации геомагнитного поля в диапазоне РСЗ-4 активно используется для поиска «аномалий», то есть сигналов немагнитосферного происхождения, например сейсмоэлектромагнитных. РСЗ-4 также приводят к возбуждению геоиндуцированных токов на средних и низких широтах. Это ставит вопрос о выборе оптимальных параметров пульсаций этого диапазона для прикладных задач. Наибольшую устойчивость обнаруживают не абсолютные параметры пульсаций, а фазовые и амплитудные соотношения для квазисопреженных пар станций. Такие соотношения, дополненные данными стандартных градиентных пар, расположенных в одном полушарии, позволяют выделить вариации, связанные с процессами в нижних геоболочках на фоне вариаций магнитосферно-ионосферного происхождения. В настоящей работе исследуются фазовые и амплитудные соотношения средне- и низкоширотных РСЗ, в том числе в сейсмоактивных регионах. Для анализа используются как квазисопреженные пары станций, так и пары в одном полушарии. Проверяется обнаруженный в [1] эффект пресеismicкой вариации разности фаз РСЗ на квазисопреженной паре станций.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

Литература

1. Ягова Н. В. Сопреженные свойства и пространственные параметры пульсаций РСЗ-4 и P_i в прикладных задачах // Двадцать первая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 9-13 февраля 2026 г.

ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ЦУНАМИ

Сорокин В.М., Яценко А.К.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

alexey_yaschenko@mail.ru

Быстрая деформация дна океана во время подводного землетрясения приводит к вертикальному движению проводящей морской воды в геомагнитном поле. В результате в океане возникает импульсный электрический ток. Вертикальное смещение поверхности океана излучает в атмосферу акустико-гравитационную волну. Распространение этой волны в ионосферу сопровождается появлением в ней электрического тока. Возникающие два тока генерируют электромагнитный импульс в системе морская среда – ионосфера. Получены уравнения электромагнитного поля и развит метод их решения в низких широтах. Проведен анализ спектральных характеристик распространяющегося поля, найдены пространственно-временные зависимости импульса поля. Геомагнитное возмущение, генерируемое током в воде распространяется со скоростью десятки-сотни м/с, его максимум убывает с расстоянием x до эпицентра землетрясения $\sim 1/x^2$ и составляет $\sim 0.1\text{--}1\text{нТл}$ на расстоянии до 200 км от эпицентра. Геомагнитное возмущение, генерируемое током в ионосфере распространяется со скоростью десятки км/с, его максимум убывает $\sim 1/x^{1/2}$ и составляет $\sim 1\text{--}10\text{нТл}$ на расстоянии до 500 км от эпицентра. Оно имеет выраженный осциллирующий характер и его спектр существенно отличается от спектра генерирующей его акустико-гравитационной волны, имея набор максимумов с частотами $(5\text{--}20)\cdot 10^{-3}$ Гц. Обсуждена возможность регистрации сигнала на поверхности Земли или морской среды и в ионосфере. Амплитуда геомагнитного возмущения на поверхности земли значительно больше, чем в ионосфере.

Работа выполнена в рамках ГР № 1021060808637-6-1.3.8

Секция 4.

Прогнозирование вариаций потоков частиц в гелиосфере и магнитосфере Земли

ПРОГНОЗ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГСО ПО ДАННЫМ ИСЗ GOES-15, 17 И 18 МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

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

Физический факультет, МГУ, г. Москва, Россия

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

azragorskayaCG@my.msu.ru

Разработана модель для прогнозирования потоков релятивистских электронов ($E > 2$ МэВ) на геостационарной орбите на три дня вперед в режиме реального времени. Использован набор данных, охватывающий период с 2011 г. по март 2026 г. Потоки электронов получены на спутнике GOES-15 и спутниках нового поколения GOES-R, расположенных на одной долготе $\sim 135^\circ$. Данные с 2011 г. по 2019 г. получены на космическом аппарате GOES-15, с 2020 г. по 2023 г. — на спутнике GOES-17, а с 2023 г. по настоящее время — на спутнике GOES-18. В качестве входных параметров использованы данные, получаемые в режиме реального времени и не являющиеся производными от других параметров: Kp, SYM-H и AL-индексы, скорость, плотность и температура ионов солнечного ветра, B_z компонента межпланетного магнитного поля. Для потоков электронов выполнена калибровка измерений между спутниками, основанная на измерениях GOES-18. Для снижения объемов вычислительных ресурсов использован метод классического машинного обучения CatBoost. Время запаздывания выбрано на основе корреляции Пирсона между параметрами (3 суток). Для оценки качества модели проведена кросс-валидация с использованием метода скользящего окна с шагом два месяца и общей длительностью 6 лет. Внутри каждого подмассива данные разделены следующим образом: 70% для обучения, 15% для валидации и 15% для тестирования. За ~ 9 лет скользящего тестирования средние показатели качества прогноза (R^2) составили на три дня вперед: 0.82, 0.62, 0.43. Также проведен анализ точности прогнозирования в зависимости от длины выборки и использованных моделей.

ГАРМОНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРЕДВЕСТНИКОВ ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО МЕТОДУ КОЛЬЦА СТАНЦИЙ

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

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

sfrovis@gmail.com

Наличие прогностических инструментов, позволяющих заблаговременно определять приближение к Земле межпланетных возмущений, способных вызвать значительные Форбуш-эффекты (ФЭ) и магнитные бури, является одной из важных и до конца не разрешенных задач солнечно-земной физики. Зачастую перед такими возмущениями наблюдается неоднородность в долготно-временном распределении космических лучей (КЛ). Наиболее ярко выраженными типами предвестников являются предвозрастания и предпонижения. В работе [1] были проанализированы значительные ФЭ и вручную определен ряд параметров предвестников в вариациях КЛ с использованием Метода Кольца Станций [2].

В настоящей работе предложена гармоническая модель для расчета параметров распределения КЛ, включающая первые две гармоники. Такая модель позволяет за каждый час рассчитать значения ряда параметров, в частности, амплитуду и фазу каждой гармоники. На основе этих данных автоматически вычисляются определенные характеристики для каждого события в имеющейся базе данных FEID (<https://tools.izmiran.ru/feid>). Сопоставление этих характеристик с полученными в работе [1] позволяет углубить понимание природы предвестников и продвинуться в разработке прогностической модели для оценки мощности приближающегося к Земле межпланетного возмущения.

Литература

1. Белов С.М., Шлык Н.С., Абунина М.А., Белов А.В. Подход к параметризации предвестников Форбуш-эффектов // Геомагнетизм и аэрономия / Geomagnetism and Aeronomy. 2026. Т. 66. № 2. С. 324–333. DOI: 10.7868/S3034502226020052
2. Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г., Мелкумян А.А. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 1. Общее описание // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 1. С. 41–48. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020010022>

ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ИЗМЕРЯЕМУЮ ОКОЛО ЗЕМЛИ СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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

ИКИ, г. Москва, Россия

bogachev.sergey@cosmos.ru

Изложены результаты экспериментального исследования вопроса о влиянии активных областей (АО), наблюдающихся на солнечном диске, на скорость и температуру медленного солнечного ветра (СВ) в максимуме солнечного цикла. Работа проведена на основе данных прибора SWEPAM, расположенного на спутнике ACE (использованы данные за 2000–2002 гг.; 23-й солнечный цикл). Для получения информации о положении и протяжённости АО использовался каталог NOAA. В ходе исследования для каждого измерения параметров СВ около Земли определялся приблизительный момент формирования этого элемента СВ на Солнце с учётом времени транзита СВ, после чего исследовалось, находилась ли АО на центральном меридиане Солнца в момент формирования СВ. Весь массив данных был разделён на две группы: СВ, сформированный при наличии АО на центральном меридиане (~40% времени), и СВ, сформированный при отсутствии АО (~60%). Затем сопоставлялась скорость и температура СВ для обоих случаев.

Скорость СВ в первом случае (в присутствии АО) в среднем оказалась примерно на 1% ниже, чем скорость СВ, сформированного в отсутствие АО (434,06 км/с против 438,09 км/с при погрешности измерений $\sigma \approx 0,37$ км/с). Для температуры СВ соответствующая разница составила около 6% (94 600 К против 100 500 К при погрешности $\sigma \approx 340$ К). Этот результат подтверждает в среднем более низкую скорость и температуру СВ, формирующегося в АО, по сравнению с компонентой СВ, формирующейся в корональных дырах, что может быть учтено в моделях прогноза скорости СВ.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-72-30002).

ГЕОМАГНИТНОЕ ОБРЕЗАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Дмитриев А.В., Пулинец М.С.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

dalexav@mail.ru

Динамика широты геомагнитного обрезания солнечных космических лучей (СКЛ) изучалась во время трех сильных геомагнитных бурь, произошедших в сентябре 2017 г., мае 2024 г. и ноябре 2025 г.. Потоки высокоэнергичных солнечных протонов с энергией выше 70 МэВ наблюдались низковысотными полярными спутниками POES/МЕТОР. Широты обрезания СКЛ определялись в Северном и Южном полушариях, как в спокойные периоды, так и во время геомагнитных бурь. Экспериментальные результаты сравниваются с эллиптической моделью обрезания СКЛ [1]. Показано, что в среднем модель хорошо описывает наблюдения в динамическом диапазоне своих входных параметров. Однако за пределами динамического диапазона, особенно для углов наклона диполя и уровней геомагнитной активности, модель выдает значительные систематические ошибки, что указывает на необходимость ее дальнейшего улучшения. На основе новых экспериментальных данных обсуждаются пути улучшения моделирования геомагнитного обрезания СКЛ во время сильных магнитных бурь.

Работа выполнена в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова при поддержке РФФ (грант №25-27-00676).

Литература

1. Dmitriev, A.V. et al. Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006 // J. Geophys. Res. V. 115. A12244. 2010. doi:10.1029/2010JA015380

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ НАЧАЛА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

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

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия

ZverevAS@ikfia.ysn.ru

Представлены результаты проводимого в ИКФИА мониторинга космической погоды за 2026 г. Краткосрочный прогноз попадания Земли в геоэффективные возмущения солнечного ветра проводится на основе анализа результатов метода глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов NMDB. Предикторами приближения возмущений солнечного ветра являются аномальные изменения в поведении рассчитанных зональных (северо-южных) компонент распределения космических лучей. За указанный период было зарегистрировано 12 предикторов. Из них 6, с заблаговременностью от нескольких часов до суток, были связаны с приближением геоэффективных возмущений солнечного ветра. Проявление 3 случаев предикторов было связано с началом попадания Земли в области крупномасштабных возмущений солнечного ветра, которые вызвали большие форбуш-эффекты (понижения) в наблюдаемой наземными приборами интенсивности космических лучей. Таким образом, эффективность прогноза геомагнитных бурь и крупномасштабных возмущений солнечного ветра составила величину ~ 0.75 .

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 126021217279-8). Авторы благодарны за предоставленные данные NMDB [www.nmdb.eu] при поддержке программы Европейского союза FP7 (контракт № 213007).

Литература

1. Зверев А.С., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Прогноз геомагнитных бурь в апреле–ноябре 2024 г. по результатам мониторинга космических лучей // Солнечно-земная физика. т. 11. № 4. с. 127–131. 2025

ВАРИАЦИИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ 10-100 КЭВ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc5/Pi3 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПИТЧ-УГЛА

Зворыгина Е. С.^{1,2}, Ягова Н. В.²

¹ МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия,

² ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

zvorygina-el@yandex.ru

Работа продолжает исследование взаимосвязи между ультранизкочастотными электромагнитными волнами миллигерцового диапазона (пульсации Pc5-6/Pi3) и электронами внешнего радиационного пояса [1]. Использовались данные измерений магнитного поля и дифференциального по направлениям и энергии потока электронов в диапазоне от 40 до 475 кэВ на геостационарном спутнике GOES.

Выполненный в предыдущих работах статистический анализ показал, что для всех компонент поля и энергии электронов наблюдается устойчивая положительная корреляция между потоком и амплитудой в зависимости от энергии [1] и питч-угла [2].

Целью данной работы является выявление когерентных пульсаций потока электронов и магнитного поля. Отбор происходит по каждой паре энергия электронов - компонента поля, и для выбранных интервалов исследуются спектры и временные формы вариаций потока и магнитного поля в зависимости от питч-угла.

Литература.

1. Зворыгина Е. С., Ягова Н. В. Взаимосвязь между мощностью УНЧ Волн в диапазоне 1-5 мГц и потоком электронов с энергиями порядка 100 кэВ на геостационарной орбите. // 19-я ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», 5-9 февраля, 2024, Москва, ИКИ, 2024 г., Сборник тезисов, стр. 313.

2. 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. [2-я научная конференция им. М.И.Панасюка «Проблемы космофизики»](#), г. Дубна, Россия, 30 июня - 4 июля 2025. Книга тезисов, стр. 99.

ПРОТОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИЯНИЯ. НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Иевенко И.Б., Парников С.Г.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия

ievenko@ikfia.ysn.ru

Протонные сияния в эмиссиях атомарного водорода возникают как результат высыпаний энергичных протонов и их перезарядки на высотах слоя E ионосферы. Высыпания протонов происходит из области магнитосферы с изотропным распределением потоков заряженных частиц. Во время протонного сияния возможна селективная регистрация высыпаний низкоэнергичных электронов в эмиссии 630.0 нм [OI] на высотах области F2 ионосферы (электронных сияний).

В докладе представлены результаты анализа динамики протонного и электронного сияний по наблюдениям на меридиане Якутска (130°E) во время большой магнитной бури 1 января 2025 г. Буря была обусловлена увеличением электрического поля E_y утро-вечер солнечного ветра до ~12 мВ/м. Усиление магнитосферной конвекции вызвало возникновение широкой полосы свечения в эмиссии водорода 486.1 нм (H β) на широтах диффузного сияния в эмиссии 630.0 нм в вечернем секторе MLT. Полоса двигалась от северного горизонта к югу через зенит станции наблюдений на геомагнитной широте 58°. После 2040 MLT протонное сияние располагалось на широтах 52-57°. В это время наблюдались две полосы электронных сияний в эмиссии 630.0 нм, которые отображали границы авроральной зоны в интервале широт 51-64°.

Спутник NOAA-19 зарегистрировал изотропную границу потоков энергичных протонов и электронов на меридиане наземных наблюдений. Широтное распределение потока высыпающихся протонов на границе соответствовало положению полосы в эмиссии H β . Два прохода спутника Swarm-C показали быстрое смещение к экватору субаврорального пика электронной температуры и, соответственно, проекции плазмопаузы во время главной фазы бури. По измерениям на спутнике ERG около магнитного экватора внутренняя граница потоков протонов и электронов была в области квази-дипольного магнитного поля. Согласно моделям IGRF и TS04 граница находилась на $L \sim 2.8-3.1$ и совпадала с экваториальным краем протонного и электронного сияний.

Анализ наблюдений дает основание полагать, что изотропизация потоков энергичных частиц в этом событии была вызвана увеличением радиального градиента ионного давления на широтах экваториальной границы зоны сияний и, соответственно, ростом поперечного тока во внутренней магнитосфере. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 26-27-20104).

ВОЗРАСТАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 21 НОЯБРЯ 2024 ГОДА (GLE76): СПЕКТРЫ И АНИЗОТРОПИЯ

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

Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Иркутск, Россия

ivankov@iszf.irk.ru

В работе исследованы спектры и пространственное распределение солнечных протонов, зарегистрированных в период наземного возрастания интенсивности космических лучей (КЛ) 21 ноября 2024 г. (GLE76). Расчеты выполнены методом спектрографической глобальной съемки с использованием пятиминутных данных мировой сети станций нейтронных мониторов и данных космического аппарата GOES-16. Получены дифференциальные жесткостные спектры и оценена максимальная жесткость ускоренных в окрестностях Солнца протонов (около 3 ГВ). Установлено, что во время события преобладает двунаправленная анизотропия КЛ.

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХОПАСНЫХ ВОЗРАСТАНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

**Крякунова О.Н.¹, Белов А.В.², Сейфуллина Б.Б.^{1,3}, Абунин А.А.²,
Абунина М.А.², Шлык Н.С.², Цепаккина И.Л.¹, Николаевский Н.Ф.¹,
Койчубаев Р.Е.^{1,4}**

¹Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Москва, г. Троицк, Россия

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

krolganik@yandex.ru

По данным за 1987-2025 гг. измерений потоков магнитосферных электронов с энергией >2 МэВ на геостационарных орбитах, скорости солнечного ветра и геомагнитной активности составлен каталог сверхопасных электронных возрастных, в которых флюенс электронов превышает 10^9 частиц·см⁻²·стер⁻¹·день⁻¹. Для этих событий рассчитаны значения максимального флюенса во время электронных возрастных, суммарный флюенс в событиях и продолжительность электронных возрастных. Экстремальные значения суточного флюенса электронов и общего флюенса за весь период возрастания наблюдались во время события 28 июля – 5 августа 2004 г. В этом событии максимальный за время события флюенс составил $9,3 \cdot 10^9$ частиц·см⁻²·стер⁻¹·день⁻¹. Во время события наблюдалась экстремальная магнитная буря с $A_p=300$ и $K_p=9^-$. Перед сверхопасными возрастаниями магнитосферных электронов наблюдаются значительные межпланетные и магнитосферные возмущения, и их мощность растет с увеличением порога флюенса.

Для событий каталога сверхопасных электронных возрастных определены возмущения межпланетного пространства, после которых начинаются возрастания электронов. Для этих межпланетных возмущений определены их солнечные источники. Получено, что в подавляющем большинстве событий сверхопасных электронных возрастных солнечным источником или одним из источников межпланетных возмущений являются высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23489700).

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

Мaurчев Е.А., Шлык Н.С., Абунина М.А., Диденко К.А.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

maurchev@izmiran.ru

В этой работе рассмотрен комплексный подход к прогнозированию потоков протонов солнечных космических лучей и оценке их влияния на скорость ионизации атмосферы Земли с использованием численного моделирования. Модель прогнозирования основана на каталоге солнечных протонных событий, который связывает рентгеновские вспышки, корональные выбросы массы и протонные возмущения. Спектры первичных протонов были восстановлены по дифференциальным энергетическим каналам GOES при помощи стандартной аппроксимации. Моделирование прохождения протонов и частиц вторичных космических лучей через атмосферу Земли, а также оценка скорости ионизации были выполнены при помощи программного кода RUSCOSMICS, реализованного на базе пакета для разработки программ GEANT4. Параметризация геометрии атмосферы Земли выполнена с использованием модели NRLMSISE-00, а нижний порог дифференциального энергетического спектра солнечных протонов определялся исходя из выбранной жесткости геомагнитного обрезания ($R = 0,17$ ГВ). Полученные в ходе работы результаты демонстрируют хорошее соответствие между прогнозируемыми и наблюдаемыми спектрами и показывают, что максимумы ионизации солнечными космическими лучами наблюдаются на высотах 50-55 км из-за относительно мягких энергетических спектров. Предлагаемый метод обеспечивает эффективный с точки зрения вычислений инструмент для решения задач прогнозирования в области оценки космической погоды и радиационной безопасности.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА НИЗКИХ ПОЛЯРНЫХ ОРБИТАХ

Мягкова И.Н.¹, Белова А.О.², Богомолов А.В.¹

¹НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Физических факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

irina@srd.sinp.msu.ru

Прогнозирование явлений космической погоды играет все более важную роль, поскольку человеческая деятельность становится всё теснее связана с космической отраслью, как из-за растущих требований к надежной связи, необходимой для навигации и робототехники, так и вследствие миниатюризации электронных компонентов космических аппаратов (КА). Прогнозирование радиационных условий на полярных орбитах представляет собой отдельную задачу, поскольку в отличие от геостационарных орбит последствия разных явлений космической погоды проявляются по-разному на разных участках таких орбит.

Потоки солнечных космических лучей (СКЛ) на низких орбитах регистрируются в полярных шапках. Это позволяет по оперативным данным (или данным прогноза) о потоках СКЛ с геостационарной орбиты и расчетной орбите КА осуществлять краткосрочный прогноз потоков СКЛ для этого КА при прохождении им полярных шапок.

Если высокий поток СКЛ приходится на главную фазу магнитной бури, то область, подвергающаяся воздействию СКЛ имеет существенно большую площадь, чем в геомагнитно-спокойное время. Положение экстремальной границы проникновения протонов СКЛ на главной фазе магнитной бури может быть оценено как функция значений K_p и Dst -индексов [1], при использовании данных прогноза K_p и Dst с горизонтом в несколько часов такая задача может быть решена.

Прогнозирование потоков внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) на низких орбитах – также отдельная задача, поскольку анализируя данные только на геостационарной орбите, мы не можем быть уверены, что наблюдаемое изменение интенсивности ВРПЗ является реальным уменьшением потоков электронов, а не смещением ВРПЗ за пределы геостационарной орбиты. Авторами разработана модель прогнозирования суточных флуенсов электронов ВРПЗ на низкой полярной орбите [2].

Литература

1. Мягкова И. Н. и др. Исследование экстремальных значений положения границы проникновения протонов СКЛ в магнитосферу Земли во время магнитных бурь 2001-2005 гг. // Известия РАН. Т. 73. № 3. С. 339–341. 2009.
2. Белова А.О и Мягкова И.Н. Прогнозирование потоков электронов на круговой полярной орбите: отбор предикторов // Солнечно-земная физика. Т. 11. № 3. С. 77–87. 2025.

СПЕКТРЫ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ НОЯБРЯ 2025 ГОДА ПО ДАННЫМ GOES И КАЛИБРОВКА HXR-ДЕТЕКТОРОВ ART-XC

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

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

v.ozheredov@cosmos.ru

В каждый момент времени на основе 14 протонных каналов GOES оценивается динамический дифференциальный спектр в диапазоне 1-390 МэВ методом аппроксимации band function [1] в трех протонных событиях ноября 2025 года. Проверяется соответствие спектров, полученных в каждом протонном событии в первый час после начала солнечного радиоизлучения на частоте 15.4 ГГц, модели длительного стохастического ускорения в слабом среднем электрическом поле [2]. Изучаются вариации спектров протонов в SPE (storm particle event) 11 и 12 ноября 2025 года.

Также мы предполагаем с помощью полученных нами динамических дифференциальных спектров протонов по данным GOES оценить энергетический диапазон и эффективность регистрации протонов, вызывающих отклик в HXR-диапазонах 20-40, 40-60 и 60-120кэВ детекторов ART-XC.

Авторы благодарят В.А. Арефьева, А.Е. Штыковского и А.Д. Самородову и других участников проекта Spectr-RG за предоставление данных по ART-XC.

Литература

1. Mewaldt, R.A., Looper, M.D., Cohen, C.M.S. et al. Energy Spectra, Composition, and Other Properties of Ground-Level Events During Solar Cycle 23. Space Sci Rev 171, 97–120 (2012).
2. A.B. Struminsky, V.A. Ozheredov, A.M. Sadovskii, N.S. Shlyk, A.V. Belov, M.A. Abunina, I.Yu. Grigorieva Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than $4 \cdot 10^{-4}$ V/cm, Advances in Space Research, Volume 76, Issue 12, 2025, Pages 7564-7577, ISSN 0273-1177

ФОРБУШ-ЭФФЕКТ 19-25 ЯНВАРЯ 2026 ГОДА: АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА И КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Сейфуллина Б.Б.^{1,2}, Крякунова О.Н.¹, Цепаккина И.Л.¹,
Николаевский Н.Ф.¹, Койчубаев Р.Е.^{1,3}

¹Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан,

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
botanaika.93@gmail.com

Рассмотрено событие Форбуш-эффекта, зарегистрированное в период 19-25 января 2026 г. нейтронным монитором ААТВ (Алматы, Казахстан; 3340 м над уровнем моря; $R = 5.9$ ГВ). Понижение интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) началось 19 января 2026 г. и достигло минимума 20 января, при этом амплитуда снижения составила $\sim 18-20\%$, что позволяет отнести данное событие к большим Форбуш-эффектам. Источником межпланетного возмущения являлась активная область, которая произвела мощную вспышку класса X1.9 (18.01.2026), сопровождавшуюся быстрым корональным выбросом массы (КВМ) со скоростью $\sim 1700-2000$ км/с. Удар межпланетного КВМ наблюдался 19 января и сопровождался резким возрастанием геомагнитной активности. Сопоставление данных нейтронного монитора с межпланетными и геомагнитными параметрами показывает, что наблюдаемое понижение интенсивности ГКЛ связано с прохождением межпланетного возмущения, сопровождавшегося ударной волной и последующей областью КВМ. По данным индекса геомагнитной активности K_p , в период 19-21 января наблюдалась экстремальная геомагнитная буря. В основной фазе бури Земля находилась также в высокоскоростном потоке солнечного ветра из корональной дыры что указывает на наложение межпланетных возмущений различного происхождения. Анализ интенсивности ГКЛ показывает, что основное понижение связано с прохождением ударной волны и области сжатой плазмы, тогда как последующая фаза восстановления определяется влиянием области КВМ на фоне высокоскоростного потока солнечного ветра. Полученные результаты позволяют предположить, что формирование Форбуш-эффектов значительной амплитуды связано с воздействием совокупности межпланетных возмущений, включающих КВМ и высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23489700).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ И ДЛИНЫ НАБОРОВ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ "СИВИЛЛА"

Семёнов М.В.¹, Мягкова И.Н.², Владимиров Р.Д.², Широкий В.Р.²,
Доленко С.А.²

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ
имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)
marksemenov979@gmail.com

Методы машинного обучения (ММО) эффективно решают задачу прогнозирования космической погоды и широко применяются в данной области. Ранее было замечено, что ошибки прогноза таких моделей зависят от положения и величины тренировочного и тестового наборов данных. Эта особенность (вероятно, связанная со сменой фаз солнечного цикла) затрудняет сравнительный анализ эффективности различных методов прогнозирования.

В данной работе представлены результаты применения реализованного авторами пакетного режима для созданной ими ранее системы прогнозирования «СИВИЛЛА» (Система Исследования Взаимосвязей Интеллектуальная Легкообучаемая Лабораторная Адаптивная) для прогнозирования значения потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (РЭ ВРПЗ) на геостационарной орбите с горизонтом 1, 3 и 6 часов, а также 1 сутки и 3 суток для интегральных суточных потоков (флюенсов) РЭ ВРПЗ. Были проведены эксперименты со скользящими тестовыми наборами данных.

На основании полученных данных были построены и проанализированы графики зависимостей качества прогноза от положения и величины тренировочного и тестового наборов для различных моделей машинного обучения и горизонтов прогноза. Подтверждено существенное изменение качественных показателей прогноза в зависимости от положения и величины тестового набора данных.

В работе представлены полученные зависимости и приведен анализ результатов проведенных экспериментов для задач прогнозирования часовых потоков и суточных флюенсов РЭ ВРПЗ. Результаты имеют некоторые особенности, предположительно связанные с отличием характеристик аппаратуры между аппаратами GOES различных серий, данные которых использовались в настоящем исследовании.

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

ПАРАМЕТРЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ

Синевич А.А.^{1,2}, Чернышов А.А.¹, Чугунин Д.В.¹, Могилевский М.М.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия

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

sinevichaa@cosmos.ru

Поляризационный джет (ПД), возникающий в субавроральной ионосферной плазме, представляет собой узкую полосу сильного западного дрейфа ионов на высотах F-слоя ионосферы вблизи границы проекции плазмопаузы. Известно, что генерация ПД зависит от геомагнитной активности, однако параметры ПД во время сильнейших геомагнитных событий на сегодняшний день не изучены. В данной работе исследованы случаи возникновения ПД и их характеристики во время таких экстремальных геомагнитных бурь как Хэллоуинская буря 29–31 октября 2003 года, Ноябрьская буря 20 ноября 2003 года, Буря Дня Святого Патрика 17 марта 2015 года, Буря Дня Победы 10–12 мая 2024 года и Октябрьская буря 10–12 октября 2024 года.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-12-00059.

ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЯ И ШТОРМОВЫЕ ВОЗРАСТАНИЯ — ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия

²ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

astrum@cosmos.ru

Рассмотрены эффекты взаимодействия магнитных структур солнечного ветра (ССВ), разделенных между собой нулем B_x компоненты магнитного поля, в модуляции потоков галактических и солнечных космических лучей (ГКЛ и СКЛ), по данным НМ Москва (<http://cr0.izmiran.ru>) и Монитора радиационной обстановки КА *Спектр РГ* (<https://monitor.srg.cosmos.ru>). Примеры такой модуляции — Форбуш понижения и штормовые возрастания (Storm Particle Events, SPE), наблюдавшиеся в периоды солнечной активности в мае 2024, мае 2025, ноябре 2025 и январе 2026. Под взаимодействием магнитных ССВ имеются ввиду эффекты, связанные с различием скоростей ССВ. Быстрые структуры могут догонять медленные, сжимать их, образовывать токовые слои на границах разной полярности, а в результате пересоединения изменять топологию магнитного поля и скорость ССВ. Наблюдаемые вблизи Земли ССВ можно разделить на две группы: в 1-й — взаимодействие уже произошло (нет догоняющих ССВ), идет разрежение потока, а во 2-й — возможность взаимодействия еще сохранилась (есть догоняющие структуры), идет сжатие и разрежение потока. Размер ССВ одного знака компоненты B_x в L1 (точке измерения параметров ССВ) сопоставим с расстоянием между L1 и L2 (положение КА *Спектр РГ*). При движении ССВ от L1 до L2 со скоростями 350-1000 км/с возможно их взаимодействие. Событие 18-20 января 2026 — 3-е SPE по величине потока протонов $>10\text{МэВ}$ (37000pfu) за всю историю наблюдений, соответствует 1-й группе; лидер по скорости падения и глубине Форбуш понижения. События 9-11 мая 2024, 30 мая - 2 июня 2025 и 9-12 ноября 2025 представляют 2-ю группу. Среди них наибольшим по амплитуде, длительности SPE и энергии протонов выделяется 12 ноября 2025, в котором модулировались солнечные протоны, распространяющиеся на фазе спада 77-го наземного возрастания интенсивности КЛ 11 ноября 2025. Это SPE за пределами орбиты Земли могло стать лидером, если ССВ от вспышки 11 ноября догнало ССВ от вспышек 9-10 ноября 2025.

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ФЛЮЕНСА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ О МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

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

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

nshlyk@izmiran.ru

Возрастания высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов возникают после начала геомагнитных возмущений с запаздыванием в 1-2 дня и являются их следствием [1, 2]. Но, в свою очередь, геомагнитные возмущения – это следствия прихода к Земле межпланетных возмущений. Был проведен обширный анализ данных по поведению суточного флюенса высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов, зарегистрированных на геостационарных спутниках серии GOES (<https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-electron-flux>) за период с 1986 по 2024 гг. Параметры предшествующих электронным возрастаниям геомагнитных и межпланетных возмущений взяты из базы данных FEID (<https://tools.izmiran.ru/feid>). Составлен общедоступный каталог таких событий, включающий две основных группы межпланетных возмущений, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр и корональными выбросами массы.

Наличие запаздывания дает возможность использовать характеристики межпланетного возмущения, зарегистрированные в день начала события, для прогноза суточного флюенса электронов на последующие дни. Наилучшие связи выявлены для следующих параметров: максимальная скорость солнечного ветра, флюенс потока электронов в предыдущие сутки, Ар-индекс геомагнитной активности, максимальная вариация V_z -компоненты ММП. Показано, что вклад их различен для событий, обусловленных высокоскоростными потоками из корональных дыр и корональными выбросами массы. На основе полученных данных разработана эмпирическая модель, позволяющая оценивать ожидаемую максимальную величину суточного флюенса высокоэнергичных электронов на 3-5 дней вперед, используя данные об уже начавшемся межпланетном возмущении. Данная модель проходит апробацию в Центре прогнозов космической погоды ИЗМИРАН.

Литература

1. Baker D., 2001, in Daglis I.A., ed., Space Storms and Space Weather Hazards. Springer Publ., New York, p. 284
2. Kryakunova O. N., Seifullina B. B., Tsepakina I. L., Shlyk N. S., Abunin A. A., Abunina M. A., Belov A. V., Nikolayevskiy N. F. On solar sources of interplanetary disturbances leading to high-energy magnetospheric electron enhancements in geostationary orbit, MNRAS 541, 911–918 (2025) <https://doi.org/10.1093/mnras/staf850>

Секция 5.
Прогнозирование изменений климата и
атмосферных процессов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВТОРИЧНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВОЛН В ТЕРМОСФЕРЕ

Гаврилов Н.М.¹, Кшевецкий С.П.^{1,2,4}, Коваль А.В.¹, Курдяева Ю.А.³

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

²БФУ им. И. Канта, Калининград, Россия

³Северо-западный филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия

⁴ИФА РАН им. А. М. Обухова, Москва, Россия

n.gavrilov@spbu.ru

Возмущения термосферы и ионосферы акустико-гравитационными волнами АГВ требуют учета при прогнозировании динамического и теплового режима верхней атмосферы и условий распространения радиоволн. Для моделирования распространения АГВ от земной поверхности в верхнюю атмосферу использована нелинейная численная модель высокого разрешения. Источники волн в модели задаются в виде первичной плоской монохроматической АГВ, распространяющейся вдоль земной поверхности. Используются профили фонового ветра в средней атмосфере, содержащие критические уровни, вблизи которых происходит усиленное образование вторичных волновых мод. Это усиливает спектральные пики на длинах волн, составляющих $1/2$ и $1/3$ от горизонтальной длины первичной АГВ. Поэтому в мезосфере выше критических уровней амплитуда первичной волны незначительна и спектр состоит из вторичных волновых мод с более короткими, чем у первичной АГВ, горизонтальными длинами волн [1].

В термосфере, вследствие увеличения молекулярной вязкости и теплопроводности, модель демонстрирует обратный переход энергии от более коротких вторичных волновых мод в область меньших волновых чисел спектра АГВ. Такие волны имеют большие вертикальные длины, подвергаются меньшей диссипации и могут распространяться до больших термосферных высот. Амплитуды этих длинных волн могут превышать амплитуду первичной АГВ, рассчитанную при отсутствии генерации спектра вторичных волн вблизи критических уровней в средней атмосфере.

Нелинейные взаимодействия в спектре вторичных волновых мод необходимо учитывать при параметризации динамического и теплового воздействия АГВ в прогностических моделях общей циркуляции и климата верхней атмосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 25-17-00166).

Литература

1. Гаврилов Н. М., Кшевецкий С. П., Коваль А. В., Курдяева Ю. А. Влияние критических уровней на спектры вторичных гравитационных волн в средней и верхней атмосфере. Солнечно-земная физика. 2026. Т. 12. № 1. С. 115-124. 2026

СПЕКТРЫ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗРАСТАНИЯХ, ИЗМЕРЕННЫЕ В ТРЕХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В., Михалко Е.А.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

balabin@pgia.ru

В Апатитах и Баренцбурге с 2009 г. проводится мониторинг электромагнитного излучения, приходящего из атмосферы. Это излучения является мягкой компонентой вторичных космических лучей, возникающих в атмосфере Земли от первичных космических лучей. Отмечаются возрастания потока электромагнитного излучения, связанные с осадками, и достигающие в отдельных событиях 100 % от уровня при ясной погоде. С 2022 г. начаты измерения дифференциального спектра гамма-излучения в диапазоне 0.1-4 МэВ в трех пунктах. Используются спектрометрические сцинтилляционные кристаллы NaI(Tl) размером Ø75х75 мм. Поле зрения спектрометра ограничено свинцовой защитой и соответствует конусу с углом около 90 градусов, обращенным в зенит. Спектрометры прокалиброваны по линиям радионуклидов: К-40, Na-22, Cs-137, Со-60. Разработана методика выделения спектра дополнительного потока, создающего возрастание. Проводились измерения в трех значительно различающихся по геофизическим условиям пунктах: в средних широтах (Тацинская, Ростовская обл.), в субарктической зоне (Апатиты) и в арктической тундре (Баренцбург). В Апатитах и Баренцбурге спектрометры поставлены на непрерывную работу. В Тацинской спектрометр работал в летний период. Указанные пункты различаются по антропогенному воздействию. В радиусе 100 км от Тацинской и Апатитов находятся многочисленные промышленные объекты, плотность населения значительная. Баренцбург удален от населенных и промышленных областей на 1000 км водного пространства.

В Тацинской зарегистрированы спектры гамма-излучения при возрастаниях потока гамма-излучения во время гроз и ливней. Зафиксированы случаи сухих гроз. В Апатитах грозы редки, а возрастания отмечаются летом и зимой при осадках любой формы. За время спектральных измерений в Апатитах накоплены сотни спектров во время возрастаний. В Баренцбурге гроз не наблюдается, возрастания имеют меньшую амплитуду, по этой причине не все возрастания позволяют выполнить спектральные измерения. Проведены сравнение и анализ спектров, полученных во время возрастаний в указанных пунктах. Дополнительный поток излучения, вызывающий возрастание, имеет один и тот же верхний энергетический предел ~2.5 МэВ для всех точек наблюдений. На спектрах присутствуют линии некоторых естественных радионуклидов: К-40, Pb-214, Bi-214. Наблюдается слабая линия аннигиляции позитронов 511 кэВ. Однако, и для базовых спектров (при ясной погоде накануне), и для спектров при возрастании суммарный вклад всех линий в спектр ~10 %, в основном спектр представляет собой континуум с убывающей функциональной зависимостью от энергии. Следовательно, возрастания гамма-излучения обусловлены не присутствием радионуклидов в осадках, а имеют иную природу и, по-видимому, вызваны влиянием метеорологических процессов в атмосфере на генерацию вторичных космических лучей.

АНАЛИЗ ВНУТРИСЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ 22-23 И 24-25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

Диденко К.А.^{1,2}, Маурчев Е.А.¹, Шлык Н.С.¹, Коваль А.В.²,
Ермакова Т.С.^{2,3}

¹ ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

² СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

³ ГГО, г. Санкт-Петербург, Россия

didenko@izmiran.ru

С использованием данных реанализа MERRA-2 [1] проанализированы параметры средней атмосферы: температура и ветер, амплитуды атмосферных планетарных волн (ПВ) с зональными волновыми числами (m) 1 и 2 (ПВ1 и ПВ2). Данные зимних сезонов усреднялись для пар более низких и высоких солнечных циклов (СЦ): 22-23 СЦ, 24-25 СЦ. Получено, что значения среднезональной температуры в мезосфере полярных широт в минимуме 22-23 СЦ превышают температуру в минимуме 24-25 СЦ на 5-15 К в период с ноября по середину марта. В стратосфере наблюдается обратная ситуация. В зимние месяцы в максимуме фиксируются как положительные, так и отрицательные приращения температур во всей стратосфере и нижней мезосфере, причем величины приращений для двух пар СЦ сопоставимы. Положительные приращения стратосферной температуры в марте характерны только для максимума 24-25 СЦ, что сопровождается изменением знака среднезонального ветра.

Вариации температуры и ветра во многом связаны с изменениями распространения планетарных волн. В максимуме 22-23 СЦ ослабление ПВ1 происходит с середины декабря по середину января, а также с конца февраля до начала марта, усиливаясь между этими периодами. Для максимума 24-25 СЦ характерно значительное ослабление ПВ1 в конце ноября – начале декабря, а значительное увеличение – в первой половине марта, сопровождаемое обращением ветра и ростом стратосферной температуры. Такое согласованное поведение параметров в 24–25 СЦ указывает на черты динамического перехода стратосферы к летнему режиму. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших исследований для корректировки атмосферных модельных экспериментов, поскольку характеристики максимумов солнечных циклов могут существенно различаться; учет этих различий повышает точность моделирования динамики атмосферы и улучшает климатические модели.

Литература

1. Gelaro R. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J. Clim. V. 30. N 13. P. 5419–5454. 2017.

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ ИЗ КОСМОСА

Карелин А.В.^{1,2}, Молодцов К.А.³, Пулинец С.А.², Хегай В.В.¹

¹ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³АО ЦНИИмаш, г. Королёв, Россия

avkarelin@izmiran.ru

Представлено описание модифицированного метода дистанционного зондирования предвестников землетрясений и вулканических извержений (ПЗВИ) из космоса, развитого на основе молекулярно-кинетической теории конденсации в атмосфере и показана возможность его применения в задачах обнаружения краткосрочных ПЗВИ на платформе малых космических аппаратов, созданных по принципу «аппарат-прибор».

Количественным показателем влияния внешних воздействий накануне землетрясения или вулканического извержения на термодинамические параметры атмосферы является поправка к химическому потенциалу паров воды в атмосфере ΔU [1-3]. Величина поправки к усредненному химическому потенциалу паров воды в атмосфере по данным метеонаблюдений, измеряемая в электрон-вольтах (эВ), может оцениваться по формуле [1]:

$$\Delta U = 5,8 \cdot 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln \left(\frac{100}{H} \right), \quad (1)$$

где T_g – температура воздуха, °С; H – относительная влажность, %.

Сочетание систематического мониторинга пространственно-временной динамики поведения температуры и относительной влажности воздуха с анализом динамики поправки к химическому потенциалу паров воды в атмосфере, может позволить с достаточно высокой вероятностью предсказать сильные землетрясения и вулканические извержения.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственной академии наук по теме: Исследование солнечной активности и физических процессов в системе "Солнце-Земля" (рег. № 1021100714181-3).

Литература

1. Боярчук К.А., Карелин А.В., Широков Р.В. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы. М.: ФГУП "НПП ВНИИЭМ", 2006. 203 с.
2. Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere. New Concepts. - Springer, 2022. 294 с.
3. Карелин А.В., Молодцов К.А., Хегай В.В., Модифицированный метод дистанционного зондирования предвестников землетрясений из космоса // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2024. Т. 198. № 1. С.26-31.

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ АНОМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.Р.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

kostin@izmiran.ru

Рассмотрены корреляции аномального развития тропических циклонов (ТЦ) и прохождение Земли через максимумы метеорных потоков. Показано, что аномальное развитие отдельных ТЦ в 2025 (не предсказанных метеопрогнозами) происходило с запаздыванием в 2-6 часов после сильных землетрясений $M > 7.0$ [1]. Сопоставлены гистограммы сильных землетрясений в каждый день за последние 100 лет с прохождением Земли через метеорные потоки. В частности, форшок 9 марта 2011 $M = 7.3$, перед событием на Фукусиме, сопровождался зарождением циклона 50Q около Бразилии, а сильнейший удар $M = 9.1$ произошел 11 марта. Резкий излом траектории 50Q был зафиксирован через ~ 6 часов. Все эти события происходили при прохождении Земли через максимум метеорного потока Alpha Leonids.

Интенсивность ТЦ Kiko, Ragasa и Humberto в сентябре, Halong и Melissa в октябре, Kalmaegi и Fung-wong в ноябре 2025 превышала 200 км/ч. Показано, что они развивались синхронно. В Индонезии, Гонконге, Тайване и на Филиппинах выпало катастрофическое количество осадков. Было эвакуировано около 2-х миллионов людей.

Аномальное развитие ТЦ и сильнейшее землетрясение в дни конференции Прогноз-2026, наиболее вероятно, произойдет 26 мая при прохождении Theta Serpentids. Данный вывод следует из развития гипотезы академика И.И. Ткачева с сотрудниками ИЯИ РАН о темной материи, состоящей из аксионов, которые могут образовывать Бозе-астероиды размером $R \sim 100$ км [2]. Такие астероиды, сталкиваясь с кометами, могут разрушить их и двигаться вместе с метеорными потоками. Проходя сквозь Землю, их гравитационное воздействие вызывает землетрясения и с запаздыванием, из-за более медленной самоорганизации атмосферы, аномальное развитие ТЦ.

Литература

1. Костин В.М., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. О возможном триггере резкого изменения параметров тропических циклонов: Материалы 23-й международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» / Электронный сборник материалов конференции. Москва. ИКИ РАН. 2025. С. 96. <https://doi.org/10.21046/23DZZconf-2025a>
2. Levkov D.G., Panin A.G., Tkachev I.I. Gravitational Bose-Einstein condensation in the kinetic regime // Physical Review Letters. 2018. V. 121. No 15. P. 151301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.1513

ГЛОБАЛЬНАЯ ФОТОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ CHARM-DE АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ДЛЯ ВЫСОТ 0-130 КМ

Криволуцкий А.А., Банин М.В., Вьюшкова Т.Ю.

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО), г. Москва, Россия

krivolutsky@mail.ru

Численная фотохимическая глобальная нестационарная модель **CHARM-DE** (Chemical Atmospheric Research Model with D and E regions). Модель является развитием основной версии **CHARM /1/**, описывающую химию нейтральных составляющих. Новая модели описывает взаимодействие **127** нейтральных (озон и другие составляющие) и заряженных химических составляющих (включая электронную концентрацию), участвующих в **250** фотохимических реакциях. Модель охватывает диапазон высот от поверхности Земли до **высоты 130 км**, куда попадают области **D и E** ионосферы. Ионизация обусловлена галактическими космическими лучами и ультрафиолетовым излучением Солнца на длине волны солнечного излучения Лайман-альфа. Разрешение по пространству: по широте **10 град.**, по долготе **5 град.** По высоте **1 км**. Шаг по времени – **10 минут**. Приводятся результаты расчетов для невозмущенных условий.

Литература

1. Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Банин М.В. Глобальная трехмерная фотохимическая модель **CHARM**, М.: ГЕОС, 2021.

ДОЛГО-ПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА C14: ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

tvkuz3@gmail.com

Рассмотрены изменения воздействия Солнца на околоземное космическое пространство и планету Земля на длительных и относительно коротких интервалах, закономерности их развития и взаимосвязанность, возможный физический механизм. На примере данных об изменении содержания атмосферного радиоуглерода C14 (далее вариаций C14) за 4.5 тысяч лет рассмотрены возможные причины указанных изменений. Для расчета спектра вариаций C14 применялся Метод Глобального Минимума, который позволяет выделять самосогласованно тренд и нестационарные гармоники без заполнения отсутствующих данных какими-либо значениями [1]. Получена сумма тренда и долго-периодной части спектра вариаций C14 с самыми большими амплитудами. Проведен анализ периодов спектра вариаций C14 для получения их связи с известными циклами затмений и с периодами движения в системе Солнце-Земля-Луна и Солнце-планеты (Юпитер, Сатурн, Венера). Показано, что самые большие амплитуды у нестационарной части спектра с самыми большими периодами. Показано, что периоды спектра включают также целые числа периодов известных циклов затмений и периодов, связанных с движениями Солнца, Земли, Луны и Венеры, Юпитера, Сатурна, что приводит к известным резонансам. Для объяснения результатов привлечен предложенный нами ранее физический механизм. На основе аналитического решения нелинейного дифференциального уравнения для дискового динамо нами была показана возможность генерации больших нестационарных магнитных полей, вызванных малыми гармоническими колебаниями диссипативного параметра динамо [2]. Причиной этих малых колебаний могут быть малые периодические приливные силы планет [3].

Литература

1. Tsirulnik L.B., Kuznetsova T.V., Oraevsky V.N. Spectral method of global minimum and its application to problems of heliospheric and planetary physics. Planet. Space Sci. 1997. vol. 45, pp. 241-250.
2. Kuznetsova T.V. and Tsirulnik L.B. Climate oscillations and abrupt changes in C14 data. Adv. in Space Res. 2004, vol. 34, pp. 426-431.
3. Kuznetsova T.V. Long-term variations in atmospheric carbon C14 content: influence of cosmic factors. 2022. DOI: [10.13140/RG.2.2.31481.13924](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31481.13924)

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕЗОННЫЙ ХОД ПОЛЯРНОГО МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА (60 КМ)

Куликов Ю.Ю.¹, Демин В.И.², Демкин В.М.³, Кириллов А.С.²,
Рыскин В.Г.¹

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия;

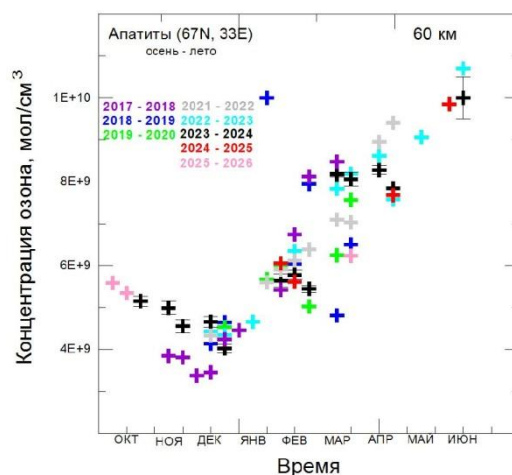
²Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия;

³Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород, Россия

yuyukul@appl.sci-nnov.ru

Обсуждаются результаты длительных наземных микроволновых наблюдений озона средней атмосферы в Апатитах (67N, 33E) в зимне-весенние сезоны, начиная с 2017 года. В измерениях был использован мобильный микроволновый спектрометр с рабочей частотой 110.8 ГГц. Прибор регистрирует вариации O_3 с 15-ти минутным разрешением на высотах от 22 до 60 км. В измерениях при низкой солнечной активности обнаружено, что переменность концентрации мезосферного озона (60 км), которая возникает из-за фотохимических процессов, может значительно уступать вариациям O_3 , которые вызваны динамикой – внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) и полярными вихрями [1]. Считается, что солнечная активность оказывает существенное влияние на полярный мезосферный озон, вызывая его значительное истощение на высотах около 60 км во время геомагнитных бурь. Энергичные электроны проникают в атмосферу, запуская химические реакции, способные уменьшить концентрацию O_3 , причем влияние высокой активности может превышать сезонные колебания [2]. В результате микроволновых наблюдений в течение нескольких лет обнаружено, что сезонные (осень-лето) изменения концентрации полярного мезосферного озона более чем 100% (см. рисунок).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (FFUF-2024-0034).



Литература

1. Куликов Ю.Ю., А.Ф. Андриянов, В.И. Демин и др. Длительные микроволновые наблюдения озона средней атмосферы в Апатитах в течение трех зим. Геомагнетизм и Аэронавигация, Т. 63, № 5, С. 644-656, 2023.
2. Miyoshi Y. et al. Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsation aurorae. Scientific Reports. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02611-3>. 2021

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСЛОИСТЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СТРУКТУР В АТМОСФЕРЕ

Кшевецкий С.П.¹, Курдяева Ю.А.², Куличков С.Н.¹, Гаврилов Н.М.³

¹*ИФА РАН, г. Москва, Россия*

²*Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*

³*СПбГУ, г. Санкт-Петербург – Петродворец, Россия*

yakurdyayeva@wdizmiran.ru

Предложен метод численного моделирования тонких анизотропных структур в атмосфере с использованием нелинейной модели высокого разрешения AtmoSym. В основе разработанного подхода лежит использование экспериментальных данных о пространственно-временной изменчивости тонкой структуры верхней атмосферы и линейной теории внутренних гравитационных волн. Это позволяет построить гидродинамические поля, аппроксимирующие реальные неоднородности. Поля вводятся в источники нелинейной модели для возбуждения собственных атмосферных волновых колебаний с требуемыми параметрами.

Результаты расчетов показали, что моделируемые анизотропные тонкослоистые структуры носят квазистационарный характер. Масштабы, формы и время их существования соответствуют известным экспериментальным данным. Показано, что нелинейные взаимодействия различных составляющих волнового спектра могут приводить к генерации вторичных мод. Это может вызывать постепенную эволюцию тонкослоистых образований в атмосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 25-17-00166) и в рамках государственного задания ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010)

ОТКЛИК СРЕДНЕЙ ВЫСОКОШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСЫПАНИЯ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

**Миронова И.А.¹, Доронин Г.Г.¹, Кочнева Э.М.¹, Базилевская Г.А.²,
Миронов А.Д.¹ и Розанов Е.В.¹**

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

² Физический институт им. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия

i.a.mironova@spbu.ru

Оценки образования озон-разрушающих компонент атмосферы и разрушения мезосферного озона будут даны во время геомагнитных возмущений и солнечных эруптивных событий с использованием одномерной фотохимической радиационно-конвективной модели с учетом ионной химии, а также с использованием наблюдений со спутника MLS (данные по озону, HO_2 и HNO_3). В докладе предполагается показать последние результаты по исследованию отклика высокоширотной атмосферы на высыпания энергичных частиц, как энергичных электронов, так и протонов во время геомагнитных возмущений 2024, 2025 и 2026 гг., а также 2003 гг. связанных с эруптивными событиями.

В качестве заключения, на основе данного исследования, делается прогноз изменения озон-разрушающих компонент атмосферы и разрушения мезосферного озона в зависимости от экстремальных событий космической погоды.

Работа выполнена в рамках государственного задания СПбГУ
№ 124032000025-1.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Пулинец С.А.¹, Малинович-Миличевич С.²

¹Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва, Россия

²Институт географии им. Йована Цвийича Академии наук и искусств, г. Белград, Сербия
pulse@cosmos.ru

В работе [1] опубликованы результаты статистических исследований воздействия солнечной активности и потоков галактических космических лучей (ГКЛ) на инициацию ураганов в регионе Северной Атлантики вокруг Мексики. В частности, было показано, что сильные ураганы категории 5 возникают через 2 суток после Форбуш-понижения космических лучей.

Одним из физических механизмов, приводящих к увеличению разности температур между поверхностью океана и температурой тропопаузы является снижение выделения скрытой теплоты вследствие уменьшения интенсивности ионизации атмосферы на уровне тропопаузы из-за уменьшения потока ГКЛ во время форбуш-понижений вследствие развития геомагнитных бурь. В частности, при формировании урагана Катрина было экспериментально установлено понижение температуры на $\sim 9^\circ \text{C}$ [2].

В ходе дальнейших более детальных исследований [3] были проанализированы тринадцать неперекрывающихся сильных ураганов (категории 4 и 5) в течение 24-го солнечного цикла. Результаты показывают, что изменения солнечной активности и интенсивности КЛ, как правило, предшествуют появлению и усилению самых мощных ураганов Северной Атлантики. Минимум ГКЛ в среднем наблюдается за 7 дней до пика интенсивности урагана. Максимум числа солнечных пятен наблюдается за 17 дней до пика интенсивности урагана, т.е. за 10 дней до минимума ГКЛ. Полученные результаты позволяют осуществлять предварительный прогноз интенсификации циклонической активности в Северной Атлантике.

Работа выполнена при поддержке Госзадания по теме УПРАВЛЕНИЕ FFWG-2022-0005, Гос.рег. № 122042500013-4.

Литература

1. Pérez-Peraza, J., Kavlaikov, S., Velasco, V., Gallegos-Cruz, A., Azpra-Romero, E., Delgado-Delgado, O., Villicana-Cruz, F. Solar, geomagnetic and cosmic ray intensity changes, preceding the cyclone appearances around Mexico. *Adv. Space Res.* 42, 1601–1613. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4>.
2. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А., О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина, *Доклады Академии наук*, 422, №5, 244-249, 2008
3. Malinović-Miličević S., Pulinets S., Radovanović M.M. *et al.* Connection of solar and geomagnetic activity with the formation and intensification of the strongest North Atlantic hurricanes. *J Earth Syst Sci* 135 81, 2026. <https://doi.org/10.1007/s12040-026-02793-5>

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ПРОГНОЗАХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ И КЛИМАТОЛОГИИ, ЭКОНОМИКЕ, МЕДИЦИНЕ: ДОСТОВЕРНОСТЬ

Рагульская М.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

ra_mary@mail.ru

В последние два десятилетия одним из проявлений научной моды стало активное привлечение солнечных процессов для объяснения разнообразных эффектов в оболочках Земли, а также социальных и биосферных явлениях. В докладе рассматривается эффективность прогнозов солнечной активности и проявлений ее динамики в солнечно-земных связях, в атмосферных и экономических процессах, в прогнозах землетрясений, климатологии и медицине. Обсуждается, что большинство таких «прогнозов» не являются прогнозами, а представляют собой выборочную подгонку уже имеющихся рядов данных под 11-летнюю цикличность (часто даже без учета реальной динамики солнечной активности в 20-21 веке), например [1, 2]. При этом существует и обратный эффект, когда анализ экспериментальных данных действительно выявляет солнечную периодику и выраженные связи с параметрами космической погоды в тех исследованиях, где изначальная постановка задачи не предполагала поиска солнечно-земных связей [3-6].

Литература

1. Белкин В. А. Геомагнитный индекс как опережающий индикатор процентной ставки ФЗС (1955-2025) : роль индекса УФ-излучения, баланса серотонина и мелатонина, а также коллективного оптимизма – пессимизма. DOI:10.13140/RG.2.2.13757.01769/4
2. Новиков В. А., Новикова М. В. Воздействие сильных вариаций геомагнитного поля на микросейсмичность будущего очага землетрясения// Труды 21-й конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». С. 368. Москва. 2026.
3. Курганский М. В. Какова вероятность прохождения смерчей (торнадо) через объекты на земной поверхности? // Международная конференция «Физика атмосферы и климата». С. 26. Kislovodsk. 2026.
4. Рагульская М. В., Обридко В. Н., Розанов А.Ю. Солнечная активность, геомагнитная активность, космические лучи и атмосферные воздействия как биотропные и эпидемиологические факторы // Геомагнетизм и аэрономия. Т 66. №1.С. 21-40. 2026.
5. Медведева И. В., Ратовский К. Г. Многолетние изменения характеристик верхней атмосферы в Восточной Сибири: зависимость от солнечной, геомагнитной и атмосферной активности // Международная конференция «Физика атмосферы и климата». С. 26. Kislovodsk. 2026.
3. 6. Ожередов В. А., Бреус Т. К. Взаимосвязь потери внимания при стрессе с космической погодой в 25-м цикле солнечной активности // Труды 21-й конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». С. 305. Москва. 2026.

Секция 6.
Обсерватории, детекторы и базы данных

МАГНИТНЫЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ХРОМОСФЕРНЫХ ВОЛОКОН

Березин И.А.^{1,2}, Тлатов А.Г.^{1,2}

¹*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия*

²*Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, Элиста, Россия*
iberalex@ya.ru

На Кисловодской Горной Астрономической Станции (ГАС) ГАО РАН ведутся длительные синоптические наблюдения крупномасштабного магнитного поля на магнитографе СТОП и хромосферных волокон в линии Н-альфа. Проведён анализ положений волокон и магнитных полей над линиями смены полярности магнитного поля (polarity inversion lines, PIL). по данным PFSS-моделирования за период 2014–2026 гг. Рассчитаны профили индекса изменения поперечного магнитного поля с высотой n (decay index) и соответствующие критические высоты достижения различных пороговых значений n для широкого набора точек на Солнце, включая как активные, так и спокойные области. Выполнено сопоставление с синоптическими картами волокон. Результаты указывают на отсутствие прямой и однозначной связи между критической высотой и наличием волокна в данной области PIL. Области с волокнами демонстрируют широкий разброс значений критической высоты, который перекрывается с распределением для областей без волокон. Таким образом, сам факт достижения критического порога n не является ни необходимым, ни достаточным условием для формирования волокна. Скорее, формирование и устойчивое существование волокон определяется более тонкими характеристиками профиля магнитного поля: крутизной его спада или роста на характерных высотах, абсолютной величиной и направлением поперечной компоненты, и другими.

Работа выполнена при частичной поддержке в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ от 16.01.2026 г. № 075-03-2026-375.

СИСТЕМА ИОНОСФЕРНОГО МОНИТОРИНГА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ И РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Буряк Н.В.^{1,2}, Вилутис А.Р.², Носиков И. А.²

¹*БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия*

²*КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*

bnikolay2005@gmail.com

Расширение парка инструментальных средств наблюдений в обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН обуславливает необходимость разработки системы передачи, хранения и первичной обработки данных, поступающих в реальном времени. В настоящей работе представлена реализация такой системы, обеспечивающей возможность предварительного анализа ионосферных и магнитных возмущений в режиме реального времени. Приводятся результаты наблюдений, выполненных в периоды геомагнитных бурь 2025 и 2026 годов. Предложенный подход позволяет интегрировать данные всех типов наблюдений, включая оптические и метеорологические. Дополнительно к натурным данным демонстрируются возможности моделирования параметров ионосферы и условий ионосферной радиосвязи.

Работа поддержана грантом РНФ № 25-77-00033 (<https://rscf.ru/project/25-77-00033/>).

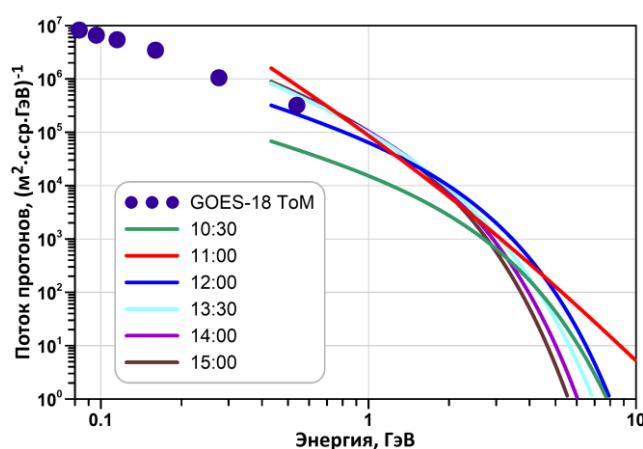
НАБЛЮДЕНИЕ И АНАЛИЗ GLE77

Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

balabin@pgia.ru

Во время мощной вспышки класс 3В (класс X5.1 в рентгеновском диапазоне) на Солнце 11.11.2025 произошла генерация солнечных космических лучей (СКЛ), которые вызвали наземное возрастание. Ему присвоено обозначение GLE77. На мировой сети нейтронных мониторов (НМ) зарегистрировано возрастание потока космических лучей, превысившее 100 %. Самую большую амплитуду возрастания показали НМ Наин (Канада) ~150 %. Подобного мощного GLE не было с 2012 г. О наличии в СКЛ протонов до ~10 ГэВ указывает следующее: НМ в Мехико и Пекине показали возрастания 2-5 %. Для Пекина значение жесткости обрезания $R_C = 8.8$ ГВ, для Мехико $R_C = 7.4$ ГВ. Среднеширотные НМ показали возрастание в 15-20 %. Наличие сильной анизотропии СКЛ на начальной фазе GLE (до 11 UT) следует из того, что возрастания на НМ Апатиты и Оулу, имеющих близко расположенные асимптотические конусы приема, различаются почти в два раза. На основе данных мировой сети НМ выполнено решение обратной задачи СКЛ, получены спектры и питч-угловое распределение потока СКЛ за пределами магнитосферы Земли в последовательные моменты времени с 10:30 до 15:00 UT. На рисунке и в таблице представлены результаты решения.



Спектры показывают хорошее согласие с данными прямых измерений на GOES-18. До 10:35 UT спектр имел экспоненциальную форму, к 11:00 UT спектр приобретает степенную форму, а с 11:30 UT снова становится экспоненциальным до конца рассматриваемого периода, но с существенно меньшим значением E_0 .

Время, UT	E_0/γ , ГэВ	J_0 , ($\text{м}^2 \text{с}$ $\text{ср ГэВ})^{-1}$
10:20	0.74	$1.0 \cdot 10^4$
10:25	0.69	$2.1 \cdot 10^4$
10:30	0.73	$2.0 \cdot 10^4$
10:40	-4.2	$2.7 \cdot 10^4$
10:55	-4.2	$1.2 \cdot 10^5$
12:00	0.65	$2.1 \cdot 10^5$
13:30	0.54	$3.4 \cdot 10^5$
14:00	0.45	$4.6 \cdot 10^5$
15:00	0.40	$5.6 \cdot 10^5$

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.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ
17-19 МАРТА 2015 г. ОБЪЕДИНЕННЫМ КОДОМ ГСМ ТИП – GAMERA**

**Дивин А.В.¹, Клименко М.В.², Бессараб Ф.С.², Гордеев Е.³,
Розанов Е.В.¹, Меркин В.Г.⁴, Соратия К.А.⁴**

¹СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

²КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

³СПб ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Лаборатория прикладной физики, Лорел, США

a.divin@spbu.ru, andrey.div@gmail.com

Численное моделирование в настоящее время является важным инструментом исследования космической погоды. Глобальные МГД модели используются для предсказания динамики системы ионосфера-магнитосфера. В данной работе проводится верификация сшивающей модели термосферы и ионосферы Земли ГСМ ТИП [1] с МГД моделью магнитосферы GAMERA/REMIX [2]. Трёхмерная модель ионосферы ГСМ ТИП рассчитывает трёхмерную эволюцию плотности, скорости, температуры и состава различных компонент. Трёхмерная модель GAMERA передает в модель ГСМ ТИП параллельные токи и информацию о высыпаниях электронов (плотность, средняя энергия); обратно ГСМ ТИП возвращает в GAMERA распределение холловской и педерсеновской проводимостей. Объединенная модель используется для изучения динамики магнитной бури 17–19 марта 2015 года, для которой уже имеется значительный объём численных и экспериментальных данных. Отклик ионосферы и магнитосферы в вычислениях верифицируется путём анализа параллельных токов, кросс-полярного потенциала, джоулева нагрева, полной энергии высыпающихся электронов и полного электронного содержания (ТЕС). Рассчитанные значения хорошо согласуются с другими опубликованными численными результатами, а также с эмпирическими соотношениями. Полный ионосферно-магнитосферный ток в модели оказывается близок к экспериментальным значениям, измеренным проектом AMPERE.

Работа выполнена при поддержке при поддержке госзаказа Санкт-Петербургского государственного университета (грант №124032000025-1).

Литература

1. Klimenko M. V. et al. Numerical simulation of the electric field and zonal current in the Earth's ionosphere: The dynamo field and equatorial electrojet // Geomag. and Aeronomy. Vol. 46, N. 4. 2006.
2. Zhang, B. et. al. GAMERA: A three-dimensional finite-volume MHD solver for non-orthogonal curvilinear geometries // The AJSS, Vol. 244(1), 20. 2019

РЕГИСТРАЦИЯ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЯ 19 ЯНВАРЯ 2026 Г. НА УСТАНОВКАХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НЕВОД

**Евстафьева Д.Д., Волков Е.П., Громушкин Д.М., Дмитриева А.Н.,
Компаниец К.Г., Мишутина Ю.Н., Шутенко В.В., Яшин И.И.**

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

DDEvstafeva@mephi.ru

Экспериментальный комплекс НЕВОД (ЭК НЕВОД) расположен на территории НИЯУ МИФИ в Москве. В его состав входят несколько установок, способных регистрировать потоки частиц на поверхности Земли, на которые оказывают влияние различные проявления солнечной активности. К этим детекторам относятся мюонный годоскоп УРАГАН [1], сцинтилляционный мюонный годоскоп (СцМГ) [1], а также нейтронные детекторы (ПРИЗМА [2] и «Нейтрон» [1]). Перечисленные установки регистрируют различные компоненты вторичных космических лучей под разной толщиной поглотителя, что влияет на их диапазон чувствительности к регистрируемым вариациям потоков частиц. Это позволяет определять не только интегральные характеристики детектируемых событий, но и особенности в соответствующих энергетических диапазонах.

Возможности ЭК НЕВОД в изучении влияния солнечной активности на поток вторичных космических лучей представлены на примере анализа Форбуш-понижения (ФП) 19 января 2026 года. Это событие является одним из самых сильных за 25 солнечных цикл. Амплитуда данного ФП в мюонных детекторах составила примерно 10%, а в нейтронных установках ~ 20%. Энергетический спектр ФП оценен с помощью мюонных годоскопов, которые позволяют регистрировать изменения потока частиц в разных диапазонах зенитных углов. Зависимость характеристик рассматриваемого Форбуш-понижения от толщины поглотителя получена с помощью нейтронных детекторов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей высоких энергий», № FSWU-2026-0011).

Литература

1. Амельчаков М.Б. и др. Экспериментальный комплекс НЕВОД / Под ред. А.А. Петрухина, С.С. Хохлова. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. 260 с.
2. Amelchakov M.B. et al. The PRISMA-36 array for studying variations of the thermal neutron flux // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2025. V. 1076. Art. no. 170547.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙКИ ПРИЕМНИКОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ СПУТНИКОВОЙ ЛУЧЕВОЙ ТОМОГРАФИИ

Зверев М.А.^{1,2}, Падохин А.М.³, Книжин С.И.^{1,2}, Лебедев В.П.²

¹*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

²*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

³*Московский государственный университет, г. Москва, Россия*

mikhail.zverev.90@mail.ru

Как известно, крупномасштабные и мелкомасштабные неоднородности ионосферной плазмы оказывают значительное влияние на качество функционирования систем спутниковой навигации (ГНСС), радиосвязи и радиолокации. В отличие от большинства локальных методов лучевая радиотомография (РТ) ионосферы позволяет восстанавливать глобальное распределение электронной концентрации с высоким пространственным разрешением при относительно низкой стоимости приемной системы спутниковых сигналов [1]. Задача лучевой РТ сводится к восстановлению электронной концентрации по интегральным измерениям полного электронного содержания (ПЭС) вдоль набора лучей “спутник–приемник”. Математически данная задача сводится к решению системы линейных уравнений при помощи итерационных методов (ART, DART и др.), требующих априорную информацию о фоновой структуре ионосферной плазмы [1]. В связи с недостатком ракурсов просвечивания исследуемой среды применимость данного метода ограничена “некорректностью” решения обратной задачи и существенно зависит от геометрии расположения приемных пунктов (угол покрытия и плотность элементов приемной системы) и выполнения гипотезы “вмороженности” среды [1]. В данной работе при помощи численного моделирования были сформулированы требования к оптимальной конфигурации приемной наземной инфраструктуры в составе научно-исследовательского комплекса ИСЗФ СО РАН, позволяющей восстанавливать потенциальную электронную концентрацию (ее градиенты и вариации), а также пространственные масштабы локальных плазменных неоднородностей и перемещающихся ионосферных возмущений. Для синтеза апертуры по плоскости излучения использовались параметры орбиты отечественной гелиофизической группировки спутников “Ионосфера-М”.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Задание № FZZE-2026-0006).

Литература

1. Kunitsyn V. E. et al. Ionospheric Tomography // Berlin: Springer-Verlag, 2003, 260p.

ИЗМЕРЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБСЕРВАТОРИИ МОСКВА (ИЗМИРАН) И ЕЁ ПУНКТАХ НАБЛЮДЕНИЯ

Канониди К.Х.

ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия,

kkkh@izmiran.ru

Проведение измерений геомагнитного поля в России неразрывно связано с исследованиями, проводимыми в ИЗМИРАН. С его участием создавались геомагнитные обсерватории и пункты наблюдения [1, 2]. Со временем некоторые обсерватории и пункты наблюдения прекращали работу, взамен появлялись новые. Изменялись измерительные приборы и способы регистрации данных. Появлялись новые требования к самим данным.

В докладе рассматривается оборудование, и действия сотрудников обсерватории Москва, при проведении абсолютных магнитных измерений в настоящее время. Показано их участие в процессе измерений, и предпринимаемые в обсерватории шаги для автоматизации абсолютных геомагнитных измерений. Приводится форма представления данных и возможность их получения.

Приводится сравнение магнитометров различных типов, работающих в обсерватории. Сравниваются их технические параметры и результаты измерения.

Обсерватория Москва с 1972 г. координирует работу пункта наблюдения ИЗМИРАН в деревне Ваймуша, Пинежского района, Архангельской области. Здесь работают магнитометры различных типов: трехкомпонентная кварцевая магнитовариационная станция, феррозондовый магнитометр НВ1121.1А и скалярно-векторный оверхаузеровский магнитометр POS-4. Приводится сравнение результатов регистрации геомагнитного поля этими магнитометрами.

В кооперации с другими научными учреждениями магнитная обсерватория ИЗМИРАН координирует регистрацию магнитного поля в штольне Баксанской нейтринной обсерватории [3], на полигоне Крымской астрофизической обсерватории в Симеизе, в обсерватории Воронежского государственного университета «Галичья гора». Сравнивается качество получаемых данных. Описаны проблемы, возникающие при регистрации геомагнитных данных и способы устранения этих проблем.

Литература

1. Гордин В.М. Очерки по истории геомагнитных измерений. // Москва ИФ/З РАН 2004 г.
2. Канониди К.Х., Канониди Х.Д., Петров В.Г. Развитие сети геомагнитных наблюдений ИЗМИРАН // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли, с. 77-87, Москва, ИЗМИРАН 2015г.
3. Sobisevich A.L. at a. North Caucasus Underground Geophysical Observatory: Instrumentation and Observation Results // Geosciences, 2025, V 15, N 42

ИЗОБРАЖАЮЩИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

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

ИКИ РАН, г. Москва, Россия

kirichenko@cosmos.ru

Рассмотрена возможность использования солнечного телескопа-спектрометра мягкого рентгеновского диапазона для решения задач прогнозирования космической погоды. Прибор находится на стадии разработки, причем проектируется сразу два его исполнения – для установки на борту малых космических аппаратов типа CubeSat формата 6U и более, а также для комплекса гелиофизической аппаратуры перспективного спутника Электро-М. Разрабатываемый прибор позволит одновременно получать как спектры, так и изображения Солнца в мягком рентгеновском диапазоне до 15 кэВ. Прибор выполнен по классической схеме камеры-обскуры. Несмотря на невысокое пространственное разрешение (до 40"), разрабатываемая аппаратура позволит разделять активные области на солнечном диске и анализировать динамику потоков мягкого рентгеновского излучения в каждой из них. Это позволит существенно повысить точность определения класса вспышек – особенно в условиях максимума солнечной активности, когда вклад в интегральное излучение вносят сразу несколько источников, а события накладываются друг на друга по времени. Кроме того, данные такого прибора исключают неопределенность в поиске вспышечной области, которая иногда возникает при использовании только интегральных потоков рентгеновского излучения от всего диска и ВУФ-изображений Солнца.

С точки зрения прогнозирования космической погоды данные телескопа-спектрометра могут использоваться для оценок вероятности возникновения SEP-событий во время вспышек. Анализ динамики излучения в изолированных вспышечных областях позволит существенно повысить точность прогнозов существующих моделей, использующих для этих целей интегральные потоки мягкого рентгеновского излучения [1, 2].

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>).

Литература

1. Stephen W. Kahler et al. Forecasting Solar Energetic Particle (SEP) events with Flare X-ray peak ratios // J. Space Weather Space Clim. V. 8. A47. 2018.
2. Sigiava AminaIragia-Giamini et al. Forecasting Solar Energetic Particle Event occurrence prediction using Solar Flare Soft X-ray measurements and Machine Learning// J. Space Weather Space Clim. V. 11. 59. 2021.

КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРОВ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ ПО ДАННЫМ PAMELA.

Кобелев П.Г., Янке В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

kobelev@izmiran.ru

На сегодняшний день регистрация потока космических лучей (КЛ) производится наземными детекторами, при этом регистрируются потоки частиц, образовавшихся после взаимодействия первичных КЛ с атмосферой. Также в последние десятилетия на магнитных спектрометрах космических аппаратов (AMS, PAMELA) проводятся прямые измерения потока первичных КЛ [1, 2]. В данной работе проведена калибровка данных сети нейтронных мониторов, обработанных методом глобальной съемки (GSM)[3], относительно базового периода 2009 года по данным эксперимента PAMELA. Проведенное сравнение потоков частиц в экспериментах PAMELA и AMS-02 с долговременными изменениями потока космических лучей по данным сети наземных детекторов, показало хорошее согласие и отсутствие признаков аппаратного дрейфа. Было выполнено ретроспективное восстановление потока за пределами магнитосферы за период до 1957 года. По указанной методике возможно прогнозирование актуального потока КЛ за пределами магнитосферы.

Литература

1. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Astropart. J. Lett. V. 742. P. 102. 2011.
2. Aguilar M. et al. // Phys. Rev. Lett. V. 121. Art. No. 051101. 2018..
3. Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др. // Геомагн. и аэроном. Т. 6. № 6. С. 991. 1966.

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ СЕТИ ИНФРАКРАСНЫХ СПЕКТРОГРАФОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕЗОПАУЗЫ

Колтовской И.И., Гаврильева Г.А., Аммосов П.П.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия

koltigor@mail.ru

Приводятся результаты исследования вариаций температуры мезопаузы и волновых процессов, полученные при помощи меридиональной сети инфракрасных спектрографов. Приборы регистрируют полосы гидроксила в инфракрасной области (около 1,5 мкм), излучаемые на высоте примерно 87 км. Общепринято, что вращательная температура, вычисленная по полосам гидроксила, соответствует температуре нейтрального газа в области мезопаузы на данной высоте.

Меридиональная сеть состоит из трех идентичных спектрографов, установленных на разных по широте оптических станциях. Базовой точкой является полигон Маймага Института космофизических исследований и астрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, расположенный в 120 км к северу от г. Якутска, в районе с низким уровнем антропогенного светового загрязнения. Постоянная регистрация полос гидроксила OH(3-1) ведется с 2014 года. Спектры молекулы гидроксила, излучаемые на высоте около 87 км, регистрируются в автоматическом режиме каждую минуту и передаются ежедневно через интернет на сервер Института.

С 2015 года аналогичный инфракрасный спектрограф был установлен на станции Полярной геофизической обсерватории «Тикси», а с 2017 года — на наблюдательном пункте в г. Нерюнгри. Измерения проводились в ночное время при угле погружения Солнца более 9° в безоблачную и малооблачную погоду. Эмиссии гидроксила регистрировались с экспозицией 60 секунд. Далее с использованием общеизвестной методики вычислялась вращательная температура. Таким образом, в докладе будет сделано сравнение температуры атмосферы в области мезопаузы на трех разных широтах: авроральной (Тикси), субавроральной (Маймага) и средней (Нерюнгри).

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант №25-27-20119).

Литература

1. Шефов, Н. Н. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики / Н. Н. Шефов, А. И. Семенов, В. Ю. Хомич. Москва: ГЕОС, 2006. 741 с.
2. Mies, F. H. Calculated vibrational transition probabilities of OH(X2Π) // Journal of Molecular Spectroscopy. 1974. Vol. 53, № 2. P. 150–188.
3. Krassovsky et al. // Planetary and Space Science. 1962. Vol. 35. P. 883–905.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ СИНОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА В КРАО РАН: ВЫБОР ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ

Куценко А.С.

КрАО РАН, п. Научный, Крым, Россия

alex.s.kutsenko@gmail.com

Кратко- и среднесрочный прогноз космической погоды основан обычно на эмпирических моделях, входными данными в которых являются синоптические наблюдения текущей солнечной активности. Надежный прогноз подразумевает учет множества факторов, включая различные интегральные индексы, информацию о произошедших корональных выбросах массы, вспышках, корональных дырах на видимой стороне диска и другие характеристики [например, 1]. Это указывает на необходимость комплексного непрерывного мониторинга Солнца в различных диапазонах длин волн.

Определяющим фактором солнечной активности является его магнитное поле. В последнее время все больший интерес проявляется к измерению магнитных полей не только в фотосфере, но и в хромосфере Солнца, поскольку эруптивные события происходят в верхних слоях атмосферы. Кроме того, хромосферные магнитограммы могут дать лучшую экстраполяцию коронального магнитного поля, что важно для моделирования распространения солнечного ветра в межпланетном пространстве. Количество инструментов, способных проводить спектрополяризацию Солнца, необходимую для измерения магнитных полей, относительно невелико. Это побуждает создавать новые распределенные сети синоптических телескопов [2, 3], в том числе у нас в стране [4]. В Крымской астрофизической обсерватории РАН разрабатывается новый автоматический телескоп, предназначенный для спектрополяриметрии всего диска Солнца в фотосфере и хромосфере. В докладе будут рассмотрены основные технические требования, предъявляемые к новому инструменту, обоснован выбор оптической схемы, различных конструктивных решений.

Литература

1. Gaidash S.P. et al. Space Weather Forecasting at IZMIRAN // Geomagn. Aeron. V. 57. P. 869-876. 2017.
2. Erdélyi R. et al. The Solar Activity Monitor Network - SAMNet // Journal of Space Weather and Space Climate. V. 12, id. 2. 2022.
3. Roth M. et al. The Tautenburg Solar Laboratory (TauSoL) as Pathfinder for SPRING // Sol. Phys. V. 299, id. 44. 2024.
4. Тлатов А.Г. и др. Солнечный магнитограф для прогнозирования космической погоды // Известия КрАО. Т. 119. С. 12-16. 2023.

МАГНИТНО-ИОНОСФЕРНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ КФ ИЗМИРАН: СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ

**Носиков И.А.¹, Янковский И.С.¹, Тимченко А.В.¹, Борчевкина О.П.¹,
Бессараб Ф.С.¹, Носикова В.В.¹, Чугаевич В.Я.¹, Клименко М.В.¹**

¹КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

ianosikov@wdizmiran.ru

Магнитно-ионосферная обсерватория Калининградского филиала ИЗМИРАН (ранее — Калининградская комплексная ионосферная станция, КИС) ведет непрерывные наблюдения с 1962 года. В настоящее время основные направления наблюдений реализуются с помощью современных цифровых инструментов: импульсного ионозонда «Парус-А» (ИПГ), вариационного магнитометра ЦМВС-2 и векторного магнетометра POS-4 (ИЗМИРАН). Ионосферные наблюдения проводятся в режиме зондирования с 15-минутным интервалом, магнитные — в ежесекундном режиме. Периодически ионозонд используется в специальных режимах наклонного и трансionoсферного зондирования ионосферы. В обсерватории также осуществляются непрерывные наблюдения с использованием камеры всего неба, метеостанции, ГНСС-приёмника (МГУ), СДВ-приемника и микробарометр (ИДГ). В настоящее время ведётся подготовка к вводу в эксплуатацию новых инструментов: ЛЧМ-ионозонда и ионозонда «FAST» (НИРФИ ННГУ), высокоскоростных камер для обнаружения волновой активности в атмосфере. Приводятся результаты модернизации и капитального ремонта технических зданий обсерватории, а также планы ее дальнейшего развития.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-00033 (<https://rscf.ru/project/25-77-00033/>). Особую благодарность выражаем техническому персоналу обсерватории: Малярову В.В., Бондаренко В.А., Папст М.Д., Гомзяковой М.В., Самокаевой В.Н., Климановой А.А.

МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЗМИРАН И БОРТОВЫХ ИОНОЗОНДОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ИОНОСФЕРА-М»

Носикова В.В.¹, Клименко М.В.¹, Янковский И.С.¹, Носиков И.А.¹,
Пулинец С.А.², Цыбуля К.Г.³, Тимченко А.В.¹, Чугунин Д.В.²,
Могилевский М.М.²

¹КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³ИПГ, г. Москва, Россия

vnosikova@yandex.ru

В настоящем исследовании представлены результаты сравнительного анализа параметров ионосферы, а именно — критической частоты $F2$ -слоя ($foF2$). Данные были получены двумя способами: с помощью бортовых ионозондов ЛАЭРТ, установленных на спутниках группировки «Ионосфера-М» [1], а также с использованием наземного ионозонда «Парус-А» [2], функционирующего в магнитно-ионосферной обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН, расположенной в п. Ульяновка Калининградской области. Для обработки первичных телеметрических данных за рассматриваемый период были разработаны программы, включающие фильтрацию извлеченных ионограмм ЛАЭРТ от шумов.

В работе рассматриваются данные пролетов спутников в зоне видимости камеры всего неба, установленной в магнитно-ионосферной обсерватории КФ ИЗМИРАН, — в диапазоне $50\text{--}60^\circ$ северной широты и $12\text{--}26^\circ$ восточной долготы. Анализ проводился для двух различных геомагнитных условий: в периоды спокойной геомагнитной обстановки 18 января 2026 года и во время геомагнитной бури, наблюдавшейся 19–20 января 2026 года. Такой разносторонний подход позволил комплексно оценить поведение ионосферных параметров при переходе от невозмущённых условий к геомагнитным возмущениям.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЗМИРАН (тема № FFUM-2026-0010).

Литература

1. Pulinets S. et al. Ionospheric Response to the Geomagnetic Storm of November 12-14, 2025, Based on Multiparameter Analysis of Data from the LAERT Topside Sounder // Atmosphere. V. 17. P. 150, 2026.
2. Гивишвили Г. В. и др. Сетевой ионозонд ПАРУС-А: опыт эксплуатации // Системный мониторинг ионосферы. Сборник научных трудов / Под ред. доктора физ.-мат. наук Н.Г. Котонаевой. — М.: ФИЗМАТЛИТ. С. 21–31. 2019.

НАБЛЮДЕНИЕ СУБАВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ STEVE И PICKET FENCE НА МЕРИДИАНЕ ЯКУТСКА ТРИ ДНЯ ПОДРЯД

Парников С.Г., Иевенко И.Б., Баишев Д.Г., Ноев А.А.

*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, Россия*

parnikov@ikfia.ysn.ru

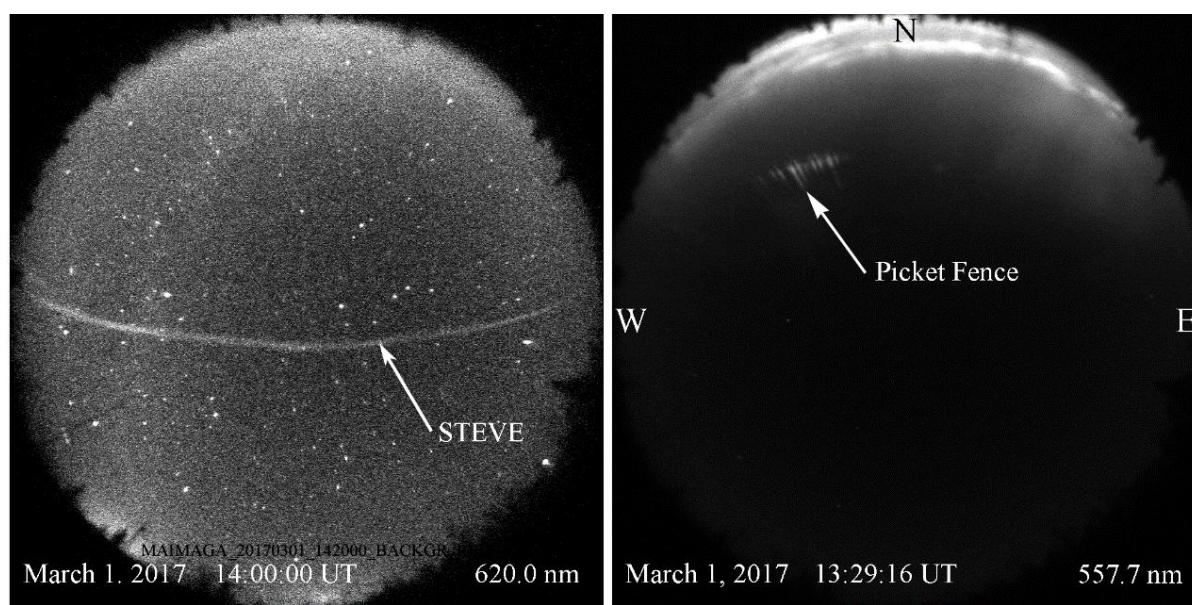


Рисунок. Оригинальные изображения STEVE и Picket fence (1 марта 2017 г.)

Рассмотрены данные инструментальных наблюдений STEVE и Picket Fence (PF) (Рис. 1) на оптическом полигоне «Маймага» три дня подряд (1-3 марта 2017 г.). Явления длительностью ~ 1 час наблюдались в предполуночном секторе MLT с периодичностью ~ 24 часа. Формирование STEVE/PF начиналось у экваториальной границы диффузного сияния. Во всех трех случаях STEVE и PF во время своей эволюции двигались в южном направлении. В первом случае STEVE и PF пересекли магнитный зенит станции наблюдений, во втором STEVE и PF пересекли географический зенит станции, не дойдя до магнитного. В третьем случае PF наблюдался на северном горизонте станции без заметных сигнатур STEVE в области континуума. Излучение STEVE в первом и втором случаях характеризовалось усилением континуума с локальным доминированием красной линии [OI]. PF наблюдался только в эмиссии 557,7 нм. Интенсивность свечения STEVE в континууме составляла единицы Рл/нм. В эмиссии 630,0 нм интенсивность достигала значений в 50-70 Рл. Интенсивность PF в эмиссии 557,7 нм достигала значений 150-200 Рл. 1 и 2 марта широтные размеры STEVE в эмиссии 630,0 нм превышали размеры той же структуры на длине волны 620,0 нм.

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 26-27-20104).

ИНДЕКСЫ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Петров В.Г.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

vpetrov@izmiran.ru

Влияние геомагнитной активности (ГА) на практическую деятельность известна почти 200 лет. Сейчас понятно, что ГА это не только магнитное поле, но и изменения в ионосфере, структуры магнитосферы, высыпания энергичных частиц. Но при любом определении для изучения ГА необходимы количественные оценки ее интенсивности – индексы. В зависимости от изучаемых аспектов (проявлений) ГА таких индексов может быть несколько.

Самым долговременным индексом, полученным по реальным данным является аа-индекс, доступный с 1868 г., однако самым распространённым индексом в настоящее время являются К-индексы отдельных обсерваторий для исследования локальных эффектов и планетарный К_p индекс для исследования глобальных проявлений ГА. Основное достоинство К-индекса – длинный ряд и доступность почти в реальном времени. Недостатки – большая инерционность (3 часа), логарифмическая зависимость и зависимость от UT. В 2020 г. были предложены индексы НР30 и НР60 – получасовые и часовые индексы, аналогичные К_p, они тоже доступны в реальном времени. Для особо критичных ко времени применений возможно оценка К_p по данным отдельной обсерватории, например Москвы. Вместо средних значений К более правильно использовать средние значения а-индекса. а-индекс – это переведенное обратно в вариацию магнитного поля значения К с использованием для любой станции единой специальной шкалы.

Для оценки магнитной активности, особенно в научно-популярных целях, используется G-индекс, он принимает значения от G0 – минимальная до G5 – экстремальная ГА, он основан на К_p-индексе. Поскольку проявления ГА очень разнообразны, существует ряд индексов, отражающих те или иные аспекты ГА (AU/AL, Dst, ASY/SYM, PC, SME U/L, SMR и т.д.). Следует иметь в виду, что наземные наблюдения регистрируют суммарный эффект от всех источников ГА, поэтому разделение индексов по источникам является не полным, и индексы достаточно хорошо коррелируют друг с другом. ГА является явлением глобальным, однако её проявления зависят от места и местного времени и поэтому наряду с глобальными индексами ГА широко используются и локальные индексы. В докладе рассмотрены основные свойства глобальных индексов ГА и особенности вычисления К-индекса в обсерватории Москва.

МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

**Продан П.Е.¹, Книжин С.И.^{1,2}, Лебедев В.П.², Чернышов А.А.³,
Еселевич М.В.²**

¹ИГУ, г. Иркутск, Россия

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

³ИКИ РАН, г. Москва, Россия

prodanpavel@yandex.ru

Низкоорбитальные спутники являются современным инструментом для исследования ионосферы благодаря возможности установки на их борт различной аппаратуры для измерения характеристик среды. Например, в качестве таких приборов можно использовать радиопередатчики, которые просвечивают ионосферу с регистрацией параметров сигнала при помощи приемных станций, находящихся на поверхности Земли. По данным о характеристиках принятых сигналов при помощи методов радио томографии восстанавливают параметры ионосферы, такие как электронная концентрация, диэлектрическая проницаемость и т.д.

В данной работе представлены результаты комплексных наблюдений космических аппаратов (КА) Ионосфера-1-2-3-4, полученные на следующих инструментах: двухканальный цифровой когерентный приемник, настроенный на частоты 150 и 400 МГц, Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) и широкоугольный оптический телескоп АЗТ-33ВМ.

Двухканальный когерентный приемник, состоящий из двух плат HackRF One, регистрировал параметры сигналов передатчиков, расположенных на борту низкоорбитальных спутников во время их пролета, и затем по принятым данным были получены спектрограммы. В результате наблюдений на ИРНР получены измерения: дальности, угол места, азимут, эффективная площадь рассеяния КА. В результате наблюдений на АЗТ-33ВМ, расположенного в саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, получены измерения: склонения, прямого восхождения и блеска КА.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (Задание № FZZE-2026-0006).

АВРОРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ТИПА АНДУЛЯЦИЙ НА ОПУСТИВШЕЙСЯ В ОБЛАСТЬ СУБАВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ КРОМКЕ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

**Сафаргалеев В.В.¹, Котиков А.Л.¹, Клименко М.В.², Петрищев М.С.¹,
Сергушин П.А.¹, Янковский И.С.²**

¹Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

vladimir.safargaleev@izmiran.spb.ru

Авроральные андуляции - гигантские волнообразные структуры - представляют собой крупномасштабные пилообразные образования размером от 100 до 1000+ км, появляющиеся во время магнитных бурь. Андуляции обнаруживаются, в основном, в спутниковых данных на экваториальной границе аврорального овала во время магнитных бурь. Структуры трактуются как оптические проявления поверхностных волн на плазмопаузе или внутренней границе плазменного слоя. Исследование этого редкого оптического явления важно для понимания магнитосферных процессов во время магнитных бурь, но детальное его изучение затруднено практически отсутствием регулярных наземных оптических наблюдений в субавроральной зоне и южнее. В последние годы участились случаи «сползания» сияний на юг вплоть до широты Санкт-Петербурга. Во время одного из таких событий оптическая камера, запущенная недавно в мониторинговый режим на базе СПб ИЗМИРАН в Красном озере, зарегистрировала несколько андуляций. В работе обсуждаются свойства зарегистрированного явления и на основе этого уточняются его некоторые морфологические особенности.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ИОНОГРАММ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСРЕДСТВОМ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ

Симаков А.М.¹, Щирий А.О.²

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

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

nickhaos9@gmail.com

Предложена методика синтеза ионограмм вертикального радиозондирования ионосферы на основе физически информированных нейросетей (PINN) [1]. Подход ориентирован на объединение физической постановки задачи с возможностями современной нейросетевой аппроксимации и направлен на получение физически правдоподобных синтетических данных, пригодных для тестирования алгоритмов автоматической обработки и интерпретации ионограмм [2]. В качестве базового математического ядра использована стационарная постановка задачи для высотного профиля электронной концентрации. Нейросеть аппроксимирует искомое решение, а процедура обучения строится так, чтобы одновременно учитывать соответствие физической модели внутри расчетной области и выполнение граничных условий. Такая организация обучения позволяет формировать более устойчивые и интерпретируемые решения по сравнению с подходами, в которых физические ограничения отсутствуют или учитываются только косвенно. Полученный профиль электронной концентрации далее преобразуется в представление, связанное с частотными характеристиками среды, после чего формируется синтетическая ионограмма, отражающая ключевые черты ожидаемого сигнального отклика.

Задачами дальнейших исследований являются: совершенствование методики синтеза, в том числе используя сравнение с реальными ионограммами, и синтетическими ионограммами, полученными другими методами, а также модификация полученной методики синтеза для случая ионограмм наклонного радиозондирования.

Литература

1. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. 2019. V. 378. P. 686-707.
2. Щирий А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний // Журнал радиоэлектроники. 2022. №10.

ОПЫТ СИНТЕЗА ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНЫМИ НЕЙРОННЫМИ СЕТЯМИ

Сингин А.Н.¹, Щирый А.О.²

¹ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

² ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия

sasha.singin@gmail.com

Рассмотрены методика, предварительные результаты и проблемы применения генеративно-состязательных нейронных сетей (Generative adversarial networks, GAN) для синтеза ионограмм радиозондирования ионосферы. Помимо решения задачи непосредственно синтеза ионограмм, такой опыт полезен для построения статистической модели ионосферы.

Данными для обучения нейросети являются ионограммы, их метаданные (конфигурации сеансов радиозондирования) [1], а также получаемые из общедоступных архивов гелио- и геофизические данные, соответствующие датам и времени сеансов получения ионограмм.

Для корректного синтеза ионограмм требуется значительная адаптация существующих подходов генерации изображений к предметной области. Отбор векторов-условий проводился с исключением объектов с неполными данными и нетипичными (отклонение более $2,5\sigma$ от медианного) значениями характеристик среды. Отобранные кандидаты нормировались различными способами к диапазонам $[0,1]$ и $[-1,1]$. За основу архитектуры нейронной сети взята архитектура BigGAN [2], которая была нами модифицирована: отказ от механизма самовнимания, изменения базового числа каналов, количества слоев и соотношения скоростей обучения между генератором и дискриминатором. Исходя из специфики предметной области, задана составная функция потерь, сочетающая ответ дискриминатора и эвристику. Полученные в результате синтезированные ионограммы выглядят правдоподобно, но при сравнении с реальными (для тех же условий) имеются существенные различия. Ключевой проблемой текущей реализации является невозможность качественной оценки схожести, синтезированной и фактической ионограмм. Она проистекает из-за невозможности сегментировать ключевую, полезную и лишнюю информацию на эталонной ионограмме. Задачей дальнейших исследований является разработка качественной меры оценки схожести двух ионограмм, учитывающей специфику изображения и физический смысл.

Литература

1. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолний // *Журнал радиоэлектроники*. 2022. №10.
2. Brock, J. Donahue et al. Large scale GAN training for high fidelity natural image synthesis. URL: <https://arxiv.org/abs/1809.1109>

РЕГИСТАЦИЯ GLE 77 НЕЙТРОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ ЭК НЕВОД

**Челидзе К.С., Волков Е.П., Громушкин Д.М., Петрухин А.А.,
Хомчук Е.П., Хохлов С.С., Шульженко И.А.**

НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

KSChelidze@mephi.ru

В Экспериментальном комплексе (ЭК) НЕВОД впервые зарегистрировано повышение потока космических лучей (GLE) с использованием нейтронных детекторов, ориентированных на исследования широких атмосферных ливней (ШАЛ). Регистрация стала возможной благодаря модернизации установок ПРИЗМА-36 и УРАН, в рамках которой были добавлены каналы для мониторинга вариаций нейтронного потока. 11 ноября 2025 года в 10:15 UT установками ПРИЗМА-36 [1], УРАН [2] и Нейтрон [3] зафиксировано резкое и статистически значимое увеличение нейтронного потока. Полученные результаты продемонстрировали возможность регистрации GLE с помощью детекторов данного типа.

Отдельного внимания заслуживает установка «Нейтрон», изначально предназначенная для исследований вариаций потока космических лучей. Отличительной особенностью данной установки является использование идентичных детекторов, размещённых под поглотителями различной толщины. Такая уникальная конфигурация позволяет оценивать энергетический спектр потока первичных протонов.

В работе представлены экспериментальные данные, полученные на этих установках. Приведено сопоставление временного профиля GLE с идентичным по геомагнитному расположению нейтронным монитором ст. Москва. Представлен предварительный результат оценки функции отклика нейтронного детектора УРАН в сравнении со стандартным нейтронным монитором NM64.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей высоких энергий», № FSWU-2026-0011).

Литература

1. Yashin I.I. et al. NEVOD — An experimental complex for multi-component investigations of cosmic rays and their interactions in the energy range $1-10^{10}$ GeV // Journal of Instrumentation. V. 16. I. 08. P. T08014. 2021. DOI: 10.1088/1748-0221/16/08/T08014.
2. Amelchakov M.B. et al. The PRISMA-36 array for studying variations of the thermal neutron flux // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. V. 1076. P. 170547. 2025. DOI: 10.1016/j.nima.2025.170547.
3. Gromushkin D.M. et al. The array of scintillation detectors with natural boron for EAS neutrons investigations // Journal of Instrumentation. V. 12. I. 07. P. C07029. 2017. DOI: 10.1088/1748-0221/12/07/C07029.

МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НОВЫМ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ - СОЛНЕЧНЫЙ РАДИОСПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР (СРСП)

Шарыкин И.Н.¹, Койнаш Г.В.¹, Зимовец И.В.¹, Иванов Е.Ф.²,
Цыбулев П.Г.³, Сотникова Ю.В.³, Петрукович А.А.¹

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Зеленчукский район,
Карачаево-Черкесская республика, Россия

ivan.sharykin@phystech.edu

В марте 2025 г. в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) введен в эксплуатацию солнечный радиоспектрополяриметр - СРСП [1,2], установленный и эксплуатируемый под руководством Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). СРСП предназначен для непрерывных многочастотных наблюдений солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот от 50 МГц до 24 ГГц в Европейской часовой зоне (+3 UTC). Ключевая задача комплекса - регистрация и каталогизация активных явлений на Солнце, а также получение многочастотных микроволновых (3-24 ГГц) спектров, необходимых для многоволнового анализа энерговыделения солнечных вспышек.

В докладе представлена архитектура, описаны технические характеристики и его режимы работы (измерений). Освещаются проведенные технические испытания и приводятся примеры результатов наблюдений Солнца: радиовсплесков разных типов и солнечных вспышек разной мощности. В докладе обсуждается методика калибровки в диапазоне 3-24 ГГц и анализ текущих технических задач. В заключении рассматриваются перспективы развития и модернизация комплекса, а также проект мониторинговой сети, состоящей из аналогичных инструментов, распределенных на территории Российской Федерации.

Данные СРСП доступны в формате FITS на WEB-ресурсе
<https://srsp.cosmos.ru/>.

Литература

1. Койнаш Г.В., Шарыкин И.Н., Зимовец И.В., и др. // Тезисы конференции “Modern astronomy: from the Early Universe to exoplanets and black holes”. V. 1. P. 687-693. 2024.
2. Койнаш Г.В., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., и др. // Тезисы конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2024”. Т. 1. С. 169-172. 2024.