

ДВАДЦАТЬ ПЕРВАЯ
ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

9–13·02·2026

ИКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

Оглавление

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца» 3
СЕКЦИЯ «Солнечный ветер и гелиосфера» 92
СЕКЦИЯ «Внешняя гелиосфера» 126
СЕКЦИЯ «Ионосфера» 130
СЕКЦИЯ «Магнитосфера» 197
СЕКЦИЯ «Теория и наблюдение токовых слоев» 238
СЕКЦИЯ «Космическая погода» 248
СЕКЦИЯ «Космическая погода и медицина» 299
СЕКЦИЯ «Волновые явления в космической плазме» 303
СЕКЦИЯ «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли» 341
СЕКЦИЯ «Атмосферно-магнитосферные связи у планет Солнечной системы» 371

СЕКЦИЯ «Теория и наблюдения Солнца»

ВЛИЯНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ (СДВИГА) НА АЛЬФА-ЭФФЕКТ И ДИНАМО МЕХАНИЗМ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СРЕДЕ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЫ СОЛНЦА

Кузанян К.М.[1,2], **Клиорин Н.**[2,3], **Рогачевский И.**[3]

[1)]*ИЗМИРАН, г. Троицк Москва, Россия kuzanyan@gmail.com*

[2)]*ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия*

[3)]*Университет Бен-Гурион, г. Беер-шева, Израиль, annfrank@fpl.gpi.ru*

Совместное воздействие турбулентности, стратифицированной по плотности (или неоднородности турбулентной скорости), и крупномасштабного сдвига при произвольных числах Маха приводит к появлению альфа-эффекта и обеспечивает работу гидродинамического динамо среднего поля. Эти явления также определяют эффективную скорость накачки крупномасштабного магнитного поля. Сжимаемость турбулентного поля скоростей (т.е. эффект конечного числа Маха) не дает вклада в тензор альфа-эффекта, обусловленный совместным воздействием неоднородности турбулентности и крупномасштабного сдвига.

Получены точные выражения для вклада в тензор альфа-эффекта и эффективной скорости накачки крупномасштабного магнитного поля в случае сильной неоднородности плотности вещества и неоднородности турбулентной кинетической энергии течений за счет стратификации и крупномасштабного сдвига в присуствии вращения [1].

Изотропная часть альфа-тензора не зависит от показателя степени спектра турбулентной кинетической энергии. Однако его неизотропная часть также вносит вклад в механизм динамо и она зависит от этого показателя. Также мы установили эта последняя часть зависит от широтного профиля дифференциального вращения, что может быть важно для работы динамо в верхней части конвективных зон Солнца и звезд.

Существует также дополнительный вклад в эффективную скорость накачки среднего магнитного поля, пропорциональный произведению градиента плотности и дивергенции средней скорости вещества. Проведены оценки вкладов этих эффектов в механизм динамо в протопланетных дисках, протогалактических и протозвездных облаках. Данный эффект также может быть оценен в солнечной конвективной зоне.

Работа поддержана грантом РНФ 21-72-20067

1. Rogachevskii, I., Kleeorin, N. // Preprint NORDITA-2025-047, arXiv:2509.03248

ЧТО ЕСТЕСТВЕННО НАЗЫВАТЬ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ТЕОРИИ ДИНАМО?

Соколов Д.Д.

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

В последние годы привлечение данных изотопных исследований позволило существенно расширить наблюдательную базу для изучения временной эволюции солнечного цикла. В настоящее время имеется реконструкция такой эволюции за 10 тыс. лет. Конечно, такая реконструкция существенно менее надежна, чем реконструкция за примерно 400 лет, основанная на телескопных наблюдениях солнечных пятен, не говоря о более коротких, но более надежных реконструкциях. В рамках этой новой реконструкции в литературе интенсивно обсуждается вопрос о том, в какой степени устойчива длина солнечного цикла и с какой точностью ее можно вычислить на основании новой реконструкции. Спектр высказанных по этому поводу мнений довольно широк. Если участник дискуссии утверждает, что длину цикла можно вычислить или предсказать с высокой точностью, то говорят о явлении синхронизации.

В докладе рассматривается, в какой степени модели солнечного динамо позволяют ограничить гипотезы о синхронизации и в какой степени качество имеющихся наблюдательных данные ограничивают возможность выявления синхронизации.

О СТРУКТУРЕ ТЕЧЕНИЙ В ПОДФОТОСФЕРНОЙ ЗОНЕ В АКТИВНЫХ И СПОКОЙНЫХ УЧАСТКАХ СОЛНЦА

Коновалихин А.М., Гетлинг А.В.

НИИЯФ МГУ им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Россия, konovalikhin.a21@physics.msu.ru

Сделана попытка реконструировать трёхмерную структуру течений на Солнце на основе гелиосейсмологических данных с целью анализа связей между течениями на различных глубинах. Для этого использованы найденные методами гелиосейсмологии времён-расстояний (time-distance helioseismology) скорости вещества в конвективной зоне на глубинах от 0,5 Мм до 19 Мм.

Рассмотрен ряд активных областей и участков Солнца, находившихся в спокойном состоянии. Проведён корреляционный анализ: рассчитаны коэффициенты корреляции между вертикальными (радиальными) скоростями V_z и дивергенцией горизонтальных скоростей $divV_{xy}$ на каждом из восьми рассмотренных уровней, а также коэффициенты корреляции между скоростями на соседних уровнях различными способами. Получены временные и глубинные профили коэффициентов корреляций. Корреляционные диаграммы позволили рассмотреть связи между полями скоростей на всех доступных глубинах.

Характер изменения временного и глубинного поведения корреляций между полями скоростей в активных областях отражает особенности их развития. Так, например, при рассмотрении активной области NOAA 11158 было обнаружено, что коэффициенты корреляций практически на всех глубинах сильно меняются (причём на разных уровнях по-разному) при переходах между различными этапами её эволюции: при смене спокойных условий на возмущённые, сопровождающиеся началом процесса формирования ускоренных потоков вещества, и при переходе к стабилизации быстрых течений.

Применение такого подхода к изучению спокойных участков Солнца, где отсутствуют потоки, нарушающие сложившуюся структуру конвекции, позволило подробнее рассмотреть проявления её различных масштабов. Было обнаружено наличие относительно высокой корреляции между вертикальными компонентами скоростей V_z в диапазонах глубин 0,5–6 Мм и 8,5–19 Мм и, наоборот, сравнительно низкой между V_z на одном уровне из первого диапазона, а на втором — из второго. (Например, коэффициенты корреляций между V_z на уровнях 0,5 и 4 Мм или на уровнях 8,5 и 15 Мм существенно выше, чем коэффициент корреляции между V_z на уровнях 4 и 8,5 Мм). Оказалось, что из всех коэффициентов корреляций между V_z на соседних уровнях наименьшее значение имеет коэффициент для глубин 6 и 8,5 Мм – на графике его глубинной зависимости это выглядит как минимум.

Эти факты могут быть проявлением супергранул в верхних слоях (0,5–6 Мм) и гигантских ячеек в нижележащих (8,5–19 Мм). Корреляция тем выше, чем более упорядочена структура течений. Возможно, глубины вблизи 6–8,5 Мм можно считать областью перехода от упорядоченности одного характера, супергрануляционной, к другой, связанной с гигантскими масштабами.

ГЕНЕРАЦИЯ СРЕДНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛИ ВАЙНШТЕЙНА-КИЧАТИНОВА ДЛЯ ВТОРЫХ МОМЕНТОВ

Макарова И. В.[1], **Юшков Е. В.**[1, 2], **Соколов Д. Д.**[1, 3]

iras27072005@gmail.com

1. МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия, 2. ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 3)ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия

Динамика среднего магнитного поля в турбулентных потоках плазмы описывается уравнением Штеенбека-Краузе-Рэдлера, предложенном в 1955 году Юджином Паркером для объяснения 11-летнего цикла солнечной активности [1]. Ключевым фактором для описания этого цикла являлось наличие в конвективной оболочке Солнца дифференциального вращения и зеркальной асимметрии, поэтому механизм генерации получил название альфа-омега динамо. Но кроме такого типа трансформации энергии турбулентного движения в энергию магнитного поля позднее были найдены и другие, например, альфа-квадрат механизм или механизм мелкомасштабной генерации. Для этих механизмов были разработаны свои модели, и, в частности, модель Казанцева, которая в отличие от уравнения Штеенбека-Краузе-Рэдлера описывала поведение не среднего магнитного поля, а средней магнитной энергии (второго момента) [2]. Сразу же возник вопрос о совместимости моделей, и осложнялось это тем, что генерация магнитной энергии априори не означала генерацию магнитного поля. Другими словами, в модели Казанцева магнитная энергия могла расти при нулевом среднем поле. Кроме того, модель Казанцева, как более сложная, была выведена при существенно более простых предположениях (например, однородности и изотропии турбулентности), не позволяющих проверить случаи с дифференциальным вращением. В итоге, на долгое время вопрос о совместимости моделей завис в воздухе.

В рамках настоящего доклада мы рассказываем о результатах исследования моделей на совместимость, сравнивая механизмы генерации в изотропной модели среднего поля и в модели Вайнштейна-Кичатинова, являющейся обобщением модели Казанцева на случай зеркальной анизотропии. Мы демонстрируем области доминирования мелкомасштабной генерации (при больших магнитных числах Рейнольдса) и альфа-квадрат механизма (при малых магнитных числах Рейнольдса). Во второй области, где доминирует среднее поле, мы показываем совпадение масштабов и скоростей генерации в обеих моделях, и задаемся вопросом, как “выделить” среднее поле в первой области, в которой доминирует рост средней магнитной энергии [4]. На основании совместимости моделей Штеенбека-Краузе-Рэдлера и Вайнштейна-Кичатинова (Казанцева) мы объясняем парадокс нарушения интегрального закона сохранения спиральности в бездиссипативном случае и процесс генерации крупномасштабной магнитной спиральности при наличии диссипации магнитной энергии.

1. Parker E.N., Hydromagnetic dynamo models //Astrophys. J. – 1955. – Vol. 122. – pp. 293.
2. Kazantsev A.P., Enhancement of a magnetic field by a conducting fluid // Sov. Phys. JETP. – 1968. – Vol. 26.5. – pp. 1031-1034.
3. Vainshtein S.I., Kichatinov L.L., The dynamics of magnetic fields in a highly conducting turbulent medium and the generalized Kolmogorov–Fokker–Planck equations // Journal of Fluid Mechanics. – 1986. – Vol. 168. – pp. 73-87.
4. Макарова И.В., Юшков Е.В., Соколов Д.Д. // Два механизма динамо в уравнении Казанцева // ЖЭТФ. – 2025. – Vol. 168(6). pp. 843-850.

НЕЙРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ДИНАМО-МОДЕЛИ

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

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

Физические модели, предназначенные для воспроизведения основных особенностей солнечной цикличности, как правило, основаны на механизме солнечного динамо. Для определения параметров модели обычно используются либо качественные аргументы, либо многократные запуски модели с разными пробными значениями. Одним из наиболее сложных компонентов является вид нелинейной функции подавления альфа-эффекта, управляющего регенерацией магнитного поля. При ее подборе обычно ограничиваются лишь простейшими видами функциональной зависимости. Мы предлагаем новый подход, в котором функция альфа-подавления представляется нейронной сетью, обучаемой таким образом, чтобы решение динамо-модели согласовывалось с наблюдательными данными или, в общем виде, было оптимальным относительно некоторого целевого функционала.

Реализация этого подхода требует вычисления градиента от численного решения системы дифференциальных уравнений по ее параметрам (в данном случае, параметрами являются обучаемые параметры нейронной сети). Для этого применяют так называемый метод сопряженного уравнения (adjoint method), а сам подход, состоящий в замене частей дифференциальных уравнений на нейронные сети, называют нейро-дифференциальными уравнениями (neural differential equations).

Для демонстрации мы рассмотрим маломодовую модель динамо и покажем, что удается найти широкий спектр функций подавления и соответствующих динамо-чисел, при которых получается близкое соответствие среднему профилю индекса солнечной активности. В рамках этого набора параметров мы наблюдаем сильную взаимосвязь между динамо-числом и видом функции подавления, что указывает на то, что для однозначного определения параметров динамо-модели необходимы дополнительные ограничения или данные о магнитном поле.

По нашему мнению, нейро-дифференциальный подход открывает новые возможности для исследования проблемы замыкания в теории динамо и согласования моделей с наблюдательными данными.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ-21-72-20067-П.

ПРИРОДА ЦИКЛИЧНОСТИ И АРИТМИИ СОЛНЦА ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В.И. Козлов

ИКФИА СО РАН «Институт космофизических исследований и аэрономии, г. Якутск, Россия.
cosmoprognoz@mail.ru

Исследование посвящено верификации гипотезы автора о природе 11-летнего цикла солнечной активности и причин его сбоев (аритмии). Установлен ключевой инвариант бинарной связи "амплитуда-длительность": чем выше амплитуда 11-летнего цикла, тем короче его длительность, и наоборот. Это означает, что площадь под кривой цикла остается постоянной. Подобный инвариант характерен для огибающей уединенной волны – "группового солитона": произведение амплитуды цикла на квадрат его ширины есть величина постоянная! Автоколебательный (солитонный) механизм является эффективным способом дискретного (за цикл) "стравливания" равными долями избыточной энергии Солнца (стабилизирующим его температуру), естественным образом объясняя природу относительной стабильности 11-летней цикличности. Далее определяется причина и виды сбоев 11-летнего цикла посредством анализа фазовых портретов солнечных циклов на комплексной фазовой плоскости. Площадь фазового портрета соответствует «фазовому объему»: произведению «энергия х время» с размерностью «действия». В физическом смысле, площадь фазового портрета солнечного цикла эквивалентна - энергоемкости (светимости Солнца). Это позволяет сравнивать результаты расчетов площади фазовых портретов по числам Вольфа с результатами измерений физических характеристик солнечной активности, в частности – вариаций «солнечной постоянной» - светимости Солнца. Локальный сбой, когда сохраняется инвариант «физического» - магнитного 22-летнего цикла, и глобальный, когда этот инвариант нарушается, являются частными случаями аритмии.



Рис. 1 Характерный вид 11-летнего цикла как - огибающей «группового солитона», в среднем, за 5 циклов. Результат получен методом «наложения эпох». В данном случае, оборот «to» - «реперная» точка с минимальным, за цикл, значением интенсивности ГКЛ, относительно которой откладывались остальные 27- дневные значения параметра флуктуаций КЛ. Указанные минимальные значения «to» в каждом из 5-х циклов относятся, соответственно, к 1982, 1991, 2003, 2014 и 2024 гг. Экстремумы осцилляций параметра флуктуаций КЛ в окрестности максимума условного 11-летнего цикла, указывает на наличие «группового солитона».

ОСОБЕННОСТИ ПЯТНООБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ И ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ФАЗЕ МАКСИМУМА ТЕКУЩЕГО 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ишков В.Н.

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

Представлены основные характеристики и ход развития текущего 25 цикла солнечной активности (СА) в 2024 – 2025 г. Текущий солнечный цикл (СЦ) начался в январе 2020 г. и является 2–м компонентом физического 22–летнего СЦ (24–25). Его развитие на февраль 2026 г. относит текущий цикл к средним по величине относительных чисел солнечных пятен и полностью укладывается в рамки сценария солнечной цикличности. Он стал самым высоким солнечным циклом (СЦ) обеих эпох пониженной СА и в октябре 2024 г. прошёл точку максимума W*=106.93 (v2–160.8), а уже в июле 2025 вступил в фазу спада СА, проявив себя одногорбым, как и все известные достоверные циклы средней величины кроме переходного СЦ23, и дав дополнительную возможность зависимости формы кривой развития цикла от коэффициента асимметричности пятнообразовательной активности полушарий. Таким образом, длительность фазы максимума текущего СЦ формально составила 15 месяцев что является рекордом для достоверных СЦ. СЦ25 начался в январе 2020 г., является 2–м компонентом физического 22–летнего СЦ (24–25) Основными особенностями фазы максимума стало резкое увеличение вспышечной активности, в том числе больших (рентгеновского класса ≥M5). Этот резкий рост вспышечной активности по количеству значимых вспышек (≥M1) поставил текущий СЦ выше предыдущего низкого СЦ24 и переходного между эпохами СЦ23. На ноябрь 2025 г. СЦ25 произвел 1534 вспышки средних рентгеновских классов M1–M4.9 и 235 больших (M≥5), из которых 86 были класса X. Более 10% этих значимых вспышек были произведены в мае 2024 г. (179) всего в 2–х активных областях (AR13664 и AR13663), что можно сравнить лишь с мартом 1991 г. (143). Заметим также, что октябрь 2024 г. (122 вспышки класса M и X) также показал результаты значительно выше средних. Благодаря этому 2024 г. стал третьим годом, в котором осуществилось >900 вспышек класса M и X за один год после 1989 и 1991 годов (соответственно 922, 968 и 979). Для сравнения: SC24 произвел только 1200 вспышек класса M и X за весь период своего существования. Сравнивая количество вспышек с 69 месяцев с момента минимума СЦ), количество больших (≥M5) вспышек в SC25 (235) превысило таковые в SC23 (212) и SC24 (124), но значительно ниже в SC21–22 (соответственно 336 и 478) До начала ноября 2025 г. самыми интенсивными вспышками были X9.0, (AR13842) 3.10.2024 г. и X8.7, произведенная (AR13664) 14.05.2024 г. Кроме того, осуществились ещё 6 вспышек классов >X5. AR13664 произвела 17 из 235 вспышек >M5 (12 класса X) в SC25, а AR13663 и 13697 – по 11 таких вспышек (5 и 6 событий класса X). На данный момент осуществилось 45 солнечных протонных событий (СПС) ≥10 pfu, из которых 2 были класса S3 и 13 – S2. Самые интенсивные СПС произошли 8.06 и 9–10.10.2024 г. (1030 pfu и 1810 pfu). По данным нейтронного монитора в Оулу в текущем цикле наблюдалось 4 довольно слабых GLE-события с максимальным ростом числа нейтронов от 8% до 17%. Первое из них (#73)

было связано с СПС от вспышки X1.0 28.10.2021 г.с пиковой интенсивностью 29 pfu (≥10 pfu). Второе (№ 74), – 11.05.2024 г. и от вспышки класса X5.8 в AR13664. Здесь поток протонов с E>10 МэВ достиг значения 116 pfu. Два других GLE произошли 8.6.2024 г. (AR13697) и 21.11.2024 г. Самая интенсивная магнитная буря произошла 10–11.5.2024 г. когда Kp-индекс достиг 9o в нескольких интервалах наблюдений. Вторая по величине магнитная буря текущего цикла произошла 10–11.10.2024 г., достигнув уровня очень большой магнитной бури (Kp = 9-, Ap = 300 нТл).

Точку минимума текущего цикла следует ожидать в первой половине 2031. За развитием текущего СЦ можно следить на странице http://www.izmiran.ru/saf, где каждый первый понедельник месяца публикуются основные индексы солнечной и геомагнитной активности и все изменения в пятнообразовательной и вспышечной деятельности Солнца.

ИЗМЕНЕНИЯ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКА ПОЛЯРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Мерзляков В.Л.

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

Исследуется изменение мощности источника полярного поля Солнца в эпохи минимумов активности. Изучаемая мощность определяется величиной тока в основании конвективной зоны Солнца. В качестве индикатора этого тока был выбран «магнитный заряд», который характеризует ток в каждой полусфере. Предложена методика оценки величины «заряда» с учетом влияния реликтового магнитного поля. В качестве наблюдательных данных использовался непрерывный ряд магнитографических наблюдений Wilcox Solar Observatory, которые охватывали 4 эпохи минимумов с 1986 года. Расчеты показали, что за указанный период мощность («магнитный заряд») источника постоянно уменьшался. Проведенная аппроксимация изучаемого изменения мощности показала, что, вероятно, в очередном минимуме солнечной активности в 2030 г. эта мощность ещё уменьшится. Такое уменьшение приведет к величине максимума 26 солнечного цикла в пределах 120 ± 26 числа Вольфа. Следует отметить, что эта величина меньше максимума текущего 25 солнечного цикла.

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПОЛЯРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Степанов Р.А., Кузанян К.М., Обридко В.Н.

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

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

Полярное магнитное поле Солнца является важным индикатором работы солнечного динамо и представляет собой наблюдаемое проявление полоидальной компоненты крупномасштабного магнитного поля. В отличие от показателей солнечной активности, связанных с тороидальным полем (числа пятен, площади активных областей), полярные магнитные поля изучены значительно слабее из-за их малой амплитуды и ограниченных возможностей наземных наблюдений. Тем не менее, именно они играют ключевую роль в моделях динамо с переносом потока и в формировании последующих циклов солнечной активности.

В данной работе проводится анализ временных рядов полярного магнитного поля Солнца на основе данных Wilcox Solar Observatory, охватывающих несколько солнечных циклов. Рассматриваются измерения магнитного поля в северном и южном полушариях в высоких широтах, где вклад активных областей минимален. Для исследования нестационарных и квазипериодических компонент применяется непрерывный вейвлет-анализ, позволяющий выявлять характерные временные масштабы и их эволюцию во времени.

Построены вейвлет-спектрограммы полярного магнитного поля в обоих полушариях, выявляющие широкий спектр вариаций от субгодовых масштабов до времён порядка солнечного цикла и более. Показано, что спектр флуктуаций имеет степенной характер, несколько более пологий, чем колмогоровский закон -5/3 для МГД турбулентности, но значительно более крутой по сравнению со спектром чисел солнечных пятен -2/3 [1].

С использованием вейвлет-кросс-корреляционного анализа исследована связь между полярными магнитными полями северного и южного полушарий. Обнаружены характерные масштабы с повышенной когерентностью, включая масштаб порядка 11 лет и дополнительный максимум на временном масштабе около 3.4 года. Наличие синхронизированных колебаний на этом масштабе может свидетельствовать о глубинных процессах переноса магнитного поля и асимметрии солнечного динамо.

Полученные результаты подчёркивают многомасштабный характер динамики полярного магнитного поля Солнца и его диагностическую ценность для изучения глобальной эволюции солнечного магнитного поля и турбулентных процессов в конвективной зоне.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-20067-П, https://rscf.ru/project/21-72-20067/

1. Plunian F., Sarson G. R., Stepanov R., // MNRAS, 2009, 400, L47

ЦИКЛИЧЕСКАЯ ВАРИАЦИЯ СОЛНЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА

Обридко В.Н., Шибалова А.С, Соколов Д.Д., Кацова М.М., Лившиц И.М.,

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

Рассмотрена циклическая вариация магниного потока. Среднее поле и солнечные пятна — тесно связанные, но не идентичные явления. Общая идея заключается в том, что динамо-эффект среднего поля создает тороидальный поток среднего поля, который посредством некоторого дополнительного механизма распадается на отдельные трубки. В целом глобальный магнитный поток определяется довольно слабыми полями. В последних циклах уменьшается доля потока сильных и средних полей, площадь и доля слабых полей растет.

Фоновое поле состоит из малых элементов. Может быть, они возникают тоже в лептоклине, но только часть из них сливаясь, превращаются в пятна. С другой стороны эта дисперсность возникает уже в процессе генерации как продукт совместного действия динамо среднего поля и генерации мелкомасштабного поля.

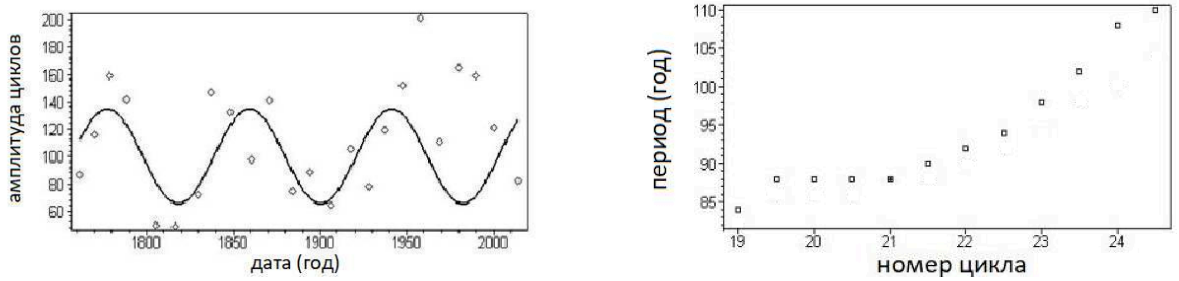
Беззнаковый поток солнечных пятен составляет весьма малую часть от полного потока. Поток со знаком состоит из огромного числа относительно малых элементов. Расположение этих элементов не хаотично существуют большие зоны в которых преобладает элементы того или иного знака. Это и приводит при усреднении к возникновению крупномасштабных магнитных полей. Магнитное поле в малых элементах может несколько меняться с фазой цикла и увеличивается при слиянии этих элементов.

К ВОПРОСУ О ЦИКЛЕ ГЛЯЙСБЕРГА

Шибаев И.Г., Шибаев А.И.

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

Понятие «цикл Гляйсберга» возникло из анализа небольшого объема данных с различной степенью надежности -- с чем связан целый ряд невязок локального характера и искажение взаимосвязи фрагментов разного масштаба. В 1939 году Гляйсберг, анализируя первые 16 циклов Цюрихского ряда (из них девять восстановленных циклов) и сглаживая максимумы циклов по четырем значениям, выделил два максимума и два минимума с периодичностью в семь – восемь циклов [1], а затем дал уточненное значение периода около 80 лет. Эта оценка легко получается при аппроксимации амплитуд этих шестнадцати циклов синусом, параметры которого находятся методом наименьших квадратов. Результат, с наилучшим значением периода в 82 года, представлен на левом рисунке, точками отмечены сами амплитуды, по горизонтальной оси их даты. Такая аппроксимация удовлетворительно описывает не более 18 циклов и её характер, в значительной степени, определяется связкой циклов V÷VII (минимум Дальтона) с циклами XII÷XIV. С накоплением достоверных данных эта оценка меняется и, при увеличении длины ряда от 18 до 24 циклов, монотонно растет до десяти – одиннадцати циклов [2]. Зависимость периода синуса от длины (в циклах) аппроксимируемого ряда демонстрирует правый рисунок.



Исследуемый ряд среднемесячных чисел Вольфа WSN включает восстановленные данные с 1749 по 1849 г. и далее данные регулярных наблюдений – достоверные данные. Зависимость периода «цикла Гляйсберга» от длины ряда, т.е. от доли достоверных данных, связана с несогласованностью характеристик восстановленного и достоверного рядов, что затрудняет трактовку и экстраполяцию его на внешний временной интервал. В работе [3], опираясь на преобразование Гильберта, дана оценка степени искажений восстановленной части ряда.

При анализе только достоверного ряда была выделена 150-летняя гармоника [4], это соответствует периодичности максимумов в четырнадцать циклов. Для новой версии v2 достоверной части ряда WSN этот период равен ~130 годам.

[1] Gleissberg W. A long-periodic Fluctuation of the Sun-spot Numbers // Observatory, V. 62, P. 158, 1939.
[2] Shibaev, A. Connection between period of low-frequency component Wolf's numbers (WNS) and length of Wolf's numbers series // Aerospace Research in Bulgaria, V. 29, P. 5–9, 2017.
[3] Шибаев И.Г. Оценка восстановленной части ряда чисел Вольфа и возможность её коррекции // Астрономический вестник. Т. 42. № 1. С. 66 – 74. 2008.
[4] Ишков В.Н., Шибаев И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Изв. РАН, серия физ. Т. 70. № 10. С.1439–1442. 2006.

СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ -4 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ФИЛИППА ДЕ ЛА ИРА

Золотова Н.В.[1], **Вохмянин М.В.**[2]

1 – СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, n.zolotova@spbu.ru

2 – University of Oulu, Oulu, Finland

В работе представлены восстановленные солнечные данные в период 1700-1710 гг. по данным парижских астрономов: Жака Кассини, Жака Филиппа Маралди, но главным образом Филиппа де ля Ира. Результаты реконструкции сравниваются с результатами Шперера [1] и Рибс и Нем-Рибс [2]. Нами построена широтно-временная диаграмма распределения пятен, дифференциальный профиль вращения, оценена доля групп пятен, выполняющих и нарушающих закон Джоя, проверена выполняемость закона Шперера. Проведено сравнение французских и немецких наблюдений выбранного периода.

1. Spoerer G. // Ueber die periodicitat der sonnenflecken seit dem Jahre 1618..., 1889.
2. Ribes J.C., Nesme-Ribes E. // Astron. Astrophys. 1993. V. **276.** P. 549.

КЛАССИЧЕСКОЕ ПРАВИЛО ВАЛЬДМАЙЕРА ДЛЯ ИНДЕКСА СУММАРНЫХ ПЛОЩАДЕЙ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Осипова А.А.[1], Наговицын Ю.А.[2,3], Федосеева С.Н.[2]

[1] Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, osisasha@mail.ru
[2] Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва
[3] Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Рассмотрена применимость классического правила Вальдмайера (ПВ) – зависимости между амплитудой и длиной ветви роста 11-летнего цикла солнечной активности – к ряду суммарных площадей групп солнечных пятен.

Показано, что полученное некоторыми авторами отсутствие корреляции для классического ПВ связано с влиянием квазидвухлетних колебаний и выбором метода сглаживания. Предложен новый прокси-ряд среднегодовых площадей групп солнечных пятен AN, свободный от квазидвухлетней компоненты и провалов Гневышева. Для него получен коэффициент корреляции между амплитудой цикла и длиной ветви роста R ~ 0.8, что подтверждает универсальность правила Вальдмайера.

Показано, что ряд AN приводит к традиционному правилу Вальдмайера в виде двух мод: для сравнительно высоких циклов и малых циклов, что, по-видимому, свидетельствует о наличии двух разных мод динамо.

В модифицированных формулировках, связывающих амплитуду с максимальной и средней скоростью роста активности, достигнуты значения R до 0.99, что делает их перспективными для раннего прогноза амплитуды солнечных циклов.

СТАТИСТИКА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА, ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ ПОЛЕЙ И ИХ ЧАСТОТ

Старченко С.В., Яковлева С.В.

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

В этой работе статистически и частотно исследованы ряды среднегодовых чисел Вольфа W, знакопеременный ряд $Q=\pm(W)^{1/2}$ и характерные частоты $Sw=W'/W$ и $Sq= Q'/Q$, представляющие отношение временной производной рядов W или Q к самим величинам W или Q.

Вероятностное распределение W преимущественно ассиметричное с наиболее вероятным значением, равным 15, при существенно от него отличающихся: среднеквадратичном 100, медианном 65 и среднем 79. Для знакопеременного ряда характерны значения: среднее -0.04, медиана 2, среднеквадратичное отклонение 8.9 и два наиболее вероятных значений -8.6 и 4.5.

Информацию к размышлению дает полученное распределение характерных частот Sw и Sq, которые отрицательны если W или Q убывает и положительны при росте. Частота Sw характеризуется средним, равным 0.05 год$^{-1}$, медианой -0.12 год$^{-1}$, среднеквадратичным отклонением 0.73 год$^{-1}$ и наиболее вероятным (за исключением незначимой нулевой моды) значением -0.24 год$^{-1}$. Обратная величина $1/Sw$ дает времена: 20 лет, -8 лет, 1.4 года и -4 года соответственно. Эти времена, по-видимому, согласуются с периодом полного (с учетом знака) цикла, периодами спада активности, флуктуациям и фазе роста.

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

Поскольку доминирующая мода -0.24 год$^{-1}$ отрицательна, то на периодах порядка половины длины цикла солнечной активности 1/0.24=5 лет происходит уменьшение числа Вольфа. Сравнивая характерные частоты, получим удвоение базовой частоты, что соответствует квадратичной нелинейности солнечного динамо. Для знакопеременного ряда аналогичным образом получаем утроение частоты, что соответствует кубической нелинейности.

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

КВАЗИ-ДВУХЛЕТНИЕ ВАРИАЦИИ В ФОТОСФЕРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СОЛНЦА

Костюченко И.Г., Вернова Е.С.

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

Вариации с неустойчивым периодом порядка 2-лет, получившие название квази-двухлетние осцилляции (КДО), наблюдаются в большинстве индексов солнечной активности и считаются одной из её базовых особенностей. В предыдущих работах нами было показано, что квази-двухлетние вариации площади солнечных пятен, которая является показателем интенсивности сильных мелкомасштабных магнитных полей Солнца, в существенной степени связаны с квази-периодическим увеличением количества очень крупных групп пятен.

В данной работе мы анализируем особенности вариаций среднего магнитного поля на поверхности фотосферы, которое может быть источником для формирования локальных магнитных полей пятен, с целью прояснить, какие особенности динамики среднего фотосферного магнитного поля способствуют появлению очень больших активных областей. Для анализа используются синоптические карты, полученные в солнечной обсерватории Вилкокс в Стенфорде (http://wso.stanford.edu/synopticl.html) на основе измерения продольной компоненты магнитного поля Солнца в μT. Эти карты строятся для каждого Кэррингтоновского оборота Солнца и содержат 30 пикселей по широте (от +75^{o} до -75^{o}) и 72 пикселя по долготе (от 0^{o} до 360^{o}), т.е. каждый пиксель имеет размер 5^{o}x5^{o}. Данные синоптических карт позволяют анализировать изменение магнитного поля в выбранной области фотосферы, а также отслеживать динамику пространственной структуры фотосферного магнитного поля.

Анализируются вариации магнитного поля в разных широтных зонах солнечной фотосферы и в различных диапазонах значения поля. Результаты сопоставляются с вариациями площади солнечных пятен и моментами появления наиболее крупных активных областей.

СМЕНА ДОМИНИРУЮЩЕЙ ПОЛЯРНОСТИ В МАГНИТНЫХ ПОТОКАХ ФОТОСФЕРЫ

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

СПбФ ИЗМИРАН, г. С. Петербург, Россия, elenavernova96@gmail.com

Все проявления солнечной активности (СА) и их циклические изменения обусловлены магнитным полем Солнца, его распределением по поверхности Солнца и его эволюцией во времени. Магнитные поля следуют 22-летнему магнитному циклу (цикл Хейла): закону смены полярности, который проявляется в смене знака полярного поля вблизи максимума СА и в смене знака ведущих и хвостовых солнечных пятен вблизи минимума СА.

Важную роль в формировании циклической структуры фотосферы играют потоки магнитного поля, которые приводят к дисбалансу полей положительной и отрицательной полярности. Проявлением дисбаланса магнитных полей являются потоки Rush-to-the-Poles (RTTP), которые имеют знак магнитного поля, совпадающий со знаком хвостовых пятен. Эти потоки дрейфуют от широты 30° до полюса и приводят к переполюсовке полярного поля. Явление дисбаланса магнитного поля проявляется также в виде ряда узких потоков с чередующимися знаками поля (ripples), обнаруженных в работах [1,2]. Было показано, что полярность этих потоков изменяется с периодом порядка двух лет, подобно квазидвухлетним вариациям.

В нашей работе [3] исследовались свойства потоков ripples на основе синоптических карт обсерватории NSO Kitt Peak, причем оказалось, что интервалы времени, содержащие ripples, располагаются между двумя областями RTTP. Данная работа является продолжением исследований циклических изменений слабых магнитных полей [3] за 4 солнечных цикла (1978−2016 гг). Для выделения вклада слабых магнитных полей порог насыщения для синоптических карт был установлен на уровне 5 Гс. Спектральный состав магнитного поля изучался с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) для массива широт в интервале ±62°.

Исследование периодических структур ripples показало попеременное чередование полярности потоков с периодами, близкими к квазидвухлетним вариациям. При анализе спектра были обнаружены две группы гармоник с максимумами в 1.26 г. и 3 г. В распределении амплитуд гармоник наблюдалось большое число малых амплитуд и резкое уменьшение числа больших амплитуд Систематические изменения наблюдались в зависимости амплитуды гармоник от широты: амплитуда была значительно выше для высоких широт. Показано также, что амплитуда гармоник снижается для самых коротких и самых длинных периодов. В течение интервала времени, содержащего ripples (от одного RTTP до другого), амплитуда вариаций связана со знаком полярного поля. Амплитуда ripples значительно выше для тех интервалов, у которых полярное поле имело положительный знак. Этот эффект указывает на связь вариаций короткопериодных полей с полярностью 22-летнего магнитного цикла, свидетельствуя о сложности структуры фотосферного поля: хотя слабые и сильные поля изменяются на первый взгляд независимо, но их пространственно-временные распределения тесно связаны друг с другом.

1. Vecchio A. et al. // Astrophys. J. **V**. 749. Art No 27. 2012.
2. Ulrich R.K., Tran T. // Astrophys. J. **V**. 768. Art No 189. 2013.
3. Vernova E.S., Tyasto M.I., Baranov D.G. // Sol. Phys.**V**. 298.I. 5. Art No 69. 2023.

ИНВЕРСИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Якунина Г.В.

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

Запуск с 2018 по 2020 г., трех космических аппаратов для исследования внутренней гелиосферы (BepiColombo, Parker Solar Probe и Solar Orbiter) открыл новые возможности в исследовании гелиосферы и ее сложной динамики. В работе использованы опубликованные результаты наблюдений этих космических аппаратов.

Наблюдения Parker Solar Probe (PSP) показали, что солнечный ветер во внутренней гелиосфере характеризуется наличием магнитных инверсий. Инверсии радиального магнитного поля, известные как обратные переключения (s*witchbacks*), встречаются в солнечном ветре вблизи Солнца. *Switchbacks* наблюдались Helios, Wind, ACE и Ulysses, а совсем недавно Solar Orbiter (SoLO). Solar Orbiter впервые дистанционно наблюдал быстрые изменения в радиальной ориентации магнитного поля. Над юго-восточным лимбом был виден S-образный изгиб в потоке плазмы, исходящем от Солнца. Эти структуры наблюдаются в солнечном ветре вблизи Солнца и особенно заметны в данных PSP, полученных на расстоянии 0,3 а.е. PSP наблюдал большое количество скачков радиальной скорости и связанных с ними разворотов или переключений в локальном радиальном магнитном поле.

Наблюдения выделяют такие особенности, как сильное отклонение магнитного поля и частые изменения направления его радиальной составляющей. Одним из наиболее изученных механизмов для объяснения образования этих структур является пересоединение в нижней части короны. Инверсия происходит в результате пересоединения при обмене между петлями в короне, образовавшимися над активной областью (АО), и близлежащими областями с открытым магнитным полем.

Космические аппараты PSP и SolO предоставили уникальную возможность изучить структуру корональных выбросов массы (КВМ) во внутренней гелиосфере. Исследования показали важную роль коронального магнитного поля АО в определении направления распространения КВМ. Корональные магнитные поля вызывают значительное изменение направления распространения КВМ как по широте, так и по долготе. Наблюдаемые отклонения и вращения КВМ можно объяснить их взаимодействием с солнечным ветром и влиянием окружающего магнитного поля. Два последовательных КВМ двигались по пересекающимся траекториям. Взаимодействие этих КВМ усложнилось из-за того, что они попали в высокоскоростной поток, исходящий из близлежащей корональной дыры, что вызвало увеличение плотности солнечного ветра, температуры плазмы и напряжённости магнитного поля. Взаимодействие между двумя КВМ и высокоскоростным потоком привело к сжатию и последующему процессу, который вызывает магнитное пересоединение. В результате образовалась цепочка магнитных инверсий (s*witchbacks*), характеризующаяся резкими изменениями направления магнитного поля.

Магнитные инверсии могут играть ключевую роль в процессах, которые в конечном счёте нагревают солнечный ветер. Несмотря на многочисленные и тщательные экспериментальные исследования, природа механизмов, вызывающих обратные потоки, до сих пор обсуждается. Наблюдения за эволюцией s*witchback* в основном основаны на статистическом анализе. Скоординированные наблюдения BepiColombo (0,35 а. е.) и Solar Orbiter (0,67 а. е.) в октябре 2021 г. впервые позволили изучить эволюцию инверсий на разных гелиоцентрических расстояниях.

ДИНАМИКА ТЕЧЕНИЙ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА И ЗАРОЖДЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Гетлинг А.В.

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

Для понимания процесса формирования солнечных активных областей (АО) и групп пятен ключевым является вопрос о том, играет ли магнитное поле активную, первичную роль в развитии АО (так бывает, если уже существующая трубка сильного магнитного потока благодаря ее плавучести выносит в верхние слои плазму с вмороженным в нее полем) или эта роль принадлежит движению вещества (которое само приводит к усилению магнитного поля in situ). Первый подход лежит в основе популярной модели всплывающей трубки (МВТ), на втором базируются модели локального динамо. Чтобы разрешить эту дилемму и приблизиться таким образом к пониманию механизмов пятнообразования, очень важен совместный анализ полей скорости и магнитных полей (а также оптических изображений).

В работе прослеживается связь зарождающейся активной области и группы пятен в ней с полем течений. Для визуализации этого поля применяется локальное корреляционное трассирование – построение траекторий яркостных элементов (гранул) отчетливо выявляет супергрануляционную структуру и картину течений в супергранулах.

Найдено, что магнитные поля зарождающейся активной области контролируются супергрануляционными течениями. В частности, получено подтверждение важному наблюдению Бумбы и Говарда [1–3], сделанному шесть десятилетий назад и практически полностью проигнорированному гелиофизиками в последующие годы. А именно, развивающееся магнитное поле АО не ломает поле конвективных скоростей, а «вписывается» в существующую супергрануляционную структуру. Это обстоятельство находится в резком противоречии с МВТ и является весомым аргументом против основанных на МВТ представлений о формировании АО.

1. Bumba V. // Bull. Astron. Inst. Czech. 1963. V. **14**. P. 1.
2. Bumba V., Howard, R. // Astrophys. J. 1965. V. **141.** P. 1492.
3. Bumba V. // Rendiconti della Scuola Internazionale di Fisica “E. Fermi” 1967. **39** Corso. P.77.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ В ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ

Садыков А.М., Красоткин С.А.

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

Одной из наиболее распространённых концепций, описывающих формирование солнечных активных областей (АО), является гипотеза всплывания магнитного потока (Magnetic flux emergence) [1]. В рамках данной гипотезы на уровне фотосферы вблизи момента появления АО ожидается усиление восходящих движений плазмы, сопровождаемое ростом магнитного потока. Однако результаты наблюдений в ряде работ [2, 3] указывают на отсутствие однозначных фотосферных признаков направленного всплытия, что мотивирует поиск новых диагностических параметров, характеризующих раннюю стадию формирования АО.

В настоящей работе выполнено статистическое исследование интегральных параметров потоков магнитного поля и радиальной (допплеровской) скорости в области зарождения АО на фотосфере Солнца. В качестве исходных данных использованы магнитограммы и допплерограммы сети наземных телескопов GONG с временным разрешением 1 мин. Рассмотрена выборка из 24 АО, наблюдавшихся в 2011–2021 гг., появляющихся в центральной части диска, что уменьшает влияние проекционных эффектов. Для корректного сопоставления объектов применён метод наложения эпох: временные ряды синхронизированы по моменту начала резкого роста суммарного (беззнакового) магнитного потока.

Были введены и исследованы два вида параметров. Первый параметр - параметр дисбаланса потоков радиальной скорости, определяемый как разность потоков подъёма и опускания, нормированная на их сумму. Данная величина является интегральной мерой направленности вертикальных движений в области формирования АО и чувствительна к изменению соотношения восходящих и нисходящих потоков. Вторая группа параметров - статистические индексы, такие как характеристический параметр (коэффициент вариации), асимметрия, эксцесс и статистическая энтропия.

Полученные результаты показывают, что наиболее информативными параметрами при появлении АО являются дисбаланс потоков радиальной скорости, характеристический параметр. Дисбаланса потоков радиальной скорости в среднем по выборке до или в момент появления АО не проявляет ожидаемого положительного увеличения, которое соответствовало бы доминированию восходящих потоков в простейшей постановке гипотезы всплывания магнитного потока. Наоборот, после начала роста магнитного потока дисбаланс смещается в область отрицательных значений, что соответствует преобладанию потока скорости опускания в формирующейся АО. Характеристический параметр фиксирует выраженный фазоподобный переход в момент появления АО, сначала в магнитном поле, а после с задержкой около 700 минут в радиальной скорости опускания, что может указывать на причинно-следственную связь: усиление магнитного поля предшествует последующей перестройке полей скоростей.

1. E.N. Parker // Astrophys. J. 1955. V. **121**. P. 491.
2. A.M. Sadykov, S.A. Krasotkin // Proc. IAU Symp. 2024. V. **365**. P. 271-274.
3. A. Pevtsov, J.B. Lamb // ASP Conf. Ser. 2006. V. **354**. P. 249.

РАСШИРЕННЫЕ ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, НИЗКОШИРОТНЫЕ БИПОЛИ И ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ДИНАМО

Тлатов А.Г.

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

Природа регенерации магнитного поля Солнца является одной из важнейших нерешенных проблем солнечной физики. В настоящее время существует два основных подхода к решению этой проблемы. Это динамо среднего поля или динамо Паркера и транспортная динамо модель Бэбкока-Лейтона (BL). Несмотря на различия в обеих этих моделях общим для них является формирование глобального магнитного поля дипольного типа. Вместе с тем существует ряд наблюдательных факторов, которые приводят к противоречиям с этими модельными подходами. Так, различные наблюдения показывают, что солнечная активность нового цикла формируется за несколько лет до появления солнечных пятен и наступления минимума активности, когда происходит формирование полярных магнитных полей. Такие волны активности получили название расширенных циклов активности (ESC). Закономерности ESC расширяют крылья бабочки активности назад во времени, почти за десятилетие до появления новых солнечных пятен и до более высоких солнечных широт. Как правило, в моделях расширенные циклы активности рассматриваются как дрейф азимутальных магнитных полей нового цикла от полярных областей к низким широтам. Также считается, что волна генерации развивается либо в глубине конвективной зоне, как в динамо Паркера, либо у основания конвективной зоны в тахоклине, как в BL моделях.

В данной работе предложена новая концепция широтного дрейфа тороидальных магнитных полей и формирования циклов активности. А именно предполагается, что формирование новых тороидальных полей происходит на небольших глубинах под фотосферой, вероятно в солнечном лептоклине (~0.95R). Тороидальные магнитные поля формируются дифференциальным вращением из всплывающих биполей активных областей, имеющих тильт угол. Наиболее эффективно это происходит для низкоширотных солнечных биполей. Для них происходит заход магнитных полей ведущих частей биполей в противоположное полушарие, а следовательно, их магнитные поля не уносятся меридиональным потоком. Всплывающие биполи формируют U-образные магнитные трубки, которые эволюционирую под действием дифференциального вращения и меридиональной циркуляции. Направление магнитного поля подфотосферной части такой U-трубки противоположно первоначальному тороидальному полю. Тороидальные поля дрейфуют на высокие широты вместе с меридиональной циркуляцией. Видимое снижение средней широты “бабочек” солнечных пятен, связано с проявлением групповой скорости волны генерации, связанной с ростом интенсивности магнитных полей во времени, эффектом “гашения” от всплывающих U-образных трубок, силой Кориололиса, выталкивающей магнитные поля на средних широтах. Но решающее влияние имеет деформация кольцевых силовых трубок с уменьшением радиуса при дрейфе к высоким широтам, и, как следствие, развитие неустойчивостей Пикельнера-Паркера.

В качестве доказательства приводятся наблюдательные данные, в том числе детальные диаграммы расширенных циклов активности по данным азимутальных магнитных полей, связь между низкоширотной активностью и амплитудой следующего цикла, глубина существования пятен и другие. В частности установлен дрейф азимутальных магнитных полей нового цикла активности направленный от низких широт к полюсам и начинается на фазе спада текущего цикла. Расширенный цикл активности формируется дрейфом азимутальных магнитных полей нового цикла к полюсам и волной всплытия U-биполей, направленной к экватору.

ЧТО ТАКОЕ ПЛОЩАДЬ ПЯТНА: МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОГРАММ SDO/HMI

Макаренко Н.Г., Королькова О.А., Волобуев Д.М.

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, korolkova@gaoran.ru

Цифровые изображения солнечной поверхности, полученные инструментами Solar Dynamics Observatory (SDO), относятся к классу изображений высокого пространственного разрешения (HR, High Resolution). Для изображений земных ландшафтов с аналогичным разрешением характерны тяжёлые хвосты в статистике отсчётов и большие значения куртозиса [1], что указывает на наличие степенного скейлинга (мультифрактальности) и слабую обусловленность среднего значения.

В настоящей работе проведён анализ изображений одиночных солнечных пятен по данным SDO. Для фотосферного изображения пятна в континууме получены значения куртозиса порядка ~10, тогда как для соответствующей магнитограммы куртозис достигает ~70. Таким образом, тень пятна в континууме допускает корректное определение среднего значения и может использоваться в качестве суррогата площади для магнитограммы, как это было предложено в [2].

Для анализа меры, индуцированной магнитным полем на магнитограмме, применён микроканонический мультифрактальный формализм. Были получены оценки гёльдеровских показателей сингулярности локально конечной меры Радона, определяемой плотностью магнитной индукции. Такую меру можно интерпретировать как «краску», нанесённую на область в виде точек, линий или равномерных слоёв. В этом случае показатели сингулярности принимают значения h(x)=0, 1 или n, где для одного равномерного слоя на поверхности n=2. Для получения устойчивых и корректных оценок показателей сингулярности использовалась техника миопических ёмкостей Шоке [3].

Анализ выборки пар «фотосферное изображение пятна — соответствующая магнитограмма» показывает, что понятие площади в классическом геометрическом смысле применимо лишь к фотосферным изображениям. Для магнитограмм доля области с «обычной» площадью (h(x)=2) не превышает 10% от всей многосвязной текстурной карты показателей сингулярности. Это ставит принципиальный вопрос о корректном определении магнитного потока для объектов со столь сложной геометрической структурой. В работе обсуждаются возможные подходы к решению данной проблемы.

1. Mumford, D., Desolneux, A. Pattern Theory. The Stochastic Analysis of Real-World Signals. A.K. Peters Ltd. 2010.
2. Obridko, V.N., *et al.* Clarifying Physical Properties of Magnetic Fields in Sunspots //*Sol Phys* **297**, 131 (2022).
3. Макаренко Н.Г., Круглун О.А., Макаренко И.Н., Каримова Л.М. Мультифрактальная сегментация данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 18-26. (2008).

ВОЗМОЖНОСТИ СТОП В КАРТИРОВАНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА

Березин И.А., Златов А.Г.

ГАС ГАО РАН, г. Кисловодск, Россия, iberalex@ya.ru

В докладе представлены результаты анализа работы и калибровки полнодискового магнитографа СТОП (Кисловодская горная станция ГАО РАН). Основное внимание уделено долговременной стабильности и пространственной однородности его ключевого элемента — электрооптического модулятора на ячейке Поккельса. На основе более чем десятилетнего архива синоптических измерений выявлены устойчивые пространственно-временные вариации эффективности модуляции. Показано наличие систематической асимметрии между северной и южной частями поля зрения инструмента, а также сезонных изменений, связанных с геометрией наблюдений. Обнаружена слабая, но статистически значимая связь между калибровочным коэффициентом и фоновым магнитным полем на высоких южных широтах. Для учёта выявленных эффектов разработана и применена процедура попиксельной калибровки, существенно повышающая однородность и достоверность магнитограмм. Проведено сравнение данных СТОП с измерениями ведущих мировых инструментов (WSO, SDO/HMI), демонстрирующее их хорошее согласие, в том числе на высоких широтах. Также обсуждаются перспективы повышения информативности измерений, включая режимы работы с увеличенным пространственным разрешением. Результаты подтверждают, что СТОП является высококачественным инструментом для долгосрочного мониторинга глобального магнитного поля Солнца, а комплексный анализ его данных предоставляет уникальные возможности как для гелиофизических исследований, так и для метрологического анализа солнечных магнитографов.

СВЯЗЬ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ ДИССИПАЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ РАДИАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОКОЛО ПЯТЕН

Плотников А.А., Куценко А.С.

КрАО РАН, п. Научный, Россия, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

В статье [1] было продемонстрировано наличие подгруппы униполярных активных областей, демонстрирующих аномально низкую (по сравнению с общей степенной зависимостью) скорость потери магнитного потока.

В рамках модели турбулентной эрозии [2] в работе [3] был проведен анализ данной подгруппы активных областей, который показал необходимость наличия некого дополнительного механизма, замедляющего потерю магнитного потока.

В статье [2] было высказано предположение, что существенное влияние на эффективность эрозии магнитной трубки (и, как следствие, на скорость диссипации ее магнитного потока) могут оказывать горизонтальные течения плазмы, направленные от центра магнитной трубки.

В данной работе был проведен анализ радиальных течений около пятен униполярных активных областей с разной скоростью потери магнитного потока. Анализ проводился по данным SDO/HMI методом локального корреляционного трассирования [4]. Для вычисления горизонтальных скоростей использовались как карты в белом свете, так и магнитограммы.

Показано, что в активных областях с разной скоростью диссипации не наблюдается существенных различий в интенсивности радиальных течений, следовательно, данный механизм не может рассматриваться в качестве причины пониженной скорости потери магнитного потока.

1. Plotnikov A.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. // MNRAS 2023. V. 521, I. 2, P. 2187
2. Petrovay K., Moreno-Insertis F. // ApJ 1997. V. 485, I.1, P. 398.
3. Plotnikov A.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. // Sol. Phys. 2024, V. 299, I. 3, id. 34
4. November L.J., Simon G.W. //ApJ 1988. V. 333, P. 427

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 25-М СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Андреева О.А.

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

Общеизвестно, что корональные дыры (КД) являются источником открытого магнитного потока и высокоскоростного солнечного ветра. В крайнем ультрафиолете и мягком рентгеновском излучении КД видны как области с пониженным излучением из-за более низких температур и плотности электронов, чем окружающее спокойное Солнце. Наблюдение за формированием КД в течение солнечного цикла (СЦ) может привести к более глубокому пониманию эволюции солнечного динамо и расширить наши знания в области прогнозирования космической погоды. В контексте 25-го цикла солнечной активности (СА), который начался в январе 2020 года и достиг своего пика в 2024 году, исследования КД приобретают особую актуальность.

В работе рассмотрены некоторые аспекты формирования корональных дыр (КД) 25-го цикла солнечной активности. В частности, анализируется эволюция КД низких широт, ввиду их влияния на формирования солнечного ветра. Показано, что экваториальные и низкоширотные источники присутствуют на протяжении всего цикла, внося свой вклад как в фазу солнечного минимума, так и в активную фазу. Результаты данного исследования, среди прочего, говорят о том, что: (а) частота появления КД, наблюдаемых в солнечной короне, зависит от фазы солнечного цикла (СЦ); (б) временная эволюция КД, по-видимому, противоположна эволюции солнечных пятен: независимо от широты, число КД, наблюдаемых в солнечной короне, максимально в фазе минимума и минимально в фазе максимума солнечного цикла. Количество полярных КД максимально в фазовом минимуме и минимально в фазовом максимуме СЦ, количество неполярных КД (средних и низких широт) максимально в фазовом максимуме и минимально в фазовом минимуме. В течение первых трех фаз СЦ процент неполярных КД увеличивается, а полярных – уменьшается в ранней фазе СЦ преобладают полярные КД, а в фазе восходящего движения и фазовом максимуме — неполярные КД.

Рассмотрены также трансэкваториальные КД в разные фазы 25 цикла. Показано, больше всего крупных трансэкваториальных КД наблюдалось в фазах роста и максима. При этом скорости солнечного ветра в среднем были меньше в фазе минимума 390<V<600 км/с, в остальных фазах скорость варьировала от 600 до 800-880км/с.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания (Тема № 122022400224-7).

МЕТОД ТРАССИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ТОРНАДО

Ганжара В.С.[1], Блуменау М.И.[1,2], Хабарова О.В.[2]

[1]*НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, vsyakshimamedov@edu.hse.ru*

[2]*ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия*

Магнитные торнадо на Солнце представляют собой подкласс протуберанцев с закрученными магнитными полями и предполагаемым вращательным движением плазмы. Отмечается особая роль магнитных торнадо в процессах переноса энергии и массы в солнечной атмосфере из конвективной зоны в корону, т.е. предполагается, что магнитные торнадо вносят вклад в нагрев короны. Несмотря на важность изучения этих магнито-плазменных структур, их свойства и временная эволюция изучены слабо, а статистические методы малоприменимы из-за необходимости визуального обнаружения и анализа движения каждого торнадо индивидуально.

Нашей группой были развиты методы обнаружения солнечных магнитных торнадо на базе отдельных изображений и коротких видео (2 часа) SDO AIA с помощью нейросетей. Между тем, предыдущие исследования проводились без рассмотрения эволюции этих структур на более протяженных временных масштабах, что ограничивало возможность анализа динамики магнитных торнадо. В данной работе решается задача автоматического пространственно-временного отслеживания магнитных торнадо на последовательностях изображений короны без ограничения длительности.

Предлагаемый метод основан на использовании нейросетевой архитектуры YOLOv12x. Для уменьшения эффекта доменного сдвига выполняется предварительное контрастное обучение базового экстрактора признаков на данных солнечных наблюдений, после чего модель обучается предсказывать ограничивающие рамки, соответствующие положениям магнитных торнадо на последовательных кадрах. Полученные результаты детектирования торнадо используются для формирования траекторий и оценки времён жизни отдельных структур при помощи алгоритма BoT-SORT.

Показано, что учёт пространственно-временной информации приводит к улучшению качества обнаружения по сравнению с детектором, работающим с одиночными кадрами. Кроме того, метод позволяет получить распределения времён жизни солнечных магнитных торнадо, что создаёт основу для их дальнейшего статистического анализа.

ИЗМЕНЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВСЛЕД ЗА ПОСТУПЛЕНИЕМ ИЗ ФОТОСФЕРЫ В ВЕРХНЮЮ ХРОМОСФЕРУ СОЛНЦА

Алексеева Л.М.

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

В предположении горизонтальности магнитного поля на базе полностью самосогласованной системы столкновительных уравнений МГД с учетом конечной проводимости плазмы, ее теплопроводности и эффекта Холла численно решается по программе ПЛАЗМАТ, специально для Солнца разработанной С.П. Кшевецким, задача с начальными условиями (Коши). В начальный момент плазма считается неподвижной.

Мы видим, что в поле силы тяжести магнитная конфигурация, в первый момент представлявшая собой одиночную силовую трубку кругового сечения, меняет форму сечения на грибообразную. Находящиеся в одном высотном слое силовые трубки, преобразуясь таким образом, приходят в соприкосновение «шляпками» --- протяженными (по горизонтали поперек поля) магнитными областями. Такая эволюция параллельных трубок с разнополярным одинаковым по величине полем порождает в зоне соприкосновения магнитную конфигурацию, аналогичную плоскому пинчу. Эти образования очень важны, поскольку, как было показано ранее, при развитии сосисочной неустойчивости в плоских пинчах верхней хромосферы Солнца возникают четкие структуры и могут генерироваться протоны надтепловых энергий. В настоящей работе изучается также, насколько зависит совместная эволюция поля и плазмы от степени сбалансированности магнитного и газового давлений в начальный момент и в момент контакта полей.

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ РЕШЕНИЯ ЭВОЛЮЦИОННОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ И ЭНТРОПИЙНЫХ ВОЛН В ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ

Шевелев Р.В., Завершинский Д.И., Сабанина А.Е., Рящиков Д.С.

Самарский университет, СФ ФИАН, Самара, Россия, RomanSheve@yandex.ru

Продольные волны сжатия активно наблюдаются в закрытых (корональные петли) и открытых (корональные перья, спикулы) магнитных структурах солнечной короны. Наблюдаемое возмущение далеко не всегда может быть корректно описано чисто магнитоакустической волной, и в общем случае представляет собой суперпозицию магнитоакустических и энтропийных волн. При анализе наблюдений достаточно часто полагается, что волна сжатия характеризуется медленным магнтоакустическим колебанием на фундаментальной гармонике. Однако при наличии нескольких собственных мод и большого числа гармоник для задач диагностики требуется точное решение соответствующего эволюционного уравнения.

В данной работе изучаются особенности приложения точного решения начальной и гранично-начальной задачи для эволюционного уравнения, описывающего динамику двух противоположно направленных медленных магнитоакустических волн и одной нераспространяющейся энтропийной моды в корональной петле в рамках приближения бесконечного сильного магнитного поля.

Исследование проводилось на примере наблюдений волн сжатия в горячих корональных петлях, в которых присутствует не только фаза, когда существуют только осцилляции на фундаментальной гармонике, но и стадия «слошинг» осцилляций [1–3]. В качестве исходных уравнений использовались как уравнения, описывающие динамику волн в случае доминирования процесса теплопроводности или эффекта теплового дисбаланса [4, 5], так и общее уравнение, учитывающее оба данных эффекта. Показано, что точное решение может качественно описать наблюдаемую динамику и получить дополнительную информацию о параметрах среды, заключенную в динамике энтропийных мод и высших гармоник магнитоакустических волн.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FFMR-2024-0017).

1. Prasad S.K., Van Doorsselaere T. Compressive Oscillations in Hot Coronal Loops: Are Sloshing Oscillations and Standing Slow Waves Independent? // Astrophys. J. The American Astronomical Society, 2021. Vol. 914, № 2. P. 81.
2. Wang T. et al. Evidence of thermal conduction suppression in a solar flaring loop by coronal seismology of slow-mode waves // Astrophys. J. Lett. 2015. Vol. 811, № 1.
3. Xia F. et al. Plasma Heating and Nanoflare Caused by Slow-mode Wave in a Coronal Loop // \apjl. 2022. Vol. 936, № 1. P. L13.
4. Zavershinskii D. et al. Mixed Properties of Slow Magnetoacoustic and Entropy Waves in a Plasma with Heating/Cooling Misbalance // Sol. Phys. 2021. Vol. 296, № 6. P. 96.
5. Zavershinskii D.I. et al. Exact solution to the problem of slow oscillations in coronal loops and its diagnostic applications // Front. Astron. Sp. Sci. 2023. Vol. 10. P. 1167781.

ДИАГНОСТИКА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ГОРЯЧИХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ С ПОМОЩЬЮ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН: РОЛЬ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ

Завершинский Д.И., Агапова Д.В.

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

В данной работе мы изучили медленные магнитоакустические (МА) волны в корональных петлях, уделив особое внимание совокупному влиянию теплопроводности, теплового дисбаланса и геометрии волновода на их дисперсионные свойства, с целью усовершенствования методов корональной сейсмологии.

Путем анализа дисперсионных уравнений, полученных в приближениях бесконечного магнитного поля и в приближении тонкой магнитной трубки, были введены характерные временные масштабы: P_{cond} в котором достигается максимум дисперсии медленных МА волн (минимум добротности) из-за влияния теплопроводности; P_{mis} в котором достигается максимум дисперсии МА волн (минимум добротности) из-за влияния теплового дисбаланса; и P_{gI} в котором волноводная дисперсия наиболее ярко выражена в изотермическом пределе. Важно отметить, что введенные характерные времена P_{cond} и P_{mis}, определяются только термодинамическими параметрами среды и скоростям неадиабатических процессов, что позволяет однозначно определить для каких корональных петель, влияние того или иного дисперсионного процесса наиболее значительно. Показано, что для «горячих» разреженных корональных петель основным источником дисперсии является теплопроводность, а для «холодных» и «теплых» плотных корональных петель, наиболее значительным источником дисперсии является тепловой дисбаланс.

Введённые характерные временные масштабы определяют диапазоны, в которых фазовые скорости приближаются к адиабатической C_S, изотермической C_{SI}, модифицированной дисбалансом C_{SQ} скоростям звука или соответствующим трубочным скоростям C_T, C_{TI}, $C_{TQ.}$. Наш анализ также показывает, что в зависимости от отношения характерных времен P_{gI}/P_{cond} поведение дисперсионных кривых может качественно изменяться. Показано, что совместное влияние волноводной дисперсии и дисперсии, вызванной теплопроводностью, расширяет область влияния изотермического режима. В частности, данный эффект может выражаться в том, что фазовая скорость даже в диапазоне периодов, соответствующем адиабатическому режиму, может не достигать скорости звука C_S, и трубочная скорость C_T, для этого диапазона является лучшей оценкой.

В ряде наблюдений медленных МА волн в «горячих корональных петлях, наблюдаемая фазовая скорость ниже не только адиабатической скорости, но и изотермической скорости звука. Для нескольких наблюдений было показано, что данное изменение может быть результатом совместного влияния геометрической дисперсии и дисперсии, связанной с теплопроводностью. Неизвестным параметром среды для указанных наблюдений являлась величина внешнего магнитного поля. Применяя разработанную модель, и подбирая значение величины магнитного поля таким образом, чтобы наблюдаемая фазовая скорость и/или период затухания наиболее близко описывались теоретическими значениями, поле было оценено ~ 10 Гс. Данное значение подразумевает, что значение беты плазмы близко к 1, что является нередким случаем для горячих корональных петель. Для верификации, модель была применена для случая, когда одновременно наблюдались медленные и быстрые МА волны. Последние были использованы для диагностики магнитного поля. Показано хорошее согласие оценок магнитного поля по медленным и быстрым МА волнам.

ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ НАГРЕВА В ГРАВИТАЦИОННО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА

Рящиков Д.С., Рябов А.С., Завершинский Д.И.

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

Проблема нагрева солнечной короны остается одной из ключевых в солнечной физике. Отсутствие точных данных о локализации, временной зависимости и зависимости нагрева от параметров плазмы затрудняет численное МГД-моделирование. В большинстве случаев используются упрощенные модели нагрева, в которых пренебрегается его зависимостью от плотности и температуры, что исключает из рассмотрения эффект теплового дисбаланса. При этом ранее этот эффект исследовался лишь для однородной атмосферы.

В данной работе представлен алгоритм конструирования функциональной зависимости нагрева от температуры и плотности для гравитационно стратифицированной атмосферы. Алгоритм включает разбиение диапазона температур и плотностей на ячейки, в каждой из которых нагрев задаётся степенной зависимостью $Q \sim \rho^{a} T^{b}$ со своими постоянными значениями параметров a и b. Эти значения подбираются таким образом, чтобы обеспечить баланс между нагревом и радиационным охлаждением плазмы на разных высотах, соответствующих заданному наблюдаемому температурному профилю атмосферы. В отличие от предыдущих моделей, в которых нагрев часто задаётся как постоянный во времени или импульсный и не зависит от локальных параметров, предложенный метод позволяет построить физически согласованную зависимость, учитывающую изменение температуры и плотности с высотой.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FFMR-2024-0017).

АНИЗОТРОПНАЯ ДИФФУЗИЯ И ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРИСУТСТВИИ МАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

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

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, garasev@ipfran.ru

Аномальная проводимость, обусловленная наличием неоднородной турбулентности в корональной плазме, в том числе в магнитных арках, в существенной мере ответственна за структуру и динамику токов, а также связанных с ними процессов магнитного пересоединения в атмосфере Солнца. Согласно проведенным оценкам, важную роль в подобных процессах может играть магнитная турбулентность, создаваемая потоками высокоэнергетических электронов в квазиравновесной материнской (основной) плазме короны за счет развития неустойчивости вейбелевского типа. Общая цель данной работы состоит в том, чтобы показать, что аномальная проводимость плазмы, вызванная не учитывавшейся ранее магнитной турбулентностью, может быть ключевым элементом механизма инициации определенного класса вспышек в солнечной короне.

Конкретно, в работе исследуется анизотропная диффузия низкоэнергетических (нерелятивистских) электронов основной однородной плазме в присутствии квазистатических турбулентных и однородных внешних магнитных полей. Различные магнитостатические конфигурации, связанные с развитием указанной неустойчивости для анизотропной плазмы с внешним магнитным полем, были получены с помощью 3D расчетов методом частиц в ячейках. Путем расчета траекторий движения пробных частиц в таких полях были вычислены коэффициенты продольной и поперечной диффузии, а также определены различные компоненты тензора проводимости. Проанализирована их зависимость от температуры плазмы и отношения среднеквадратичного турбулентного поля к вешнему. Проведено сравнение найденной аномальной проводимости для ожидаемого уровня магнитной турбулентности в корональных арках с имеющейся там проводимостью, обусловленной столкновениями электронов с ионами и нейтральными частицами.

РАСЩЕПЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Дертеев С.Б., Сумьянов А.В., Михаляев Б.Б.

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

Исследование неадиабатических акустических волн в плазме солнечной короны показало, что под действием теплопроводности в спектре локализованных акустических возмущений появляются два отдельных максимума, обозначаемые как короткий период P_s и длинный период P_l, то есть происходит расщепление спектра [1, 2]. Подобные максимумы обычно наблюдаются в корональных волнах сжатия, которые регистрируются в крайнем ультрафиолетовом диапазоне и привлекают повышенный интерес к себе из-за своей способности переносить значительную энергию в корону из нижних слоев атмосферы. Вейвлет-анализ показывает, что из первоначального спектрального максимума с периодом в 3-10 мин выделяется отдельный максимум, который дает второй период, увеличивающийся до значений в 20-30 мин по мере перемещения импульса в короне. На наш взгляд, это может объяснить происхождение таких длинных периодов в волнах сжатия на расстояниях 50-90 Мм от основания короны.

Такое поведение спектра акустического импульса объясняется особенностью действия теплопроводности на его гармонические составляющие, в центре которой оказывается период P_2, соответствующий минимуму групповой скорости. Гармоники с периодами $P<P_2$ практически не имеют дисперсии, затухают сильно и равномерно, что приводит к формированию максимума P_s. Из гармоник с периодами $P>P_2$ формируется отдельный максимум, который дает длинный период. По мере затухания, которое на длинных периодах носит крайне неравномерный характер, длинный период быстро увеличивается. Сам максимум при этом движется быстрее из-за высокой дисперсии длиннопериодических гармоник. Различное поведение гармоник позволяет выделить из спектра короткопериодическую часть, формирующую отдельное возмущение, то есть фактически происходит физическое разделение первоначального импульса на два отдельных возмущения, каждое из которых характеризуется своим максимумом в спектре. Максимум короткопериодического возмущения практически не меняется, при этом само возмущение быстро затухает. Длиннопериодическое возмущение затухает значительно слабее, что объясняет возможность наблюдения длинного периода на больших расстояниях.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2025-420/4.

1. Mikhalyaev B.B., et al. // Solar Phys. 2023. V. **298**. P. 102.
2. Derteev S.B., et al. // Solar Phys. 2024. V. **240**. P. 141.

РОЛЬ КВАЗИЛАГРАНЖЕВА КОРРЕЛЯТОРА СКОРОСТИ В ТЕОРИИ КАЗАНЦЕВА

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

ФИАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва, Россия, kopyev@lpi.ru

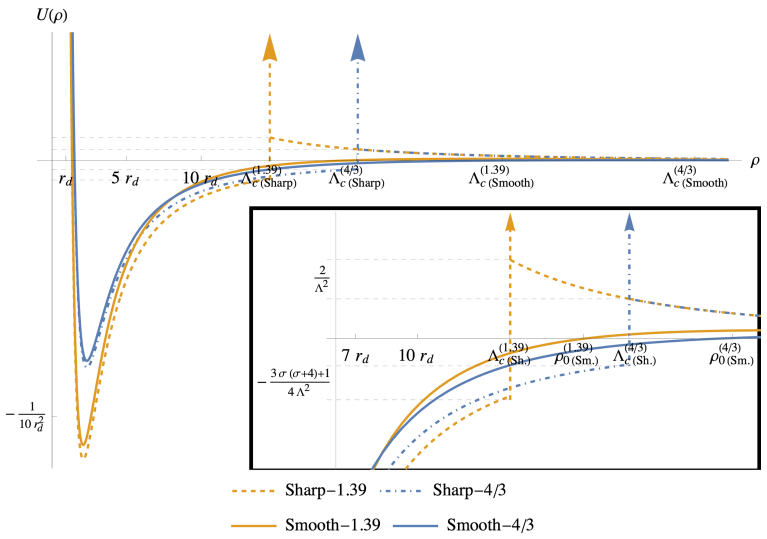
За последние десятилетия достигнут значительный прогресс как в численном моделировании турбулентного динамо, так и в теоретическом понимании турбулентности. Однако до сих пор отсутствует количественное сравнение между результатами моделирования и теорией динамо.

Ключевым результатом настоящей работы является демонстрация того, что для достижения количественного согласия между теорией и моделированием в уравнение Казанцева необходимо подставлять квазилагранжевый коррелятор скоростей, а не стандартный эйлеров. Использование квазилагранжевого подхода, учитывающего движение жидкости вместе с магнитным полем, позволяет получить теоретические предсказания для Rm_c и инкремента роста, хорошо согласующиеся с данными численных симуляций уравнений магнитной гидродинамики в широком диапазоне чисел Рейнольдса (Re).

Важным следствием является предложенное объяснение наблюдаемого в моделировании снижения Rm_c с ростом Re в области умеренных и высоких чисел Рейнольдса. Мы связываем этот эффект с зависящей от Re перемежаемостью турбулентности, которая проявляется в масштабной зависимости структурной функции скорости в инерционном интервале. Показатель скейлинга этой функции, увеличивающийся с Re, оказывает сильное влияние на эффективность динамо-процесса, что и приводит к уменьшению порогового значения Rm_c.

Таким образом, для корректного сравнения теории и моделирования необходимо либо напрямую измерять квазилагаржевский коррелятор в тех же симуляциях, где исследуется динамо, либо, как минимум, использовать универсальные параметры теории, не зависящие от деталей масштаба накачки.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС.



Эффективный потенциал, соответствующий порогу генерации для двух «резких» и двух «гладких» моделей с различными показателями скейлинга масштабной зависимости структурной функции. Масштаб нормирован масштабом диффузии, который принимается одинаковым для обеих моделей. Вертикальные стрелки соответствуют дельта-функциям в потенциале «резкой» модели.

1. Kopyev, A. V., Il'yn, A. S., Sirota, V. A., Zybin, K. P. // preprint arXiv:2512.22061. 2025.
2. Kopyev, A. V., Sirota, V. A., Il'yn, A. S., Zybin, K. P. // preprint arXiv: 2509.13206. 2025.

ИНВАРИАНТЫ МАГНИТНЫХ ЛИНИЙ И МГД-СПЕКТРЫ

Ахметьев П.М. , Дворников М.С., Смирнов А.Ю.

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

В теории среднего поля инварианты магнитных линий применяются к магнитному крупномасштабному потоку в замкнутой фазовой области с проводящей жидкой средой, и характеризуют МГД-спектры. Согласно [1] выделяются три основных МГД-спектра с показателями -5/3 (колмогоровский); -3/2 (Ирошникова-Крейчнана); -1 (Рузмайкина-Шукурова). Магнитные потоки рассматриваемых спектров имеют показатели -7/6, -1, -1/2 могут быть охарактеризованы асимптотическими эргодическими инвариантами магнитных линий с соответствующими фрактальными показателями.

Основная цель работы – представить численный эксперимент, доказывающий асимптотическое свойство указанных инвариантов магнитных линий. Мы выбрали инвариант M_3, который не сводится к попарным коэффициентам зацеплений магнитных линий и характеризует МГД-спектр Рузмайкина-Шукурова, и показали, что в при накручивании магнитной линии саму на себя произвольное число раз, инвариант удовлетворяет асимптотическому свойству. Такое же свойство выполняется для оставшихся инвариантов.

В докладе мы также остановимся на приложениях. В качестве одного из которых рассмотрена магнитная гидродинамика в присутствии аксионного поля. Выведено новое уравнение индукции, в котором учтен вклад аксионов зависящих как от времени, так и от пространственных координат [2]. Изучена эволюция сферического аксионного образования в замагниченной солнечной плазме [3,4]. Найдены осциллирующие решения для гармоник магнитного поля внутри аксионного сгустка. Высказано предположение, что распад подобных мелкомасштабных структур может давать вклад в нагрев солнечной короны, что позволит решить одну из проблем физики Солнца - а именно - объяснение высокой температуры солнечной короны.

В [5] проведено исследование фазового перехода при потере зеркальной симметрии аксионного солитона и выделении магнитной энергии на спиральной конфигурации. Мы вычислили характерный масштаб неоднородности, характеризующий максимальную МГД-нестабильность. Здесь спектр Ирошникова-Крейчнана преобразуется в колмогоровский, что позволяет проследить фазовый переход из геометрических принципов. Наш новый результат состоит в том, что фазовый переход от аксионного солитона к максвелловскому может произойти по-другому. А именно, при соответствующих начальных условиях аксионная компонента может трансформироваться в максвелловскую, заданную спектром Рузмайкина-Шукурова. При этом области правой и левой спиральности магнитного потока могут хаотически чередоваться и распространяются на более мелкий масштаб. Масштаб нестабильности оказывается меньшим, чем при переходе к колмогоровскому спектру.

1. Ya. B. Zeldovich, A. A. Ruzmaikin, and D. D. Sokoloff, Magnetic Fields in Astrophysics // Gordon and Breach, New York (1983).
2. P. Akhmetiev and M. Dvornikov, Magnetic field evolution in spatially inhomogeneous axion stars, Int. J. Mod. Phys. D 33, 2450001 (2024), arXiv:2303.09254.
3. M. Dvornikov, Low mode approximation in the axion magnetohydrodynamics, Int. J. Mod. Phys. D (2025), doi: 10.1142/S0218271825410019, arXiv:2502.20839.
4. M. Dvornikov, Thin layer axion dynamo, Eur. Phys. J. C 84, 892 (2024), arXiv:2401.03185.
5. П. М. Ахметьев, М. С. Дворников, Эволюция зеркальных аксионных солитонов, ТМФ 225, 375–390 (2025), arXiv:2504.00893 [hep-th].

SOLAR SURFACE OSCILLATIONS AND ENERGY TRANSPORTS IN BISPECTRAL ELECTRONIC THERMOSTATISTICS

Souvik Das and Pralay Kumar Karmakar

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

The ubiquitous five-minute solar p-mode oscillations, excited near the photosphere, play a fundamental role in mediating upward energy transport and driving coronal dynamics [1]. These modes are strongly influenced by nonthermal electron populations. To investigate this influence, we employ a generalized double-spectral electronic thermostatistical framework based on the (r, q) -distribution [2]. A local linear perturbation analysis [3] of an inhomogeneous, viscous, turbulent, and nonthermal solar plasma yields a cubic dispersion relation describing longitudinal helioseismic modes and their stability properties. The turbulence effect is incorporated through Larson logabarotropic equation of state [4]. The effects of the nonthermality indices r and q, electron temperature, and fluid viscosity on mode dispersion, growth, and damping are systematically studied. Numerical analysis reveals that suprathermal electrons significantly modify p-mode dynamics, with the nonthermal spectral indices exerting a mode-accelerating influence that counteracts viscous and thermal dissipation. The high-frequency p-modes are shown to transport acoustic energy fluxes exceeding $10^6\, W\, m^{-2}$ near the lower photosphere, sufficient to energize the chromosphere and quiet corona and to enhance spicule, microspicule, and coronal loop oscillations. In contrast, the low-frequency g-modes contribute negligibly to coronal heating. A hybrid power-law decay formalism is developed to model the attenuation of p-mode energy flux with height. Complementary two-dimensional simulations further elucidate the spatiotemporal evolution of the vertical energy flux, and the results are consistent with SDO/HMI Doppler velocity observations reported in the literature.

1. Stix M. *The Sun*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
2. Qureshi, M. N. S., Shah, H. A., Murtaza, G., Schwartz, S. J., & Mahmood, F. (2004). Parallel propagating electromagnetic modes with the generalized (r, q)-distribution function. *Physics of Plasmas*, *11*(8), 3819–3829.
3. Das S, Atteya A, Karmakar PK. A theoretic analysis of magnetoactive GES-based turbulent solar plasma instability. *Mon Not R Astron Soc* 2023;**523**:5635–60.
4. Larson RB. Turbulence and star formation in molecular clouds. *Mon Not R Astron Soc* 1981;**194**:809–26.

ОСОБЕННОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В КОРОНЕ СОЛНЦА И ДИАГНОСТИКА КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ

Степанов А.В.[1,2], **Иванов Е.Ф.**[3], **Мешалкина Н.С.**[3]

[1]ГАО РАН, [2]ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, [3]ИСЗФ СО РАН, Иркутск

Исследованы радиовсплески II типа, генерируемые ударными волнами (УВ) в короне Солнца, зарегистрированные в 2024-2025 годах радиоспектрополяриметром 50-3000 МГц ИСЗФ СО РАН. Особое внимание уделено изучению тонкой частотно-временной структуре всплесков, к которой относятся частотное расщепление гармоник, структура “herringbone” и явление “spectral bump”, вызванное прохождением УВ через область корональной дыры. Получена оценка уровня ленгмюровской турбулентности в УВ, определены параметры плазмы в источниках всплесков и параметры электронных пучков, ответственных за генерацию ‘herringbone’.

ЗАВИСИМОСТЬ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ УДАРНЫХ ФРОНТОВ В КОРОНЕ ОТ МОЩНОСТИ ВСПЫШКИ

Чернов Г.П.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), 108840, Россия, г. Москва, Троицк, Калужское шоссе, д. 4, gchernov@izmiran.ru

Проблемы взаимосвязи между солнечными вспышками, выбросами корональной массы и радиовсплесками типа II еще далеки от разрешения, несмотря на многочисленные статистические исследования и анализ отдельных событий. В проблеме продолжения корональных всплесков II типа в межпланетное пространство остается еще много неясного. Почему даже в самых сильных явлениях (X 9-20) не наблюдались всплески II типа с числами Маха 3-5? Почему обычно взрывной ударный фронт догоняет КВМ (а не наоборот), после взаимодействия с которым всплеск II типа не проходит в межпланетное пространство? Почему скорость ударного фронта не зависит от мощности вспышки?

В данной работе эти проблемы обсуждаются в рамках модели радиовсплесков типа II генерирующихся в пределах бесстолкновительных ударных волн из-за генерации колебаний плазмы (неустойчивось Бунемана) и, как следствие, генерации электромагнитного излучения. В рамках такой модели источника радиовсплесков типа II необходимо выполнение двух условий: (1) ударная волна должна быть относительно интенсивной (число Маха должно превышать определенное критическое значение Mcr), и (2) ударная волна должна быть перпендикулярной, незначительное отклонение от θ перпендикулярности (~ 2°) приводит к прекращению генерации плазменных волн и электромагнитного излучения [1].

Обзор последних наблюдений на новых инструментах [2] позволяет сделать предварительные выводы: 1. Мощность вспышки не определяет как скорость ударной волны, так и число Маха, которое всегда превышало критическое значение для начала излучения. 2. Процесс прохождения УВ в межпланетное пространство не зависит от мощности вспышки.

1. Chernov G., Fomichev V. On the Issue of the Origin of Type II Solar Radio Bursts // Astrophys. J. 2021. V. 922:82 (11pp). https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac1f32
2. Feng S. and Zucca P. Multiple sources of a type II radio bursts within a coronal mass ejection. // Sol. Phys. (2025) 300:108.

СУБТЕРАГЕРЦОВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ: ВРЕМЕННЫЕ ПРОФИЛИ РЕНТГЕНОВСКОГО И ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

КРАО РАН, пгт. Научный, Россия, vvsvid.smirnova@yandex.ru

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

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

Анализ временных профилей субтерагерцовых (суб-ТГц) солнечных вспышек в различных диапазонах, а также изображений, полученных из наблюдений на AIA/SDO радиоинтерферометре миллиметрового диапазона ALMA [1], показал, что источники суб-ТГц излучения могут располагаться в переходной области и короне. Это противоречит полученным ранее результатам, следующих из расчета дифференциальной меры эмиссии (DEM) по данным о крайнем ультрафиолетовом излучении (КУФ) и стандартной модели вспышек [2, 3]. Кроме того, в некоторых событиях наблюдается корреляция временных профилей КУФ, мягкого рентгеновского и суб-ТГц излучения, а в других событиях - суб-ТГц профиль коррелирует с жестким рентгеновским излучением, а корреляция с излучением в корональных линиях отсутствует. Поскольку излучение в линии Hα генерируется в хромосфере [3], то, сравнивая временные профили суб-ТГц, рентгеновского и Hα-излучения, можно получить ценную информацию об источнике суб-ТГц компоненты. Отсюда следует необходимость проведения детального сравнительного анализа временных профилей суб-ТГц, Hα- и рентгеновского излучения солнечных вспышек, поскольку соответствующие детальные исследования практически не проводились, ввиду отсутствия однородных наблюдательных данных.

Изучение отдельных событий свидетельствует, что на импульсной фазе вспышки, временной профиль жесткого рентгеновского излучения иногда коррелирует с суб-ТГц профилем, или наблюдается запаздывание появления максимума суб-ТГц излучения относительно жесткого рентгеновского [4]. Подобное поведение наблюдается при сравнении профилей суб-ТГц и мягкого рентгеновского излучения [5]. На основе выборки известных суб-ТГц событий, нами показано, что в импульсной фазе в большинстве исследованных вспышек наблюдается задержка максимума суб-ТГц излучения относительно Hα и рентгеновских временных профилей, тогда как на фазе спада наблюдается корреляция суб-ТГц, Hα- и мягкого рентгеновского излучения. Это свидетельствует о сложной природе суб-ТГц излучения и необходимости детального анализа полученных статистических результатов на основе стандартной и контурной модели [6] солнечных вспышек.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственного задания 122022400224-7, гранта РНФ № 22-12-00308-П и FFUG-2024-0002.

1. Skokić, I., Benz, A. O., Brajša, R., et al. // A&A. 2023. V. 669. A156.
2. Tsap Y. T., Smirnova V. V., Motorina G. G. Et al. // Sol. Phys. 2018. V. 293. P. 50.
3. Benz A.O. // Living Reviews in Solar Physics 2008. V. 5. No. 1. Art. no. 1.
4. Giménez de Castro C., Cristiani G., Simões P. et al. // Sol. Phys. 2013. V. 284. No. 2. P. 541.
5. Smirnova V. V., Tsap Y. T., Morgachev A. S. et al. // Ge&Ae. 2021. V. 61. No. 7. P. 993.
6. Зайцев В.В., Степанов А.В. // Астрон. Журн. 1991. Т. 68. С. 384.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ”

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

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

Изготовленная в ФИАН для установки на Российском сегменте МКС научная аппаратура «Солнце-Терагерц» состоит из восьми детекторов, целевые частоты которых лежат в диапазоне 0.4–12.0 ТГц. Одной из основных целей эксперимента является изучение солнечных вспышек. Для определения параметров вспышек был разработан алгоритм, который использует полученные методами численного интегрирования модельные данные об интенсивности излучения, проходящего в оптическую систему прибора. В данной работе рассматривается определение параметров частотного спектра U-образной формы: спектрального индекса спадающей части спектра, положения точки перегиба и спектрального индекса растущей части спектра. Значение спектрального степенного индекса спадающей части спектра предполагалось в диапазоне -1.0 – -3.0, положение точки перегиба – в диапазоне 0.4–12.0 ТГц, значение спектрального индекса растущей части – в диапазоне 1.0 – 4.0.

Проведённый в работе анализ показал, что алгоритмы на основе перебора справляются с определением параметров спектров по входным данным с шумом лучше алгоритмов, которые были обучены на тренировочных данных с шумом. Алгоритмы, которые были обучены на тренировочных данных без шума, значительно уступают двум предыдущим группам и склонны к переобучению. Было принято решение при дальнейшей работе отдать предпочтение алгоритму итерационного перебора, так как он показывает наивысшую точность из рассмотренных алгоритмов: среднеквадратичное отклонение при определении спектрального индекса спадающей части 0.27, при определении точки перегиба – 1.66 ТГц, при определении спектрального индекса растущей части – 0.70.

Разработанный алгоритм может быть интегрирован в систему обработки данных будущего эксперимента на МКС, обеспечивая автоматическое восстановление параметров спектров солнечных вспышек. Для улучшения интерпретации данных в дальнейшем необходимо рассмотреть возможность определения спектров различной формы.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВСПЫШЕЧНОГО ГАЗА ПО ИЗЛУЧЕНИЮ В СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ ВОДОРОДА, ГЕЛИЯ И КАЛЬЦИЯ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 21 АПРЕЛЯ 2011 Г.

Малютин В.А. [1], **Бычков К.В.** [1], **Купряков Ю.А.** [1,2], **Горшков А.Б.** [1], **Белова О.М.** [1]

[1]*Астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, malyutinv@list.ru*
[2]*Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic*

Излучение солнечной вспышки 21 апреля 2011 г. наблюдалось в обсерватории Ondřejov в спектральных линиях кальция, гелия и водорода. После обработки спектров были определены интегральные потоки в линиях бальмеровской серии Hα, Hβ, Hε, в линиях H CaII, IR CaII (λ=8542 Å), а также D3 HeI. По данным потокам было осуществлено восстановление параметров излучающего газа в приближении набора нагретых слоев газа, ориентированных поперек луча зрения, в рамках стационарного нагрева [1]. Критерием восстановления считается наилучшее согласие между наблюдаемыми и теоретическими потоками одновременно во всех зарегистрированных линиях. Для вычисления теоретических потоков в линиях мы воспользовались своими моделями атомных систем: так, модель атома водорода включает 18 дискретных уровней, ион кальция – 22 уровня, атом гелия – 29 уровней. Рассеяние в частотах линий учитывается в приближении вероятности выхода кванта [2-4]. Методика расчетов подробно рассмотрена в работе [5]. Нам потребовалось рассмотреть 3 газовых слоя со своими индивидуальными параметрами. Если три линии водорода удалось объяснить с точностью около 5-7 %, то теоретические потоки в линиях кальция и гелия оказались занижены от 15 до 20 % относительно наблюдаемых значений. Такое отклонение может свидетельствовать о дополнительном источнике нагрева, рассмотрением его вклада мы сейчас занимаемся.

Средний слой оказался очень протяженным и достаточно разреженным, а ближний и дальний - очень тонкими и плотными, т.е. плазма во вспышке крайне неоднородна. Концентрация плазмы слоев варьируется в пределах 10^{11} - 10^{14} $см^{-3}$. Данная трехслойная структура сохраняется на 7-минутном отрезке времени, который соответствует интервалу оптических наблюдений.

Работа выполнена в рамках Государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

1. Э. А. Барановский // Изв. Крым. астрофиз. обс. 1986, т. 75, стр. 3.
2. Л. М. Биберман // ЖЭТФ. 1947, т. 17, стр. 416.
3. T. Holstein // Phys. Rev. 1947, v. 72, p. 1212.
4. T. Holstein // Phys. Rev. 1951, v. 83, p. 1159.
5. Ю. А. Купряков, К. В. Бычков, О. М. Белова и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2024, т. 79, № 2, 2420801 (8 стр.).

ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШКИ SOL2015-08-21, ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАБЛЮДАЕМЫХ ПОТОКОВ В ЛИНИЯХ КАЛЬЦИЯ, ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ. НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРУКТУРЫ ВСПЫШКИ И РОЛЬ ПЛАЗМОИДОВ

Купряков Ю.А.[1,2], Бычков К.В.[1], Малютин В.А.[1], Горшков А.Б. [1], Белова О.М. [1], M. Bárta[2]

[1]Астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, kupry@sai.msu.ru

[2]Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic

Перенос энергии вспышки через солнечную атмосферу, а также характеристики излучения вспышки по-прежнему остаются важными и открытыми проблемами. Солнечная хромосфера, узкая и сложная область между солнечной фотосферой и короной, остаётся объектом первостепенного интереса во время вспышек, поскольку она является местом основного выделения энергии, в том числе высвечивания вспышечной энергии.

Мы наблюдали вспышку класса M1.4 в активной области NOAA 12403 на горизонтальной солнечной установке для исследования Солнца (HSFA-2) обсерватории Ondřejov в спектральных линиях кальция, гелия и водорода. Активная область не меняла свою конфигурацию в течение нескольких дней, располагаясь в районе сильного магнитного поля. Это была типичная биполярная область, состоящая из группы пятен, пор и ярких флоккул. После обработки спектров были определены интегральные потоки излучения в линиях Hα, Hβ, Hε, H CaII, IR CaII, D3 HeI, а затем в рамках модели нагретых однородных газовых слоев выполнен теоретический расчет параметров плазмы с учётом физических условий в хромосфере, включая самопоглощение в спектральных линиях. Методика расчетов подробно рассмотрена в работе [1]. Для объяснения наблюдаемых потоков потребовалось рассмотреть 3 газовых слоя, ориентированных поперек луча зрения, со своими индивидуальными параметрами. Один из них очень протяженный, а два других тонкие, т.е. плазма во вспышке очень неоднородна. Концентрация плазмы слоев варьируется в пределах 10^{11} - 10^{14} $см^{-3}$, толщина слоев от 5 до 17000 км, температура от 7450 до 21500 К, турбулентная скорость от 20 до 65 км/с. Наблюдения в радиодиапазоне 0.8–2.0 GHz показывают тесную связь между дрейфующими пульсирующими структурами, наблюдаемыми на радиоволнах дециметрового диапазона (вертикальные светлые линии на рис. 1) и наличием плазмоидов [2]. Мы считаем, что выявленная неоднородность структуры вспышки связана с существованием плазмоидов.

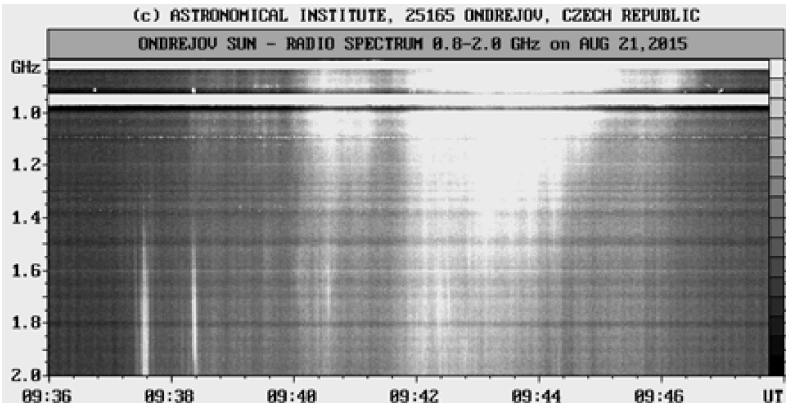


Рис.1

1. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М. и др. // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. 2024, Т. 79, № 2, С. 2420801.
2. Bárta M., Karlický M., Žemlička R.// Solar Physics. 2008, Volume 253, Issue 1-2, pp. 173-189

О МЕХАНИЗМАХ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ИЗ КОРОНЫ В ХРОМОСФЕРУ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т.

КРАО РАН, пгт. Научный, Россия, azis@craocrimea.ru

Наблюдения свидетельствуют о доминирующей роли нетепловых электронов в переносе энергии вспышек из короны Солнца в хромосферу [1]. В то же время нельзя исключать, по крайней мере, для некоторых событий важную роль тепловых потоков в нагреве хромосферных слоев. Возможен также и нагрев хромосферы in situ. Доминирование каждого механизма варьируется от вспышки к вспышке. Особо следует отметить недавние результаты, полученные с помощью наблюдений мягкого рентгеновского (SXR, GOES) и крайнего ультрафиолетового (AIA/SDO) излучения, предполагают, что в ряде вспышек корона быстро за десятки секунд может нагреваться до температуры $T \sim 10–15$ МК перед импульсной фазой вспышек (так называемые «горячие начала» [2]). Это предполагает, что, изучая временные характеристики рентгеновского и оптического излучения, можно получить важную информацию о механизмах переноса энергии в солнечных вспышках.

Исходя из данных наблюдения в линии Hα (обсерватории San Vito; Holloman AFB, NM; Learmonth) и рентгене (GOES) нами были рассмотрены солнечные вспышки различных рентгеновских классов за период с начала 2015 до конца 2021 гг. Получено, что начало эмиссии H_α задерживается относительно эмиссии SXR B-класса в 91.4% событий, C-класса - в 84.5% случаев, а M- и X-класса - в 78.2% событий, что предполагает важную роль теплового нагрева рентгеновской плазмы в начале солнечной вспышки. Между тем для максимумов SXR- и H_α -излучения эффект Нойперта наблюдается лишь для 53.9% событий класса B, для 61.1% событий класса C и для 56.5% вспышечных событий M– и X-класса, что несколько противоречит стандартной модели солнечных вспышек и свидетельствует о важной роли либо теплопроводности, либо энерговыделения in situ. Поведение слабых вспышек лучше согласуется со стандартной моделью.

Работа выполнена при частичной поддержке Государственного задания 122022400224-7.

1. Graham S. Kerr. // *Front. Astron. Space Sci.* 9:1060862.doi: 10.3389/fspas.2022.1060862. .
2. Hudson et al. // Mon. Notices R. Astronomical Soc. 2021.V.501, P.1273. doi:10.1093/mnras/staa3664

ЯВЛЕНИЕ “КОРОНАЛЬНЫЙ ДОЖДЬ” НА РАДИОВОЛНАХ И БАЛАНС ТЕМПЕРАТУРЫ В КОРОНЕ СОЛНЦА

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

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, СПб Ф САО РАН
vbog_spb@mail.ru

Изучение солнечной короны таит в себе много проблем. До сих пор, неясна природа ее высокой температуры, ее стабильности и свойств ее излучения. Влияние мощного излучения спокойного Солнца на ухудшение шумов аппаратуры ограничивает чувствительность приемных систем во всех диапазонах. Это препятствует изучению структур слабого контраста, которые лежат в основе существующих теорий нагрева короны. Наблюдения показывают, что использование инструментов с большой эффективной площадью позволяет преодолеть основную проблему, связанную с влиянием мощного излучения спокойного Солнца на ухудшение шумов аппаратуры. В САО РАН создан спектральный комплекс и разработана концепция широкодиапазонной радиоспектроскопии с октавным перекрытием частотного диапазона РАТАН-600. Следует сказать, что на более высоких частотах EUV и X-ray в оптическом диапазоне методы спектроскопии широко используются на уровнях фотосферы и хромосферы, тогда как корона эффективно излучает и на радиоволнах. С другой стороны, устойчивый температурный баланс короны невозможен без существования явлений стабилизации. Таким явлением считается эффект коронального дождя, который регулярно наблюдается в режиме спектроскопии на РАТАН-600. Приводятся примеры наблюдений и их интерпретация.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА НА ТЕМП ФОРМИРОВАНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК МАЛЫХ ЭНЕРГИЙ

Богачёв С.А., Моисеев Ю.А.

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

Солнечные вспышки малых энергий (микровспышки и нановспышки) могут содержать значительную часть полной энергии, высвобождаемой в результате активных солнечных процессов, что делает их интересным объектом для исследования. Основные трудности, возникающие при изучении слабых вспышечных событий, связаны со сложностью их выделения на фоне шума, а также с их схожестью с рядом артефактов, например, со всплесками излучения, возникающими при попадании в детектор космического телескопа заряженных частиц. Особенно сложным оказывается изучение нановспышек в области энергий порядка и ниже 10^{23} эрг (полная энергия вспышки), в которой они, по сути, становятся уже неотличимы от шума. По этим причинам всё ещё остаются нерешеннными ряд существенных вопросов физики слабых вспышек, например, их энергетическое распределение в области малых энергий.

В настоящем исследовании мы изучили вопрос о зависимости энергии и темпа формирования солнечных нановспышек от фазы солнечного цикла. Как известно, для обычных и сильных вспышек существует довольно сильная 11-летняя периодичность с выраженными максимумами в годы высокой солнечной активности. Для нановспышек наличие такой зависимости не является очевидным по ряду причин. Во-первых, их энергия, возможно, черпается не из тороидального магнитного поля, обладающего 11-летней цикличностью, а из так называемого магнитного коврика — более слабых магнитных полей, поддерживаемых конвективными течениями плазмы и не зависящих от фазы цикла. Кроме того, отсутствие выраженной зависимости от солнечного цикла требуется в ряде моделей, например, при объяснении нагрева солнечной короны. В то же время экспериментально вопрос о наличии или отсутствии 11-летней цикличности в темпе формирования нановспышек с необходимой степенью достоверности не исследован.

Мы представляем в докладе результаты нашего исследования и также обсуждаем некоторые особенности обработки изображений для более достоверного выделения слабых вспышечных событий на изображениях Солнца.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-72-30002.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, МАГНИТНЫЕ ЖГУТЫ И КОРОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ МАССЫ

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

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

Поведен анализ механизмов эрупции корональных выбросов массы (КВМ), моделируемых в виде магнитного жгута с током и окружающим его внешним магнитным полем. Рассмотрена природа сил, действующих на жгут как электромагнитной, так и гидродинамической природы. Обсуждается условие непрерывности тангенциальной компоненты электрического поля на границе жгута, что, по мнению некоторых авторов, свидетельствует о неправомерности моделирования солнечных корональных жгутов в виде лабораторных пинчей. Рассмотрены различные подходы, используемые для описания сил, ответственных за эрупцию токовых жгутов. Обращено внимание на важную роль распределения электрического тока в магнитных жгутах, а также внешних факторов, обеспечивающих МГД стабилизацию жгута и соответственно КВМ к различным видам возмущений. Проанализированы подходы и ограничения, накладываемые на применимость гидродинамических моделей, при описании силы аэродинамического торможения корональных жгутов.

Доклад посвящен памяти А.А. Соловьева (ГАО РАН). Работа выполнена при частичной поддержке ГЗ, проект № 122022400224-7 (Цап Ю.Т.), и РНФ (№ 22-12-00308, Степанов А.В.).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ И ИХ ИСТОЧНИКОВ В ПЕРВЫЕ 5 ЛЕТ 25-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

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

[1] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,* irina.2014.irina@mail.ru

[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

После первой половины 24-го солнечного цикла стало очевидно принципиальное отличие его возможности ускорять солнечные энергетические частицы от того же периода 23-го цикла. Краеугольный вопрос был «Почему Солнце больше не ускоряет частицы до высоких энергий в 24-ом солнечном цикле?» [1]. Протонные события и корональные выбросы массы (КВМ) существенно различались своими характеристиками [2]. Сейчас, по прошествии первых 5 лет развития нечетного 25-го цикла, логично сравнить выводы работ [2, 3, 4] для того же периода 23-24 циклов, учитывая их четность, обсуждавшуюся в [5]. А именно, проверить какие будут различия в распределении количества протонных возрастаний и в характеристиках их источников (солнечных вспышек и КВМ). Обращаем внимание на уже 5 зарегистрированных Ground Level Enhancement (GLE) событий в первой половине 25-го цикла, тогда как в том же периоде 23-го было 9 GLE, а в 24-ом — всего одно (GLE71 17 мая 2012). При этом наблюдалось порядка 100 солнечных протонных событий за первые 5 лет в этих циклах, что примерно согласуется с количеством КВМ со скоростью > 900 км/с. В работе мы используем данные протонного детектора EPHIN/SOHO (4.3-7.8 МэВ, 25-53 МэВ) и базы данных телескопа ART-XC (обсерватории Spectr-RG), расположенных в окрестностях точек L_1 и L_2. Методы автоматического выделения протонных возрастаний описаны в [6]. Информация о КВМ взята из каталога (CME SOHO LASCO Catalog). Для проверки критериев «протонности» солнечных вспышек мы используем ежедневные сводные отчеты по солнечной активности NoAA. Работа направлена на поиск возможных факторов, контролирующих максимальную энергию частиц в солнечных циклах.

1. *Mewaldt, R. A.; Cohen, C. M.; Li, G.; Mason, G. M.; Smith, C. W.; von Rosenvinge, T. T.; Vourlidas, A.* Why is the Sun No Longer Accelerating Particles to High Energy in Solar Cycle 24? American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract id. SH33D-03
2. *Gopalswamy, N., S. Akiyama, Yashiro S., Xie H., Mäkelä P., and Michalek G.* (2014), Anomalous expansion of coronal mass ejections during solar cycle 24 and its space weather implications // Geophys. Res. Lett., vol. 41, pp. 2673–2680, doi:10.1002/2014GL059858.
3. *Mäkelä P., Gopalswamy N., Akiyama S., Xie H., and Yashiro S.,* Estimating the height of CMEs associated with a major SEP event at the onset of the metric type II radio burst during solar cycles 23 and 24 // AphJ, 806:13 (11pp), 2015 June 10. doi:10.1088/0004-637X/806/1/13
4. *Vainio Rami, Raukunen Osku, Tylka Allan J., Dietrich William F., and Afanasiev Alexandr*, Why is solar cycle 24 an inefficient producer of high-energy particle events?// A&A, 604, A47 (2017). doi: 10.1051/0004-6361/201730547
5. *Григорьева И.Ю., Ожередов В.А., Струминский А.Б.*, Толкование правила Гневышева-Оля и модуляция галактических космических лучей солнечной активностью // ГиА, 2025, том 65, №8, с. 1183-1194. doi:10.7868/S3034502225070228
6. *Ожередов В.А., Струминский А.Б., Григорьева И.Ю.* Соотношение между максимальными потоками солнечных протонов и электронов: ускорение и/или распространение? // Космические Исследования, 2026 (принята в печать)

ЧАСТОТА ПОЯВЛЕНИЯ МОЩНЫХ ВСПЫШЕК И СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

Кацова М.М., Обридко В.Н.

ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова mkatsova@mail.ru

Одиннадцатилетний цикл солнечных пятен является основным календарем в изучении солнечной активности. Поэтому естественно стремление связать все процессы с ним. Однако на самом деле большинство явлений не совпадает с экстремумами цикла. Так, крупномасштабное поле наблюдается скорее в противофазе с 11-летним циклом. Не в фазе с циклом наблюдаются и элементы крупномасштабного поля, в частности, появление крупных комплексов активности и протяженных корональных дыр. С последними связаны и магнитные бури с постепенным началом. Считается, что нестационарные процессы типа вспышек и корональных выбросов массы обнаруживаются, в основном, вблизи максимумов циклов. Это действительно так, если мы рассматриваем распределение всех типов вспышек. Однако оказалось, что самые мощные вспышки балла X10 и выше наблюдаются скорее на фазе спада цикла. Так, из 61 вспышки балла X после 1970 года 49 событий наблюдались в максимум цикла и на фазе спада. Только 12 из них наблюдались на фазе роста. Этот эффект особенно резко выражен для наиболее мощных вспышек балла X10 и выше. Их было всего 29, причем 22 из них произошли на фазе спада, 4 – непосредственно вблизи максимума и только 3 на фазе роста. Эффект слабее выражен для менее мощных рентгеновских вспышек <X10. Таких вспышек было соответственно всего 32, из них 10 на фазе спада и 13 вблизи максимума, на фазе роста таких вспышек всего 9. Природа этого эффекта неясна, возможно, она связана с тем, что в генерации мощных вспышек некоторую роль играет и структура крупномасштабных полей.

О ПРИРОДЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ИНТЕНСИВНОГО ММ-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Мельников В.Ф.[1], Ву Ж.[3], Кузнецов А.А.[2], Смирнов Д.А.[1], Анфиногентов С.А.[2], Конг С.Л.[3], Чень Я.[3]

[1]*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, v.melnikov@gaoran.ru*
[2]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[3]*ISS Shandong University, Weihai, China*

Выполнен анализ причин генерации экстремально интенсивного микроволнового всплеска (>10^4 sfu на частотах 20-35 ГГц) в лимбовой вспышке 14 мая 2024 рентгеновского класса X1,7. Установлено, что в течение ~15 минут до главной фазы вспышки в магнитной петле, в которой затем наблюдалась наибольшая яркость микроволнового излучения, поддерживалась сверхвысокая температура плазмы (T_e ~ 40 МК), а затем произошел трехэтапный процесс энерговыделения и ускорения электронов. Проведенная радиодиагностика на основе данных Сибирского радиогелиографа в диапазоне 3-24 ГГц в моменты трёх главных пиков микроволнового излучения показала, что от пика к пику количество энергичных электронов во вспышечной петле становится все больше, а их энергетический спектр ужесточается (в последнем, наиболее интенсивном пике, показатель наклона спектра достигает -2).

Эти особенности вспышки (экстремально высокая температура плазмы и последовательное трёхкратное энерговыделение/ускорение), а также проведенное теоретическое моделирование процесса ускорения электронов для разных температур плазмы в области ускорения продемонстрировали важность наличия предварительно разогретой плазмы и последующего многоступенчатого энерговыделения для эффективного ускорения энергичных электронов и создания условий для генерации экстремально интенсивного микроволнового всплеска.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-00308-П.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЖЁСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ KONUS-WIND И SOLO/STIX, НАБЛЮДАВШИХСЯ ЗА ЛИМБОМ ДЛЯ ОДНОГО ИЗ ИНСТРУМЕНТОВ

В.И. Киселёв[1,2], **А.Л. Лысенко**[2]

[1]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, valentin_kiselev@iszf.irk.ru*

[2] *ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*

Как известно, источники жёсткого рентгеновского излучения наиболее высоких энергий в солнечных вспышках обычно располагаются в основаниях корональных петель, где за счёт высокой плотности плазмы ускоренные электроны теряют энергию наиболее эффективно. В короне плотность плазмы ниже, и источники жёсткого рентгеновского излучения значительно слабее источников в основаниях. Наблюдать такие источники в короне без вклада источников в области оснований корональных петель возможно, когда более яркие источники в основаниях петель скрыты за солнечным лимбом. В работе исследованы солнечные вспышки, для которых один из инструментов, Konus-Wind или SolO/STIX, наблюдал вспышку на диске Солнца и, соответственно, в основном излучение от оснований петель, а для второго инструмента основания петель располагались за лимбом, и наблюдалось излучение короны. По результатам разрешённого по времени спектрального анализа для каждой вспышки проведено сравнение спектральных индексов и спектральной эволюции, полученных для излучения из областей короны и оснований петель. Сделаны выводы об особенностях распространения ускоренных электронов в короне.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 25-22-00288

ФИТИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО СПЕКТРА ВСПЫШЕЧНОГО СОБЫТИЯ 14 МАЯ 2024 ГОДА НА ОСНОВЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Смирнов Д.А., Мельников В.Ф.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, astronom.v.cube@gmail.com

Предметом исследования в данной работе является солнечная вспышка 14 мая 2024 года, наблюдавшаяся на Сибирском радиогелиографе (СРГ) в диапазоне частот 3-24 ГГц. Активная область находилась на юго-западной части солнечного лимба, вспышка имела GOES класс X1.7 (источник – NOAA №13664). Это первая анализируемая по данным СРГ лимбовая вспышка, в которой на радио-изображениях полностью разрешается вспышечная петля, что позволяет диагностировать параметры вспышечной плазмы как в ее основаниях, так и в вершине по отдельности.

Используемый алгоритм проведения радиодиагностики заключается в фитировании (подгонке) рассчитываемых с помощью FastGS Codes [1] значений интенсивности и поляризации ГС-излучения к наблюдаемым значениям на различных частотах микроволнового спектра. Подробно метод фитирования на основе генетического алгоритма описан в работе [2].

Диагностика проводилась для двух возможных вариантов питч-углового распределения энергичных электронов: 1) в предположении изотропности их распределения; 2) с учетом возможной анизотропии электронов. Использование второго подхода чрезвычайно важно, потому что исследование возможных погрешностей в оценках магнитного поля и параметров ускоренных электронов, возникающих при фитировании микроволновых спектров излучения, показало, что диагностика в предположении существования анизотропности потоков электронов обеспечивает более точное восстановление параметров по сравнению с изотропным, особенно при значительной продольной анизотропии [3].

В результате диагностики были восстановлены значения и динамика в процессе развития вспышки следующих параметров: величины магнитного поля, угла между направлением силовых линий магнитного поля и лучом зрения, концентрации и показателей энергетического спектра электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-12-00308-П.

1. Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes // Astrophys. J. 2010. V. 721. № 2. P. 1127–1141.
2. Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Микроволновая диагностика вспышечной плазмы методом фитирования по данным Сибирского радиогелиографа // СЗФ 2024. Т. 10. № 3. С. 27–39
3. Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Возможные погрешности в восстановленных методом фитирования параметрах радиоисточника, связанные с анизотропностью распределения электронов // СЗФ 2025 (направлена в печать).

НАБЛЮДЕНИЯ СЕРИИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X-КЛАССА В НОЯБРЕ 2025 ГОДА НОВЫМ СОЛНЕЧНЫМ РАДИОСПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРОМ - СРСП

Койнаш Г.В., Шарыкин И.Н., Зимовец И.В., Иванов Е.Ф.

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

В ноябре 2025 года новым солнечным радиоспектрополяриметром СРСП [1-2] (https://srsp.cosmos.ru/) была проведена серия наблюдений мощных солнечных вспышек X-класса по классификации GOES. Наблюдения выполнялись в широком диапазоне радиочастот от 50 МГц до 24 ГГц с одновременной регистрацией динамических спектров и параметров круговой поляризации радиоизлучения, что позволило исследовать временную и спектральную эволюцию нестационарных процессов в ходе развития вспышек.

В рамках работы проанализированы следующие события, связанные с активной областью NOAA AR 14274: вспышка класса X1.8, произошедшая 09 ноября 2025 года в интервале 07:01/07:35/07:55 UTC (N23W03); вспышка класса X1.2, зарегистрированная 10 ноября 2025 года в 08:55/09:19/10:19 UTC (N23W14); вспышка класса X5.2, наблюдавшаяся 11 ноября 2025 года в интервале 09:49/10:04/10:17 UTC (N23W23); а также вспышка класса X4.0, произошедшая 14 ноября 2025 года в интервале 07:44/08:30/08:40 UTC, когда активная область находилась ближе к западному лимбу солнечного диска (N21W58). Все события сопровождались интенсивным микроволновым и метрово-дециметровым радиоизлучением, характерным для вспышек высокой мощности.

Полученные данные от солнечного радиоспектрополяриметра СРСП позволили проследить динамику радиоизлучения и его поляризации в различных фазах вспышек, связанных с процессами энерговыделения, ускорения и распространения электронов в корональных магнитных структурах. Произведен анализ временной структуры радиоизлучения и его спектров.

Проведено сопоставление наземных радионаблюдений с данными космического мониторинга GOES/XRS в рентгеновском диапазоне, а также с информацией от других наблюдательных инструментов, например таких как: AIA/SDO - ультрафиолетовые изображения, HMI/SDO - векторные магнитограммы, временных профилей рентгеновского излучения KONUS/WIND, что подтверждает диагностические возможности СРСП. Полученные результаты демонстрируют перспективность нового солнечного радиоспектрополяриметра СРСП для детального исследования физических механизмов мощных солнечных вспышек и его значимость для комплексного мониторинга экстремальной солнечной активности в сочетании с наземными и космическими средствами наблюдений.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме ПЛАЗМА.

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

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

ПОИСК АНОМАЛЬНО ЯРКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА ЧАСТОТЕ 23 ГГЦ ПО ДАННЫМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

Феденёв В.В., **Анфиногентов С.А.**

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

Сильное магнитное поле солнечных активных областей проявляется в микроволновом излучении на высоких частотах (единицы-десятки ГГц) в виде стабильных ярких источников, создаваемых гирорезонансным (ГР) излучением в тепловой плазме солнечной короны. Самая высокая частота, на которой это излучение можно наблюдать, пропорциональна максимальному модулю коронального магнитного поля вдоль луча зрения.

Долгое время считалось, что выше 20 ГГц наблюдение таких источников маловероятно. Однако анализ данных радиогелиографа Нобеяма показал, что ГР источники наблюдаются даже на частоте 34 ГГц [1]. За период с 1995 по 2018 год на частоте 34 ГГц было обнаружено 27 долгоживующих радиоисточников, предположительно имеющих гирорезонансную природу. Верификация гирорезонансной природы подобных источников возможна только при наличии пространственно-разрешённых многоволновых наблюдений в широком частотном диапазоне.

В данной работе мы используем наблюдения многоволнового Сибирского Радиогелиографа (СРГ) [2], ведущего непрерывные наблюдения Солнца в диапазоне 3-24 ГГц, начиная с сентября 2023 г. Цель исследования состоит в поиске долгоживущих ГР источников, с верификацией механизма излучения путём построения спектра мощности излучения. В качестве отправной частоты для первичной пороговой фильтрации источников по яркости выбрана частота 23 ГГц, вспышечная активность исключается путём сравнения с каталогами вспышек и благодаря анализу поведения радиоисточника на фазе затухания вспышки.

В докладе рассматриваются как способы обнаружения ГР источников, так и практические аспекты автоматизированного построения каталога событий и фильтрации ложноположительных случаев. Показано несколько выявленных случаев ГР излучения вместе с спектрами мощности излучения. Кроме того, представлен обзор на текущее состояние программного обеспечения для получения изображений СРГ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

1. Fedenev V.V., Anfinogentov S.A., Fleishman G.D. // The Astrophysical Journal 2023. V. **943** P. 160

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

РОЛЬ ИСТОЧНИКА КОГЕРЕНТНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИИ ВСПЫШКИ 09 ОКТЯБРЯ 2024 ГОДА

Кашапова Л.К.[1] **, Тан Ч.**[2]

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

[2] *State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, CAS, Beijing, China*

В большинстве солнечных вспышек микроволновое излучение на частотах выше 1 ГГц обычно формируется некогерентным механизмом - магнитотормозным или гиросинхротронным. Редкие события, в которых когерентное излучение наблюдается на низких микроволновых частотах предполагает присутствие каких-либо топологических особенностей в пространственной структуре вспышки и поэтому привлекают особое внимание.

В докладе представлены предварительные результаты исследования вспышки, произошедшей 09 октября 2024 года. Комбинация наблюдений Сибирского радиогелиографа и спектрального радиогелиографа Mingantu (MUSER) выявила тонкую структуру квазипериодических пульсаций (КПП) с диапазоном частот около 1-3.5 ГГц, форма которой нехарактерна для гиросинхротронного излучения. Спектральный анализ подтвердил плазменный механизм наблюдаемых КПП, а анализ временных профилей и пространственной структуры выявил то, что их источник находился вблизи мощного солнечного пятна. Обсуждаются возможные причины когерентной природы пульсаций, наблюдавшихся в микроволновом диапазоне, эмпирический сценарий, полученный в результате анализа наблюдений и роль источника КПП в инициировании и эволюции вспышки.

Исследование выполнено при поддержке PIFI Group grant (2025PG0008).

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РАДИОИСТОЧНИКОВ ВО ВСПЫШКЕ 4 МАЯ 2024

Мешалкина Н.С.-, Алтынцев А.Т., Кузнецов А.А., Жданов Д.А., Tan Chengming, Wu Zhao

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

Обсуждаются ускорение и перенос электронов во вспышке SOL2024-05-04T06:02:00 рентгеновского класса M9.1. Рассмотрены пространственные, поляризационные и спектральные особенности радиоисточников на основе данных Сибирского Радио Гелиографа (СРГ, 2.8-24 ГГц), Chashan Broadband Solar millimeter spectrometer (CBS, 6-15 ГГц, Китай) и Бадарского Широкополосного микроволнового спектрополяриметра (БШМС, 4-8 ГГц).

Два предвсплеска и главный всплеск являлись широкополосными и наблюдались на всем диапазоне частот на кривых потока СРГ, т.е. механизм был гиросинхротронный. Во время вспышки наблюдался выброс плазмы, заполняющей крупномасштабные петли с удаленными основаниями, находящимися на расстоянии около 130 угл. сек. от ядра вспышки. Обнаружены задержки для предвсплеска и основного всплеска между радио и рентгеном (Fermi Gamma-Ray Burst Monitor (Fermi/GBM)), что говорит об удержании электронов в магнитной ловушке.

Проанализировано поведение радиоисточников (в ядре и удаленном) по изображениям вспышечной области в диапазоне частот Сибирского Радио Гелиографа (2.8-16 ГГц). В ядре в ходе вспышки наблюдается сложная динамика нескольких источников с противоположными знаками поляризации, причем всплытие лево-поляризованного источника соответствует всплытию магнитного потока S-полярности. В ядре суммарная степень поляризации не превышала 20 %, в удаленном источнике степень поляризации росла с частотой, максимальное значение достигало 70 %. Рассматриваются возможные причины этого явления. Длительность импульса на полувысоте из удаленного источника на всех частотах меньше, чем длительность из ядра вспышки, что говорит об удержании в магнитной ловушке электронов в ядре. Из фиттирования спектров удаленного источника получены параметры вспышечной плазмы и показано, что распределение электронов было анизотропным. Работа поддержана грантом PIFI (2025PG0008).

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОНОВОЙ ПЛАЗМЫ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСКОРЕНИЯ КВАЗИТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ ВИСТЛЕРОВ

Филатов Л.В.[1], **Мельников В.Ф.**[2]

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

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

Принято считать, что первичное ускорение электронов в солнечных вспышках происходит в регулярном электрическом поле в области нейтрального токового слоя или в областях, возникающих в силу разных причин в коллапсирующих или в скрученных магнитных петлях. Это поле ускоряет электроны фоновой плазмы высокоэнергичного хвоста максвелловского распределения. Недавно было показано [Tsap, Melnikov, Astron. Letters, 2023], что число электронов, способных преодолеть кулоновский барьер потерь энергии резко увеличивается с ростом температуры плазмы (при увеличении температуры с 10^6 К до 10^7 К число электронов с энергией в несколько кэВ возрастает на более, чем 6 порядков величины). Благодаря этому эффекту потенциальное число квазитепловых электронов, для которых возможно ускорение до больших энергий, также может увеличиться на порядки.

В настоящей работе мы показываем, что отмеченное выше свойство ускорения квазитепловых электронов оказывается наиболее действенным, если ускорение происходит в турбулентных электрических полях, не позволяющих ускоряемым электронам быстро покидать область ускорения. В качестве турбулентного поля рассмотрена турбулентность низкочастотных вистлеров, которая может эффективно генерироваться в компактных областях вспышечных петель с анизотропным распределением температуры фоновой плазмы. Рассмотрены процессы резонансного взаимодействия этой турбулентности с электронами плазмы с максвелловским распределением по скоростям. В нашей модели динамика квазитепловых электронов описывается нестационарным уравнением Фоккера-Планка, это позволяет отследить во времени перераспределение электронов по энергиям, питч-углам и положению в магнитной петле. Показано, что взаимодействие электронов на «хвосте» максвелловского распределения с турбулентностью вистлеров приводит к быстрому (0.1 - 1 с) формированию нетеплового распределения электронов на энергиях 10-100 кэВ. С ростом температуры от 10^6 К до 10^7 К концентрация таких электронов увеличивается на много порядков величины и может достигать единиц процентов от концентрации электронов фоновой плазмы. При более высоких температурах плазмы энергетический спектр нетепловых электронов становится значительно более жестким.

Проведенные расчёты продемонстрировали, что первичное ускорение электронов в солнечных вспышках может происходить за счет резонансного взаимодействия фоновой плазмы с турбулентностью вистлеров. Также была подтверждена важность наличия предварительно разогретой плазмы для эффективного ускорения энергичных электронов и создания условий для генерации интенсивных жестких рентгеновских и микроволновых всплесков во время вспышечного энерговыделения.

ИСТОЧНИКИ МИЛЛИМЕТРОВОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАНЫМ РТ-7.5 И AIA/SDO

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

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

Работа направлена на изучение природы миллиметрового (мм) излучения на разных фазах солнечных вспышек, зарегистрированных с помощью радиотелескопа МГТУ им. Н.Э. Баумана РТ-7.5 на частотах 93 и 140 ГГц. Рассмотрены методы определения площадей источников ультрафиолетового (УФ) излучения в разных каналах инструмента AIA/SDO, а также их связь с оценками спектральных потоков мм излучения вспышек. Особое внимание уделено проблеме корреляции временных профилей мм и УФ излучения. С целью определения параметров тепловой вспышечной плазмы по данным вакуумного УФ излучения использован метод регуляризации Тихонова [1], предложенный для восстановления дифференциальной меры эмиссии DEM (differential emission measure) корональной вспышечной плазмы по данным AIA/SDO [2]. Предлагаемая методика и развитый на ее основе авторский подход позволяют строить карты температуры и меры эмиссии в диапазоне температур 0.5 – 25 МК. Сделан вывод о необходимости пересмотра сделанных ранее выводов о локализации источников мм излучения. Получены дополнительные указания в пользу тепловой природы мм излучения солнечных вспышек для выбранных событий.

Работа выполнена в рамках ГЗ № 122022400224-7 (Смирнова В.В.) и РНФ №22-12-00308-П (Цап Ю.Т.).

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 286 с.
2. Hannah I.G., Kontar E.P. // A&A 2012. V. **539**. Id. A146. P. 14.

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗЛУЧЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Куприянова Е.Г.[1,2], **Михальчук А.В.**[2], **Самофалова Б.А.**[3], **Кузий Д.Д.**[2], **Дмитриев В.А.**[1,2]

[1] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru*
[2] *СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*
[3] *КФУ, г. Казань, Россия*

Волновые процессы являются частыми спутниками солнечных вспышек, однако их роль в общем ходе солнечных вспышек не полностью ясна. Тем не менее, волновые процессы интересны тем, что обладают богатым потенциалом для диагностики как вспышечного энерговыделения, так и его влияния на окружающую среду. Так, например, анализ быстрых волновых пакетов позволит локализовать и определить масштабы первичного энерговыделения, а анализ свойств глобальных корональных волн позволит понять характер влияния вспышечного энерговыделения на окружающие плазменные структуры и, возможно, на межпланетную среду [1]. В докладе указанные процессы обсуждаются на примере солнечной вспышки, в ходе которой зарегистрирован отклик на энерговыделение в виде глобальной корональной волны, быстрых волновых пакетов и характерной осциллирующей структуры в динамических радиоспектрах.

1. Nakariakov et al. // Rev. Mod. Plasma Phys. 2024. V. 8. P. 19.

БЫСТРЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПАКЕТЫ В РАДИОДАННЫХ

Дмитриев В.А.[1,2], **Куприянова Е.Г.**[2,1]

[1] *СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, st069138@student.spbu.ru*
[2] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru*

Наблюдаемые быстрые волновые пакеты в некоторых солнечных вспышках обладают мощным диагностическим потенциалом [1]. В частности, они позволяют диагностировать пространственные и временные масштабы области импульсного энерговыделения, отсутствующие в стандартной модели солнечной вспышки, а также локализовать эту область (см., например, [2]). Однако малое число зарегистрированных таких событий не позволяет полностью реализовать их диагностический потенциал. Поэтому в данной работе поставлена задача автоматического детектирования быстрых волновых пакетов в динамических радиоспектрах. Поиск осуществлялся с помощью классифицирующей нейросети / методов машинного обучения. Были использованы данные радиоспектрографов HiRAS и сети e-Callisto в диапазоне 20 МГц — 2 ГГц. В докладе представлены результаты детектирования волновых пакетов в данных за 2011 год и обсуждаются полученные результаты.

1. Nakariakov et al. // Rev. Mod. Plasma Phys. 2024. V. 8. P. 19.
2. Karlicky et al. // A&A 2011. V. 529. P. 96.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРЕХМИНУТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТЕНИ ПЯТНА: РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО АМПЛИТУДАМ ЦУГОВ И АНОМАЛИИ, СВЯЗАННЫЕ СО ВСПЫШКАМИ

Барахоева К.А., **Анфиногентов С.А.**

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

Одними из наиболее известных волновых процессов в солнечной атмосфере являются трехминутные колебания в тени пятна [1]. В солнечных пятнах сконцентрирована большая часть магнитного потока активной области. Таким образом, пятна магнитно связаны практически со всей корональной частью активной области и процессы, происходящие в солнечных пятнах, могут влиять на ход энерговыделения во время солнечных вспышек. В частности, в ряде работ сообщалось об обнаружении связей между солнечными вспышками и усилением трёхминутных колебаний в пятнах. В одних работах было обнаружено первичное спонтанное усиление колебаний, в последующем провоцирующих вспышку [2,3], в других - генерация или усиление собственных колебаний в результате энерговыделительного процесса в атмосфере Солнца [5,6].

В подобных исследованиях важно уметь отличать аномальные усиления колебаний, связанные со вспышкой, от случайных флуктуаций и артефактов обработки данных. Именно этому и посвящена данная работа. В докладе представлены результаты статистического исследования 11 активных областей по данным SDO/AIA (304Å). Проанализировано распределение амплитуд отдельных цугов 3 мин колебаний в пятне в период без солнечных вспышек.

Обнаружено, что распределение квадрата амплитуды цугов трехминутных колебаний во всех исследованных активных областях хорошо описывается распределением хи-квадрат с числом степеней свободы $\nu = 3.1 \pm 0.1$. Полученный результат позволяет количественно оценивать значимость наблюдаемых усилений колебаний, как вероятность случайного возникновения цуга с данной амплитудой. Также был предложен метод, позволяющий отличать реальные усиления колебаний от «ложных» цугов, появляющихся в результате узкополосной фильтрации всплесков и других вариаций сигнала с широким спектром. Эффективность метода продемонстрирована на примере анализа случая аномального усиления трёхминутных колебаний, опубликованного в работе [2].

1. Beckers J. M., Tallant P. E. //Solar Physics, Volume 7, Issue 3, pp. 351-365. – 1969. – Т. 7. – С. 351-365.
2. Sych R. et al.//Astronomy & Astrophysics. – 2015. – Т. 577. – С. A43.
3. Chandra R. et al. //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2015. – Т. 446. – №. 4. – С. 3741-3748.
4. Kosovichev A. G., Sekii T. //The Astrophysical Journal. – 2007. – Т. 670. – №. 2. – С. L147.
5. Wang Y. et al. //The Astrophysical Journal. – 2024. – Т. 961. – №. 2. – С. 231.
6. Chelpanov A. A., Kobanov N. I. //Astronomy Reports. – 2020. – Т. 64. – №. 4. – С. 363-368.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЛОЙ ВСПЫШКИ 10 МАЯ 2024

Мотык И. Д.[1], Кашапова Л. К.[1], Li Y.[2,3], Song D.[2,3], Jing Zh.[2,3] , Liu Xi.[2,3].

(1) ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия. motykilya@iszf.irk.ru
(2) Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, China.
(3) School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, China

Белая вспышка - один из самых мощных видов солнечных вспышек. Ее инидикатором является увеличение интенсивности излучения в континууме, что указывает на перенос энергии в глубокие слой солнечной атмосферы. В настоящее время нет однозначного мнения ни о том какой механизм вносит больший вклад в формирование излучения в континууме. Нет его и в том как происходит перенос энергии от места выделения в короне к нижним слоям солнечной атмосферы. Для ответов на эти вопросы необходимо получение новой информации с пространственным разрешением о процессах выделения и распространения энергии в во время этих явлений. Классическими маркерами этого являются заряженные частицы или , например, электроны.

Известно, что микроволновое излучение солнечных вспышек чувствительно даже к слабым потокам электронов, а его спектральный анализ позволяет сделать вывод об их тепловой или нетепловой природе, оценить характеристики частиц. В настоящее время большинство микроволновых наблюдений белых вспышек были проведены в режиме „солнце как звезда“. Эти наблюдения не позволяют получать информацию о параметрах плазмы в разных вспышечных ядрах. Благодаря микроволновым изображениям, получаемым Сибирским Радиогелиографом, появилась возможность проследить как эволюцию потока излучения каждого микроволнового источника, так и получить для них оценики параметров плазмы.

В данной работе представлено исследование связи между микроволновым, рентгеновским и излучением в континууме на примере белой вспышки 10 мая 2024 в сверхактивной области NOAA 13664. Исследованы особенности развития морфологии активной области во время вспышки и эволюция микроволновых источников связанных с различными вспышечными ядрами, наблюдавшимися в контнууме. Проведён анализ временных профилей и микроволновых спектров каждого источника, а также сравнение пространственной структуры рентгеновских источников с микроволновыми. Обсуждается сценарий распространения энергии во время вспышки, разработанный на основе полученных результатов и вероятные механизмы генерации излучения в континууме.

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СЛАБЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Рожкова Д. В., **Кашапова Л. К.**

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

Слабые солнечный вспышки или микро и нано- вспышки как правило имеют простую временную и пространственную структуру. Они могут играть роль как элементов сложных и длительных процессов, таких как развитие сложных солнечных вспышек или нагрев солнечной атмосферы, так и служить идеальными тестовыми примерами для методов оценки параметров плазмы с использованием модельных расчетов, например фитирование или подгонка. Этот метод позволяет оценить наиболее вероятные параметры плазмы, минимизируя расхождения между расчетным и наблюдаемым параметрами излучения. В случае микроволновых спектров, особенности формирования излучения гиросинхротронным механизмом, сложность геометрии и структуры источника вспышки может привести к неоднозначности результатов. В этом случае именно слабые вспышки с простой временной структурой позволяют понять границы применимости метода. Одним из серьезных ограничений для развития исследования таких вспышек является уровень сигнала и возможности телескопов, наблюдающих в различных спектральных диапазонах. Сибирский радиогелиограф (СРГ) благодаря высокой чувствительности и широкому спектральному диапазону сделал доступным исследование слабых событий с высоким спектральным разрешением в микроволновом диапазоне.

В докладе представлены результаты исследования микроволнового излучения серии слабых вспышек, полученные в результате применения и сравнения работы двух наиболее популярных методов моделирования гиросинхротронного излучения. Первый метод основан на формулах из работы [1], а второй использует быстрый гиросинхротронный код, представленный в работе [2]. Получены и проанализированы оценки параметров плазмы в предположении излучения, как только ускоренных электронов, так и комбинации электронов с тепловым и нетепловым распределением по скоростям или энергиям. Также для нескольких событий было проведено их сравнение с параметрами, полученными в рентгеновском диапазоне. Обсуждаются как возможности использования результатов полученных при анализе спектров микроволнового излучения, так и особенности параметров плазмы, полученные для слабых событий.

1. Ramaty R. // ApJ 1969. V. **158**. P. 753

2. Fleishman G. D., Kuznetsov A. A. // ApJ 2010. V. **721**. P. 1127

УЗКИЕ КВМ И МИКРОВСПЫШКИ

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

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

Узкие корональные выбросы массы (КВМ), наблюдаемые коронографами видимого диапазона, часто интерпретируются как джеты, возникающие в результате магнитного пересоединения между открытыми и закрытыми магнитными силовыми линиями. В рамках данной работы исследуется связь между временными характеристиками узких КВМ и ассоциированных с ними микровспышек с целью проверки данной гипотезы.

На основе данных коронографа LASCO и спектрогелиографа Mg XII (спутник КОРОНАС-Ф) проанализировано 41 событие с угловой шириной менее 20°. Время инжекции узких КВМ оценивалось по их геометрии и кинематике, а время магнитного пересоединения микровспышек по длительности фазы нарастания мягкого рентгеновского излучения.

Обнаружено, что исследуемые события можно разделить на две группы. Для первой группы наблюдается корреляция между временем инжекции КВМ и временем пересоединения микровспышек. Вторая группа подобной корреляции не демонстрирует. Сравнение положения микровспышек с областями открытого магнитного поля, реконструированными методом PFSS на основе магнитограмм MDI, показывает, что события первой группы преимущественно связаны с областями открытого магнитного поля, тогда как события второй группы, как правило, удалены от них.

Полученные результаты указывают на то, что около 60 % КВМ с угловой шириной менее 20° являются джетами и согласуются с моделью магнитного пересоединения между открытыми и закрытыми магнитными силовыми линиями. Оставшиеся события, несмотря на малую угловую ширину, по своим свойствам ближе к обычным КВМ и, вероятно, имеют иную физическую природу.

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАННИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ

Каламанов В.Г., Садовский А.М.

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

Изучение коронального выброса массы (КВМ) требует знания его структуры, которая, в свою очередь, может пролить свет на параметры КВМ и его эволюцию. При этом инструментарий для исследования структуры коронального выброса массы можно расширить, включив в него современные методы, используемые в обработке изображений. Следовательно, необходима апробация новых компьютерных методов для исследования КВМ и для выяснения их возможностей по изучению структуры коронального выброса массы.

Один из современных методов, получивших распространение во многих смежных областях, — это механизм выделения границ. Под границами подразумеваются кривые на изображении, вдоль которых происходит резкое изменение яркости и фиксируются другие виды неоднородностей (в основном, в контексте освещенности, цвета, ориентации) [1]. Таким образом, границы содержат в себе существенную информацию об объекте, снижая необходимое количество данных для качественного анализа [1]. Одним из наиболее распространенных методов является метод Канни [2], выбранный для данного исследования. В качестве основных требований к своему методу Джон Канни упоминал точность обнаружения границ, точность их локализации и уникальность отклика. Метод Канни имеет следующую очередность действий: сглаживание изображения, нахождение градиентов, подавление немаксимумов, двойная пороговая фильтрация, трассировка области неоднозначности [2]. В результате, получается новое изображение, содержащее информацию о границах объекта.

В ходе исследования изображений, полученных с различных космических аппаратов, было установлено, что метод Канни представляет собой эффективный метод выделения границ структур коронального выброса массы. В частности, он позволяет получить границы эруптивной структуры КВМ для более качественного последующего анализа. Полученные в результате границы дают возможность исследовать эволюцию коронального выброса массы в динамике: в данном случае они могут дать понимание магнитной топологии КВМ и структуры силовых линий магнитного поля.

1. *Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008b).* Digital Image Processing. Prentice Hall.
2. *Canny, J. (1986).* A computational approach to edge detection. IEEE Transactions

МНОГОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 16 ФЕВРАЛЯ 2024 Г.: ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЧАСТИЦ

Кузнецов А.А.[1], **Wu Zh.**[2], **Лысенко А.Л.**[3], **Huang R.**[2], **Киселёв В.И.**[1]

[1] *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, a_kuzn@iszf.irk.ru*
[2] *Shandong University, Weihai, China*
[3] *ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

Солнечные вспышки являются источниками электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. Мы представляем результаты анализа вспышки класса X2.5, которая произошла 16 февраля 2024 г. в активной области AR 13576 вблизи юго-западного лимба Солнца. Данная вспышка наблюдалась Сибирским Радиогелиографом (СРГ), радиополяриметрами Нобеямы (NoRP) и спектрометром Чашаньской обсерватории (CBS) в микроволновом диапазоне, космическими инструментами Konus-Wind, ASO-S/HXI и SolO/STIX в рентгеновском диапазоне, и космической обсерваторией SDO в оптическом, УФ и КУФ диапазонах.

Микроволновые изображения СРГ показали, что в рассматриваемом событии на частотах выше ~5 ГГц доминировало излучение из источника в ядре активной области – по-видимому, относительно компактных вспышечных петель с напряжённостью магнитного поля порядка 1000 Гс. Данные петли наблюдались также ASO-S/HXI в диапазоне 10-300 кэВ. В то же время, практически синхронно с излучением данного источника наблюдались микроволновые уярчения на более низких частотах (ниже ~5 ГГц), возникавшие на расстоянии порядка 100 Мм от ядра активной области, в областях открытого магнитного поля с напряжённостью порядка 10 Гс.

Наблюдения Konus-Wind указывают на наличие в рассматриваемом событии ускоренных электронов с крайне высокой энергией – до ~4 МэВ. Рентгеновские всплески на наиболее высоких энергиях возникали с задержкой по сравнению со всплесками на более низких энергиях, но одновременно с микроволновыми всплесками. В отличие от наблюдений ASO-S/HXI и Konus-Wind, на изображениях SolO/STIX основной рентгеновский источник (связанный со вспышечными петлями) был скрыт солнечным лимбом, но наблюдался источник на энергиях до ~50 кэВ, расположенный на высоте нескольких десятков Мм; данный источник не был виден в микроволновом диапазоне.

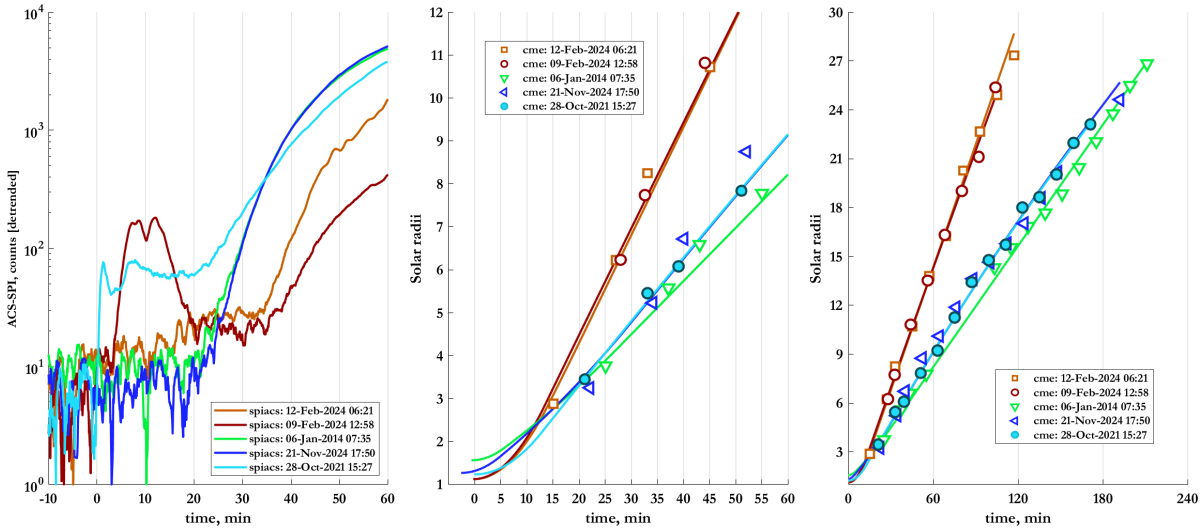
Сделан вывод, что в рассматриваемом событии магнитное пересоединение происходило на достаточно большой высоте (и, по-видимому, было инициировано эрупцией филамента); там же происходило и ускорение частиц. Ускоренные электроны первоначально инжектировались под большими углами к магнитному полю (что характерно для стохастического ускорения); затем они рассеивались под влиянием МГД турбулентности и распространялись вниз, где одновременно генерировали микроволновое и рентгеновское излучения в различных областях, магнитно связанных с областью ускорения. Вторичное накопление ускоренных частиц в магнитных ловушках не играло заметной роли.

Авторы благодарят команды СРГ, CBS и ASO-S за обеспечение работы инструментов и помощь в обработке наблюдений. Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме «Солнечная радиоастрономия» (№ 0278-2026-0002).

СИНХРОНИЗАЦИЯ УСКОРЕНИЯ ПРОТОНОВ И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ В РАЗЛИЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Ожередов В.А.[1], **Струминский А.Б.**[1], **Григорьева И.Ю.**[2]
ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com
ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В работе мы рассматриваем по данным детектора ACS SPI (Anti-Coincidence Shield of the Spectrometer *INTEGRAL*) 5 протонных возрастаний (ПВ) с источниками на видимой и залимбовой стороне Солнца, сопровождаемых корональными выбросами массы (КВМ). КВМ и ПВ сопоставлялись друг другу исходя из критерия близости времени прихода первых протонов t_{p+} и первого появления КВМ в поле зрения LASCO t_1: $|t_{p+} - t_1| \le 30\,\text{min}$. Детектор ASC SPI регистрирует HXR-излучение в энергетическом диапазоне > 60кэВ (это могут быть как первичные фотоны, так и вторичные, рожденные в теле детектора под действием космических лучей). Эти события (КВМ+ПВ) разделены на 2 группы по форме сигнала ACS SPI, обусловленного протонным возрастанием. При совпадении двух профилей протонных возрастаний мы делаем предположение, что момент начала ускорения протонов (радио-ноль, т.е. начало самого высокочастотного излучения из RSTN-диапазона) у залимбового события будет совпадать с радио-нулем события на видимой стороне Солнца. Формальный расчет показывает, что такое наложение также приводит к максимальному значению кросс-корреляции для высотно-временных профилей КВМ. Время прихода первых протонов на орбиту Земли: группа A = {28 Oct 2021,06 Jan 2014,21 Nov 2024} – первый приход на 20-й минуте, $|t_{p+} - t_1| = 1\,\text{min}$ и группа B = {09 Feb 2024,12 Feb 2024} – на 35-й, $|t_{p+} - t_1| = 7\,\text{min}$. Первое событие каждой группы имеет источник на видимой стороне Солнца, а последующие события – залимбовые. Величина среднего ускоряющего протоны электрического поля, вычисленная по времени прихода первых протонов [1], в первой группе равна 3.5×10^{-5}, а во второй группе 1.4×10^{-5} (в *2.3* раза меньше). В предположении, что ускоряющее поле близко к полю Драйсера, а температуры плазмы примерно равны, мы получаем, что плотности различаются также в *2.3* раза. При этом скорости КВМ должны отличаться в 1.48~√2.3, что подтверждается наблюдениями (*2875km/sec/1934km/sec*). Видно, что протонные возрастания имеют одну и ту же форму в пределах каждой группы, а высотно-временные профили КВМ практически совпадают. На рис. показаны временные профили ASC-SPI (слева, фон вычтен) и положение фронта КВМ от времени КВМ на разных масштабах (в середине и справа).



1. A.B. Struminsky et al. // Advances in Space Research, v.76, #12, pp. 7564-7577

УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 28 ОКТЯБРЯ 2003 ГОДА

Б.Ю.Юшков

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

Одним из способов изучения процессов ускорения протонов до высоких энергий во время солнечных вспышек является исследование высокоэнергичного гамма-излучения [1]. Это излучение возникает в результате распада нейтральных и заряженных пионов и характе-ризуется спектральной особенностью в области 30-100 МэВ. Такое гамма-излучение было зарегистрировано во время мощной (X17) солнечной вспышки 28 октября 2003 года прибо-ром СОНГ на борту ИСЗ КОРОНАС-Ф [2]. Временно́й профиль зарегистрированого гамма-излучения отличается быстрым (несколько секунд) резким возрастанием интенсивности до максимума с последующим спадом. В работе [3] был предложен механизм постепенного ускорения протонов электрическими полями напряженностью до $3.3 \cdot 10^{-4}$ В/см, и этот меха-низм был применен для анализа вспышки 28 октября 2003 года. В настоящем докладе пред-ставлены результаты моделирования временно́го профиля гамма-излучения при ускорении протонов электрическими полями, предложенными в [3]. Показано, что смоделированный профиль принципиально отличается от зарегистрированного. При постепенном ускорении протонов интенсивность пионного гамма-излучения должна нарастать также постепенно с характерным временем несколько минут. Резкое возрастание интенсивности высокоэнер-гичного гамма-излучения наблюдалось и в ряде других вспышек.

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

1. Курт В.Г., Юшков Б.Ю., Кудела К., Галкин В.И.. // Космич. исслед. 2010. Т. **48**. С. 72.
2. Kuznetsov S.N., Kurt, V.G., Yushkov, B.Yu., Kudela, K., Galkin, V.I., // Solar Physics. 2011. V. **268**, P. 175.
3. Struminsky A.B., Ozheredov V.A., Sadovskii A.M., Shlyk N.S., Belov, A.V., Abunina M.A., Grigorieva I.Yu. // Advances in Space Research, 2025. V. **76**, P. 7564.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ УСКОРЕНИЕ ПРОТОНОВ ВО ВСПЫШКАХ 10, 11, 14 НОЯБРЯ 2025 ГОДА - РЕЗУЛЬТАТЫ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Грушин В.А., Струминский А.Б.

ИКИ РАН, г. Москва, vgrushin@cosmos.ru

В работе [1] было предложено классифицировать эруптивные вспышки по напряжённости среднего электрического поля (времени прихода первых протонов к Земле) и времени доступного для ускорения протонов >100 МэВ (длительноси наблюдения нетеплового излучения электронов > 100 кэВ – микроволн и HXR). Однако в модели стохастического ускорения [2] время доступное для ускорения протона зависит не только от длительности работы ускорителя, но и от времени, проведённого протоном в самом ускорителе (от вероятности покинуть ускоритель после одного акта его ускорения).
Модель [2] применяется к трём протонным возрастаниям 10, 11 и 14 ноября 2025 г., которые различаются моментом первого прихода протонов на Землю и, следовательно, средним ускоряющим полем. Моменты первого прихода протонов на Землю относительно начала радиоизлучения на 15.4 ГГц определялись в [3] по данным монитора радиационной обстановки ART-XC КА Спектр-РГ и мировой сети нейтронных мониторов (НМ) . Согласно [3], время начала протонного возрастания в этих событиях было на 20, 10 (15) и 15 мин при максимальной жёсткости протонов <808 МВ, >808 МВ(> 3840 МВ) и < 808 МВ, соответственно. Наблюдаемые в этих событиях средние электрические поля ускорения протонов $<3.2\cdot10^{-5}$, $<1.7\cdot10^{-4}$ и $<5.6\cdot10^{-5}$ В/см в модели [2] удаётся получить, как при электрическом поле одного акта 10^{-5} В/см, так и 1 В/см, изменяя характеристики единичного акта ускорения протона – длительность и вероятность покинуть ускоритель.

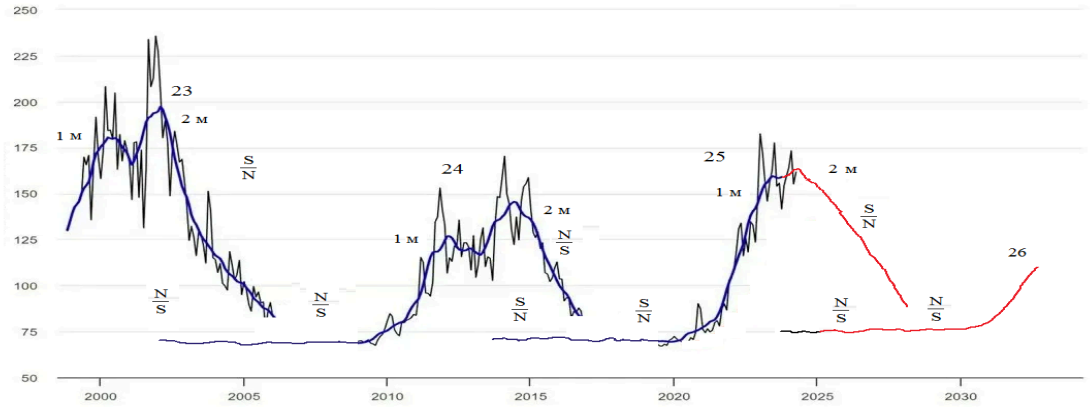
[1] Sadovski A.M., et al, //Bull. of RAS. Physics, 2025, Vol. 89, No. 6, pp.835-838.
[2] Грушин В.А., Струминский А.Б. Проверка модели стохастического ускорения солнечных протонов в среднем электрическом поле ~10^{-4} В/см при ускоряющем поле одного акта 1 В/см. XXIX-я ежегодная конференция «Солнечная и Солнечно-Земная физика - 2025», Троицк, 13-17 октября 2025.
[3] Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю. и др., 21 ая конференция Физика плазмы в солнечной системе, ИКИ РАН февраль 2026.

ДИНАМО-ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СМЕНЫ 23, 24 И 25 ЦИКЛОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ ЯВЛЕНИЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА И ЕГО ПОЛЯРНОСТИ

Плеханов П.Г., Плеханов Ю.Г.

Самарский университет им. С.П. Королёва, Самара, Россия skb.smk@yandex.ru

В рамках развития гипотезы Бэбкока проведено исследование спада первого максимума и спада второго максимума активности Солнца 23, 24, 25 циклов. Разработана гипотеза смены циклов активности Солнца и его полярности. В гипотезе обосновывается, что спад первого максимума активности Солнца наблюдаемого 23 цикла вызван формированием в конвективной зоне около полюсов Солнца полоидальных магнитных поясов противоположной полярности следующего 24 цикла, скручиванием петель из силовых линий общего магнитного поля Солнца. Период спада второго максимума активности Солнца 23 цикла вызван преобразованием полоидальных магнитных поясов 24 цикла около широты 30 градусов полушарий Солнца в тороидальные магнитные пояса вытягиванием и смещением к экватору Солнца петель силовых линий дифференциальным вращением его атмосферы. Одновременное существование в конвективной зоне силовых магнитных линий двух тороидальных магнитных поясов противоположной полярности 23 и 24 циклов. приводит к чрезвычайному нагреву короны Солнца. Разработана диаграмма активности 23, 24 циклов, которой одновременно показана ветвь спада первого максимума и окончания активности Солнца 23 цикла и ветвь начала формирования в конвективной зоне 24 цикла и фазы спокойного Солнца. Показана ветвь роста и спада первого максимума активности Солнца 25 цикла. Показана ветвь формирования 26 цикла противоположной полярности. Гипотеза имеет практическое значение в создании приборов определять смену цикла активности Солнца и его полярности по нагреву его короны. Научное значение гипотезы заключается в определении процессов раздельной активности полушарий Солнца и в объяснении физики законов Ваундера, Хейла, Шперрера и Джоя.



1. Бэбкок (H.W. Babcock), Astrophys. J. 133, 572 (1961).
2. Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Турбулентное динамо в астрофизике (МНаука,1980).
3. Григорьев В.М. Динамика трубок магнитного поля в процессе формирования солнечного пятна. Астрономический журнал. 2012. Т. 89, № 11. С. 967–975.
4. Плеханов П.Г. Солнечная активность. Монография, Издательство Инкома-пресс, г. Самара, 2011-52с..

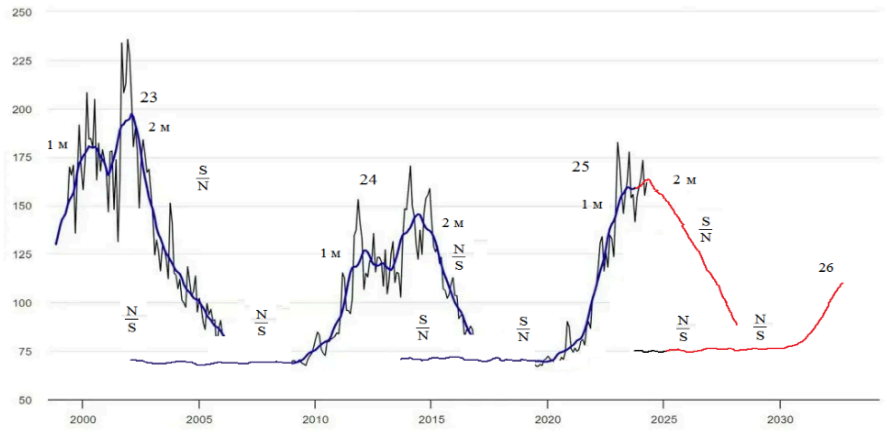
ДИАГРАММА СМЕНЫ НАБЛЮДАЕМОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА И ЕГО ПОЛЯРНОСТИ 23, 24 И 25 ЦИКЛОВ

Плеханов П.Г.

Астрономическая лаборатория РАЕ г. Самара, Россия. skb.smk@yangex.ru

Проведено исследование ветви спада двух максимумов и окончания цикла солнечной активности диаграммы активности 22, 23, 24 циклов. Разработана диаграмма, в которой показаны одновременно две ветви: ветвь спада первого максимума активности действующего цикла и ветви следующего цикла наблюдаемой активности Солнца. Ветвь спада первого максимума активности 22 цикла вызвана формированием в конвективной зоне около полюсов Солнца полоидальных магнитных поясов следующего 23цикла. Ветвь спада первого максимума активности 23 вызван формированием полоидальных поясов противоположной полярности следующего 24 цикла. Ветвь спад первого максимума активности 24 вызвана формированием полоидальных поясов противоположной полярности наблюдаемого Сегодня 25 цикла. Ветви спада второго максимума активности 22, 23, 24, и 25 циклов вызваны преобразованием полоидальных магнитных поясов в тороидальные пояса на широте около 30 градусов полушарий Солнца. Выдвигаемая диаграмма позволяет диагностирование ветви смены формирования и активности Солнца следующих 26 и 27 циклов смены их полярности. Солнца. На диаграмме показана нейтральность полушарий Солнца, которая вызвана ветвью спада активности действующего цикла и одновременной ветвью формирования следующего цикла противоположной полярности. Диаграмма позволяет определить временную характеристику фаз активности Солнца.

Диаграмма смены циклов активности Солнца и его полярности



Примечание:
1. Показана смена 23 и 24 циклов активности и полярности Солнца.
2. Показано прогнозирование формирования, активности и смена полярности 26 цикла

1. Бэбкок (H.W. Babcock), Astrophys. J. 133, 572 (1961).
2. Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А., Турбулентное динамо в астрофизике (МНаука,1980).
3. Григорьев В.М. Динамика трубок магнитного поля в процессе формирования солнечного пятна. Астрономический журнал. 2012. Т. 89, № 11. С. 967–975.
4. Плеханов П.Г. Солнечная активность. Монография, Издательство Инкома-пресс, г. Самара, 2011-52с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ДИНАМО-МОДЕЛИ ПАРКЕРА

Юшков Е.В., **Азизов Ф.А.**

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

Роль параметрического резонанса в звездном и планетарном магнитном динамо обсуждалась с тех пор, как было замечено совпадение длительности 11-летнего цикла солнечной активности и 11-летнего периода вращения Юпитера вокруг Солнца. В настоящее время мы, конечно, понимаем, что механизм динамо работает независимо от подобного потенциального параметрического влияния. Это напрямую следует, например, из существования планетарных магнитных полей, или из наличия циклов магнитной активности у звезд, у которых похожего планетарного воздействия нет [1]. Однако сам вопрос о возможности влияния параметрического резонанса на динамо-механизм никуда не делся. В данном докладе мы расскажем о результатах, продолжающих наши исследования параметрического резонанса прошлых лет [2-3].

Ранее с помощью маломодовой модели сферического магнитного динамо, см., например, [2], было показано, что параметрическое влияние на генерируемое среднее магнитное поле имеет место быть, и в частности, наиболее эффективно оно проявляет себя вблизи удвоенной собственной частоты системы, то есть в условиях параметрического резонанса. Однако, как следует из результатов работы [3], численное моделирование маломодовой системы обыкновенных дифференциальных уравнений предсказывает ряд новых эффектов: например, резонансное подавление генерации, появление биений в около резонансной области и параметрический резонанс с исходно монотонным решением.

В данной работе мы изучаем параметрическое влияние на более сложную (по сравнению с маломодовой системой) нелинейную динамо модель Паркера в частных производных и показываем какие из обнаруженных ранее эффектов сохраняются, а какие трансформируются. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-11-000 69).

1. Katsova M.M., Azizov F.A., Obridko V.N., Sokoloff D.D., Yushkov E.V. // Resonances and stellar cycles: observations and modelling. 2025. Moscow University Physics Bulletin. V. 80(7), pp. 1–5 (in print).

2. Азизов Ф.А., Юшков Е.В., Соколов Д.Д. // Резонансы с монотонными и немонотонными решениями в линейной динамо-системе Паркера. 2025. Журнал экспериментальной и теоретической физики, Т. 168 (7), стр. 1-7.

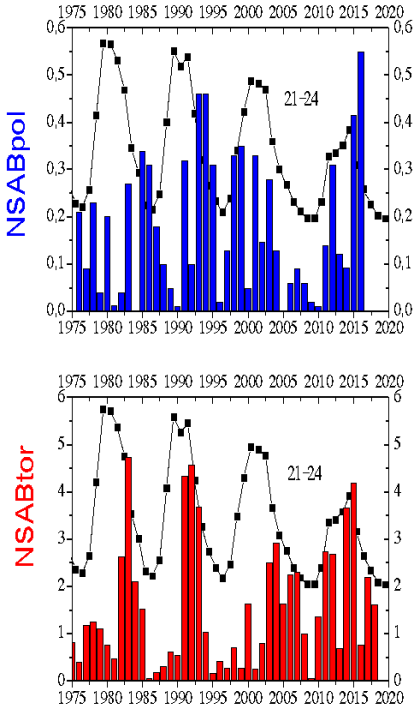
3. Serenkova A.Y., Sokoloff D.D., Yushkov E.V. // Nonlinear parametric resonance in the simplest model of a solar dynamo. 2023. Journal of Experimental and Theoretical Physics, V. 136 (4), pp. 456-464.

СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ ПОЛЯРНОГО И ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (21-24 СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ)

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

Институт Космических исследований РАН. morozova.evgeniya2014@yandex.ru

Северо-южная асимметрия (NSA) солнечных пятен в динамике солнечных циклов является одной из нерешенных задач физики солнечной активности. Возникновение солнечных пятен напрямую связано с взаимной динамикой в цикле полярного и тороидального магнитных полей. NSA полярного и тороидального магнитных полей проявляется как NSA солнечных пятен. На рис. представлены экспериментальные данные по динамике асимметрии полярного NSABpol и тороидального NSABtor магнитных полей Данные публикуются впервые. Результаты анализа.1. Временная динамика NSABpol между циклами достаточно хаотична. NSABpol минимальна в максимуме активности (область изменения знака Bpol), незначительна на фазе роста активности, быстро спадает на фазе спада активности. 2. Абсолютная величина NSABtor ~ в 10 раз больше NSABpol. В максимуме цикла NSABtor достигает минимума (область максимальных величин Btor). Для всех циклов после максимума активности (~ через 2-5 лет) регистрируется увеличение анизотропии тороидального магнитного поля. В этот период происходит дополнительное увеличение полярного поля за счет диффузии через экватор тороидальных потоков из другой полусферы. На фазе спада активности NSABpol и NSABtor постепенно уменьшаются. 3. В 21 и 22 и 24 циклах анизотропия полярного поля формируется полем южной полусферы CNSABpol<0,в 23 цикле — формируется полем северной полусферы CNSABpol>0. CNSA-кумулятивная анизотропия.



Подписи к рис. Северо-южная асимметрия полярного поля NSABpol и тороидального магнитного поля NSABtor , G. NSABpol=|Bpoln-Bpols|, NSABtor=|Btorn-Btors|

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРАЩЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ТОРНАДО С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Костромина Е.Д.[1], Блуменау М.И.[1,2], Калюжный А.П.[3], Алексанян С.А.[3], Никитин И.С.[1,2], Хабарова О.В.[2]

[1]НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, edkostromina@edu.hse.ru

[2]ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия

[3]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия

Магнитные торнадо на Солнце привлекают внимание специалистов как протуберанцы, ассоциирующиеся с потенциально высоким риском корональных выбросов масс в силу закрученности линий магнитного поля и потенциального вращения плазмы в этих структурах. Кроме этого считается, что магнитные торнадо являются каналами передачи тепла из более глубоких слоев Солнца в корону [Wedemeyer-Böhm et al., 2012]. Для изучения их свойств нашей группой были разработаны методы автоматического детектирования этих магнито-плазменных образований с помощью нейронных сетей.

В большинстве существующих работ наличие вращения торнадо и его особенности оцениваются качественно на основании визуального отслеживания отдельных структурных элементов [Schmieder et al., 2016; Kuniyoshi et al., 2023], что не позволяет получить полную пространственно-временную картину движения плазмы. В данной работе предлагается автоматизированный подход к анализу динамики магнитных торнадо на основе методов компьютерного зрения.

В качестве основного инструмента используется анализ оптического потока на последовательностях изображений SDO/AIA, позволяющий получить оценки видимого движения плазмы в плоскости изображения. В компьютерном зрении оптический поток - это расчет карты скоростей для пикселей видео. Если объект передвинулся из точки А в точку Б, алгоритм рисует вектор этого движения. В применении к нашей задаче оптический поток - это векторное поле скоростей перемещения деталей яркостного рельефа (структур плазмы) в плоскости снимка. Математически это решение уравнения адвекции интенсивности, которое интерпретирует временные изменения яркости как результат переноса локальных неоднородностей.

Для ограничения области анализа применяется предварительная сегментация торнадо, в том числе, с использованием нейронных сетей. На основе вычисленных полей скоростей обсуждается возможность оценки параметров вращения, таких как характерные скорости и пространственные масштабы движения.

В докладе представлены первые результаты применения предложенного подхода к наблюдательным данным, выполнено сравнение нескольких алгоритмов метода оптического потока, а также обсуждаются его ограничения и возможные направления дальнейшего развития, включая восстановление траекторий движения плазмы.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ГЛОБАЛЬНОЙ ВОЛНЫ В КОРОНЕ СОЛНЦА

Кузий Д.Д. [1], **Куприянова Е.Г.**[1,2], **Дмитриев В.А.** [1,2]

[1] *СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, Alana_K@list.ru*
[2] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru*

Глобальные корональные волны являются одним из проявлений солнечной активности. Они генерируются в результате процессов импульсного выделения энергии, таких как солнечные вспышки, корональные выбросы массы, джеты, и позволяют, в свою очередь, проводить диагностику этих процессов. Однако, природа глобальных волн до конца не ясна. Нужны оценки динамики их параметров. В данной работе получена и проанализирована оценка скорости одного из участков фронта глобальной корональной волны, наблюдавшейся на Солнце 24 февраля 2011 года. Использован метод разностных изображений SDO/AIA в спектральном канале 193 Å.

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СОСТАВЛЕНИЮ ГЕНЕРАЛЬНОГО КАТАЛОГА ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В СИСТЕМЕ КИСЛОВОДСКОЙ ГОРНОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Осипова А.А.[1], **Ларионова А.И.**[1], **Федосеева С.Н.**[2], **Наговицын Ю.А.**[2,3]

[1] *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, osisasha@mail.ru*
[2] *Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург*
[3] *Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва*

Рассматриваются методологические и алгоритмические подходы к формированию генерального 70-летнего каталога групп солнечных пятен на основе данных Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН (KMAS) и Дебреценского каталога (DPD). Актуальность работы обусловлена необходимостью создания самодостаточной отечественной базы данных солнечной активности и снижением зависимости от зарубежных наблюдательных рядов, широко используемых в современных исследованиях.

В рамках работы выполнена первичная верификация данных KMAS и DPD, включающая автоматизированный и экспертный контроль качества, выявление и коррекцию ошибок оцифровки, некорректных записей и внутренних противоречий. В каталоге KMAS выявлено менее 1% некорректных записей, которые, тем не менее, были предварительно скорректированы.

Разработан алгоритм идентификации групп солнечных пятен, наблюдаемых одновременно в Кисловодске и Дебрецене, с учётом различий во времени наблюдений, координатах и условиях регистрации. Для коррекции эффекта наблюдателя предложен и реализован подход с использованием ежедневных переходных коэффициентов, рассчитанных на основе сравнения суммарных ежедневных площадей групп. В отличие от традиционного применения единого коэффициента для всего периода совместных наблюдений, данный метод позволяет учитывать динамические изменения условий наблюдений, состава наблюдателей и характеристик инструментов.

На основе корреляционного анализа показано, что для повышения достоверности калибровки при расчете ежедневного переходного коэффициента необходимо учитывать только группы, расположенные в пределах 0.92 относительного радиуса солнечного диска, что позволяет минимизировать влияние краевого эффекта. Разработанный алгоритм использован для автоматического заполнения лакун в наблюдениях KMAS данными DPD с учётом ежедневных переходных коэффициентов. Из 7678 выявленных лакун для 1410 реализовано автоматическое заполнение для простых случаев соответствия групп, также показаны принципиальные ограничения полностью автоматических процедур сопоставления, обусловленные различиями в интерпретации структуры активных областей наблюдателями.

Полученные результаты создают основу для формирования высокодостоверного 150-летнего каталога и последующего физического анализа долгосрочных изменений характеристик различных популяций групп солнечных пятен.

PYTHON БИБЛИОТЕКА ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ЛИНИЙ ИНВЕРСИИ ПОЛЯРНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Калюжный А.П.[1], Алексанян С.А.[1], Петерс Е.А.[1], Беззаборов А.А.[1], Блуменау М.И.[2,3], Костромина Е.Д.[2], Хабарова О.В.[3]

[1]РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия, kalyuzhnyy.a.p@edu.mirea.ru

[2]НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия

[3]ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия

Линии инверсии полярности (polarity inversion lines, PILs) или нейтральные линии магнитного поля на Солнце представляют собой границы, вдоль которых радиальная компонента магнитного поля изменяет знак. Их пространственное распределение и динамика отражают конфигурацию магнитного поля Солнца на разных масштабах и являются важным индикатором солнечной активности.

На данное время было предпринято несколько попыток создания универсальных программных инструментов, обеспечивающих реконструкцию нейтральных линий на поверхности фотосферы для произвольных дат наблюдений (Ji et al., ApJ, 2023; Kisielius & Illarionov, SolPhys, 2024). На практике идентификация таких структур требует обработки значительного объёма данных, что ограничивает возможность проведения систематических исследований на длительных временных масштабах.

В данной работе представлено полностью автоматизированное программное решение, реализованное на языке Python, которое охватывает весь цикл обработки данных - от чтения кэррингтоновских карт распределения магнитного поля до реконструкции нейтральных линий и их трёхмерной визуализации на сферической поверхности. В качестве исходных данных используются синоптические карты радиальной компоненты магнитного поля Солнца, предоставляемые Wilcox Solar Observatory. Моделирование структуры линий магнитного поля солнечной короны выполняется на основе модели поверхности источника (Potential Field Source Surface model, PFSS).

Разработанный программный комплекс предназначен для исследования эволюции PILs и анализа их расположения по отношению к активным областям и структурам в короне. В частности, рассматривается применение реконструкции нейтральных линий в задаче изучения пространственного распределения солнечных магнитных торнадо. В докладе представлены используемые методы и архитектура разработанного Python-приложения, а также обсуждаются преимущества, ограничения предложенного подхода и перспективы его дальнейшего развития.

ПОЛУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ДЛЯ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ И ЭНТРОПИЙНЫХ ВОЛН В КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ ПО МУЛЬТИКАНАЛЬНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ SDO/AIA

Першин А.А., Мердеев Р.А., Завершинский Д.И.

Самарский университет, г. Самара, Россия, andrepershin1993@yandex.ru

В ходе работы был разработан программный комплекс, который предназначен для диагностики плазмы в корональных петлях по мультиканальным наблюдениям волн сжатия с помощью инструмента SDO/AIA. Созданный комплекс позволяет получить и анализировать пространственно-временное распределение температуры и концентрации частиц плазмы вдоль корональных петель. Волны сжатия рассматриваются как суперпозиция энтропийных и магнитоакустических волн. Полученные пространственно-временные позволяют получить характеристики собственных мод волновода, и использовать методы МГД-сейсмологии для диагностики среды. Система реализует полный цикл обработки данных: от интерактивной идентификации петель на изображениях до восстановления физических параметров плазмы. Комплекс состоит из четырех основных модулей, интегрированных в единый рабочий процесс.

В качестве исходных данных для программного пакета используются данные с Уровня 1.5. Сами исходные данные, используемые программой, получаются с помощью стандартных инструментов системы JSOC-SDP. Для идентификации и трассировки корональных петель реализован интерактивный инструмент. Метод позволяет пользователю задавать контрольные точки вдоль петли непосредственно на изображениях AIA в выделенном канале, что обеспечивает точное соответствие морфологии наблюдаемой структуры. После определения основной линии петли автоматически генерируются параллельные линии, смещенные на заданное расстояние, формируя двумерную область интегрирования. Ширина полосы выбирается в соответствии с характерным поперечным размером анализируемой петли. Координаты точек вдоль петли интерполируются кубическим сплайном, что обеспечивает плавность и непрерывность производной. Касательные и нормальные векторы вычисляются аналитически на основе параметрического представления сплайна.

Для каждого спектрального канала AIA (94, 131, 171, 193, 211, 304, 335 Å) из временных серий изображений извлекаются данные вдоль заданной области. Интенсивность в каждой точке вдоль петли рассчитывается как среднее значение по соответствующему поперечному срезу, что позволяет уменьшить влияние шумов и мелкомасштабных неоднородностей. Наиболее оптимальный шаг разбиения петли составляет 1 угловую секунду. Интенсивность в точке вдоль петли в заданный момент времени вычисляется как среднее значение интенсивности пикселям конкретного кадра в поперечном срезе.

Восстановление распределения температуры и концентрации частиц плазмы основано на решении системы интегральных уравнений:

$$I_k = \int R_k(T) DEM(T) dT$$

где I_k - наблюдаемая интенсивность в канале k, $R_k(T)$ - функция отклика канала, $DEM(T) = n_e^2 \frac{dl}{dT}$ - дифференциальная мера эмиссии. Расчет дифференциальной меры проводился по методу SITES.

Наблюдаемые профили температуры и плотности плазмы были использованы для определения параметров медленных магнитоакустических и энтропийных волн в горячих корональных петлях.

ОСОБЕННОСТИ ДИСПЕРСИИ МГД-ВОЛН: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТОНКОЙ ПОТОКОВОЙ ТРУБКИ И МАГНИТНОГО СЛОЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Агапова Д.В., Завершинский Д.И.

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

Ключевую роль в формировании пространственно-временных структур плазмы в астрофизических объектах, таких как солнечная корона, играют неадиабатические процессы: нагрев, радиационное охлаждение и теплопроводность. Их мощность, определяемая локальной температурой и плотностью, оказывает значительное влияние на генерацию и эволюцию волновых возмущений, включая акустические, магнитоакустические (МА) и альфвеновские волны. В приближении оптически тонкой среды стандартным способом моделирования тепловыделяющих сред служит обобщенный источник теплопотерь, описывающий баланс нагрева и охлаждения. При этом не менее значимым фактором является теплопроводность, которая, перераспределяя энергию, изменяет температурный профиль плазмы и её динамические свойства. Особой чувствительностью к изменениям в среде обладают магнитозвуковые волны. Их свойства, такие как инкремент затухания (усиления), фазовая скорость и амплитуда, являются функциями термодинамических параметров, что позволяет использовать их для точной диагностики солнечной атмосферы.

Исследования влияния теплопроводности и теплового дисбаланса на медленные МА волны выявило качественно согласованные результаты в рамках двух базовых теоретических подходов – модели тонкой потоковой трубки и модели магнитного слоя и модели магнитного слоя. В длинноволновой области спектра поведение волн в обеих моделях контролируется тепловым дисбалансом, что выражается в модифицированным выражением для адиабатической трубчатой скорости, учитывающим мощность нагрева и охлаждения плазмы. В коротковолновой области в обоих случаях фазовая скорость определяется теплопроводностью, а изотермическая звуковая скорость становится ее пределом.

Однако ключевое различие между моделями проявляется в структуре дисперсионных решений. Модель тонкой магнитной трубки, основанная на приближении узкого изолированного волновода, предполагает единственное решение для медленной МА-моды. В то время как модель магнитного слоя, описывающая плазменную конфигурацию с конечной поперечной протяжённостью, предсказывает целый спектр решений, соответствующих различным поперечным гармоникам — от фундаментальной (n = 1) до высших (n>1). Каждая гармоника представляет отдельную волновую моду с собственной поперечной структурой, что находит отражение в виде семейства дисперсионных ветвей. Эти ветви заметно расходятся в области малых периодов и постепенно сходятся к общему пределу при увеличении длины волны. Соответственно, дисперсия фазовой скорости в модели тонкой трубки является слабо выраженной и обусловлена физическими параметрами среды, но не геометрией. В модели магнитного слоя к этим эффектам добавляется сильная геометрическая дисперсия, связанная с конечной толщиной слоя, что приводит к сложной зависимости скорости от волнового числа. При этом для каждой поперечной гармоники эта зависимость имеет собственную траекторию. Таким образом, выбор между моделями должен определяться не только физическими условиями (учётом неадиабатических процессов), но и геометрической сложностью исследуемой плазменной структуры.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FMR-2024-0017).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ОКРЕСТНОСТИ МАГНИТНОЙ ПЕТЛИ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ОСНОВАНИЯМИ

Шаин А.В., Мельников В.Ф., Деркач А.А.

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

Опубликован ряд теоретических работ (Zaitsev & Stepanov 2017; Titov & Démoulin 1999; Solov'ev, Kirichek 2020; и др.), в которых рассматриваются различные модели магнитных жгутов, ответственных за процессы накопления и высвобождения энергии в солнечной короне.

В настоящей работе предпринимается попытка исследовать структуру распределения электрических токов в окрестности магнитного жгута с помощью трёхмерного численного моделирования. Представлены предварительные результаты МГД-экспериментов, выполненных с использованием кода MPI-AMRVAC (Keppens et al., 2020). Рассматривается формирование магнитного жгута в первоначально потенциальном биполярном магнитном поле за счёт плавного вращения плазмы в фотосферных основаниях магнитной петли. Получены пространственные распределения плотности электрического тока и его временная эволюция. В частности, установлено, что формирование токовых структур сопровождается чередованием направлений электрических токов в окрестности жгута.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-00308-П.

THE MEAN STEP BOUNDARY MODEL OF THE SOLAR ATMOSPHERIC LOOPS

Naga Varun. Y

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

Solar atmospheric loops constitute the basis of the coronal magnetic structure. Usually, the abrupt step boundary model of the magnetic flux tube is used to model these magnetized plasma loops while analyzing different wave modes exhibited by them. We prove that the abrupt step boundary model (ASB model) is logically self-contradictory by showing that there is a singularity in the force density at the boundary even when the flux tube is static and therefore, show that the derivation of the well-known dispersion relation for the magnetoacoustic modes using this model is incorrect. The implication of this singularity on the electrodynamic boundary condition was earlier discussed in [1]. As an alternative we present a more refined model called as the mean step boundary model (MSB model) for the solar atmospheric loops. We prove that MSB model is free from the model induced artifacts or singularities and therefore conclude that this model must be used instead of the regularly used abrupt step boundary model of the flux tubes in all the applications that are astrophysical or otherwise. As a supplement, we derive the dispersion relation of the well-known Zaitsev-Stepanov-Edwin-Roberts (ZSER) theory in a mathematically rigorous way using this model.

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

1. Yelagandula N. V. An Additional Note to “A New Insight into the Linear Theory of Magnetoacoustic Waves in the Homogeneous Flux Tubes with an Abrupt Boundary” //Research Notes of the AAS. – 2024. – Т. 8. – №. 5. – С. 142.

ОСОБЕННОСТИ САНТИМЕТРОВОГО СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600 СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29.03.2006 Г.

Голубчина О.А.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия, golubchina_olga@mail.ru

В работе представлен обзор основных результатов исследования источников радиоизлучения северной полярной области Солнца и северо-западного лимба Солнца, открытых во время наблюдений максимальной фазы (Ф = 0.998) солнечного затмения 29.03.2006 г. в сантиметровом диапазоне длин волн (1.03 – 30.7) см на радиотелескопе РАТАН – 600. При обработке наблюдений использовалось моделирование радиоизлучения Солнца и Луны в предположении круговой симметрии. Приведены распределения яркостных температур радиоизлучения в атмосфере Солнца. Получены оценки уменьшения яркостных температур солнечного радиоизлучения на сантиметровых длинах волн наблюдений в области корональной дыры (КД). Обсуждаются полученные распределения яркостной температуры, электронной концентрации открытого Северо-западного диска Солнца с удалением от центра оптического диска Солнца. Представленные распределения яркостных температур свидетельствуют о возможной нижней границе формирования солнечного ветра от исследуемых открытых областей Солнца во время наблюдения максимальной фазы солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопе РАТАН – 600.

СОЗДАНИЕ КАТАЛОГА ЗАТУХАЮЩИХ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ ВБЛИЗИ ЛИМБА ЗА 2020-2024 ГГ. С ПОМОЩЬЮ RESNET-18

Нечаева А.Б., Зимовец И.В.

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

Корональные петли на Солнце представляют из себя крупномасштабные (радиус от нескольких Мм до сотен Мм) структуры, хорошо наблюдаемые в ультрафиолетовых каналах телескопов. Изгибные колебания петель в свою очередь являются одним из самых изучаемых корональных феноменов на Солнце. Разделяют два режима изгибных колебаний: затухающие и незатухающие. В данной работе речь идёт о затухающих колебаниях, которые возбуждаются взрывными процессами и наблюдаются на временах порядка десятков минут.

Создание каталога затухающих колебаний солнечных корональных петель – важная прикладная задача, требующая ручного просмотра изображений для каждой вспышки и отбора событий. Однако можно попытаться облегчить эту задачу при помощи использования алгоритмов компьютерного зрения, а именно натренировать алгоритм по каким-либо признакам в УФ изображениях Солнца различать вспышки, которые порождают затухающие изгибные колебания. В данной работе используются данные телескопа Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту Solar Dynamics Observatory (SDO) в канале 171 Å. На основе предыдущих каталогов затухающих колебаний петель [1] сформирована обучающая выборка для нейросети на основе ResNet-18, которая определяет наличие или отсутствие колебаний на УФ изображениях рассматриваемой активной области после вспышки. Всего в финальный каталог вошли 334 отдельных колебательных события, проассоциированные с 201 вспышкой вблизи лимба. В каталоге приведены основные характеристики колебаний такие как период колебания, длина петли, количество видимых периодов, а также оценки для амплитуды колебания и времени затухания в случаях, где это возможно было оценить. Стоит также отметить, что подобные попытки применения компьютерного зрения для определения наличия колебаний уже предпринимались [2], однако данный алгоритм построен на другой архитектуре и других входных данных.

1. Nechaeva A., Zimovets I.V., Nakariakov V.M., Goddard C.R. // The Astrophysical Journal Supplement Series 2019, V. **241**. P. 31

2. Belov S.A., Zhong Y., Kolotkov D.Y.; Nakariakov V.M. // The Astrophysical Journal Supplement Series 2025, V. **281**. P. 12.

СОЛНЕЧНЫЙ РАДИОСПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР 50 МГц - 24 ГГц (СРСП)

Шарыкин И.Н., Койнаш Г.В., Зимовец И.В., Иванов Е.

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

В марте 2025 г. был введен в эксплуатацию солнечный радиоспектрополяриметр - СРСП [1-2], установленный в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) 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. Основная цель комплекса - регистрация и каталогизация активных явлений на Солнце, а также получение многочастотных микроволновых (3-24 ГГц) спектров в качестве контекстных данных для современных комплексных многоволновых наблюдений солнечных вспышек. Описаны базовые характеристики и настройки комплекса, особенности его архитектуры и интерфейсов управления. Освещаются проведённые технические испытания, а также первые научные наблюдения, подтвердившие работоспособность системы в широком диапазоне частот от 50 МГц до 24 ГГц. На сегодняшний день данные выкладываются в открытом доступе на сайт https://srsp.cosmos.ru/.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме ПЛАЗМА.

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

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

ВЫХОД МАГНИТНОГО ЖГУТА 6 СЕНТЯБРЯ 2017 г. В ПРОЦЕССЕ ВСПЫШКИ БАЛЛА X9.2 В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ 12673

Головко А.А.

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

Анализ структуры магнитного поля и его изменений в активной области №12673 во время самой мощной вспышки 24-го солнечного цикла, имевшей балл X9.3, позволяет сделать выводы о характере изменений. Они хорошо соответствуют модели выброса магнитного жгута, описанной в работе [1]. Наблюдения с помощью HMI SDO показали синхронное уменьшение магнитного потока N- и S-полярностей по обе стороны линии раздела полярностей в течение короткого интервала времени (1-2 мин) перед максимальной стадией развития вспышки. Это иллюстрируется на Рис.1. Скорость изменения достигла $6x10^8$Вб/с.

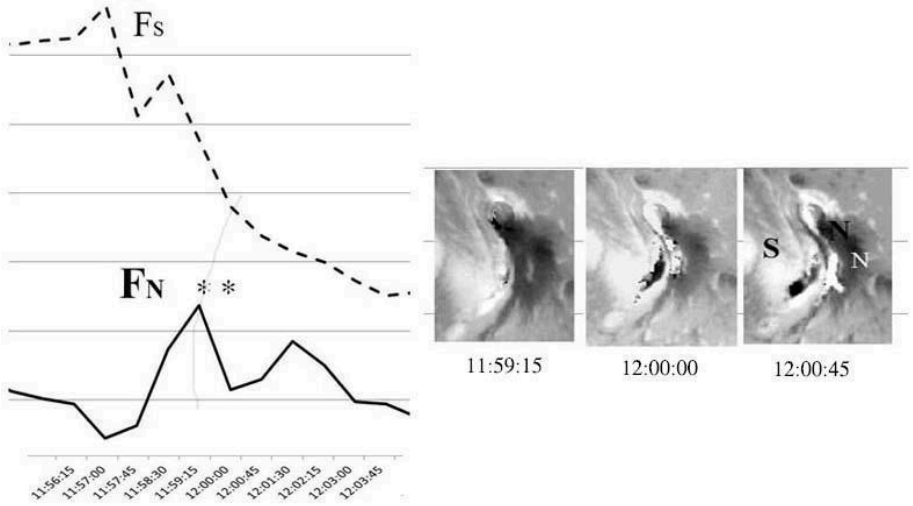


Рис. 1. Звездочками отмечен интервал времени, в котором произошло синхронное уменьшение магнитного потока обеих полярностей, соответствующее гашению потока.

Такое изменение потоков, названное “magnetic cancellation” (гашение потоков) было описано впервые в работе [2] и обнаружено во многих активных областях (например, согласно выводу работы [3] во вспышке 14 июля 2000 г.). Физическая интерпретация этого явления пока неоднозначна; в работе [4] используется модель выброса U- образной магнитной трубки. Тем не менее, его связь с процессом вспышки реальна и подтверждается моделированием динамики магнитных жгутов [1].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки России (проект №0278-2026-0001).

1. Yan X. L., J. C. Wang J.C., G. M. Pan G.M. et al. // Astrophys. Journ. 2018. V. 856:79 (14pp).
2. Martin S.F., Livi S.H.B.,Wang J. // Australian J. Phys. 1985.V.38, P. 929.
3. Головко А.А. // Труды V Росс.-Монг. Конф. по Астр. и Геофиз., Иркутск, 2004. С.100.
4. Lites B.W. et al. // Astrophys. Journ. 1995. V., P. 877.

О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР И ПЛАЗМЕННЫХ СЛОЁВ В ФОРМИРОВАНИИ СМ–ДМ СПЕКТРА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Ступишин А.Г., Кальтман Т.И.

СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, agstup@yandex.ru

Спектральные наблюдения активных областей Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах с высоким частотным разрешением выявляют узкополосные по частоте особенности — депрессии и сложные волнообразные структуры, которые не удаётся объяснить в рамках однородных моделей солнечной атмосферы.

В данной работе рассматривается возможная роль холодных плазменных слоёв и магнитных структур нижней короны в формировании подобных особенностей см–дм спектров активных областей. В качестве рабочего приближения используются упрощённые модельные атмосферные профили, а также параметрические модели магнитного поля. Рассматриваются конфигурации с наличием холодного слоя (волокна) на различных высотах в диапазоне десятков мегаметров.

Проведённые расчёты показывают, что присутствие холодного магнитного слоя может приводить к появлению узкополосных депрессий интенсивности в дм-диапазоне, а также к формированию сложных спектральных структур. Эффект связан с перераспределением вкладов гирорезонансного и свободно-свободного механизмов излучения и с изменением условий прохождения радиоволн через неоднородную магнитно-плазменную среду.

Полученные результаты следует рассматривать как предварительные и иллюстрирующие принципиальную возможность объяснения наблюдаемых узкополосных спектральных особенностей в рамках моделей со слоистой магнитно-плазменной структурой короны. Дальнейшие исследования будут направлены на использование более реалистичных атмосферных профилей и физически согласованных моделей магнитного поля, а также на сопоставление расчётов с наблюдательными данными РАТАН-600.

ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 50 МГЦ - 24 ГГЦ ПО ДАННЫМ НОВОГО СОЛНЕЧНОГО РАДИОСПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРА - СРСП

Шарыкин И.Н., Койнаш Г.В., Зимовец И.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, srsp@cosmos.ruu

В работе рассматриваются временные профили радиоизлучения импульсной солнечной вспышки C6.5, произошедшей 31 мая 2025 г. в 13:21 UT, в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах по данным нового солнечного радиоспектрополяриметра - СРСП [1-2] (https://srsp.cosmos.ru/), установленного в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) и эксплуатируемого под руководством Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). Выбранное событие примечательно наличием ярко выраженного импульсного профиля потока радиоизлучения в сантиметровом диапазоне на многих частотах. В работе сравниваются данные в радиодиапазоне с рентгеновскими наблюдениями GOES и KONUS/WIND. Рассматривается пространственная структура энерговыделения солнечной вспышки по данным ультрафиолетовых изображений AIA/SDO и векторным магнитограммам HMI/SDO. Обсуждается концепция «элементарного» события с точки зрения реальной внутренней временной структуры импульса вспышечного энерговыделения по данным радиоизлучения в широком диапазоне частот, а также на базе пространственной морфологии источников ультрафиолетового излучения и топологии магнитного поля.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 25-22-00745.

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

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

Лысенко А.Л, Дёмин А.Г., Ридная А.В., Уланов М.В., Свинкин Д.С., Цветкова А.Е., Фредерикс Д.Д.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru

Созданный в ФТИ им. А. Ф. Иоффе эксперимент Konus-Wind представляет собой два спектрометра жесткого рентгеновского/гамма-излучения, установленные на борту космического аппарата Wind, которые проводят непрерывный обзор всего неба в диапазоне энергий ~20-1200 кэВ с 1994 г. по настоящее время. Konus-Wind находится за пределами магнитосферы Земли, в точке Лагранжа L1, и не подвержен помехам со стороны радиационных поясов и затенениям Землёй, благодаря чему наблюдает Солнце практически непрерывно (90 % времени). Это делает инструмент аналогом рентгеновских сенсоров GOES/XRS в жёстком рентгеновском диапазоне, где за излучение солнечной вспышки ответственны ускоренные электроны. За всё время наблюдений Konus-Wind зарегистрировал около 15,000 солнечных вспышек в фоновом режиме, предоставляющем временные профили в трёх широких каналах G1 (20–80 кэВ), G2 (80–300 кэВ), G3 (300–1200 кэВ) с временным разрешением около 3 с. Данные Konus-Wind актуальны и по сей день, поскольку диапазоны новых телескопов, SolO/STIX, ASO-S/HXI и Aditya-L1/HEL1OS, ограничены сверху энергиями 150-300 кэВ.

Мы представляем базу данных солнечных вспышек, зарегистрированных инструментом Konus-Wind в фоновом режиме, которая доступна по адресу http://www.ioffe.ru/LEA/kwsun_waiting и дополняет базу данных солнечных вспышек, зарегистрированных в эксперименте Konus-Wind в триггерном режиме http://www.ioffe.ru/LEA/kwsun. Для каждой вспышки база данных содержит временные профили в формате ASCII. Добавлена возможность интерактивного преобразования данных в формат FITS для анализа спектра при помощи стандартных пакетов (например, XSPEC). В докладе представлено описание фоновых данных инструмента и проиллюстрированы их возможности на примере некоторых интересных событий.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 25-22-00288.

БЫСТРЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПАКЕТЫ В МНОГОКАНАЛЬНОМ ИЗЛУЧЕНИИ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Самофалова Б.А.[1], **Куприянова Е.Г.**[2,3], **Михальчук А.В.**[3]

[1] *КФУ, г. Казань, Россия, basamofalova@kpfu.ru*
[2] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru*
[3] *СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*

В докладе обсуждается солнечная вспышка 24.02.2011 года, в многоканальном излучении которой нами были найдены быстрые волновые пакеты. По данным в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (КУФ) волновые пакеты возникли на фазе роста вспышки, продолжались на протяжении всей импульсной фазы и начала фазы спада. Волновые пакеты были зарегистрированы в следующих каналах SDO/AIA: 171Å, 193Å, 211Å, 131Å, что соответствует достаточно большому разбросу температур: от 0.4 до 2 МК. Одновременно в радиодиапазоне похожий отклик в виде волнового пакета наблюдался во временных профилях динамического спектра в диапазоне частот от 600 до 1300 МГц. Найдено, что характерные временные масштабы в радио- и в КУФ- диапазонах различаются: в радиодиапазоне наблюдается дрейф периода от 100 до 200 секунд, а в КУФ диапазоне — от 72 до 96 с. Обсуждается возможный сценарий данного события.

МАГНИТНЫЕ ЖГУТЫ И ПОВЕДЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРЕДВСПЫШЕЧНОЙ ФАЗЕ

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

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

[2]*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

В работе исследованы 17 вспышек различных классов по данным NoRH (17 ГГц) и СРГ (6ГГц). Для поиска и идентификации магнитных жгутов применялся метод восстановления магнитного поля с помощью нелинейной бессиловой (NLFFF) экстраполяции и пространственной структуры плотностей электрических токов, являющихся хорошей количественной характеристикой скрученности силовых линий магнитного поля. Показано, что положение наиболее мощных жгутов, характеризующихся самыми сильными в активной области электрическими токами, совпадает с положением максимума радиояркости в момент пика вспышки. Связь магнитных жгутов с поляризованным радиоизлучением и с излучением в крайнем ультрафиолетовом диапазоне (КУФ) (по данным SDO/AIA) во время максимума яркости вспышки свидетельствует о том, что вспышечные аркады совпадают пространственно с расположением жгутов в активной области. За несколько часов до вспышки в области магнитных жгутов наблюдается свечение петель в КУФ (94 Å и 131 Å). Здесь же затем наблюдается максимальная радиояркость вспышки. В предвспышечной фазе в эруптивных событиях наблюдается изменение пространственной конфигурации радиоисточника за несколько минут до начала вспышки, а также флуктуации радиоизлучения с периодами от 10 до 100 минут в течение нескольких часов до начала вспышки.

Работа авторов М.В.Ф., Ш.А.В., К.С.А. выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-12-00308-П.

ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА NORH, RSTN И GOES

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

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, beam@gaoran.ru
НИУ ВШЭ, Нижний Новгород, Россия

Под предвестником мы понимаем событие (в данном случае квазипериодические флуктуации (КПФ)), которое, как правило, предшествует другому событию (вспышка). При этом мы предполагаем, что между предвестником и последующей вспышкой существует какая-то пока нам неизвестная физическая связь. Эффект усиления мощности КПФ микроволнового излучения перед вспышкой, который можно рассматривать как предвестник солнечной вспышки был обнаружен более 50 лет назад, однако общепринятой интерпретации этого эффекта до сих пор нет.

В наших предыдущих работах мы обнаружили, что по данным корреляционных кривых, полученных по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма, 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).

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.

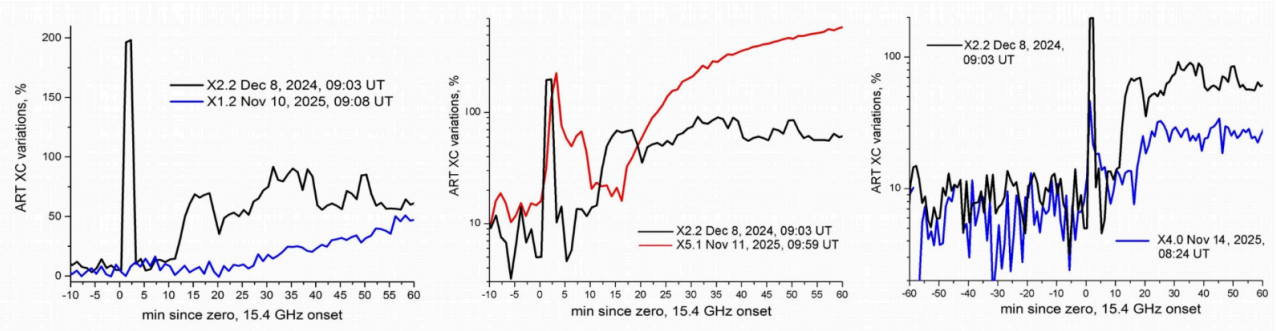
КЛАССФКАЦИЯ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК 10-14 НОЯБРЯ 2025 ГОДА

Струминский А.Б.[1], **Садовский А.М.**[1], **Григорьева И.Ю.**[2], **Ожередов В.А.**[1], **Арефьев В.А.**[1], **Штыковский А.Е.**[1], **Самородова А.Д.**[1]

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

[2] *ГАО РАН, Пулково, г. Санкт-Петербург, Россия*

В работах [1,2] проверялась гипотеза о стохастическом ускорении протонов в солнечных вспышках по наблюдениям мощных протонных событий детектором жесткого рентгеновского излучения (HXR) ACS SPI/INTEGRAL и мировой сетью нейтронных мониторов (НМ, наземные протонные возрастания 2003-2024 гг. (Ground Level Enhancement, GLE). Был сделан вывод, что для ускорения протонов достаточно среднего электрического поля напряженности $Ɛ<10^{-4}$ В/см. При энергиях протонов >100 МэВ и $Ɛ<1.8\cdot10^{-4}$ В/см возможно наблюдение у Земли эффекта обратной дисперсии — первыми приходят протоны не больших, а меньших энергий <500 МэВ. Было предложено классифицировать эруптивные вспышки по напряженности среднего электрического поля (времени прихода первых протонов к Земле) и времени доступного для ускорения протонов >100 МэВ (длительности наблюдения нетеплового излучения электронов >100 кэВ — микроволн и HXR. Миссия КА INTEGRAL завершилась 28 февраля 2025 г., данные ACS SPI перестали быть доступными.
Монитор радиационной обстановки ART-XC КА Спектр-РГ, также как и ACS SPI может регистрировать как первичное солнечное HXR излучение >60 кэВ, так и вторичное, рожденное в детекторах под действием протонов космических лучей. Поэтому он может быть использован для решения таких же задач — определения темпа ускорения протонов (средней напряженности электрического поля) в солнечных вспышках.



Наблюдения детекторами ART-XC протонных возрастаний 10, 11 и 14 ноября 2025 г. подтверждают выводы [1,2] и показывают, что их родительские вспышки можно классифицировать по длительности наблюдения HXR излучения (времени ускорения протонов >100 МэВ) и среднему электрическому полю (времени прихода протонов к Земле). Во вспышке X1.2 10 ноября реализовалось длительное ускорение в таком слабое среднем электрическом поле, что протонов >300 МэВ не было. Во вспышке X5.1 11 ноября напряженности электрического поля и длительности ускорения было достаточно для ускорения протонов >2000 МэВ (GLE77). Во вспышке же X4.0 14 ноября для ускорения протонов >300 МэВ не хватило длительности ускорения, несмотря на сильное поле. Эффект обратной дисперсии наиболее ярко был виден в событии 11 ноября 2025 г., в котором протонное возрастание ART XC произошло позже, чем на НМ SOPB, но раньше, чем на НМ LMSK. Это показывает, что максимальная энергия протонов, регистрируемых ART XC, меньше 300 МэВ. Протоны с энергией менее 300 МэВ еще не дошли, а протоны с энергией единицы ГэВ еще не успели ускориться.

1. Sadovski A. M., et al. // Bull. of RAS. Physics, 2025, Vol. 89, No. 6, pp. 835–838.
2. Struminsky A.B., et al. // Adv. Space Res. 2025, Vol. 76, Issue 12. pp. 7564-7577.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИОНОВ И НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ С ПОВЕРХНОСТЯМИ

Моисеенко Д.А., Лымарева Д.Н., Петух А.И.

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

Исследование процессов прямого взаимодействия космической плазмы с различными поверхностями имеет важное прикладное значение в рамках планируемых экспериментов.

Задачу можно разделить на два направления – исследование процессов взаимодействия космической плазмы с объектами солнечной системы или элементами космических аппаратов и задачу регистрации параметров нейтральных атомов и ионов, образованных в результате такого взаимодействия.

Ярким примером взаимодействия плазмы с объектами солнечной системы является отражение солнечного ветра от поверхности Луны - до 20 % протонов солнечного ветра может отражаться в виде энергичных нейтральных атомов. Детектирование потока нейтральных атомов позволит исследовать свойства поверхности в зависимости от структуры, рельефа и угла освещения потоками солнечного ветра, решать задачи локализации магнитных аномалий и исследовать границы данных регионов в зависимости от меняющихся условий космической плазмы. Также процессы нейтрализации ионов при взаимодействии с мишенью может быть использовано в ионных масс-анализаторах во времяпролетных схемах.

В работе представлены результаты исследования процессов рассеяния и отражения ионов и нейтральных атомов на мишенях, изготовленных из различных металлов и с различным качеством обработки поверхности.

В качестве мишеней использовался шлифованный алюминий с золотым покрытием, а также две вольфрамовые мишени – шлифованная и полированная. Мишени освещались потоком ионов водорода и азота с энергиями от 500 до 3000 эВ.

В процессе эксперимента менялся угол освещения мишеней, фиксировались угловые распределения частиц – ионов и нейтральных атомов, образованных в результате взаимодействия начального потока с мишенями.

Полученные в результате проведения эксперимента данные позволяют оценить влияние структуры и материала мишени на процессы отражения и рассеяния ионов различных масс и энергий, определить ожидаемые траектории движения нейтральных атомов и ионов, оценить энергетическое распределение вторичных и рассеянных частиц.

Результаты данного исследования позволяют проводить более качественное проектирование и макетирование узлов приборов, использующих преобразование ионов в нейтральные атомы, либо наоборот – ионизацию энергичных нейтральных атомов. К таким узлам относятся схемы измерения времени пролета частиц в ионных спектрометрах, а также ионизационные ячейки в детекторах энергичных нейтральных атомов.

УЧЕТ МЕТЕОЭФФЕКТА В ДАННЫХ РЕГИСТРАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ ЯКУТСКОГО СПЕКТРОГРАФА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО НАЗЕМНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПУНКТЕ НАБЛЮДЕНИЯ

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

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

Для исключения температурного эффекта атмосферы, в данных регистрации мюонных телескопов космических лучей, необходимы данные аэрологического вертикального зондирования вблизи пункта расположения детекторов. Но из-за их частого отсутствия, обычно используется информация, получаемая на основе глобальных атмосферных моделей, которая в последнее время стала недоступной для российских ученых.

В связи с этим, мы предлагаем эмпирический метод учета температурного эффекта при регистрации космических лучей на подземном комплексе мюонных телескопов Якутского спектрографа. Используются данные непрерывных наземных измерений температуры, представленные Якутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и на сайте, разработанном ООО "Расписание Погоды" (Санкт-Петербург).

Сравнение результатов коррекции температурного эффекта в подземных наблюдениях, выполненных с использованием наземных температур и данных глобальных атмосферных моделей, показывает практическую пригодность предлагаемого подхода. Это открывает возможность для его применения в режиме реального времени.

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

ГЕЛИОСФЕРА И ИНТЕНСИВНОСТЬ ГКЛ В ПЕРИОДЫ ИНВЕРСИИ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СРАЗУ ПОСЛЕ НЕЁ

Крайнев М.Б., Калинин М.С.

ФИАН, Москва, Россия

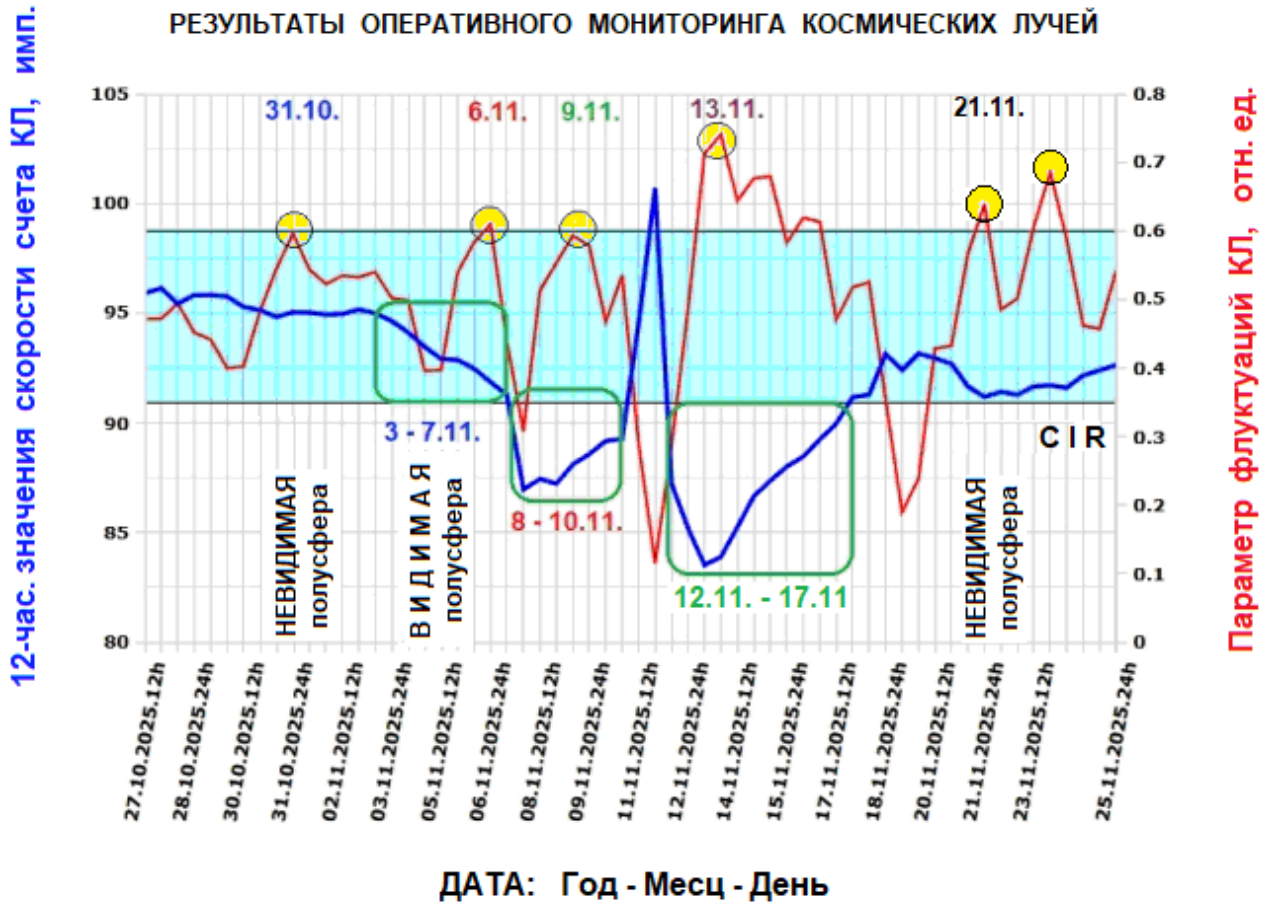
Доклад будет посвящён рассмотрению поведения солнечных и гелиосферных характеристик, а также интенсивности ГКЛ в пяти последних периодах инверсии гелиосферного магнитного поля (ГМП), включая последний (в максимуме 25-го цикла), возможно, ещё не закончившийся. Кроме того, по данным 7-ми последних инверсий ГМП (в циклах 19-25) анализируется скорость восстановления интенсивности ГКЛ после инверсии ГМП и обсуждаются возможные причины зависимости этой скорости от общей полярности ГМП.

ЭФФЕКТ «ГАЛО» В МЕРЦАНИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА УДАРНОЙ ВОЛНЕ ОТ ИСТОЧНИКА НА НЕВИДИМОЙ С ЗЕМЛИ ПОЛУСФЕРЕ СОЛНЦА

В.И. Козлов[1], **В.В. Козлов**[2]

1. ИКФИА СО РАН «Институт космофизических исследований и аэрономии, г. Якутск, Россия, cosmoprognoz@mail.ru
2. *Арктический Центр Космической Погоды, Москва*

Анализируются экстремальные по мощности события на геоэффективной фазе завершения инверсии магнитного поля Солнца в мае-июне и октябре-ноябре 2025 г. (https://www.forshock.ru/). В обоих случаях отслеживается динамика мерцаний галактических космических лучей (ГКЛ): в течение прохождения источника активности с видимой полусферы Солнца на невидимую полусферу и последующим его возвращением. Значимые значения параметра флуктуаций ГКЛ – предвестники предваряют приход «штормовых» частиц регистрируемых перед фронтом межпланетной ударной волны (УВ). В том числе, и от мощного источника на невидимой с Земли полусфере Солнца. Область за фронтом ударной волны (УВ) - баллистический «*след*» («*волна реверберации*») с относительно регулярным магнитным полем, определяется низким «диагностическим» значением параметра флуктуаций КЛ являясь, по сути – маркером УВ. Высокая степень анизотропии вспышки с энергией ~1 ГэВ 11.11.2025 г. обусловлена высокой степенью регулярности магнитного поля в области баллистического «*следа*» за ударной волной.



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ СОБЫТИЙ

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

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

Разработан новый подход к моделированию переноса солнечных космических лучей (СКЛ), основанный на численном решении уравнения переноса в диффузионном приближении. Метод применен для анализа трех солнечных протонных событий 11 мая, 23 июля и 21 ноября 2024 года. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными по 10 высокоэнергетическим дифференциальным каналам прибора на спутнике GOES-16. Наилучшее совпадение расчетных и наблюдаемых временных профилей позволило количественно определить ключевые параметры событий: флюенсы протонов, энергетическую и пространственную зависимость коэффициента диффузии, параметры инжекции СКЛ в межпланетную среду. Полученное хорошее соответствие подтверждает адекватность предложенного подхода для описания распространения солнечных космических лучей и диагностики состояния солнечной атмосферы и межпланетной среды.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ и Сибирским отделением РАН, проект №. FWRS-2026-0024.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛЯРНОЙ ГЕЛИОСФЕРЕ И ЕГО ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ НА СОЛНЦЕ

Кислов Р.А.[1], **Кузнецов В.Д.**[1]

[1] *ИЗМИРАН, Россия, Москва, Троицк, kr-rk@bk.ru*

В работе [1] было показано на основе анализа данных Ulysses, что электрическое поле в полярной гелиосфере почти на порядок величины сильнее, чем можно было бы ожидать исходя из того, что его источником является униполярный эффект на Солнце. В новом исследовании предложено возможное частичное решение данной проблемы. Для этого предложено разбить солнечную атмосферу на две зоны. В пределах поверхности источника солнечный ветер ещё не сформировался и преобладает азимутальное движение плазмы. Во второй зоне вдали от Солнца солнечный ветер уже сформировался и имеет сверхзвуковую и сферхальфвеновскую скорость. Данный подход сам по себе не нов, но обычно в первой зоне магнитное поле считается полоидальным дипольным, а во второй выбирается в согласии с известной моделью Паркера. В настоящей работе учтено возможное малое ненулевое азимутальное магнитное поле вблизи Солнца, выписаны условия непрерывности плотности тока между двумя областями и учтена конечная проводимость плазмы вблизи границы двух зон. Поскольку в зоне солнечного ветра величина $B_\varphi r$ не зависит от расстояния, с ней связана наиболее медленно убывающая с расстоянием от Солнца составляющая электрического поля. Величина этой составляющей определяется значением $B_\varphi r$ на границе между зонами, а само равновесие вблизи границы определяется различиями в конечной проводимости плазмы. Величина вычисленного электрического поля находится в согласии с наблюдениями в полярной гелиосфере.

[1] Kislov, R.A. The Stationary Electric Field in the Heliosphere and Its Possible Relation to Current Sheets // **Universe. 2022**. V. 8. issue 3. https://doi.org/10.3390/universe8030152

СПЕКТРЫ И АНИЗОТРОПИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ 8 ИЮНЯ 2024 Г. (GLE75)

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

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

В работе исследованы спектры и пространственное распределение солнечных протонов, зарегистрированных в период наземного возрастания интенсивности космических лучей (КЛ) 8 июня 2024 г. (GLE75). Расчеты выполнены методом спектрографической глобальной съемки с пользованием пятиминутных данных мировой сети станций нейтронных мониторов и данных космического аппарата GOES-18. Получены дифференциальные жесткостные спектры и оценена максимальная жесткость ускоренных в окрестностях Солнца протонов (около 3 ГВ). Обнаружены двунаправленные потоки первичных КЛ с жесткостью 2 ГВ, инжектированные в петлеобразное образование межпланетного магнитного поля. Проведен сравнительный анализ полученных спектров ускоренных частиц во время GLE75 с похожими событиями, которые мы анализировали ранее.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ 10-14.11.2025

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

1. НИИЯФ МГУ, 2. ФИАН, 3. ИПГ, 4. Физ. фак. МГУ, Москва, Россия, nav19iv@gmail.com

С 10 по 14 ноября 2025 года космические аппараты наблюдали повышенные потоки энергичных протонов со сложным временным профилем, обусловленным несколькими последовательными эрупциями из одной активной области на Солнце. В первоначальном повышении 10 ноября, от солнечной вспышки рентгеновского балла X1.2 с гелиокоординатами N23W14, наблюдались протоны с энергией (*E*) вплоть до >50 МэВ.
11 ноября (солнечная вспышка: X5.2, N23W23) в околоземное пространство вторглись солнечные протоны с *E*>10 ГэВ, зарегистрированные наземными приборами (GLE 77).
12 ноября в результате воздействия сложного межпланетного коронального выброса массы потоки солнечных протонов с *E*>10 МэВ на орбите Земли превысили 1000 $см^{-2}·с^{-1}·ср^{-1}$.
14 ноября (солнечная вспышка: X4, N21W58) наблюдалось возрастание потоков протонов с энергией вплоть до >100 МэВ и с максимальным потоком протонов с *E*>10 МэВ порядка 10 $см^{-2}·с^{-1}·ср^{-1}$ (рис. 1).

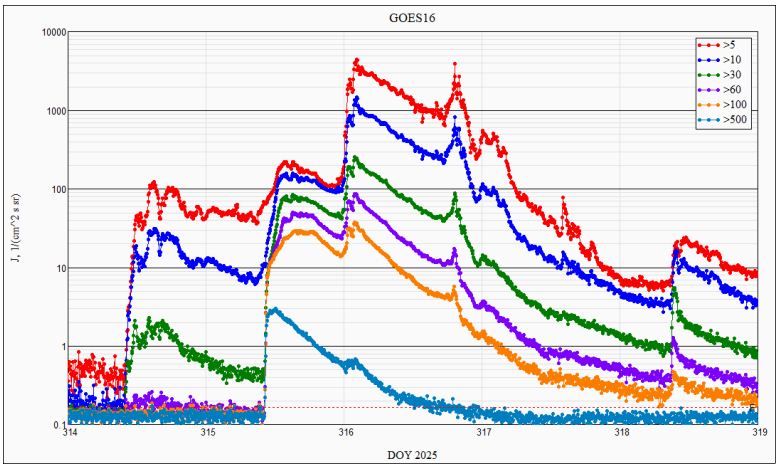


Рис. 1 Временные профили потоков солнечных протонов по данным ИСЗ GOES 10-14.11.2025

Выполнен сравнительный анализ динамики потоков солнечных протонов и вариаций параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, результаты которого позволяют выделить особенности, связанные с модулирующим воздействием крупномасштабных межпланетных магнитных структур на потоки частиц. Особое внимание уделено:

- отсутствию энергетической дисперсии в локальных максимумах потоков протонов разных энергий и подобию пространственного распределения потоков частиц на околоземной орбите и в точке Лагранжа L1 при запаздывании на время распространения солнечного ветра от L1 до Земли, наблюдаемых 10 и 12 ноября;
- замедленному спаду временного профиля потоков протонов с энергией вплоть до >100 МэВ 11 и 12 ноября.

Предложен сценарий развития физических процессов, обусловивших особенности временного профиля потоков солнечных протонов 10-14 ноября 2025 г.

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

КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ВОЗРАСТАНИЙ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ В 25 СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

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

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

2. Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской Академии наук,

г. Москва, Россия

3. Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

4. Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия dalex@srd.sinp.msu.ru

По данным КА GOES проведен статистический анализ 5-минутных данных возрастаний потоков энергичных протонов (30 - 500 МэВ) для 70 интервалов солнечных протонных событий в 2021 - 2025 гг, что соответствует фазам роста, максимума и началу спада солнечной активности 25 солнечного цикла. Рассматривались следующие источники возрастаний: рентгеновские солнечные вспышки (SF), межпланетные ударные волны (МУВ), межпланетные корональные выбросы масс (МКВМ) и межпланетные каналы (МК) - магнито-плазменные трубки, соединяющие область ускорения вблизи Солнца с Землей. Всего было проанализировано 123 пиковых возрастаний. Из них 44 имеют характерные диффузионные профили и соответствуют потокам, приходящим непосредственно из области SF, 43 возрастания сопровождаются МУВ, 24 - МКВМ, и 9 - МК. Для трех возрастаний потоков протонов источники пока найти не удалось.

Наибольшую вариабельность демонстрируют протоны с энергией до 30 МэВ, потоки которых существенно модулируются такими межпланетными структурами как МУВ и МКВМ. Сильная возмущенность внутренней гелиосферы большим количеством этих структур в рассмотренный период объясняет комплексную динамику временных профилей протонов, которая сильно отличает их от простого диффузионного распространения из области ускорения на Солнце.

В событии ноября 2025 года удалось обнаружить указание на то, что пространственный размер области модуляции потоков протонов может быть менее 100 Rз в поперечном направлении, в результате чего потоки протонов, наблюдаемые разнесенными на это расстояние космическими аппаратами, могут существенно различаться.

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

СВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ И ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАЗНЫХ ТИПАХ ТЕЧЕНИЙ В 21-25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

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

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

Данная работа посвящена исследованию особенностей поведения содержания дважды ионизированных ионов гелия в разных крупномасштабных типах течений солнечного ветра. На основе среднечасовых данных базы OMNI был проведен статистический анализ взаимосвязи относительного содержания гелия с другими параметрами плазмы и межпланетного магнитного поля для основных типов течений: квазистационарных быстрых и медленных потоков, межпланетных проявлений выбросов корональной массы (магнитных облаков и событий Ejecta) и областей сжатой плазмы (CIR и Sheath). Анализ проводился для периода с 1976 по 2024 г., что позволило сравнить зависимости между эпохой высокой солнечной активности (21-22 солнечный цикл) и эпохой низкой активности (23-24 цикл), а также отдельно рассмотреть особенности 25 солнечного цикла.

В результате анализа обнаружено, что почти для всех типов течений характерно снижение содержания гелия при увеличении плотности протонов и потока частиц. Как правило, зависимости между рассматриваемыми параметрами в разных типах имеют похожий характер. При этом общий вид соответствующих зависимостей схож в двух эпохах солнечной активности, а различия между 23-24 и 25 циклами минимальны как по характеру зависимостей, так и по среднему содержанию гелия – что дополнительно свидетельствует о принадлежности 25 цикла к эпохе низкой солнечной активности.

Также показано, что в определенных типах течений могут наблюдаться отдельные особенности. Например, в быстрых квазистационарных потоках, в отличие от других типов, содержание гелия практически не меняется с ростом плотности и температуры протонов. В межпланетных проявлениях выбросов корональной массы наблюдается снижение содержания гелия при увеличении плазменного параметра β (что отмечалось также в прошлых работах), в то время как для других типов течений связь содержания гелия с β отсутствует. Подобные особенности могут быть использованы для уточнения критериев диагностики крупномасштабных типов течений солнечного ветра. Кроме того, было выявлено, что в быстрых и медленных потоках содержание гелия по-разному изменяется с увеличением потока частиц: возрастает и снижается, соответственно. Эти зависимости также различаются по характеру в рассмотренных эпохах солнечной активности.

НАБЛЮДЕНИЕ ЭРУПТИВНОГО СОЛНЕЧНОГО ПРОТУБЕРАНЦА ВБЛИЗИ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ В КРАЙНЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

Анфиногентов С.А., Рубцов А.В.

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

Солнце регулярно демонстрирует динамические явления, такие как корональные выбросы массы и эрупции протуберанцев. Эти явления возмущают плазму солнечного ветра и нарушают условия в околоземном пространстве, вызывая магнитные бури на Земле. В настоящее время распространение таких возмущений через межпланетное пространство изучается с помощью коронографов и измерений in situ, осуществляемых несколькими космическими аппаратами, что позволяет строить аналитические и эмпирические модели прогноза космической погоды. К сожалению, эти измерения ограничены и не позволяют получить полную картину пространственно-временной структуры возмущений межпланетного пространства, что делает последующее моделирование неточным.

В докладе представлены изображения перемещающейся структуры в солнечном ветре, полученные инструментом EUV космического аппарата IMAGE в диапазоне крайнего ультрафиолета (линия гелия 30.4 нм). Мы идентифицировали это явление как оторвавшийся солнечный протуберанец, обогащённый однократно ионизированными ионами гелия, который следовал в составе выброса корональной массы. Инструмент IMAGE/EUV изначально не предназначался для наблюдения межпланетных явлений, однако высокая яркость и контрастность изображения протуберанца позволили легко отличить его от фона.

Полученные нами результаты говорят о целесообразности размещение КУФ-телескопов на будущих спутниках, расположенных вне линии Солнце–Земля. Это откроет новые возможности для отслеживания возмущений в межпланетном пространстве и позволит существенно улучшить модели прогноза космической погоды.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

О СВЯЗИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ, ИЗМЕРЯЕМЫХ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН, С ПЛОТНОСТЬЮ СТРУКТУРЫ SHEATH КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ

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

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

При прогнозировании космической погоды необходима информация о распространении корональных выбросов массы (КВМ) в гелиосфере. В отсутствие прямых измерений такую информацию можно получить из наблюдений межпланетных мерцаний космических радиоисточников с помощью наземных радиотелескопов, которые функционально связаны с флуктуациями плотности плазмы КВМ. В значительной степени геоэффективность гало КВМ, распространяющихся в сторону Земли, определяется наиболее плотной и турбулентной частью его структуры – области уплотнения плазмы между головной ударной волной и передней кромкой КВМ (Sheath). На примере КВМ двух типов – “эжекта” и “магнитного облака” рассматривается возможная связь мерцаний, измеряемых на Большой синфазной антенне (БСА) ФИАН, с со средней плотностью области уплотнения в периоды наблюдений, моделируемой на основе данных коронографа LASCO C3 и измерений параметров плазмы в точке L1 базы данных OMNI.

ПОДХОД К СТАТИСТИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОЗМУЩЕНИЙ ВЫЗВАННЫХ КВМ-НЕВИДИМКАМИ

Белов С.М., Шлык Н.С., Абунина М.А.

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

Основным инструментом для наблюдения корональных выбросов массы (КВМ) являются коронографы расположенные на космических аппаратах около Земли. Их данные (в частности SOHO/LASCO) уже долгие годы используются в каталогах межпланетных возмущений. Однако существенная проблема заключается в том, что выбросы, происходящие около центра солнечного диска, зачастую бывают незаметными в картинной плоскости коронографа. Эта проблема усугубляется тем, что именно эти выбросы достигают Земли с наибольшей вероятностью. Поэтому очевидно, что наблюдений коронографа недостаточно для полноценной каталогизации КВМ. Наша группа занимается развитием каталога Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID), который насчитывает более 9300 событий. Так как мы претендуем на полноценное описание всех событий и их солнечных источников, для нас остро стоит вопрос о выделении всех геоэффективных КВМ. Начиная с 2024 года мы начали вручную каталогизировать невидимые для коронографа КВМ по изображениям SDO, отмечая время выброса и положение на диске. В докладе будет представлена статистика по таким КВМ за 2024 год и оценка жизнеспособности такого подхода. Также будут обсуждаться другие решения, такие как, например, программное выделение диммингов.

ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА ПРИМЕРЕ КВМ 15 ФЕВРАЛЯ 2011 ГОДА

Вахрушева А.А.[1, 2], **Шугай Ю.С.**[1], **Капорцева К.Б.**[1, 2], **Калегаев В.В.**[1, 2]

[1] *НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*
[2] *Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

vakhr.anna@gmail.com

Корональные выбросы массы (КВМ) – выбросы плазмы с Солнца в межпланетное пространство, являющиеся проявлениями солнечной активности. КВМ являются одним из главных источников геомагнитных возмущений. Самые мощные магнитные бури вызваны взаимодействующими потоками солнечного ветра: взаимодействием КВМ с высокоскоростными потоками солнечного ветра (ВСП) из корональных дыр, а также взаимодействием нескольких КВМ друг с другом [1].

Взаимодействуя с окружающим солнечным ветром, КВМ могут ускоряться, замедляться, менять направление движения, а также изменять свою форму и магнитную структуру [2]. Отклонение КВМ от радиального распространения, а также изменение фронта, может происходить не только по пути его распространения в гелиосфере, но и вблизи Солнца, если корональный источник КВМ находился недалеко от корональной дыры – большая часть отклонений КВМ происходит на начальных этапах распространения [3].

В работе рассмотрено взаимодействие коронального выброса массы с потоком из корональной дыры на примере КВМ, наблюдавшегося в коронографе 15 февраля 2011 года. Использованы данные с космических аппаратов SDO, SOHO, STEREO. Численное моделирование проведено с использованием Drag-Based Model.

1. Scolini et al. // ApJS. 2020. V. **247.** № **1.** P. 21.
2. Temmer et al. // Living Sol Phys. 2021. V. **18.** A. 4.
3. Isavnin et al. // Sol Phys. 2014. V. **289**. P. 2141.

АНАЛИЗ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПЕРЕД РАМПОМ МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

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

*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия. *borodkova_nl@cosmos.ru*

Низкочастотные колебания, возбуждаемые движущимися друг относительно друга потоками плазмы перед фронтом межпланетной ударной волны, являются весьма распространенным явлением. Особый интерес представляет тип волн, называемых вистлерами, так как они играют важную роль при передаче энергии между частицами плазмы. В работе исследовались низкочастотные цуги колебаний магнитного поля, зарегистрированные перед фронтом межпланетной ударной волны на разнесенных в пространстве спутниках. Для всех цугов колебаний были определены волновой вектор, направление поляризации волн и углы распространения вистлеров относительно направления магнитного поля и нормали к ударному фронту.

Проведен подробный анализ отдельного события и представлены результаты статистического исследования.

На примере отдельного события выполнено сравнение последовательностей цугов колебаний, наблюдавшихся перед фронтом одной и той же квазиперпендикулярной межпланетной ударной волны с числом Маха $M_{MS} \approx 2.36$ около точки Лагранжа L1 и в околоземном пространстве. Показано, что некоторые цуги колебаний могут сохраняться в пространстве на расстоянии $\sim 1.6 \cdot 10^6$ км. Одной из возможных причин этого может являться перемежаемая структура фронта, когда нестационарные куски фронта сочетаются со стационарными частями.

Статистически получено, что, в среднем, с ростом угла распространения вистлеровских волн относительно нормали к фронту ударной волны θ_{kn} уменьшается угол между волновым вектором и направлением магнитного поля θ_{kB}. Получена зависимость углов θ_{kB} и θ_{kn} от числа Маха и угла между нормалью к фронту волны и направлением вектора магнитного поля.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В ПЕРИОД СУПЕРБУРИ 10-11 МАЯ 2024г.

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

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

В работе исследуются свойства каскада турбулентных флуктуаций магнитного поля в околоземном пространстве 10-11 мая 2024 г. в период регистрации у Земли межпланетного возмущения, связанного сразу с несколькими корональными выбросами массы и вызвавшего значительное сжатие магнитосферы и интенсивную магнитную бурю. В ходе события доступны быстрые измерения магнитного поля с нескольких космических аппаратов – Wind, THEMIS, MMS, GOES-18 – в солнечном ветре в окрестности точки либрации L1, вблизи околоземной ударной волны и в магнитослое, что позволило исследовать эволюцию свойств каскада турбулентных флуктуаций при их распространении от L1 к ударной волне и далее при входе плазмы в магнитослой для разных областей внутри межпланетного возмущения (областей сжатия и магнитных облаков). Анализ основан на сравнении измерений свойств одного объема плазмы на паре космических аппаратов. Исследовались скейлинг спектров флуктуаций, сжимаемость и свойства функции распределения флуктуаций на масштабах перехода от МГД описания плазмы к кинетическому. Выявлено, что свойства флуктуаций на МГД масштабах сохраняются при распространении плазмы от L1 к околоземной ударной волне, тогда как на кинетических масштабах могут наблюдаться изменения. Также показано, что в период возмущения зависимость эксцесса функции распределения от масштаба выглядит практически идентично в L1 и вблизи Земли, тогда как в период спокойного солнечного ветра указанная зависимость может существенно отличаться в этих двух областях. Пересечение околоземной ударной волны приводит к существенной модификации спектров флуктуаций и усилению роли сжимаемой компоненты в турбулентном каскаде.

НОВЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЧИСЕЛ РЕЙНОЛЬДСА В ТУРБУЛЕНТНОМ ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ

Дуканов И. А.[1, 2], **Юшков Е. В.**[1, 3], **Соколов Д. Д.**[1, 2], **Фрик П. Г.**[4]

dukanov.ia21@physics.msu.ru

1)МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия, 2)ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия, 3)ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 4)ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

Числа Рейнольдса, кинетическое Re и магнитное Rm, являются параметрами подобия физических процессов, протекающих в магнитогидродинамических системах [1]. Характеризуя взаимоотношение между диссипацией и нелинейными эффектами, они определяют развитие турбулентного каскада, длину инерционного интервала турбулентного спектра, скорость диссипации. Задача реконструкции чисел Рейнольдса по спектральным или корреляционным характеристикам процесса является классической задачей астрофизики и, в частности, физики Солнца или солнечного ветра. Однако для плазмы солнечного ветра вопрос оценки чисел Рейнольдса выглядит весьма загадочно, потому что, с одной стороны, существует множество работ, в которых эти числа анализируются, см., например, обзор [2], с другой стороны, разброс существующих оценок покрывает многие порядки, а это, в свою очередь, наводит на мысль, о проблеме используемых для оценок методов.

Самым распространенным методом оценки чисел Рейнольдса является метод, основанный на связи корреляционного и Тейлоровского масштаба. Заметим, что далее мы будем говорить не о числах, а о числе Рейнольдса, предполагая в рамках доклада равенство Re и Rm, то есть близость к единице магнитного числа Прандтля (что является разумным и в контексте солнечного ветра [3]). Тейлоровский масштаб, определяющий скорость диссипации энергии, вычисляется обычно по корреляционной функции флуктуирующего магнитного поля, так называемым, методом Ричардсона. Подход Ричардсона подразумевает экстраполяцию корреляционной функции в область бесконечного хорошего приборного разрешения, то есть в область очень малых масштабов. Основная проблема здесь в том, что в существующих спутниковых миссиях, разрешающая способность магнитометров недостаточна для однозначного определения Тейлоровского масштаба – это и является причиной столь сильной ошибки в оценке Re и Rm.

В докладе, мы демонстрируем это, с помощью так называемого каскадного (оболочечного) МГД-моделирования [4], численно рассчитывая эволюцию спектров солнечного ветра из начальных данных, собранных вблизи Солнца спутниковой миссией Parker Solar Probe, см., например, [5]. Демонстрируя недостатки метода Ричардсона, мы предлагаем новый метод оценки, основанный на взаимосвязи этих чисел с расположением точки перегиба корреляционной функции. Используя этот метод мы даем пусть и грубую, но первую оценку чисел Рейнольдса в солнечном ветре, и проводим сравнение с существующими ранее значениями.

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – Гостехиздат, 1957.
2. Wrench D. et al. What is the Reynolds Number of the Solar Wind? – The Astrophysical Journal. – 2024. – Т. 961. – №. 2. – С. 182.
3. Pérez-de-Tejada H. Empirical values of the transport coefficients of the solar wind: Conditions in the Venus ionosheath – The Astrophysical Journal. – 2004. – Т. 618. – №. 2. – С. L145.
4. Abushzada I. et al. Turbulent dynamo in the shell model and the Kazantsev-Kraichnan approach – Physical Review E. – 2025. – Т. 112. – №. 1. – С. 015104.
5. Raouafi N. E. et al. Parker solar probe: Four years of discoveries at solar cycle minimum – Space Science Reviews. – 2023. – Т. 219. – №. 1. – С. 8.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИНДЕКС СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА КАК ИНДИКАТОР МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

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

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

На основе обширного материала по параметрам солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, вариациям космических лучей с 1965 по 2024 гг., собранного в базах данных ИЗМИРАН, исследуются особые периоды в данных солнечного ветра, выделяемые по предложенному ранее нашей группой рассчитываемому температурному индексу [1]. Обсуждаются их характеристики (частота регистрации, длительность, величины индекса и др.), отличия от условно-спокойных периодов в данных солнечного ветра.

Проведен анализ поведения температурного индекса в событиях, связанных с разными типами солнечных источников, а именно межпланетными корональными выбросами массы, высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр и смешанные события. Установлено, что самые длительные низкие значения температурного индекса (< 0.5) наблюдаются внутри межпланетных возмущений, обусловленных корональными выбросами массы, особенно содержащими структуру магнитного облака, а более короткие интервалы, как правило, регистрируются при пересечении секторной границы межпланетного магнитного поля перед началом воздействия высокоскоростного потока плазмы из корональной дыры. Высокие значения температурного индекса (> 1.5) обычно указывают на области взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра (как в коротирующей области взаимодействия, так и в турбулентной области сжатия перед межпланетным корональным выбросом).

Полученные связи могут быть использованы как для предварительной идентификации, так и для детального анализа межпланетных возмущений и уточнения их солнечных источников.

1. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60. – № 5. – С. 547–556.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПРОФИЛИ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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

[1] *МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, suhareva@phys.msu.ru*
[2] *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына*
[3] *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН*

В работе единым методом проекционных отображений выполнена реконструкция и анализ пространственно-временного профиля векторов скорости солнечного ветра **V** и структуры межпланетного магнитного поля **B** (ММП). Проанализированы экспериментальные данные с 2001 по 2025 гг, предоставляемые аппаратами ACE и WIND, находящимися в точке либрации L1 системы Солнце-Земля. Пример структуры отображений векторов ММП **B** и скоростей плазмы **V** в период с 274 дня – по 280 день 2025 года представлен на Рис.1.

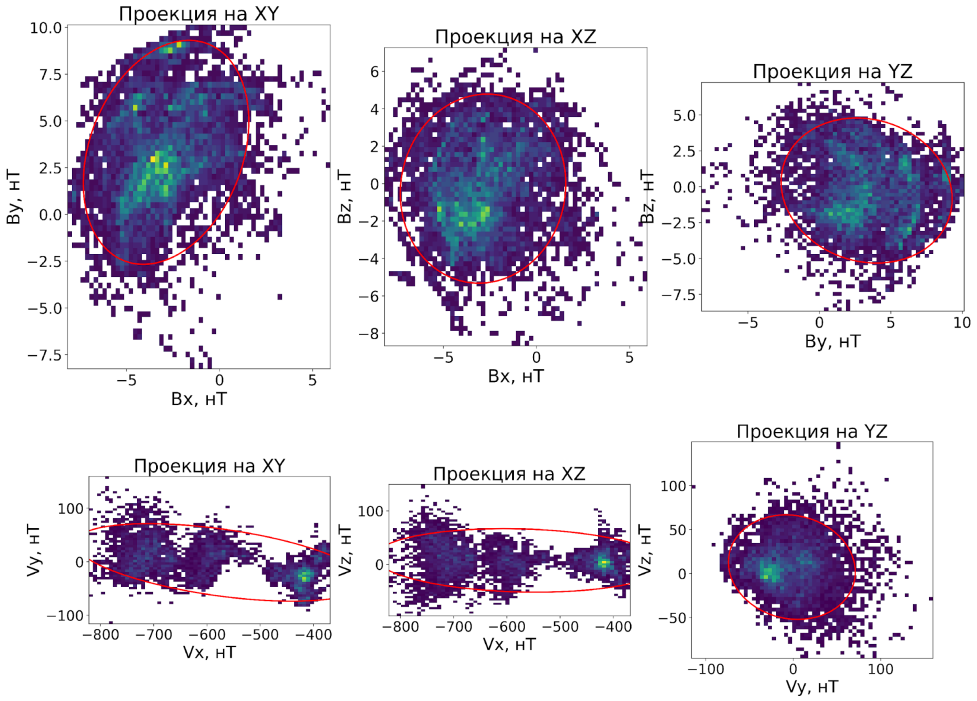


Рис .1 Примеры проекционных отображений для двух векторных полей **V** и **B**.

Первичные временные ряды проходят обработку серией оконных фильтров, позволяющих проводить интервальный анализ временной структуры и использовать условные вероятности при интерпретации характеристик. В работе использованы выборки временного ряда в 02 – 07 – 28 и 90 суток. Статистически значимым интервалом как для ММП, так и для поля скоростей **V** принято подпространство состояний внутри контура эллипса вторых пространственных моментов для статистических ансамблей. Вариация параметров фильтра позволяет создавать синхронизированные сигнальные последовательности или конструировать оптимальные для решаемой задачи сигнальные структуры. На панели рисунков для скорости **V** представлен пример отображения для скорости солнечного ветра с формированием нескольких быстрых мод и одной медленной, Основной акцент представляемой работы сделан на получении количественных векторных и тензорных метрик, на основе которых возможна классификация состояний бинарной системы векторных полей.

К ВОПРОСУ О ГРАВИТАЦИОННОМ ВЛИЯНИИ ПЛАНЕТ НА СОЛНЕЧНУЮ АКТИВНОСТЬ

Охлопков В.П.

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

Ранее в моих работах был введен параметр - средние разности гелиоцентрических долгот пар планет (СРД) – для различных сочетаний планет [1,2].

Были проведены расчеты с 1000-го года до наших дней и разработан индекс JEV линейных конфигураций планет Венера, Земля и Юпитер. Проведено сопоставление с солнечной активностью по данным Шове и числам Вольфа. Показано, что количество максимумов СА четко соответствует количеству минимумов индекса JEV (минимальные значения индекса JEV соответствуют линейным конфигурациям планет как при их соединении, так и при расположении по разные стороны от Солнца). За интервал времени с 1500 по 2016 год основные периодичности, полученные из спектрального анализа, в СА и в индексе JEV составляют соответственно 11.06 и 11.065 лет. За интервал времени с 1000 по 2016 год основная периодичность и в СА и в индексе JEV составляет соответственно 11.069 и 11.067 лет. Индекс JEV, отражающий линейные конфигурации трех планет - Венеры, Земли и Юпитера и хорошо согласованный с 11-летним циклом солнечной активности, может служить индикатором гравитационного воздействия трех планет на солнечную активность.

В данной работе используя координаты планет были проведены расчеты расстояния центра масс планет (ЦМП) от центра Солнца и соответствующие гелиоцентрические долготы для интервала времени с 1900 года по 2025 год. Рассмотрены две ситуации расположения ЦМП и Земли по отношению к Солнцу. Первая – Земля и ЦМП находятся по одну сторону от Солнца и на одной линии с ним. Вторая - Земля и ЦМП находятся по разные стороны от Солнца. Для этих ситуаций, когда разность гелиоцентрических долгот Земли и ЦМП составляла не более одного градуса, т. е. Земля и центр масс планет находились на одной линии с Солнцем брались измеренные числа Вольфа. Показано, что в первой ситуации значения чисел Вольфа превышали аналогичные значения для второй ситуации в 1.22 раза. Это свидетельствует о гравитационном воздействии планет на вытягивание солнечного вещества с магнитными полями из глубинных слоев Солнца с последующим образованием солнечных пятен.

1. *Охлопков В.П.* // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2014. № 3. С. 50-55
(Okhlopkov V.P.// Moscow University Physics Bulletin, 2014, V. 69, № 3, P. 257-262).
2. *Охлопков В.П.*// Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2016. № 4. С. 92-98
(Okhlopkov V.P., Moscow University Physics Bulletin, 2016, V. 71, № 4, P. 440-446).

ВЛИЯНИЕ 11-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ДОЛГОТЫ ПЕРИГЕЛИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ

Гасымов А.[1], Салимов С.[2]

Бакинский Инженерный Университет, hqasimov@beu.edu.az

В данном исследовании анализируется распределение долгот перигелия системы периодических комет в зависимости от фазы 11-летнего цикла солнечной активности. Работа выполнена как продолжение исследования влияния 11-летней солнечной активности на систему периодических комет. Известно, что 11-летний цикл солнечной активности связан со сложными процессами, происходящими на Солнце, в частности с пятнами, формирующимися на его фотосфере. Сильное магнитное поле, присущее солнечной активности и солнечным пятнам, оказывает значительное влияние на небесные тела Солнечной системы, включая кометы. Это воздействие существенно отражается на динамике небесных тел и их физических условиях.

Вычисление долготы перигелия, являющейся одним из орбитальных параметров комет, может играть важную роль в выявлении внешних факторов, влияющих на формирование, эволюцию и динамику системы периодических комет. Хотя долгота перигелия определяется как сумма долготы восходящего узла и аргумента перигелия, при таком расчёте важно учитывать угол наклона между орбитальной плоскостью комет и плоскостью эклиптики.

Фаза 11-летней солнечной активности определяется эмпирической формулой (1), приведённой ниже.

$$F = \{\frac{t-T_1}{2(T_{max}-T_{1)}};\ əgər\ t < T_{max}\ \frac{t-T_{max}}{2(T_2-T_{max})} + 0,5;\ əgər\ t > T_{max} \qquad (1)$$

Здесь t — дата открытия кометы, T_1 и T_2 — соответствующие минимумы активности, T_{max} — период максимальной активности. Для каждой кометы вычисляется F, и определяется распределение комет по фазовым интервалам.

Долгота перигелия комет вычисляется с помощью эмпирической формулы (2). Как отмечалось, эта формула позволяет точно определить долготу перигелия комет.

$$L=arctg(tg\omega cosi)+\Omega \qquad (2)$$

Здесь ω — аргумент перигелия, i — угол наклона орбитальной плоскости кометы к плоскости эклиптики, Ω — долгота восходящего узла. После определения долгот перигелия комет проводится анализ концентрации этих долгот в зависимости от фазы 11-летнего цикла солнечной активности.

Анализ показывает, что концентрация долгот перигелия системы периодических комет в основном наблюдается в угловых интервалах 0–60° и 150–180°. Это указывает на долгосрочные динамические изменения направлений орбит, вызванные гравитационным влиянием планет, особенно Юпитера. Зависимость среднего значения долготы перигелия системы периодических комет от перигелийного расстояния не выявлена.

АНИЗОТРОПИЯ И ПЛОТНОСТЬ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ НАЗЕМНОГО ВОЗРАСТАНИЯ В НОЯБРЕ 2025 Г. ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

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

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

На основе обработки данных мировой сети наземных детекторов КЛ методом глобальной съемки произведен анализ события наземного возрастания КЛ 11 ноября 2025 г. Представлена эволюция пространственно-углового распределения КЛ в течение события. Полученные результаты обсуждаются.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской федерации (тема номер FWRS-2021-0012).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ ГЕЛИОСФЕРЫ НА СЕВЕРО-ЮЖНУЮ АНИЗОТРОПИЮ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

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

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

Нейтральный токовый слой (НТС) является одним из основных модулирующих факторов, влияющих на распространение галактических космических лучей (ГКЛ) в ближней гелиосфере. Влияние НТС на ГКЛ проявляется в наблюдаемых на Земле вариациях интенсивности ГКЛ в виде особенностей 11-ти летних [1, 2] и рекуррентных 27-дневных [3] колебаний. В данной работе основное внимание уделяется еще одному проявлению НТС — северо-южной анизотропии ГКЛ, экспериментальное определение которой представляет определенные сложности. Для ее определения использован метод скрещенных телескопов [4]. Показано, что северо-южная анизотропия ГКЛ испытывает квази- 13- и 27-дневные вариации с амплитудой 0,3-0,4 % обусловленные геометрией НТС. На основе полученных результатов произведена оценка величины гелиоширотного градиента ГКЛ на орбите Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской федерации (тема номер FWRS-2021-0012).

1. Гололобов П.Ю. и др. // Солнечно-земная физика 2020. V. **6.** С. 30.
2. Крымский Г.Ф. и др. // ЖЭТФ 2007. V. **131.** С. 222.
3. Krymsky G.F. et al. // Proc. 30th ICRC. 2008. V. **1.** P. 381.
4. Скрипин Г.В. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. **5**. С. 817.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В КОРОНЕ СОЛНЦА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЗАРЯДОВОГО СОСТАВА ИОНОВ

Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А.

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

Ионный состав солнечного ветра (СВ) является важной характеристикой термодинамических условий в солнечной короне. Анализ зарядовых распределений тяжелых ионов дает информацию о механизмах формирования СВ и процессах нагрева/охлаждения плазмы, а также для идентификации источников СВ на Солнце. Из-за«заморозки» зарядового состояния тяжелых ионов на выходе из короны в гелиосферу, по параметрам зарядовых распределений ионов, измеренных «in-situ», можно восстановить условия в короне на высотах нескольких солнечных радиусов от поверхности Солнца, где формирующийся поток СВ переходит в стадию радиального расширения. Ранее в работе[1] термодинамика плазмы СВ в солнечной короне на стадии расширения былаРассмотрена с помощью функции политропы, в которой давление p и плотность ρ плазмы связаны соотношением p/ρ^{γ} = const. Анализ значений индекса γ, полученных изсопоставления измерений зарядовых распределений тяжелых ионов кислорода и железа и их моделирования по измеренным параметрам плазмы СВ, показал, что реальные значения индекса для разных типов СВ в короне на расстояниях от 1.5 до 5 солнечных радиусов находятся в диапазоне γ = 1.06 – 1.34. Отличие этих значений от адиабатического индекса α = 5/3 дает возможность оценить внешние потоки энергии нагрева плазмы формирующихся крупномасштабных потоков СВ. Используя данные измерений параметров плазмы СВ и метод расчета «замороженного» зарядового распределения ионов кислорода и железа в состоянии частичного термодинамического равновесия с помощью уравнений баланса ионизации и рекомбинации, получены средние значения и радиальные распределения потоков энергии нагрева, типичные для медленного СВ, быстрого СВ из корональных дыр и корональных выбросов массы (КВМ). Поток энергии нагрева плазмы СВ в короне на расстояниях до 5 солнечных радиусов составляет, в среднем, 60÷70% от энергии адиабатического охлаждения и максимален для КВМ. Анализ политропных индексов для разных типов СВ показывает, что охлаждения плазмы СВ ниже адиабатического предела не происходит.

1. Goryaev F. F., Slemzin V. A. Study of the Solar Wind Plasma Thermodynamics in the Solar Corona Based on the Charge State of Heavy Ions // Astronomy Letters. – 2024. – Vol. 50. – №. 6. – P. 408-419.

СВЯЗЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ПАРАМЕТРАМИ ГЕЛИОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ БУРИ 10 – 12 МАЯ 2024 Г.

Данилова О.А., Сдобнов В.Е.

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

Космические лучи (КЛ) представляют собой потоки заряженных энергичных частиц, пронизывающие межпланетное пространство. Они приходят как из ближнего солнечного пространства, так и из дальнего галактического. Под действием геомагнитного поля заряженные частицы галактических космических лучей меняют свою траекторию. Часть из них, с жесткостью ниже характерного для пункта их измерения порогового значения (называемого жесткостью геомагнитного обрезания или геомагнитным порогом, R) не доходят до земной поверхности. Из-за экранирующего характера магнитного поля Земли на экватор проникает существенно меньше частиц, чем на высокие широты. Во время геомагнитных возмущений внутри магнитосферы формируются глобальные токи, которые подавляют геомагнитное экранирование.

В данной работе геомагнитные пороги R были рассчитаны двумя методами: (1) методом, в котором траектории частиц космических лучей вычисляются численно в модельном магнитном поле магнитосферы Ts01 ($R_{эф}$) [1]; и (2) спектрографической глобальной съемки по наблюдательным данным регистрации космических лучей мировой сетью станций ($R_{СГС}$) [2] во время очень сильной магнитной бури 10 – 12 мая 2024 г. Изменения ΔR определялись как разности между значениями жесткостей, рассчитанными для каждого часа в период бури, и средним значением жесткости в спокойный период перед бурей — 8 мая 2024 г. Геомагнитные пороги получены для шести разноширотных станций космических лучей, которые в спокойное время охватывают большую полосу жесткостей обрезания от 11 до 2 ГВ.

Далее были рассчитаны корреляции вариаций геомагнитных порогов $\Delta R_{СГС}$ и $\Delta R_{эф}$ с магнитными и динамическими параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности *Dst* и *Kp*.

Выявлено, что значения изменений геомагнитных порогов космических лучей для данной бури, вычисленные обоими методами, хорошо коррелируют между собой. Наиболее геоэффективными являются вертикальная составляющая межпланетного магнитного поля *Bz*, его полное значение *B*, в то время как *By*-составляющая поля практически не влияет на изменения пороговых жесткостей для всех станций. ΔR хорошо коррелируют с геомагнитными индексами *Dst* и *Kp*, с параметром электрического поля *Ey* и с динамическими параметрами солнечного ветра *N* и *P*, в то время как со скоростью солнечного ветра *V* сколько-нибудь существенной корреляции не наблюдается. Анализ показал, что реакция ΔR на контролирующие электромагнитные параметры и индексы геомагнитной активности с широтой станции наблюдения для данной бури почти не меняется, только изредка уменьшаясь с увеличением широты станций.

1. Tsyganenko N.A. // J.Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A8. P.1176.
2. Dvornikov V.M. and Sdobnov V.E. //Int. J. Geomagn. Aeron. 2002. V. 3. P. 217–223.

3D И 2D ТРАНСПОРТНОЕ УРАВНЕНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЯХ ГЕЛИОСФЕРЫ - II

М.С. Калинин, М.Б. Крайнев

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

В работе приводятся аналитические результаты, относящиеся к решению 2D и 3D стационарных транспортных уравнений для галактических космических лучей (ГКЛ). Устанавливается связь 3D решения через решение 2D уравнения, полученного усреднением по долготе 3D уравнения. Получены также выражения, связывающие в общем виде 3D градиенты с 2D градиентами.

В общем виде проведён анализ 3D уравнения для поправки $u(r,\theta,\phi)$ к двумерному решению U и получено его решение. Основные характеристики 3D решения, усреднённые по долготе, сравниваются с характеристиками 2D решения. В целом работа является продолжением первой части работы под тем же названием.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 28.06.2024

Капорцева К.Б[1], **Вахрушева А.А.**[1,2], **Лаврухин А.С.**[1], **Ширяев А.О.**[1,3], **Шугай Ю.С.**[1]

[1]*НИИ Ядерной Физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

[2]*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия,*

[3]*Факультет космических исследований МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

kb.kaportceva@physics.msu.ru

Изучение геомагнитных возмущений и прогнозирование их динамики является важной частью космической погоды. Принято считать, что основными источниками геомагнитных возмущений являются приходящие к Земле геоэффективные потоки солнечного ветра, такие как межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) и высокоскоростные (ВСП) потоки солнечного ветра.

В работе представлен анализ геомагнитного возмущения 28.06.2024, которое длилось в течение 2,5 суток; при этом минимальное значение Dst индекса составило -105 нТл. В данный период времени был зафиксирован приход к Земле МКВМ с максимальной скоростью 500 км/с и магнитным полем 30 нТл. Ударная волна (УВ) достигла L1 в 9:00 28.06.2024. Источником этого МКВМ на Солнце предположительно был выброс волокна, зарегистрированный на солнечном диске 5:00 25.06.24. Таким образом, возмущение достигло Земли за 3 суток. Однако в данном событии наблюдается ряд нетривиальных особенностей, которые усложняют моделирование и понимание произошедших процессов.

Во-первых, данный МКВМ наблюдался также на КА Stereo A, который в рассматриваемый период времени находился на расстоянии 0,95 а.е. и отстоял от Земли на 20 градусов западнее по долготе. Так как отрыв волокна происходил также с западной полусферы, моделирование предсказывает более ранний приход возмущения на КА Stereo A. Но согласно наблюдениям, возмущение было зарегистрировано в точке L1 на 6 часов раньше, и амплитуда возмущения по скорости и по магнитному полю в L1 также была выше.

Второй особенностью является то, что начало геомагнитной бури произошло ранее прихода УВ, в 12:40 UT 27.06.2024, когда динамическое давление потока солнечного ветра возросло с 2.38 нПа до ~5 нПа, а Bz компонента ММП стала отрицательной. При этом наблюдался скачок SC магнитного поля, когда SYM-H индекс за 9 минут увеличился с +8 нТл до +18 нТл. Это свидетельствует о возможном дополнительном источнике геоэффективного солнечного ветра. Сохраняющееся отрицательное значение Bz порядка -8 нТл привело к развитию магнитной бури. В свою очередь приход основного возмущения и УВ 28 числа привел к гораздо более резкому росту динамического давления и скачку SC в уже развивающейся магнитной буре (изменение SYM-H с -78 нТл до -49 нТл). Магнитная буря затем продолжила своё развитие и SYM-H индекс достиг минимума в -119 нТл.

В работе представлены возможные причины наблюдаемых эффектов и обсуждается их значение для моделирования и прогнозирования геомагнитных возмущений.

ОЦЕНКИ РЕЖИМОВ ИСТЕЧЕНИЯ ПЛАНЕТАРНОГО ВЕТРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЗВЕЗДА-ЭКЗОПЛАНЕТА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Кислов Р.А.[1,2], **Руменских М.С.**[2,1], **Шайхисламов И.Ф.**[2]

[1] *ИЗМИРАН, Россия, Москва, Троицк, kr-rk@bk.ru*

[2] *Институт Лазерной Физики Сибирского отделения РАН, Россия, Новосибирск*

В системах экзопланета-звезда возможны ситуации, когда нагрев и ионизация атмосферы горячего Юпитера приводят к формированию планетарного ветра, направленного от экзопланеты к звезде. Более того, смещениям спектральных линий в наблюдениях могут соответствовать случаи сверхзвукового истечения плазмы через точку L1. В такого рода течениях плазмы вблизи экзопланеты могут образовываться не менее двух критических точек – звуковой и альфвеновской. В зависимости от величины магнитного поля экзопланеты, гравитации звезды и экзопланеты, термодинамических параметров атмосферы экзопланеты и регуляризации уравнений для скорости плазмы в критических точках возможны различные режимы течения плазмы. В данной работе приведены оценки положения критических поверхностей на примере экзопланеты WASP-69 b. Показано, что в зависимости от возможной величины магнитного поля в точке L1 может реализоваться как режим медленного дозвукового течения плазмы, так и сверхзвукового сверхальфвеновского. Причём переход от одного режима к другому может носить пороговый характер, связанный с относительным расположением критических точек, их единственностью и переходом между различными ветвями решений уравнений для скорости плазмы при плавном изменении магнитного поля.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-72-10080

ФОРМИРОВАНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОТОНОВ ГКЛ НИЗКИХ И СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Крайнев М.Б., Калинин М.С.

ФИАН, г. Москва, Россия

Для исследования долговременных (с характерным временем существенно большим периода вращения Солнца, T≈27 дней) вариаций гелиосферы и ГКЛ в ней надо иметь длительные ряды в терминах интенсивности первичных (т. е. вне земной магнитосферы) ГКЛ. В докладе планируется обсудить классификацию таких рядов по эффективной энергии ГКЛ и предложить процедуру формирования рядов интенсивности протонов ГКЛ низких и средних энергий по данным космических аппаратов и регулярного баллонного мониторинга космических лучей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ОКРУЖЕНИЯ ЛУНЫ: ПЛАЗМЕННЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ НА ОРБИТАЛЬНЫХ И ПОСАДОЧНЫХ АППАРАТАХ

Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н., Шестаков А.Ю., Петух А.И.

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

Исследования Луны – одно из приоритетных направлений как отечественной космической программы, так и зарубежного сообщества. В ближайшие годы планируется запуск ряда отечественных автоматических аппаратов – орбитального Луна-26, посадочного Луна-27.

Важным аспектом исследования окололунного пространства является изучение процессов взаимодействия космической плазмы с Луной на различных масштабах.

Несмотря на большое количество уже реализованных экспериментов, следующие задачи сохраняют свою научную значимость:

- Исследование параметров плазмы на границах плазменной тени Луны, вблизи терминаторной области.
- Исследование процессов отражения протонов солнечного ветра от поверхности в зависимости от солнечно-зенитного угла и структуры реголита.
- Изучение механизмов ускорения и захвата вторичных и отраженных ионов потоками солнечного ветра на различных масштабах.
- Исследование популяций вторичных низко энергичных тяжелых ионов в экзосфере Луны, в зависимости от параметров космической плазмы.
- Определение элементного состава реголита методом вторичной ионной масс-спектрометрии.
- Изучение процессов взаимодействия космической плазмы с локальными магнитными аномалиями.

Исследования лунной экзосферы позволит не только расширить информацию об экзосфере спутника Земли, но и экстраполировать полученные данные на более далекие объекты солнечной системы.

В докладе рассматриваются основные задачи плазменных спектрометров для запланированных и перспективных космических миссий, приводятся аналитические характеристики ионных спектрометров для миссий Луна-26 и Луна-27.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ОКРУЖЕНИЯ ВЕНЕРЫ

Петух А.И., Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л.

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

Плазменное окружение Венеры – одна из наиболее интересных структур для изучения в рамках физики космической плазмы. Венера не имеет собственного магнитного поля; при взаимодействии солнечного ветра с плотной ионосферой возникает индуцированная магнитосфера: на дневной стороне межпланетное магнитное поле, вмороженное в солнечный ветер, сжимается перед планетой и образует магнитный барьер, на ночной стороне простирается магнитосферный хвост [1,2]. Схожая индуцированная магнитосфера Марса подробно изучалась миссией MAVEN.

Прямые исследования взаимодействия солнечного ветра с Венерой в данный момент не проводятся. Десятилетие назад миссией Venus Express в цикле со слабой солнечной активностью были получены данные по особенностям индуцированной магнитосферы планеты. Для дальнейшего изучения плазменного окружения Венеры необходима миссия с перицентром меньше, чем у Venus Express, работающая в период более активного солнечного цикла [3].

Венера-Д – перспективный отечественный проект изучения дальнего космоса. В состав плазменного комплекса миссии Венера-Д, входят спектрометры ионов и электронов, детектор нейтральных атомов. Ионный спектрометр (ИСПЕК) предназначен для исследования функции распределения ионов по скоростям на границах и в структурах индуцированной магнитосферы, в магнитосферном хвосте. Электронный спектрометр (ЭЛСПЕК) дополнит сведения о ионосфере и магнитосфере Венеры. Детектор нейтральных атомов (ДНЧ), необходимый для определения массового состава и пространственного распределения нейтральных частиц, будет выполнять задачи по изучению процессов пересоединения в магнитосфере планеты и взаимодействия магнитосферных и ионосферных ионов с нейтральными атомами [4]. В докладе приводятся характеристики приборов плазменного комплекса миссии Венера-Д и дана оценка его потенциала для изучения плазменного окружения планеты. Выполнено сопоставление приборного оснащения, орбитальных параметров миссий Venus Express и MAVEN; кроме того, проведено сравнение характеристик научной аппаратуры этих миссий с параметрами плазменного комплекса КА Венера-Д.

1. Luhmann J. G., Ledvina S. A., Russell C. T. Induced magnetospheres //Advances in Space Research. – 2004. – Т. 33. – №. 11. – С. 1905-1912.

2. Du J. et al. Asymmetries of the magnetic field line draping shape around Venus //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2013. – Т. 118. – №. 11. – С. 6915-6920.

3. Futaana Y. et al. Solar wind interaction and impact on the Venus atmosphere //Space Science Reviews. – 2017. – Т. 212. – №. 3. – С. 1453-1509.

4. Моисеенко Д. А. и др. Научные задачи и перспективы комплекса плазменных приборов в проекте Венера-Д // Космические исследования. – 2024. – Т. 62. – №. 6. – С. 655-662.

ПАРАМЕТРЫ И ИСТОЧНИКИ ОДИНОЧНЫХ И КОМПЛЕКСНЫХ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, СВЯЗАННЫХ С КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ В 2023 ГОДУ

Родькин Д.Г., Слемзин В.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, *rodkindg@gmail.com*

В связи с потребностями надежных прогнозов космической погоды, возрастает интерес к исследованиям, посвященным идентификации типов крупномасштабных возмущений солнечного ветра в связи с их влиянием на Землю, а также анализу источников этих возмущений. В данной работе рассматривались одиночные и комплексные крупномасштабные структуры солнечного ветра, связанные с корональными выбросами массы (КВМ) и потоками из корональных дыр (КД) в период роста 25 солнечного цикла (2023 год), когда по данным каталога CDAW наблюдалось большое количество КВМ, в том числе, 82 типа Гало. По “in situ” данным OMNI для анализа было выделено 33 события (одиночных - 40%, а комплексных - 60%), для которых можно было однозначно установить источники на Солнце. Одиночные разделялись на МКВМ (4 структуры) и высокоскоростные потоки (ВСП) из КД (9 структур). Комплексные разделялись на МКВМ-МКВМ (9 структур) и МКВМ-ВСП (11 структур). Данные по Dst индексу для установленных событий были взяты из базы World Data Center for Geomagnetism.

Координаты точки вылета КВМ определялись по каталогам вспышек и диммингов SolarDemon [1] и SolarMonitor [2]. Для оценки времени прихода КВМ к Земле применялась модель магнитодинамического торможения DBM (Drag-Based model [3]). Корональные дыры, проходящие через солнечный центральный меридиан (по долготе ±30°), определялись по данным наблюдений телескопа SDO/AIA, а их характеристики вычислялись с помощью программы CATCH [4]. Для оценки времени прихода ВСП из КД к Земле использовалась баллистическая модель [5].

Продемонстрировано, что продолжительность, протонная плотность и средняя напряженность магнитного поля заметно выше для комплексных структур, что приводит к большей их геоэффективности (около 70%). Определена вероятность появления возмущений солнечного ветра различных типов у Земли в зависимости от характеристик их источников на Солнце. Показано, что она максимальна для источников КВМ вблизи центра солнечного диска (±40°) и падает до 0 вблизи лимба. По данным каталога CDAW определено, что средняя разность по времени между 2мя взаимодействующими КВМ равна 16±12 часам. При этом может наблюдаться как “сильное”, так и “слабое” взаимное воздействие между КВМ, входящими в состав комплексов. Определены условия, при которых КВМ можно рассматривать как одиночные, а также условия образования комплексных структур. Представленные статистические данные могут быть использованы для улучшения аналитических методов прогноза космической погоды.

1. https://www.sidc.be/solardemon/
2. https://solarmonitor.org/
3. B. Vršnak, T. Žic, et. al. // Solar Phys. 2013. **285.** 295
4. S. G. Heinemann, M. Temmer, et. al. // Solar Phys. 2019. **294**. 121
5. J.T. Nolte and E.C. Roelof // Solar Phys. 1973. **33**. 241

ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР И АСТРОСФЕРЫ КАК ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Садовский А.М., Струминский А.Б.

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

Несмотря на более чем столетнюю историю, проблема происхождения космических лучей (КЛ) не решена окончательно, так как нет однозначного ответа на вопрос, где и когда ускоряются КЛ. Уже в классической работе В.Л. Гинзбурга ([1], см. также [2]) рассматривалось ускорение в звездных окружениях и при взрывах сверхновых, и был сделан вывод, что наиболее вероятный источник КЛ — взрывы сверхновых. Однако в [1, 2] не рассматривался другой возможный источник КЛ — звездный ветер и астросферы.

Рассматривается возможность ускорения типа ускорения Ферми второго рода [3] во множестве источников. Единичный акт ускорения протона — это ускорение в одном из “макро” ускорителей (магнитном облаке по терминологии Ферми, которое в данном случае представляет собой астросферу) со своим характерным временем и электрическим полем, а множество “макро” ускорителей формирует необходимую цепочку ускорения. Сделаны оценки на возможные электрические поля, ускоряющие протоны, и на время, необходимое для такого ускорения, для различных источников частиц. Показано, что протоны при своем распространении могут продолжать набирать энергию в достаточно слабых средних электрических полях в течение долгого времени, что может объяснить появление частиц сверхвысоких энергий.

1. Гинзбург В.Л. // УФН. 1953. Т. **51**. С. 343
2. Гинзбург В.Л. // УФН. 1996. Т. **166**. С. 169.
3. Fermi E. // Phys. Rev. 1949. V. **75**. P. 1169.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЖПЛАНЕТНЫХ И ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНЫХ ВОЛН

Сапунова О.В., Бородкова Н.Л.

Институт космических исследований РАН, sapunova_olga@cosmos.ru

Доклад по материалам кандидатской диссертации.

Необходимость исследования бесстолкновительных ударных волн по спутниковым данным проистекает из невозможности их полноценного воспроизведения в лабораторных условиях. Воссоздание низкотемпературной бесстолкновительной плазмы с космическими параметрами крайне тяжело, особенно - быстропротекающих процессов, с временными масштабами меньше или порядка секунды. В связи с этим обработка и анализ спутниковых данных остаются единственным доступным методом проверить теории и модели, применяемые для описания тонких структур в солнечном ветре. Которые, в свою очередь, используются не только в области фундаментальной науки, но и для предсказания космической погоды и её влияния на Землю.

В работе получено подробное поведение параметров плазмы на фронте межпланетной ударной волны с временным разрешением 0.031 с. Проведено сравнение толщины и длительности фронта МУВ по параметрам плазмы и магнитного поля на разнесенных космических аппаратах. Экспериментально показано повышение относительной концентрации α-частиц за фронтом МУВ и ОЗУВ, в ряде случаев - резкое кратковременное увеличение непосредственно за рампом. Получена зависимость изменения относительной концентрации альфа-частиц от угла Θ_{Bn} при пересечении фронта МУВ и ОЗУВ: показано падение относительной концентрации
α-частиц при уменьшении угла Θ_{Bn} при пересечении фронта МУВ, для ОЗУВ показан меньший рост относительной концентрации при тех же условиях.

Впервые экспериментально получены спектры мощности флуктуаций параметров ионов дважды ионизированного гелия до частоты 0.67 Гц. Доказано существование излома спектра на частоте, соответствующей инерционной длине иона. Получены указания на наличие двойного излома спектра.

Подтверждено теоретическое предположение о наличии колебаний относительной концентрации альфа-частиц при пересечении фронта ОЗУВ.

ПЕРЕИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ VOYAGER 2/PLS О ТЕМПЕРАТУРЕ ПРОТОНОВ В ГЕЛИОСФЕРНОМ УДАРНОМ СЛОЕ И ОБЪЯСНЕНИЕ РАСХОЖДЕНИЙ С ДАННЫМИ IBEX-LO

Балюкин И.И., Янг Ж., Измоденов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, igor.baliukin@cosmos.ru

В работе [1] было обнаружено расхождение на 1–2 порядка величины между наблюдаемыми на КА IBEX потоками энергичных нейтральных атомов (ЭНА) и предсказаниями моделей гелиосферы в диапазоне энергий 0.05–0.5 кэВ. Важно отметить, что при вычислении потоков ЭНА в существующих моделях обычно делается предположение о том, что температура тепловых протонов солнечного ветра в области гелиосферного ударного слоя (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой) составляет ~10^5 K. Это предположение основано на данных наблюдений прибора PLS на космическом аппарате Voyager 2 [2]. Однако наши расчеты Particle-in-Cell и гибридной моделей прохождения протонов через гелиосферную ударную волну указывают на то, что за ударной волной (а) температура тепловых протонов в ~5 раз выше, и (б) функция распределения протонов не является максвелловской. Эти два фактора являются ключевыми при объяснении различия между данными IBEX-Lo и расчетами моделей.

Выводы о малой температуре протонов в области внутреннего ударного слоя, сделанные по измерениям V2/PLS, основаны на ряде предположений (в частности, о максвелловости функции распределения протонов). Мы откажемся от этих предположений и проведем переинтерпретацию данных V2/PLS. Будут представлены результаты численного моделирования распределения протонов в ударном слое и потоков ЭНА на основе расчетов функций распределения протонов за ударной волной, полученных в рамках гибридной модели, а также сравнение с данными наблюдений приборов IBEX-Lo, IBEX-Hi и Cassini/INCA.

1. Galli A., Baliukin I.I., Kornbleuth M. et al. // The Astrophysical Journal Letters 2023. V. 954. L24.
2. Richardson J.D., Kasper J.C., Wang C., Belcher J.W., Lazarus A.J. // Nature 2008. V. 454 P. 63-66.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ИНФРАКРАСНЫЕ АРКИ ВОКРУГ ЗВЕЗД

Заболотный И.П., Измоденов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivan.zabolotniy@cosmos.ru

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

В окрестности звезд, движущихся относительно локальной межзвездной среды, наблюдаются инфракрасные арки. Они возникают из-за свечения межзвездной пыли, которая увлекается плазмой в области взаимодействия звездного ветра с локальной межзвездной средой – астросфере, нагревается звездой и излучает в тепловом диапазоне.

В данной работе рассматриваются влияние магнитных полей на распределение пыли в окрестности звезд и результирующие карты теплового излучения. Параметры плазмы и электромагнитного поля были получены из трехмерной магнитогидродинамической модели области взаимодействия звездного ветра с локальной межзвездной средой. Для расчета параметров пыли использовался кинетический подход, в котором пыль моделировалась с учетом распределения пыли по размерам. Температура определялась в предположении о локальном термодинамическом равновесии пыли с полем излучения звезды.

В результате работы было показано, что асимметрия пылевых арок вокруг звезд связана с направлением межзвездного магнитного поля. Кроме того, распределение пыли в астросферах отличается от распределения плазменной компоненты из-за того, что более крупные пылинки слабо связаны с плазмой. Это приводит к формированию филаментов и других особенностей, которые наблюдаются в окрестности звезд. Некоторые наблюдаемые структуры внутри астросфер могут послужить индикатором внутреннего магнитного поля, аналогичного магнитному полю Паркера в солнечном ветре.

Таким образом изучение свечения межзвездной пыли в астросферах может послужить не только индикатором звездного ветра, но и инструментом для изучения магнитных полей в окрестности звезд.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ШИРИНЫ ЛИНИИ РАССЕЯННОГО СОЛНЕЧНОГО ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ЛУЧА ЗРЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Титова А.В., Измоденов В.В.

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

Солнечные Лайман-альфа фотоны рассеиваются на межзвездных атомах водорода, которые проникают внутрь гелиосферы через область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. Свойства рассеянных фотонов определяются параметрами атомов, с которыми они взаимодействовали. Таким образом, с помощью рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения можно непрямым способом исследовать характеристики межзвездных атомов водорода.

С 1996 г. рассеянное солнечное Лайман-альфа излучение измеряется прибором Solar Wind ANisotropy (SWAN), установленном на борту КА SOHO. Одним из важных результатов, полученным на основе анализа данных SOHO/SWAN было обнаружение минимума ширины линии в районе 50-60° от направления навстречу потоку межзвездной среды. В течение многих лет данный минимум рассматривался как доказательство существования вторичных атомов водорода – рожденных в результате перезарядки с протонами во внешнем ударном слое. Так как протоны во внешнем ударном слое медленнее, чем атомы межзвездной среды, у вторичной популяции средняя скорость также меньше. Если рассмотреть направление луча зрения навстречу потоку межзвездной среды, то из-за разницы проекций скоростей суммарная ширина линии будет большой. По мере смещения луча зрения в сторону, перпендикулярную потоку, эти проекции сближаются, распределения в пространстве скоростей начинают перекрываться, и ширина линии уменьшается.

Тем не менее кинетическое моделирование, учитывающее немаксвелловский характер распределений и сильную анизотропию температуры (Katushkina et al., 2011), не подтвердило наличие минимума. В частности, было показано, что радиальная температура атомов изменяется с углом наблюдения: в направлении навстречу потоку она меньше, чем в поперечном направлении. Анизотропия перевешивает эффект от сближения проекций средних скоростей двух популяций, что и приводит к отсутствию выраженного минимума. Таким образом вопрос о причинах образования минимума остается открытым.

Необходимо отметить, что методика восстановления спектра по данным SOHO/SWAN, использованная в Quemerais et al. (1999), позволяла восстанавливать спектры лишь в диапазоне скоростей от -30 до +30 км/с (относительно центра линии Лайман-альфа). Поэтому спектральные профили для некоторых лучей зрения (в частности, коллинеарно потоку межзвездной среды, движущемуся со скоростью порядка 26 км/с) восстановлены не полностью. Далее полученные частичные данные были аппроксимированы с помощью распределения Гаусса. Описанные ограничения и предположения могли повлиять на результат. Поэтому в рамках данного исследования мы провели моделирование с учетом этих факторов и оценили, как неполные данные о спектральных профилях и аппроксимация распределением Гаусса влияет на поведение ширины линии.

Результаты моделирования показали, что наблюдаемый минимум ширины линии может быть воспроизведен как следствие описанной методики обработки. В направлениях, близких к набегающему и сбегающему потоку, эта процедура завышает измеряемую температуру, а в промежуточных направлениях приводит к занижению ширины линии и появлению искусственного минимума в районе 50–60°. Таким образом, характерный минимум, ранее считавшийся прямым свидетельством вторичной популяции атомов водорода, может быть объяснен как артефакт обработки наблюдений. Этот вывод разрешает давнее противоречие между данными SOHO/SWAN и результатами кинетического моделирования.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОФИЛИ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИИ ЛАЙМАН-АЛЬФА

Корольков С.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Интерпретация спектров поглощения в линии Лайман-альфа (Ly-α) является основным методом диагностики параметров астросфер — звёздных аналогов гелиосферы. Однако широко используемые для этой цели упрощённые модели, будь то гидродинамические приближения или кинетические расчёты с допущением о локальной максвелловости распределения атомов водорода, могут приводить к систематическим ошибкам в определении характеристик звёздного ветра. Это связано с тем, что в результате взаимодействия с неоднородной плазмой гелиосферы/астросфер распределение нейтральных атомов водорода становится существенно немаксвелловским и анизотропным, что не учитывается в упрощённых подходах.

В представленной работе проведено сравнительное исследование влияния этих кинетических эффектов на профили поглощения Ly-α. Для этого была выполнена серия модельных расчётов гелиосферы с использованием трёх различных подходов: стандартной многожидкостной (гидродинамической) модели, кинетической модели с предположением о локальной максвелловости при вычислении спектров и полностью кинетической модели, свободной от этого допущения. На основе адаптированного численного кода рассчитаны трёхмерные функции распределения атомов водорода и получены профили поглощения для различных направлений обзора в гелиосфере.

В результате работы получено детальное количественное описание анизотропии и отклонений от максвелловского распределения в различных регионах гелиосферы. Проведённый анализ позволил оценить погрешности, вносимые каждым уровнем упрощения, в расчёт спектров Ly-α. Установлены корреляции между особенностями функции распределения и формой линии поглощения, что позволило определить границы применимости упрощённых моделей для разных направлений наблюдения. Данный результат имеет высокую практическую ценность, так как открывает путь для более точной и реалистичной диагностики параметров звёздного ветра и структуры астросфер/гелиосферы по наблюдаемым профилям Ly-α.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЯТЕН В ГРУППЕ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Козелов Б.В.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия

По одновременным данным наблюдение камерой всего неба на Верхнетуломском полигоне (VTL) и камерой с малым полем зрения в обсерватории Ловоозеро (LOZ) триангуляцией определялась высота пятен в группах пульсирующих полярных сияний (ППС). По высоте определялась зависимость энергии вызвавших ППС электронов от L-оболочки. В проанализированных случаях получено, что меньшим L соответствуют большие энергии электронов в каждом событие, что совпадает с ожидаемой зависимостью для взаимодействия волн с частицами в магнитосфере. Методом SVD будут выявлялись основные пространственные компоненты (собственные функции) в ППС, определены характеристики временной динамики основных пространственных компонент.

ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛОЖЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА И ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА

Мингалев О.В.[1], **Мельник М.Н.**[1], **Воробьев В.Г.**[1], **Ягодкина О.И.**[1], **Черняков С.М.**[1], **Гомонов А.Д.**[1], **Романова Н.Ю.**[1], **Калишин А.С.**[2], **Мингалев И.В.**[1]

[1]*Полярный геофизический институт, г. Апатиты* (*Мурманская обл.*) *mingalev_o@pgia.ru*
[2]*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург*

Эмпирическая модель APM_GEO с геомагнитными индексами Dst и AL в качестве входных параметров показала себя значительно более адаптивной по сравнению с эмпирическими медианными моделями ионосферы, имеющими в качестве геомагнитного входного параметра 3-х часовой геомагнитный индекс Ap.

Отсюда вытекает следующий замысел создания более адаптивной модификации модели ГДМИ, в которой к единственному геомагнитному входному параметру – взвешенному индексу Ap добавляются текущие значения индексов Dst, AL и Kp. Распределение параметров ионосферы следует натягивать по методике, используемой в модели ГДМИ, на модифицированные главные линии, когда положение АО берется по модели APM_GEO, а ГИП «приклеивается» к экваториальной границе зоны жестких диффузных высыпаний электронов (DAZ) со стороны экватора с помощью какой-либо его эмпирической модели, которая определяет зависимость от индекса Kp сдвига по исправленной геомагнитной широте между экваториальной границей зоны DAZ и минимумом ГИП, а также зависимость от индекса Kp аналогичного сдвига между минимумом ГИП и его экваториальной границей.

Наиболее подходящей для такой процедуры является эмпирическая модель ГИП из работы [*Na Yang, Huijun Le, Libo Liu*, Statistical analysis of ionospheric mid-latitude trough over the Northern Hemisphere derived from GPS total electron content data. // Planets and Space. 2015. 67:196. DOI 10.1186/s40623-015-0365-1], где предложены следующие эмпирические зависимости сдвига в градусах по исправленной геомагнитной широте $\delta\Theta_1^{\text{ГИП}}(\text{Kp})$ между полярной границей ГИП и его минимумом, а также аналогичный сдвиг $\delta\Theta_2^{\text{ГИП}}(\text{Kp})$ между минимумом ГИП и экваториальной границей ГИП:

$$\delta\Theta_1^{\text{ГИП}}(\text{Kp}) = 5.01 - 0.13\cdot\text{Kp},\quad \delta\Theta_2^{\text{ГИП}}(\text{Kp}) = 8.08 - 0.57\cdot\text{Kp},\quad \Theta_{\min}^{\text{ГИП}}(\text{Kp}) = 60.36 - 1.29\cdot\text{Kp}.$$

На рис. 1 кривые этой модели показаны черными линиями: $\Theta_{pol}^{\text{ГИП}}(\text{Kp})$ сплошной, $\Theta_{\min}^{\text{ГИП}}(\text{Kp})$ штрихпунктирной и $\Theta_{eq}^{\text{ГИП}}(\text{Kp})$ точечной, а соответствующие кривые модели APM_GEO показаны $\Theta_{pol}^{\text{ГИП}}[\text{APM}]$ фиолетовой, $\Theta_{\min}^{\text{ГИП}}[\text{APM}]$ зеленой и $\Theta_{eq}^{\text{ГИП}}[\text{APM}]$ коричневой линиями.

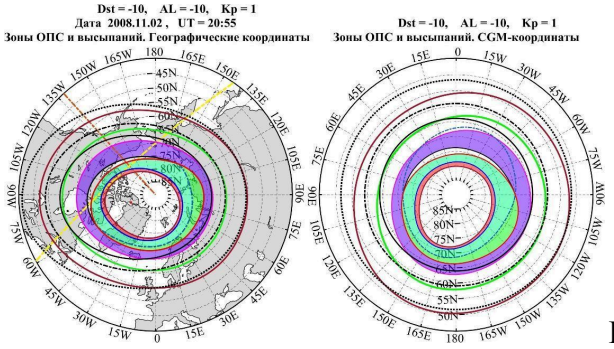


Рис. 1. Пример сравнения моделей для спокойных условий.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ: ВЕРИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ

Сигаева К.Ф.[1,2], **Климов П.А.**[1,2], **Сараев Р.Е.**[1,2], **Николаева В.Д.**[1]

[1]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, sigaeva.kf15@physics.msu.ru*

[2]*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

Изображающие фотометры проекта PAIPS [1] расположены в высокоширотных геофизических обсерваториях Ловозеро (LOZ) и Верхнетуломская (VTL) на расстоянии 153 км. Детекторы наблюдают одну область атмосферы над VTL в диапазоне высот от 27 до 307 км. Это позволяет производить стереометрические измерения аврорального свечения с высоким временным разрешением и, в том числе, проводить исследования высоты пульсирующих полярных сияний (ППС).

В ходе работы была предложена методика оценки высоты свечения ППС, основанная на использовании коэффициентов корреляции Пирсона и учитывающая реальную геометрию эксперимента. Для проверки корректности оценок, получаемых по данной методике, была проведена её апробация на модельных событиях с разным уровнем соотношения сигнала к шуму.

За два последних сезона (2023/2024 и 2024/2025) в ходе стереометрических наблюдений ППС были зарегистрированы в течение 95 ночей. Для анализа были выделены 5 событий с ясными погодными условиями на обеих станциях, к которым была применена методика оценки высоты. В результате было показано, что чаще всего ППС наблюдаются на высотах 90–100 км, что соответствует энергии высыпающихся электронов около 10 кэВ, характерной для ППС.

В докладе будет представлена методика оценки высоты, ее апробация на модельных событиях и применение к данным эксперимента PAIPS, а также исследование динамики высоты ППС и сравнение с данными камер всего неба ПГИ.

Исследование поддержано грантом РНФ (проект № 22-62-00010).

1. Klimov P, Sharakin S, Belov A, Kozelov B, Murashov A, Saraev R, Trofimov D, Roldugin A, Lubchich V. System of Imaging Photometers for Upper Atmospheric Phenomena Study in the Arctic Region. *Atmosphere*. 2022; 13(10):1572. https://doi.org/10.3390/atmos13101572

НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНАЯ СРЕДНЯЯ ЭНЕРГИЯ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ ПОЛУНОЧНОЙ ЗОНЫ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, zhanna@pgia.ru

В задачах моделирования процессов, протекающих в области полярных сияний, требуется задание параметров потока высыпающихся электронов. При этом возникает вопрос, какие значения параметров использовать при моделировании процессов, происходящих в ионосфере при среднестатистическом полярном сиянии?

К основным параметрам потока высыпающихся электронов относятся форма его энергетического спектра, средняя энергия потока и питч-угловое распределение. От данных параметров зависит локализация области высот, в которой протекают процессы, инициированные авроральными электронами. Для определения данной области могут быть использованы высотные распределения объемной интенсивности эмиссий, возбуждаемых только за счет прямого удара первичными электронами и электронами ионизационного каскада, рожденными в ионосфере. К таким эмиссиям, регистрируемым в полярных сияниях, относятся полосы первой отрицательной системы иона молекулярного азота 1NG N_2^+, наиболее интенсивными из которых являются полосы с началом 391.4 нм и 427.8 нм [1]. Высота максимума высотных профилей интенсивностей данных эмиссий соответствует области, в которой происходит максимальная диссипация энергии потока высыпающихся электронов.

В докладе показаны полученные на основе модели нестационарной авроральной ионосферы [2] результаты анализа изменений h_{max} -высоты максимума интенсивности свечения полосы 427.8 нм от параметров потока электронов. Оказалось, что высота h_{max} слабо зависит от формы энергетического спектра и питч-углового распределения электронного потока и определяется в основном средней энергией потока высыпающихся электронов.

В работе [3] на основе большого материала наблюдений, включающего в себя 57907 событий, было получено статистическое распределение высоты максимума объемной интенсивности эмиссии 427.8 нм в полуночном секторе авроральной зоны. Смоделированная зависимость h_{max} от средней энергии электронного позволяет трансформировать полученное в работе [3] статистическое распределение h_{max} в распределение средней энергии потока высыпающихся электронов $E_{ср}$. В свою очередь, статистическое распределения $E_{ср}$ позволяет выделить интервал для наиболее вероятных среднестатистических $E_{ср}$. Максимум полученного среднестатистического распределение средней энергии авроральных электронов, ответственных за полярные сияния в полуночном секторе авроральной зоны, локализован в области $E_{ср}$ от 3 до 4.5 кэВ.

Полученные значения средней энергии высыпающихся электронов $E_{ср}$ могут быть использованы при решении различных задач по моделированию авроральных событий как входные среднестатистические параметры.

1. Chamberlain J.W. **Physics** of the aurora and airglow. 1961. 704 p.
2. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. // Космические исслед. 2017. Т.55. С. 94.
3. Whiter D.K., Partamies N., Gustavsson B., Kauristie K. //Ann. Geophys. 2023. V. 41. P. 1.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПО ДАННЫМ РИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ДВУХ ТОЧКАХ

Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Ларченко А.В.

Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

Для объяснения случаев одновременной наземной регистрации всплесков авроралного ОНЧ-хисса и значительного риометрического поглощения (>1 дБ), ранее было выдвинуто предположение о их пространственном разнесении. Для количественной проверки этого предположения разработана численная модель на основе метода Монте-Карло, решающая задачу восстановления параметров области поглощения по данным двух риометров (обс. Ловозеро и Туманный). Область поглощения, обусловленная высыпанием электронов, аппроксимируется гауссовой дугой вдоль геомагнитной параллели.

Применение модели к событиям 2023 года с поглощением >0.4 дБ и существенной пространственной вариацией показало, что область поглощения является локализованной по широте (ширина ~90-100 км) и смещена в сторону станции, на которой наблюдается максимальное значение поглощения. Восстановленные положения и размеры области в нескольких событиях совпали с положением авроральных дуг, наблюдаемых all-sky камерой, а наиболее вероятные энергии высыпающихся электронов составили 40-50 кэВ.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанная модель является эффективным инструментом для диагностики положения и размеров области поглощения. Результаты количественно подтверждают, что одновременная регистрация хисса и поглощения возможна благодаря пространственному разнесению области засветки хисса и локальной зоны поглощения, часто связанных с единой авроральной структурой. Основное ограничение метода – вырожденность решений при малых или близких уровнях поглощения на двух станциях – определяет необходимость использования данных более густой сети наблюдений в перспективе.

ТОНКАЯ ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА СУБАВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ

Климов П.А.[1,2], Николаева В.Д.[1], Артемьев А.В.[3], Котиков А.Л.[4], Сараев Р.Е.[1,2], Щелканов К.Д.[1,2], Белов А.А.[1,2], Кудрявцев В.Д.[1,2], Клименко М.В.[5], Янковский И.С.[5]

[1]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, pavel.klimov@gmail.com*

[2]*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

[3]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[4]*СПбФ ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

[5]*КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*

Высыпания энергичных электронов является одним из наиболее энергетически активных каналов связи между магнитосферой и ионосферой Земли. Основными причинами, приводящими к потерям электронов, являются резонансные взаимодействия со свистовыми и ион-циклотронными электромагнитными волнами, а также рассеяние на кривизне силовых линий. Среди всех высыпаний, вызванных свистовыми (хоровыми) волнами, мелкомасштабные (кратковременные) явления представляют наибольший интерес и одновременно являются наиболее сложными для теоретического объяснения. Примером такого типа высыпаний являются микровсплески релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли (ВРПЗ). ВРПЗ, как и основная зона генерации хоровых волн обычно занимают широкий диапазон L-оболочек от плазмопаузы (L ~ 4,5–5 при нормальных условиях) до геостационарной орбиты (L ~ 6,6–7). Во время сильных геомагнитных возмущений внешний пояс может существенно смещаться на низкие L-оболочки магнитосферы. Эффективность хоровых волн на низких L-оболочках в формировании интенсивных субсекундных высыпаний исследована недостаточно подробно. В связи с этим интересно понять, могут ли оптические микровспелески (ОМВ), пульсирующие и мерцающие полярные сияния (ППС и МПС), формирующиеся за счёт высыпаний электронов хоровыми волнами, возникать в субавроральной зоне (на L ~ 3–4) во время сжатия магнитосферы и обладают ли они какими-то отличительными особенностями в сравнении с аналогичными эффектами, регистрируемыми на более высоких широтах. С этой целью высокочувствительный фотометр с высоким временным разрешением (1 мс) был установлен на субавроральных широтах (в обсерватории Красное Озеро: 60,53 с.ш., 29,72 в.д.).

В работе проанализированы два временных интервала. В первый период – с 15 по 21 апреля 2025 г. – на фоне геомагнитной бури интенсивностью Dst индекса - 150 нТл и череды суббурь были зарегистрированы ППС и, на фазе восстановления бури, четыре серии ОМВ. Второй рассмотренный период относится к слабой геомагнитная буре с амплитудой Dst индекса - 60 нТл, начавшейся 16 октября. В ночь с 18 на 19 октября 2025 г., геомагнитное возмущение достигло обсерватории Красное озеро и разнообразие быстрых форм свечения было представлено ППС (с классической временной структурой: основная частота около 0,1 Гц и модуляция на частоте 2–3 Гц на фазе “включено”) и мерцающими сияниями на частоте около 10 Гц. Также 19 октября около 20 часов местного времени на фазе восстановления геомагнитной бури при отсутствии полярных сияний была зарегистрирована серия ОМВ. ОМВ обнаруженные в субавроральных широтах были зарегистрированы во внешнем радиационном поясе, вблизи границы изотропизации и при наличии хоровых волн. Длительность зарегистрированных микровплесков меньше, чем обнаруженные ранее в Верхнетуломской (VTL, 68,58 с.ш., 31,75 в.д.) и составляют 3,5 и 46,5 мс для апрельской и октябрьской бурь соответственно, против 81 мс полученных ранее в VTL.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-62-00010 (https://rscf.ru/project/22-62-00010/).

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ПГИ

Мингалев И.В., Гомонов А.Д., Черняков С.М., Романова Н.Ю., Привалов А.В.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, mingalev_i@pgia.ru

В Докладе изложены результаты анализа данных ионозонда наклонного зондирования на короткой радиотрассе Мурманск-Туманный длиной около 100 км для оценки разнообразия типов состояния ионосферы в спокойных условиях и данных о широтных профилях ионосферного ВПЭС, в авроральной и субавроральной зоне, полученных с использованием фазоразностного метода. Анализ данных показал, что часто случаются ситуации, когда в спокойных условиях для двух моментов времени, отличающихся на 24 или 48 часов имеет место качественно разное состояние ионосферы. Другой важной особенностью поведения высокоширотную ионосферы, подтвержденной в ходе анализа данных, является возможность быстрого изменения параметров ионосферы даже в спокойных условиях. Изложенные результаты анализа данных наблюдений позволяют сделать вывод о том, что в рамках принятого в существующих эмпирических моделях подхода к описанию распределений параметров ионосферной плазмы невозможно описать реальное поведение высокоширотной ионосферы даже в спокойных условиях. Для решения этой задачи требуется разрабатывать новый подход.

УСТОЙЧИВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВЫСОТЫ СРЕДНЕШИРОТНОГО СЛОЯ E-СПОРАДИЧЕСКОГО ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ "МОСКВА" (ИЗМИРАН) ЗА 2007-2025 ГГ.

Куминов А.А.

ЦАО Росгидромета, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия, airship@mail.mipti.ru

19-летний временно́й ряд значений действующей высоты слоя *E*-спорадического ионосферы (*h'Es*) был разложен в ряд Фурье. Визуальный анализ полученного спектра амплитуд позволил выделить несколько участков спектра, интересных тем, что они сформированы временны́ми вариациями *h'Es* различной физической природы:

- низкочастотный участок с периодами гармоник, бо́льшими одного года;
- спектральный участок, включающий гармоники годовой вариации;
- среднечастотный участок, с периодами больше суток, но меньше 2,5 месяцев;
- высокочастотный участок, включающий гармоники суточной вариации.

Суммирование всех гармоник низкочастотного участка дало временной ряд, содержащий тренд и вариации с периодами, бо́льшими одного года. Кросскорреляционный анализ полученного ряда с временны́м рядом плотности потока солнечного радиоизлучения на частоте 2800 Мгц в 1947-2025 гг. обнаружил, что максимальное значение, равное 0,81, коэффициент кросс-корреляции имеет при запаздывании ряда *h'Es* на семь лет.

Сумма годовых гармоник подтвердила найденный ранее характер годовой вариации *h'Es* в среднеширотной ионосфере: относительно большие высоты в зимне-весенний период, почти линейное уменьшение высоты в течение лета и резкое увеличение высоты после осеннего минимума. Основными гармониками в годовой вариации являются: первая (средняя дата максимума 20 марта) и вторая (средние даты максимумов 09 января и 11 июля). Близкое положение минимумов этих гармоник (18 сентября – первой и 10 октября – второй) образуют глубокий осенний минимум.

Сумма всех гармоник среднечастотного участка спектра дала временно́й ряд, подтвердивший обнаруженное ранее в средних широтах существование двух внутрисезонных режимов вариаций *h'Es* на частотах, которые свойственны волнам Россби: зимой размах вариаций заметно больше, чем летом. Это явление может быть связано с регулированием вертикального распространения волн Россби из тропосферы в нижнюю термосферу направлением и величиной скорости зонального ветра в стратомезосфере.

Временной ряд суммы гармоник, составляющих суточные вариации *h'Es*, показывает заметную годовую вариацию суточной амплитуды. Годовая огибающая при этом имеет довольно сложную форму, но в общем зимние амплитуды суточной вариации больше по величине, чем летние.

Методом наложения эпох вычислена средняя за 19-летний интервал форма суточной вариации *h'Es*, она представляет собой сумму суточной и полусуточной гармоник. Максимум первой гармоники приходится на 11^{h}LT, максимумы второй гармоники – на 08^{h}LT и 20^{h}LT.

Одновременно определен усредненный суточный ход вероятности появления слоя *E*-спорадического. Максимальная вероятность равна 0,616 в 11^{h}LT, минимальная равна 0,228 в 03^{h}LT.

Представленные здесь результаты, будучи интересны сами по себе, показывают также широкие возможности, которые открывает использование данных наблюдений действующей высоты слоя *E*-спорадического ионосферы для изучения процессов, протекающих в нижней термосфере.

СИНХРОННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЕТРОМ

Васильев Р.В., Едемский И.К., Будовкина А.А., Шелков А.Д., Артамонов М.Ф., Ойнац А.В., Клименко М.В.

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

Исследования динамики параметров ионизированной и нейтральной компонент верхней атмосферы Земли средних широт вблизи равноденствия в течение нескольких суток в спокойных геомагнитных условиях показали значительное влияние нейтрального ветра на формирование вариаций концентрации ионосферной плазмы и свечения атомарного кислорода, возникающего в результате рекомбинации ионосферной плазмы [1]. Моделирование с использованием плазмосферно-ионосферной модели (ПИМ) ИСЗФ показало временную динамику концентрации плазмы и интенсивности свечения, расходящуюся с наблюдаемыми вариациями этих величин. Данное расхождение может быть обусловлено особенностями используемой в расчетах климатологической модели нейтрального ветра HWM. Однако, подобное расхождение показывает моделирование с привлечением глобальной самосогласованной модели GSM-TIP, в которой нейтральный ветер рассчитывается в ходе моделирования. Учёт наблюдаемого ветра в оценках дрейфа ионосферной плазмы проводит к предварительному пониманию причин формирования максимума концентрации ионосферной плазмы и соответствующего ему максимума интенсивности свечения атомарного кислорода. Поведение температуры термосферы, во время наблюдения максимумов концентрации плазмы и свечения указывает на то, что исследуемое явление может быть ассоциировано с полуночным температурным максимумом, который впервые наблюдался на широте 52°N нашими инструментами [1]. В докладе представлены новые сведения и результаты анализа нескольких событий подобного рода на основе данных оптических и радиофизических наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты получены с использованием уникальных научных установок «Оптические инструменты» [https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/] и «Иркутский радар некогерентного рассеяния» [https://ckprf.ru/catalog/usu/77733/].

1. Васильев Р.В., Едемский И.К., Шелков А.Д., Артамонов М.Ф., Алсаткин С.С., Евсеев У.Н., Лебедев В.П., Ташлыков В.П., Тащилин А.В., Тимченко А.В.. Анализ поведения ионосферной плазмы и свечения I630 среднеширотной верхней атмосферы с использованием данных радара НР и интерферометра Фабри—Перо. Солнечно-земная физика. 2025, т. 11, № 4, с. 17–27. DOI: 10.12737/szf-114202502.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПОПЕРЕК ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СТЕНДЕ «КРОТ»

Николенко А.С., Гущин М.Е., Коробков С.В., Зудин И.Ю., Стриковский А.В., Лоскутов К.Н., Айдакина Н.А., Вершинин И.М., Кочедыков В.В., Плешков Д.С.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, nikolenko@ipfran.ru

Распространение потоков ионизированного вещества поперек внешнего магнитного поля – фундаментальная проблема, возникающая в различных областях физики космической и лабораторной плазмы. В околоземной среде эти процессы имеют место при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли, а также при проведении активных геофизических ракетных экспериментов в ионосфере и магнитосфере. Множество примеров можно обнаружить в астрофизических объектах, например при аккреции вещества на молодые звездные объекты, взрывах сверхновых. Изучение потоков плазмы, распространяющихся поперек внешнего магнитного поля, важно для исследования механизмов образования бесстолкновительных ударных волн.

На крупномасштабном плазменном стенде «Крот» проводятся лабораторные эксперименты по ограниченному моделированию явлений, возникающих при инжекции плазменных струй в ионосфере и магнитосфере Земли [1]. В качестве источника плазменных струй в лабораторных экспериментах применяются компактные коаксиальные ускорители [2, 3], которыми плазменные потоки инжектируется в вакуум или менее плотную фоновую плазму поперек квазиоднородного магнитного поля фактически в «безграничном» режиме разлета.

При инжекции плазменной струи поперек квазиоднородного магнитного поля в вакууме происходит коллимация плазмы в плоскости, образованной векторами начальной скорости и внешнего магнитного поля – «плазменный лист». Длина, на которую распространяется плазменный поток поперек поля в лабораторном эксперименте, превышает один метр, и составляет порядка 10 гирорадиусов ионов струи. Различными контактными и бесконтактными методами установлена концентрация в плазменном листе – на уровне 10^{13} см$^{-3}$ вплоть до расстояния полуметра от точки инжекции. Независимое применение бесконтактной и зондовой диагностики показало, что скорость плазменного потока практически не зависит от индукции B_0, и близка к начальной скорости инжекции. Толщина плазменного потока за областью диамагнитной каверны изменяется обратно пропорционально B_0. Измерения возмущений внешнего магнитного поля в пространстве показали, что за областью диамагнитной каверны плазменная струя движется поперек B_0, практически не ослабляя внешнее магнитное поле, при этом уровень возмущений последнего сопоставим с уровнем теплового диамагнетизма плазмы. Такой режим движения плазмы возможен только за счет ее поляризации поперек V_0: движение струи поперек поля может быть описано в рамках модели «плазменного конденсатора» [4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24–12–00459

1. Гаврилов, Б. Г., Зецер, Ю. И. // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. **16**, № 3. С. 146.

2. Николенко А.С., Гущин М.Е., Коробков С.В., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Стриковский А.В, Лоскутов К.Н. // Физика Плазмы. 2023. Т. **49**. № 11. С. 1101.

3. Коробков С. В., Николенко А. С., Гущин М. Е., Стриковский А. В, Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Шайхисламов И. Ф., Руменских М. С., Земсков Р. С., Стародубцев М. В. // Астрономический журнал. 2023. Т. **100**. №1. С. 107.

4. Peter W., Rostoker N. Theory of plasma injection into a magnetic field //Phys. Fluids. 1982. V. **25**, No. 4. P. 730.

ВЛИЯНИЕ ЛУНЫ НА ДИНАМИКУ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

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

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, sashasap789@gmail.com

В работе представлены результаты анализа многолетней динамики абсолютного значения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Исследование основано на данных, полученных в геофизической обсерватории «Михнево» (54°56′35″ с.ш., 37°44′20″ в.д.) путём регистрации сигналов GPS с помощью двух приемников: трёхчастотного Javad Sigma 3T и двухчастотного Javad Prego. На их основе было восстановлено вертикальное ПЭС. Далее по полученному вертикальному ПЭС определялось абсолютное значение ПЭС с помощью методики, представленной в работе [1].

Применение Фурье анализа для 11 лет непрерывных наблюдений позволило выделить амплитуды и частоты основных гармоник. В свою очередь понимание периодов основных мод дало возможность выявить физические причины их появления.

В ходе анализа были идентифицированы известные периодические вариации — такие как полусуточные (обусловленные приливным взаимодействием с Луной), суточные (связанные с движением по Земле границы день-ночь), и гармоника, связанная с дифференциальным вращением Солнца вокруг своей оси.

Кроме того, была обнаружена мода с периодом 29,5 суток, что соответствует синодическому периоду Луны (периоду смены лунных фаз). Применение Фурье анализа позволило показать синхронность колебаний, вызванных этой модой, и смены фаз Луны.

Были проведены оценки величины отражаемого от Луны потока Солнечного излучения в инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах. Поток отраженного ионизующего излучения очень мал и не может приводить к образованию гармоники с амплитудой, составляющей около 0.8 TECU (~10% амплитуды суточной гармоники).

Наиболее вероятно, что данная гармоника вызвана гравитационным взаимодействием Луны и верхних слоев атмосферы Земли которое усиливается во время сизигийных приливов в полнолуние и новолуние. Дополнительно это предположение подтверждает гармоника с периодом около 14.7 суток, но меньшей амплитуды.

Таким образом удалось выявить периодический эффект, значительно влияющий на периодические изменения абсолютное значение ПЭС. Данное исследование в дальнейшем может быть использовано для уточнения динамических моделей ионосферы и показывает перспективы использования абсолютного значения ПЭС, восстановленного по результатам регистрации сигналов GPS для одной обсерватории.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6.

[1] Mylnikova, A.A., Yasyukevich, Yu.V., Kunitsyn, V.E., and Padokhin, A.M., Variability of GPS/GLONASS differential code biases, *Results Phys.*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002

ВОЗМОЖНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КЕЛЬВИНА-ГЕЛЬМГОЛЬЦА В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Крылова А. А., Кузьмин А.К., Садовский А.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, naur.zum@mail.ru

Рассматривается теория и возможность возникновения неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (КГ) в плазме полярной ионосферы Земли. В частности, подробно изучается развитие неустойчивости в полуденном секторе MLT. Показано стабилизирующее влияние проводимости Педерсена и эффекта Холла и выявлены условия, при которых неустойчивость КГ достигает нелинейной стадии.

Полярная ионосфера с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца рассмотрена как среда распространения радиосигнала. Для такой среды приведена возможная формулировка задачи распространения с переменными в пространстве и времени граничными условиями.

КОРРЕЛЯЦИЯ СИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ МКС ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП) НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС И FPMU НА АМЕРИКАНСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС

В.А.Грушин[1], С.И.Климов[1], В.Е.Корепанов[4], Б.Киров[2], Ш.Салаи[5], Я.Надь[5], К.Балайти[5], П.Сегеди[5], Е.М.Твердохлебова[3], Д.И.Новиков[1], Л.А.Осадчая[1]

1 - ИКИ РАН, Москва, 2 - ИКИТ Болгарской академии наук,3 - ФГУП ЦНИИмаш,4 - ИКИ НАНУ НКАУ-Львовский филиал,5 - Вигнеровский центр по физике Венгерской академии наук.

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

Зонд Ленгмюра ЗЛ-1, комбинированные волновые зонды КВЗ-1 и КВЗ-2, а также, феррозондовый магнитометр ДФМ-1 в составе эксперимента Обстановка -1 этап[1] и зонды Ленгмюра WLP и NLP в составе эксперимента Floating Potential Measurement Unit одновременно выполняли измерения в период с 2013 г. по 2015 г. Ранее, в докладе [2] мы показали, что смонтированные на противоположных концах МКС и на противоположных сторонах по отношению к Земле, зонды показывают качественно сходные результаты. На нескольких небольших интервалах мы наблюдали изменения плавающего потенциала двух зондов в ритме движения МКС по орбите. При этом синфазного повышения потенциала не наблюдалось. В представляемом докладе, мы используем данные интернет ресурса CDA WEB NASA США. Это позволяет построить корреляционные функции синхронно полученных долговременных (до суток) рядов измерений потенциала, ионной концентрации и температуры электронов в приповерхностной зоне МКС. Корреляционные функции построены также между электромагнитными и плазменными каналами, как в случае близкого расположения датчиков – на общей штанге, так, и в случае датчиков, установленных на разных сегментах МКС. Обращает на себя внимание сходство форм вольтамперных характеристик зондов Ленгмюра «Обстановка» и WLP FPMU[3], имеющих разные форму и площадь собирающей поверхности (цилиндр l=70 mm; r =1,5mm и сфера r=50 mm).

1. С.И. Климов, В.А. Грушин, К. Балайти и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперементе «*Обстановка (1 этап)*» на Российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии № 1(15)/2021, с. 20-41.
2. С.И. Климов, В.А. Грушин и др. Совместный анализ результатов электромагнитных измерений и измерений параметров плазмы в приповерхностной зоне мкс по данным экспериментов «Обстановка (1 этап) на российском сегменте МКС и FPMU на американском сегменте МКС. // Доклад на конференции Plasma-2021.
3. Aroh Barjatya, Charles M. Swenson, Donald C. Thompson, *and* Kenneth H. Wright Jr. Invited Article: Data analysis of the Floating Potential Measurement Unit aboard the International Space Station. Review of Scientific Instruments 80, 041301 (2009); https://doi.org/10.1063/1.3116085

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ СМ ПИВ ПО ДАННЫМ МНОГОПОЗИЦИОННОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА ИСЗФ СО РАН

Трофимов Е.А., Ойнац А.В., Толстиков М.В., Цедрик М.В., Громик Н.А., Пономарчук С.Н., Грозов В.П.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

В работе представлена методика определения характеристик ПИВ при разнесённой регистрации СНЗ ЛЧМ-сигналов на основе восстановления высотного профиля электронной концентрации ионосферы. Суть методики заключается в спектральном анализе временных вариаций электронной концентрации в нескольких точках пространства на соседних высотах. Сопоставляются результаты, полученные при обработке данных за разные сезоны года с целью сравнения распределений параметров СМ ПИВ в разные календарные периоды. В перспективе разрабатываемые алгоритмы планируется использовать в режиме автоматической обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Результаты получены с использованием оборудования ИСЗФ СО РАН, входящего в Центр коллективного пользования «Ангара» (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/).

1. Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V. Technique of ionospheric parameters automatic determination from data of vertical sounding with a continuous chirp signal // Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2023, 127806Q. DOI: 10.1117/12.2688438.
2. Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLII, № 10. С. 855–872.
3. Медведев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В., Кушнарев Д.С. Метод исследования пространственно-временной структуры волновых возмущений в ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49, № 6. – С. 812-823.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫХ МОЛЕКУЛ N_2 И ИОНОВ N_2^+ НА ВЫСОТАХ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

Кириллов А.С. [1], **Тарасенко В.Ф.** [1,2], **Золотенков Б.А.** [1,2], **Кириллов В.А.** [1]

[1]*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, kirillov@pgia.ru*
[2]*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Исследованиям высотных атмосферных разрядов (красных спрайтов, голубых струй, эльфов, гало и других) в настоящее время уделяется очень большое внимание. Получены данные о различных их свойствах. Наибольшее число работ при этом посвящено изучению красных спрайтов. Однако исследование их свойств, в том числе спектров излучения, затруднено из-за большой высоты этих разрядов над уровнем моря, сложности спектральных измерений, а также пространственной и временной неопределённости их появления. Предлагается получать предваритеьльную информацию о спектрах излучения красных спрайтов при высоком разрешении в различных диапазонах, используя их лабораторные аналоги – плазменные диффузные струи (ПДС). Для обоснования прогнозов о спектрах излучения красных спрайтов, экспериментально измеренные излучательные характеристики ПДС сравнивались с данными расчётов. При этом использовалась модель, описывающая кинетические процессы с участием электронно-возбужденных триплетных состояний N_2 и дублетного состояния N_2^+ в смеси газов N_2 и O_2. Проводится сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных отношений спектральных плотностей излучения десяти полос красного и инфракрасного диапазонов спектра свечения молекулярного азота (первая положительная система 1PG) к плотностям излучения ультрафиолетовых полос N_2 (вторая положительная система 2PG) и полосы N_2^+ (первая отрицательная система 1NG) при давлениях среды 0.03–1 Torr. Показано уменьшение отношения спектральных плотностей энергии W_{1PG}/W_{2PG} с ростом давления, что объясняется ростом скорости гашения состояния $B^3\Pi_g$ с увеличением плотности среды.

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

КОМПЕНСАЦИЯ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ КОНЦЕТРАЦИИ ИОНА O2+ МОДЕЛИ IRI2020 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 630 НМ

Шелков А.Д., Васильев Р.В., Ратовский К.Г.

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

Комбинирование наземных оптических и радиотехнических инструментов позволяет получать информацию о взаимодействии нейтральной и заряженной компонент атмосферы. Одним из явлений, проявляющихся в результате взаимодействия этих компонент является собственное свечение атмосферы. В свою очередь, ночной ход интенсивности на конкретных длинах волн обладает своими особенностями. Так, с середины XX века известно о повышении яркости свечения красной линии атомарного кислорода на длине волны 630 нм. Это связано с переходом энергии через плазмосферу. из другого полушария вдоль магнитных силовых линий. Исследуя параметры и динамику свечения линии 630 нм в предрассветные часы, можно определить теплопроводность плазмосферы.

Необходима изоляция вклада пришедшей энергии из магнитосопряженной ионосферы в локальную. Для этого было проведено моделирование свечения линии 630 нм в приближении диссоциативной рекомбинации молекулярного иона O2+:

$$O_2^+ + e \rightarrow O + O.$$

На входе модели свечения, где возможно, использовались данные инструментов ИСЗФ СО РАН. А именно, цифрового ионозонда DPS-4 (n_e) и интерферометра Фабри-Перо (T_n), входящего в перечень уникальных научных установок «Оптические инструменты» НГК РАН. Остальные входные параметры были взяты из данных моделей MSIS 2.1 и IRI2020.

В процессе моделирования свечения красной линии атомарного кислорода O(1D) обнаружилось, что высотный профиль интенсивности обрывается на высоте 300 км (рис. 1).

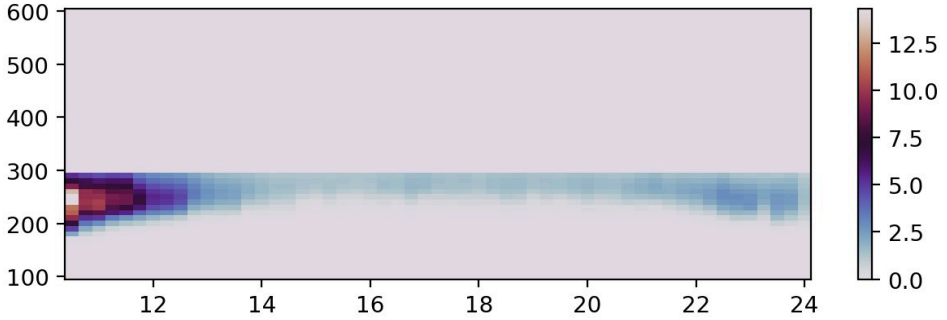


Рисунок 1. Высотный профиль ночного хода интенсивности линии 630 нм за счет диссоциативной рекомбинации O_2^+. Взяты среднесезонные значения осени 2022 года.

Все дело в специфике расчета ионного состава моделью IRI. Высотный диапазон делится на два отрезка – низкая (80-300 км) и высокая ионосфера (300-2000 км). В низкой ионосфере действует предположение об отсутствии ионов H^+ и He^+, в высокой отсутствуют ионы NO^+ и O_2^+. Из-за этого на высотах выше 300 км обращается в ноль концентрация иона O_2^+, что приводит к обрыву высотного профиля свечения 630 нм. По нашим оценкам, потерянная доля ионной концентрации на входе модели свечения приводит к потерям интенсивности порядка единиц Рэлей, что для полуночи составляет около 10%.

В докладе представлены результаты компенсации этой ошибки путем моделирования ночной генерации иона O_2^+ через реакцию перезарядки молекул кислорода O_2 на атомарных ионах кислорода O^+ и эмпирической экстраполяции высотного профиля ионной концентрации.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 10 ИЮНЯ 2021 Г.

Попов В.И., Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Моисеев А.В.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, volts@mail.ru

В работе представлена трехмерная модель ионосферы, основанная на формализме Эйлера с блоком учета солнечного затмения. Проведено численное моделирование состояния ионосферной плазмы с учетом эффекта кольцевого солнечного затмения 10 июня 2021 г. Проводится сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными измерений полного электронного содержания по данным сети станций ГНСС и спутника DMSP F17. Показано, что солнечное затмение приводит к существенному понижению концентрации электронов, которое сохраняется до 6 часов после затмения. Установлено, что солнечное затмение также влияет на тепловой режим ионосферы и приводит к резкому понижению температуры электронов в области тени.

НАБЛЮДЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА НАД КАЛИНИНГРАДСКИМ РЕГИОНОМ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В МАЕ 2024 ГОДА

Клименко М.В.[1], Белюченко К.В.[1], Клименко В.В.[1], Носиков И.А.[1], Янковский И.С.[1], Тимченко А.В.[1], Ефишов И.И.[1], Чернышов А.А.[2], Чугунин Д.В.[2], Синевич А.А.[3], Ряховский И.А.[4]

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

[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[3] *ИЗМИРАН, г. Москва, Россия*

[4] *ИДГ РАН, г. Москва, Россия*

Понимание сложных процессов, которые происходят в магнитосфере, атмосфере и ионосфере Земли во время крупных геомагнитных бурь, имеет важное значение не только для фундаментальной науки, но и для смягчения потенциальных последствий этих событий, таких как сбои в энергосистеме канадской провинции Квебек в 1989 году. Ранее по данным наземных и спутниковых наблюдений изучены ионосферные явления в области средних широт над Калининградским регионом, связанные с самой интенсивной геомагнитной бурей XXI века на сегодняшний день (10–12 мая 2024, «Буря Дня Победы»). Наблюдения показали одновременное появление поляризационного джета, представляющего собой узкую (1°-2°) полосу быстрых (сверхзвуковых) ионных дрейфов на запад, U-образной структуры на ионограммах, суб-аврорального свечения STEVE, увеличение индекса возмущения полного электронного содержания (ROTI), аниомальные возмущения амплитуды СДВ сигнала на трассе со средней точкой в окрестности Калининграда. Данное исследование основано на данных спутниковых систем (Swarm, DMSP), наземных магнитометров, ионозондов, сигналов ОНЧ (очень низкой частоты), приемников GNSS (глобальная навигационная спутниковая система) и камеры всего неба. Для верификации возможностей численной модели воспроизвести появление и проявления поляризационного джета мы провели расчеты на Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) эффектов геомагнитной бури 10-11 мая 2024 г. Были рассмотрены основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании ионосферных возмущений в период развития поляризационного джета. Обсуждаются возможности использования камер всего неба и приемных и передающих устройств КВ-радиоволн для детального изучения скорости и проявлений поляризационного джета.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 25-27-00217.

ИОНОСФЕРНЫЙ И ГЕОМАГНИТНЫЙ ОТКЛИК НА МЕЖПЛАНЕТНУЮ УДАРНУЮ ВОЛНУ ПЕРЕД МАГНИТНОЙ БУРЕЙ 10 МАЯ 2024 Г.

Костина П.В., Пилипенко В.А., Падохин А.М.

Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия, kostina.pv@yandex.ru

Хотя все больше число исследователей пытаются выделить аномальные вариации полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы в качестве предвестника землетрясений, но физический механизм предвестниковых аномалий совершенно не выяснен. Чувствительность ПЭС ионосферы к внешним электрическим полям и токам можно оценить с помощью тестового сигнала с известной амплитудой, каким является импульс внезапного начала бури SC, возбуждаемый межпланетной ударной волной. Хотя ее воздействие относительно кратковременно, но за это короткое время в околоземную среду переносится значительная электромагнитная энергия, которая может оказывать триггерное воздействие на все геофизические оболочки. При этом наблюдаемый отклик на межпланетную ударную волну может быть достаточно сложным из-за одновременного возбуждения нескольких волновых УНЧ процессов. Поэтому исследование воздействия возмущений различной физической природы на ионосферу с помощью сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) может дать представление о возможных механизмах взаимодействия магнитосферы и ионосферы.

В данной работе рассматривается реакция ионосферы и геомагнитного поля на SC 10 мая 2024 года, наблюдаемая с помощью мировой сети наземных магнитометров и ГНСС приёмников. Сравнение магнитного и ионосферного откликов позволяет определить чувствительность ПЭС на разные типы МГД волн. Использование мировой сети станций дает возможность определить скорости распространения SC вдоль ионосферы.

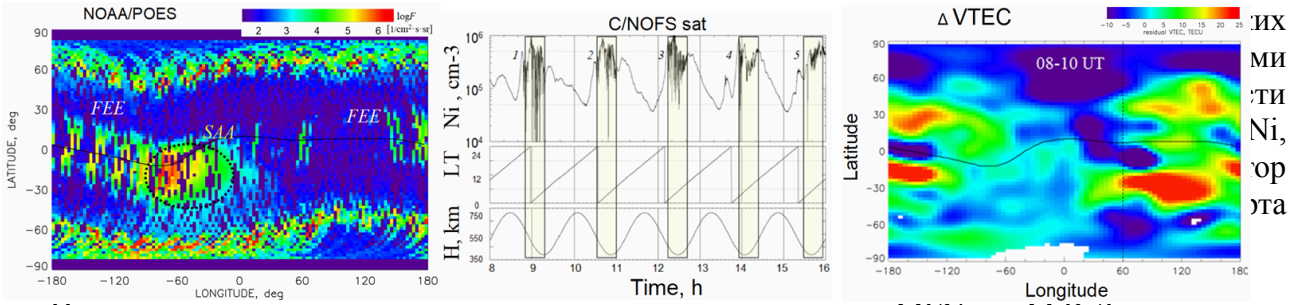
ИОНИЗАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В НИЗКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ВО ВРЕМЯ БУРИ 1 ИЮНЯ 2013 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ C/NOFS и NOAA/POES

Суворова А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, suvorova@dec1.sinp.msu.ru

Исследован ионосферный эффект, создаваемый длительными интенсивными потоками квазизахваченных энергичных электронов (FEE) во время умеренной геомагнитной бури 1.06.2013. Ранее с применением методики 2-часовых глобальных ионосферных карт GIM был показан значительный вклад ионизирующего воздействия FEE в динамику положительных ионосферных бурь на низких широтах [1, 2]. Прямые измерения плотности ионосферной плазмы на низких широтах также подтвердили, что повышенная ионизация связана с появлением энергичных частиц FEE [3]. В данной работе с использованием одновременных данных низковысотных спутников NOAA/POES и C/NOFS представлено еще одно прямое доказательство ионизации нейтральной верхней атмосферы на низких широтах потоками FEE (>30 кэВ). Эффект обнаружен на высотах ионосферной F области. Ионизационный эффект проявлялся в значительных неоднородностях и увеличении плотности ионов в ночном секторе над Тихим океаном, там же где одновременно наблюдались потоки FEE. Эффект был наиболее ярко выражен на фазе восстановления магнитной бури, т.е. при ослаблении действия электродинамических и термосферных механизмов положительной ионосферной бури. Показано, что локальная плотность ионосферной плазмы увеличилась в 2-3 раза. Вклад в полное электронное содержание (ПЭС) может быть довольно большим, до 25 TECU (1 TECU=10^{16} м$^{-2}$) особенно на восстановительной фазе бури, что необходимо учитывать при анализе и совершенствовании моделей положительных ионосферных бурь [4].

(а) (б) (в)



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

1. Suvorova A.V., Tsai L.C., Dmitriev A.V. // Planet. Space Sci. 2012. V. **60.** P. 363.
2. Suvorova A.V., et al. // J.Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. **118**. P. 4672.
3. Голубков М.Г., Суворова А.В., Дмитриев А.В., Голубков Г.В. // Хим. Физ. 2020. Т. **39**. С. 69.
4. Suvorova A.V., Dmitriev A.V. // Cyclonic and Geomagnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts. 2015. NOVA Sci.Publ.

ФЛУКТУАЦИИ МОЩНОСТИ ДЕЦИМЕТРОВЫХ СИГНАЛОВ В ДИАПАЗОНАХ L1 И L2 НА ТРАССАХ РАДИОЗАТМЕННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (СПУТНИКИ COSMIC-1) НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ В МАРТЕ 2015 ГОДА

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Андреев В.Е.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, gubenko@fireras.su

Проведен анализ ~50 сеансов спутникового зондирования высокоширотной (>60°N) ионосферы Земли, выполненных 17–18 марта 2015 года в радиозатменном эксперименте *COSMIC-1* для двух диапазонов L1 (~19.0 см) и L2 (~24.4 см) дециметровых (ДМ) волн. Корональные выбросы массы (КВМ), достигшие магнитосферы Земли 17 марта (~ 04:45 UT), спровоцировали сильную геомагнитную бурю класса *G4*, которая вызвала значительные флуктуации характеристик ДМ-сигналов на трассах зондирования: навигационные (*GPS*) спутники – низкоорбитальные (*COSMIC-1*) спутники [1].

Наиболее заметные вариации мощности радиоволн наблюдались в *E*-области нижней ионосферы Земли на высотах менее ~110 км. Здесь возмущения мощности ДМ-сигналов, возникающие вследствие неоднородностей ионосферы с вертикальными размерами <2 км (дифракционные масштабы), были максимальны во время второй стадии (M2) главной фазы магнитной бури и изменялись от –3.0 до +2.5 дБ.

Для оценки уровня флуктуаций в анализируемых профилях регистрируемой мощности дециметровых сигналов, мы использовали величину S4-индекса, которая определяется как стандартное отклонение мощности радиоволн, нормированное на среднюю мощность сигнала [2]. По значениям S4-индекса флуктуаций (замираний) ДМ-сигналов при распространении по ионосферным трассам радиозатменного зондирования их можно классифицировать следующим образом: слабые замирания – S4 < 30%; средние – 30% < S4 < 60%; сильные – S4 > 60%. Было найдено, что значения S4-индекса не превышали ~15% (слабые замирания) для всех профилей мощности, которые получены в сеансах радиозатменных измерений, выполненных в спокойный геомагнитный период накануне начала (~04.45 UT 17 марта 2015 года) магнитной бури. Во время первой стадии (M1) главной фазы магнитной бури (с ~06.23 UT по ~12.00 UT 17 марта 2015 года) значения S4-индекса удовлетворяли неравенству 20% < S4 < 40% (слабые и средние замирания). Для второй стадии M2 главной фазы шторма (с ~12.00 UT по ~23.00 UT 17 марта 2015 года) характерны средние замирания ДМ-сигналов (40% < S4 < 60%). На участке фазы восстановления (начало ~23.00 UT 17 марта 2015 года) значения S4-индекса примерно такие же (S4 < 15%), как для спокойного геомагнитного периода накануне начала бури.

Обнаружена корреляция между вариациями (вертикальные масштабы неоднородностей >2 км) мощности и рефракционного ослабления радиоволн, которая свидетельствует об определяющем вкладе слоистых неоднородностей в наблюдаемые вариации. Исследование вариаций мощности радиозатменных сигналов в высокоширотной ионосфере Земли является актуальным для анализа динамики космической погоды, а также представляет практический интерес в задачах обеспечения радиосвязи и навигации.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

1. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А. // Радиотехника и электроника 2025. Т. **70**. С. 899, https://doi.org/10.7868/S3034590125100025

2. Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия 2021. Т. **61**. С. 713, https://doi.org/10.31857/S0016794021060067

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ, ВОЗМУЩЁННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ГНСС РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЛИНИИ 630 НМ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 2021-2024 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, denis.kogogin@gmail.com

[2] ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

[3] ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлена методика обработки совместных экспериментальных данных ГНСС радиозондирования и оптических измерений и проведен анализ интенсивности свечения, полученной по данным снимков ночного неба с выделенными областями искусственного оптического свечения (ИОС) / подавления фонового свечения в линии 630 нм и вариаций ПЭС по данным карт распределения интенсивности данного параметра для тождественных областей возмущенной мощным радиоизлучением УНУ стенд СУРА области ионосферы по данным экспериментов проведенных в 2021-2024 гг. В силу достаточно стабильных ионосферных условий и состояния космической погоды, большого количества проведенных сеансов воздействия на ионосферу, а так же новым возможностям построения динамических ПЭС карт в окрестности стенда, исключающим необходимость ожидания пересечения луча спутник-приемник непосредственно пятна ИОС и/или области подавления фонового свечения в экспериментах 2021-2024 гг., удалось накопить большой объем данных по синхронным измерениям интенсивности свечения в красной (630.0 нм) линии и вариациям ПЭС в возмущенной мощным радиоизлучением области ионосферы. Получены статистически значимые зависимости вариаций нейтральной (ИОС/подавление фонового свечения в линии 630 нм) и заряженной (вариации ПЭС) компонент ионосферной плазмы в области её взаимодействия с мощной радиоволной. По данным их анализа установлено, что динамика ПЭС повторяет динамику ИОС с обратным знаком (увеличение яркости ИОС соответствует уменьшению ПЭС), но с запаздыванием на ~ 40-50 с. Так же установлено, что 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 под действием излучения стенда. Общая динамика изменения интенсивности вариаций ПЭС при регистрации ИОС оказывается качественно и в общем количественно схожей с динамикой при регистрации подавления фонового свечения. Таким образом на статистически значимом объеме экспериментальных данных регистрации ИОС, включая данные регистрации подавления фонового свечения, показано, что искусственное свечение в линии 630 нм генерируется в основном внутри крупных полостей ионосферной плазмы т.е. в областях с пониженной электронной концентрацией.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-77-10029. Обработка данных подавления фонового свечения была выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-72-20019. Экспериментальные данные получены с использованием УНУ Стенд СУРА и оборудования УНУ Оптические инструменты.

ВСПЫШКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ГРОЗ (TGF), НАБЛЮДАЕМЫЕ С ОРБИТЫ И С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Шлюгаев Ю.В.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

Впервые вспышки гамма-излучения из грозовых облаков были обнаружены орбитальными космическим аппаратами и стали обозначаться наземными гамма-вспышками, или TGF. Некоторые особенности регистрации TGF, такие, как наблюдения только в области достаточно низких широт, где высота тропосферы и высота мощных конвективных облачных систем существенно больше, чем в средних и высоких широтах, последующая связь TGF с компактными внутриоблачными разрядами (CID), которые являются самыми мощными импульсными источниками радиоизлучения в атмосфере Земли, однозначно свидетельствовали о том, что источник TGF и CID находится на значительной высоте вблизи верхней кромки грозового облака и значительно выше областей, где формируются обычные молниевые разряды. Тем не менее, существуют публикации, где авторы утверждают, что они регистрируют TGF на поверхности Земли, хотя распространение гамма-квантов от тропопаузы мало вероятно, вследствие поглощения в плотной атмосфере. Анализ данных, приведённых в одной из таких работ [Wada et al., Sci. Adv. 11, eads6906 (2025)], демонстрирует, скорее, излучение, связанное с широким атмосферным ливнем (ШАЛ), порожденным частицей высокой энергии.

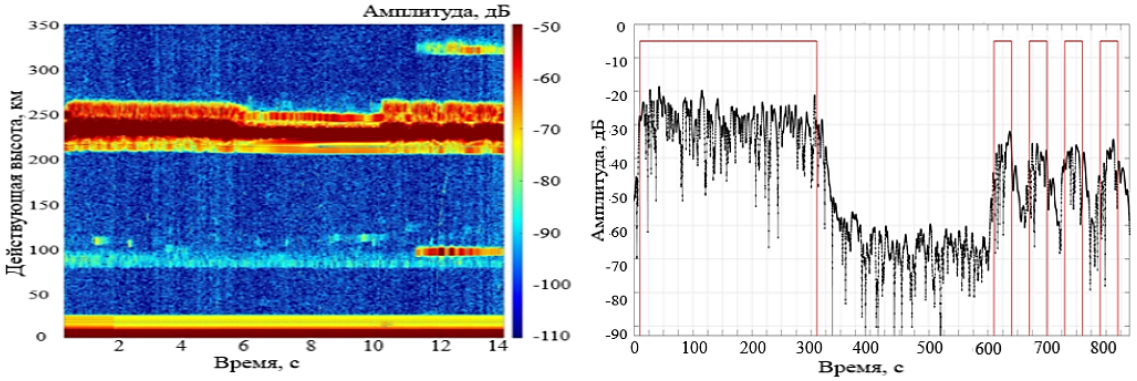
ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ – РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ СУРА

Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А., Хромин О.К.

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

В работе приведены результаты недавних исследований воздействия на ионосферу излучением мощных радиоволн нагревным стендом СУРА (56,1°N; 46,1°E). Ранее в экспериментах, основанных на диагностике нижней ионосферы методом импульсного зондирования с помощью установки частичных отражений, было обнаружено, что искусственное возмущение F-области может распространяться на высоты ниже уровня отражения мощной волны на 40–100 км. В июле и октябре 2025 г. были проведены новые эксперименты, целью которых являлось исследование процесса распространения искусственного возмущения из области резонансного взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой. Нагрев ионосферы производился излучением в зенит или в направлении магнитного зенита обыкновенной радиоволной на частоте 5.828 МГц, а зондирование – пробными волнами на частоте 4.3 МГц. Стенд СУРА в этих исследованиях использовался как для непрерывного возмущения ионосферы и создания искусственных ионосферных неоднородностей разных масштабов, так и для диагностики ионосферы, когда один из трех передатчиков стенда импульсно излучал пробные радиоволны. Каждый цикл измерений продолжался 15 мин и включал непрерывный нагрев в течение 5 мин, паузу той же длительности, а в последующие 5 мин каждые 30 с проводился нагрев ионосферы в течение 5 с с паузой длительностью 25 с (в июле) или каждую минуту в течение 30 с с паузой 30 с (в октябре). В июле пробные волны отражались на истинной высоте 150–170 км, что было существенно ниже высоты отражения мощной волны (225–250 км). Во время воздействия на ионосферу возрастали вариации амплитуды пробного сигнала в нижней ионосфере, и увеличивалась его действующая высота отражения в F-области. В октябре через 10–20 с после начала нагрева вблизи высоты отражения пробной волны появлялся дополнительный сигнал амплитудой на 30–40 дБ выше, чем в паузе, релаксирующий после окончания нагрева за близкое время. Разность истинных высот отражения пробной (180 км) и нагревной (200–230 км) радиоволн в октябре составила 20–50 км. Таким образом, в обоих случаях дополнительный сигнал при нагреве обеспечивался, как правило, рассеянием на искусственных неоднородностях нижней части F-области при разности высот нагревной и пробной радиоволн 20–100 км в разных ионосферных условиях.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-27-00031.



Пример появления дополнительного сигнала на частоте 4.3 МГц при воздействии на ионосферу частотой 5.828 МГц (О-мода) в течение 5 мин и 30 с на действующей высоте 237 км 08.10.2025 в сеансе 13:30–13:45. Красными линиями показаны интервалы нагрева.

ПОДХОД К БЕЗАППАРАТНОЙ ДИАГНОСТИКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

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

ФГБОУ ВО УУНИТ, г. Уфа, Россия, meccos160@yandex.ru

Режимы работы пространственно-распределенных систем высокоширотной инфраструктуры (магистральные трубопроводы, энергораспределительные системы и сети, системы автоматики железных дорог, навигационные системы, используемые в процессах наклонно-направленного бурения и пр.) часто находятся в прямой зависимости от параметров космической погоды и уровня возмущенности геомагнитного поля. В этой связи такие объекты нуждаются в непрерывном контроле рисков возникновения сбоев или отказов, вызванных экстремальной геомагнитной активностью, характерной для данного региона. Известные подходы к идентификации предаварийного состояния, как правило, реализуются посредством прямых измерений параметров физических величин в окрестности эксплуатации соответствующего оборудования. Однако плотное покрытие всей территории Арктической зоны РФ (АЗРФ) сетью измерительных приборов и станций по ряду причин на сегодняшний день является невозможным. Предлагаемый в работе подход предполагает проводить вероятностную диагностику уровня воздействия космической погоды на технологические системы высокоширотной инфраструктуры путем качественной оценки естественных индикаторов состояния космической погоды и верхней ионосферы.

Ранее в [1] был предложен подход к автоматической классификации снимков всего неба для фиксации структуры полярных сияний, результаты которого применялись в настоящей работе. Также в [2] была построена статистическая модель зависимости экстремальных уровней геоиндуцированных токов с областью наблюдения полярных сияний, что коррелирует с результатами, полученными в текущем исследовании.

Представленные результаты получены на основании данных, регистрируемых вблизи арктической станции Ловозеро, что делает их наиболее релевантными для Кольского полуострова, но также коррелирующими с остальными субрегионами АЗРФ.

Для оценки вероятности появления экстремальных погрешностей измерения азимутального угла $\Delta D \geqslant \pm 2°$ использовался Байесовский подход по следующим параметрам: сезонность, суточный ход, локализация и структура полярных сияний. Показано, что наибольшие вероятности возникновения экстремальных погрешностей наблюдаются:

- в периоды осеннего и весеннего равноденствий;
- экстремальные значения в утренние и вечерние часы, а также умеренные в районе полночи;
- при наблюдении сияний в южной части небосвода;
- при ярко-выраженной структуре полярных сияний.

1. Подход к автоматической классификации полярных сияний по данным наблюдений камер всего неба / А. В. Воробьев, А. Н. Лапин, Г. Р. Воробьева // Геомагнетизм и Аэрономия. – 2025. – Том 65. – № 5. – С. 728-738. – DOI: 10.7868/S3034502225050153.

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

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-30010-П.

ГЕНЕРАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЛНОЙ ЦУНАМИ НАД ПРИБЕРЕЖНОЙ ОБЛАСТЬЮ СУШИ

Ященко А.К., Сорокин В.М.

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

Рассмотрен механизм формирования возмущения геомагнитного поля волной цунами на суше в береговой области. Источником возмущения является электрический ток в морской среде и в ионосфере. Тока в морской среде возникает в результате ее движения в геомагнитном поле при распространении волны цунами. Источником тока в ионосфере служит ее движение под действием акустико-гравитационной волны в геомагнитном поле. Она генерируется вертикальным смещением волной цунами поверхности морской среды. Развита модель, которая позволила объяснить распространение возмущения геомагнитного поля на сушу береговой область. Поглощение волны цунами в момент достижения ее передним фронтом береговой линии приводит к нестационарности токов и генерируемой ей акустико-гравитационной волной. Вариации тока в ионосфере возникают в моменты времени после достижения акустико-гравитационной волной ионосферы. Поле этого тока возникает на земле за береговой линией. Результаты проведенных расчетов показывают, что учет вклада ионосферных токов при рассмотрении задачи генерации нестационарных возмущений геомагнитного поля при падении волны цунами на берег принципиально важен. А именно: возмущения длятся дольше, дальше распространяются вглубь суши, существенно изменяется их форма. Кроме того, генерируется горизонтальная компонента возмущения геомагнитного поля, отсутствующая (в рамках выбранной геометрии и других приближений) при учете только токов в морской среде.

ИОНОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА КАМЧАТКЕ 29 ИЮЛЯ 2025 ГОДА

Рябова С.А.[1,2]

[1]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, riabovasa@mail.ru*

[2]*ИДГ РАН, г. Москва, Россия*

Землетрясение магнитудой Mw = 8,8 по данным USGS произошло 29.07.2025 г. в Курило-Камчатском желобе в зоне субдукции между Тихоокеанской и Охотоморской тектоническими плитами на глубине ~35 км (GEO: 52,498° N; 161,264° E). Курило-Камчатская дуга простирается более чем на 2000 км от о. Хоккайдо (Япония) до сочленения с Алеутской дугой и является крупнейшей тектонической структурой Камчатского региона, которая отличается высокой сейсмичностью. Ее высокая динамика (скорость субдукции составляет 7–8 см/год) определяет значительное количество сильных землетрясений с магнитудой, превышающей 7. Сильное землетрясение 29.07.2025 г. вызвало не только большое количество афтершоков, но привело к активизации вулканической деятельности на Камчатке.

По данным станции petт из 32-х спутников GPS для исследования косейсмического отклика ионосферы на мегаземлетрясение на Камчатке 29.07.2025 г. и его мощный афтершок магнитудой 6.9 были выделены те спутники, которые в момент основного толчка землетрясения и его мощного афтершока (от 5 минут до и 15 минут после событий) находились на расстоянии меньше 450 км.

Обработка и анализ данных показал, что возмущения плотности плазмы в F слое в ближней зоне наблюдаются спустя 10–15 мин после основного толчка и имеют форму N волны, причем форма импульса демонстрирует равенство площадей под положительной и отрицательной фазами. Возмущения полного электронного содержания вызваны распространением ударной волны после сейсмических событий. Оцененная по амплитуде энергия землетрясения и его сильного афтершока неплохо согласуется с сейсмологическими оценками энергии.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и в рамках государственного задания ИДГ РАН № 125012700798-8 «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий».

АЛГОРИТМЫ УСВОЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Хамикова М. А.

ИВМ РАН, г. Москва, Россия, khamikova.ma@phystech.edu

Рассматривается новая версия системы вариационного усвоения данных наблюдений о полном электронном содержании для диффузионной модели F слоя ионосферы Земли INM-IM, включающая векторную функцию управления и разбиение временного отрезка на отдельные подотрезки. Разработка системы усвоения ведётся в рамках деятельности по созданию комплексной модели Земной системы ИВМ РАН, включающей в качестве вычислительного блока ионосферный и термосферный.

Модель INM-IM основана на решении уравнения неразрывности для электронной концентрации в стандартных для F слоя приближениях динамического преобладания процесса амбиполярной диффузии и квазинейтральности плазмы. Решаемая задача состоит в восстановлении глобального поля электронной концентрации n с усвоением известных данных наблюдений – интегралов электронной концентрации вдоль прямолинейных траекторий «станция-спутник». Отличие новой версии вариационной системы усвоения заключается в использовании одновременного управления как по правой части (слагаемое U_1), так и по начальным данным U_0 одновременно. Основное динамическое уравнение модели, а также условия наблюдения имеют вид:

$$\left\{\left(\frac{\partial}{\partial t} - \nabla(K\nabla(\cdot)) - \frac{\partial}{\partial z}(u\cdot(\cdot)) - \frac{\partial}{\partial y}(v\cos\varphi\cdot(\cdot)) + k\right)n = P_0 + U_1,\ n|_{t=0} =\right.$$

$$= U_0 \int\limits_{\Omega_k} n(z,\varphi,t)\varphi\, d\varphi dz = Tec_k(t)$$

где P_0 – функция фотоионизации, k – коэффициент рекомбинации,

$$K = \begin{pmatrix} K_1^2 & -K_1K_2 \\ -K_1K_2 & K_2^2 \end{pmatrix} -$$

матрица эффективных коэффициентов диффузии, $u,\ v$ – эффективные скорости, связанные с процессами гравитационного оседания, t – время, $z,\ y$ – пространственные координаты, φ – широта, a – радиус Земли, $Tec_k(t)$ – значение интеграла электронной концентрации в момент времени t на траектории с номером k.

Отдельно рассматривается разбиение всего окна усвоения на меньшие отрезки времени для оптимизации используемой памяти и исследуется качество восстановления полученной системы. С помощью численных экспериментов показано, что в рамках обновлённого подхода система воспроизводит основные характеристики верхней ионосферы с достаточной точностью.

1. Дымников В.П., Кулямин Д.В., Останин П.А., Шутяев В.П. Усвоение данных для двумерного уравнения амбиполярной диффузии в модели ионосферы земли // Журнал вычислительной математики и математической физики. - 2023. - Т. 63. - №5. - С. 803-826.
2. Ostanin, P. A., Kulyamin, D. V., Kostrykin, S. V., Vasilev, A. E., & Dymnikov, V. P. (2025). Four-dimensional variational data assimilation system for the Earth ionosphere. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling, 40(1), 33-46.

НАГРЕВ ИОНОСФЕРЫ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛЭП И КНЧ ПЕРЕДАТЧИКА

Пилипенко В.А.[1,2], **Федоров Е.Н.**[1], **Мазур Н.Г.**[1]

[1] *Институт Физики Земли РАН, Москва pilipenko_va@mail.ru*

[2] *Геофизический Центр РАН, Москва*

К настоящему времени наша планета оказалась в электромагнитной среде, созданной скорее промышленной деятельностью, чем естественными процессами. Все больше появляется свидетельств антропогенного «загрязнения» околоземного пространства как непреднамеренный побочный продукт развития техносферы. Особое значение имеет процесс излучения электромагнитной энергии линиями электропередачи (ЛЭП) в диапазоне промышленной частоты 50-60 Гц. В этом же диапазоне мощными излучателями являются наземные передатчики типа ЗЕВС. В медийном поле высказываются опасения – не может ли излучение ЛЭП или передатчика ЗЕВС влиять на верхнюю атмосферу и ионосферу? Сложная волновая картина распространения КНЧ волны в ионосфере не поддается аналитическому рассмотрению, и ответ на этот вопрос требует численного моделирования. Приведены результаты численных расчетов электромагнитного отклика атмосферы и ионосферы на приземный крупномасштабный излучатель. Результаты моделирования представлены для нескольких типов источников: несбалансированный ток в ЛЭП с длиной L=500 км на частоте 50 Гц, и передатчик ЗЕВС с L=60 км на частоте 82 Гц. По результатам моделирования, оба типа источников могут возбуждать в верхней ионосфере излучение с интенсивностью до десятков мкВ/м над земной корой с проводимостью 10^{-5} См/м (Кольский полуостров). Эффект нагрева электронов оказался крайне малым, но нагрев ионов оказался более заметным благодаря циклотронному резонансу. Следовательно, в настоящее время общий эффект нагрева от ЛЭП и ЗЕВС с типичными амплитудами токов варьируется от незаметного до слабого. Однако, интенсивность промышленных излучений в околоземном пространстве продолжает нарастать по мере технологического развития человечества, и эффекты модификации ионосферы над ЛЭП со временем могут стать заметными. Работа поддержана грантом РНФ 21-77-30010-П.

МАГНИТНАЯ БУРЯ 12-13 НОЯБРЯ 2025 Г.: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ

Ю.В. Ясюкевич[1,2], Е.И. Данильчук[1,2], А.А. Чернышов[3], А.Б. Белецкий[1], Е.А. Борвенко[1], А.М. Веснин[1], В.А. Иванова[1], М.В. Кравцова[1], А.В. Ойнац[1], С.В. Олемской[1], А.М. Падохин[4,5], К.Г. Ратовский[1], В.Е. Сдобнов[1], В.Г. Файнштейн[1], Д.С. Хабитуев[1], С.А. Язев[1,2], А.С. Ясюкевич[1]

1 – ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru; 2 – ИГУ, Иркутск, Россия; 3 – ИКИ РАН, Москва, Россия; 4 – Физический факультет МГУ, Москва, Россия; 5 – ИЗМИРАН, Москва, Россия

Очень сильная геомагнитная буря (G4), произошедшая 12-13 ноября 2025 г. стала третьей по интенсивности магнитной бурей 25-го цикла солнечной активности. Данное событие вызвано процессами в активной области NOAA 14274. Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ), ассоциированные с вспышками X1.7 (09.11), X1.2 (10.11), X5.1 (11.11), зарегистрированы в точке Лагранжа L1 22:15 UT и 23:38 UT 11 ноября, 18:53 UT 12 ноября. Первая МКВМ характеризовалась низкими абсолютными величинами межпланетного поля и незначительно повлияла на геомагнитную обстановку, но, по всей видимости, повлияла на распространение последующей МКВМ. 12 ноября индексы Dst (2:00 UT) и SYM-H (0:16 UT) начали резко падать, достигнув –217 нТл (в 5:00 UT) и –254 нТл (в 3:59 UT), соответственно. Максимальное значение индекса Kp составило 9-. Третий МКВМ пришедший на фазе восстановления 13 ноября привел к очередному развитию кольцевого тока и усилению геомагнитной бури.

В работе представлен анализ источников возмущений в околоземном космическом пространстве и их воздействия на магнитосферу и верхнюю атмосферу Земли на основе данных сетей приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, ионозондов, оптических инструментов, КВ-радаров (класса SuperDARN), мониторов космических лучей и спутниковых данных.

Анализ показал значительные глобальные ионосферные возмущения. Авроральный овал расширялся в сторону экватора, достигая широт ~35°N в американском секторе. Мы зафиксировали экваториальные плазменные суперпузыри, практически достигающие границы аврорального овала в американском секторе. Гребни экваториальной аномалии усилились, превысив 175 TECU, и сместились к полюсу на 8–10°. На средних широтах критическая частота слоя F2 (foF2) характеризовалась сильным отрицательным возмущением (–50%) во время главной фазы магнитной бури, за которым последовало необычное продолжительное и интенсивное (превышающее +100%) положительное возмущение. Эти ионосферные возмущения, наряду с интенсификацией мелкомасштабных неоднородностей, напрямую повлияли на технологические системы: ошибки высокоточного позиционирования PPP для GPS увеличились до 2–3 метров на высоких широтах и в области наблюдения экваториального суперпузыря. Кроме того, в ходе события наблюдалось значительное Форбуш-понижение интенсивности космических лучей и 77-е наземное возрастание (GLE), связанное с солнечной вспышкой X5.1.

Результаты демонстрируют сложную связь процессов от Солнца до Земли и указывают на существенные риски для спутниковой навигации и связи.

ЭФФЕКТ ТЕРМИНАТОРА В ВАРИАЦИЯХ ФОНОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА

Крашенинников И.В., **Митин О.В.**

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

Электромагнитный шум в декаметровом диапазоне радиоволн является принципиальным ограничивающим фактором в работе радиотехнических систем, использующих ионосферное прохождение радиоволн. Соотношение сигнал/шум (SNR – Signal to Nose Ratio) определяет ключевые параметры радиосистем: скорость и надежность передачи информации. В практике прогнозирования и планирования работы ионосферных радиосистем используется глобальная модель фоновых электромагнитных шумов, разработанная в 60-70-х годах на основе мировых данных их регистрации, и включающая в себя модели базовых компонент шумовых излучений: атмосферного, галактического и антропогенного происхождений. Наиболее мощным источником EMN (Electromagnetic Noise) является атмосферная составляющая, генерируемая в своей главной части в тропической зоне, интенсивность которой наиболее подвержена временным вариациям в суточном ходе.

Регистрация уровня фонового электромагнитного шума на частоте 4996 кГц, в паузах работы станции точного времени РВМ (Москва), осуществлялась SDR-приемником HackRF (динамический диапазон ~ 110 дБ) с программным управлением приемом радиосигнала и последующей его обработкой. Приемная антенна была реализована в виде несимметричного полуволнового диполя, имеющего диаграмму направленности с учетом подстилающей поверхности в азимутальной плоскости близкую к круговой, что позволило считать условия приема шумового радиосигнала практически изотропными.

Измерения показали сильное различие в суточной динамике среднеквадратичного EMN по месяцам года – в зимних условиях характерно формирование резких всплесков интенсивности (рис.1) в переходное время, которое связывается с формированием эффективного канала переноса шумового излучения атмосферного происхождения по границе максимального поперечного градиента электронной плотности, соответствующей линии утреннего и вечернего терминаторов [1]. В летнее время данный эффект отсутствует ввиду значительного меньшего перепада критических частот в дневное и ночное время и, соответственно, более низкими (~ 3 раза) максимальными значениями поперечного градиента

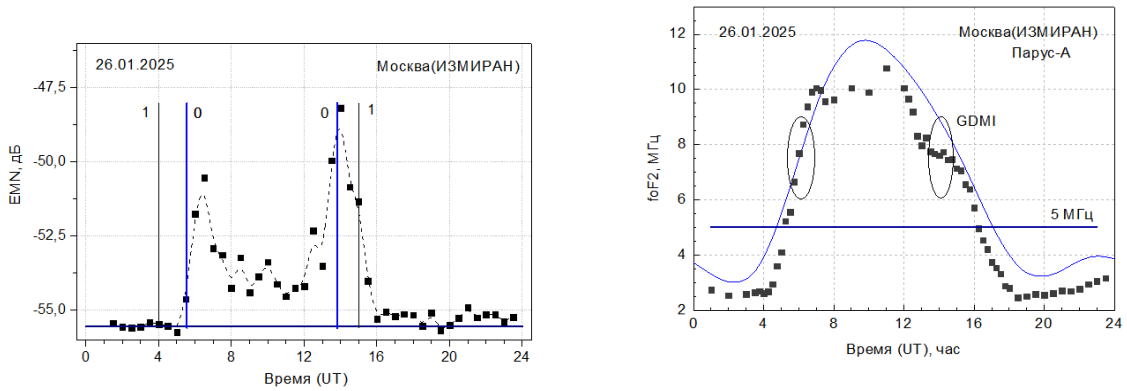


Рис. 1. Зависимость фонового ЭМ шума в зимний сезон (26.01.2025): эксперимент (левая панель) и состояние ионосферы – foF2 на ст. ИЗМИРАН (правая панель, модель GDMI – сплошная линия, квадратиками нанесены данные ионозонда “Парус-А”, и горизонтальная линия соответствует частоте 5 МГц). Вертикальными линиями отмечены времена прохождения утреннего и вечернего терминаторов (0 и 100 км высоты).

1. Крашенинников И.В., Попов А.В., Стаханова И.Г. // Геомагнетизм и аэрономия 2016. Т. **56**. №5. С. 662.

ОБРАТНОЕ ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ: ИОНОСФЕРНЫЕ СТАНЦИИ СЕТИ РОСГИДРОМЕТА – КА «ИОНОСФЕРА-М»

Романов И.В.[1], Котонаева Н.Г.[1], Носиков И.А.[2]

[1]*ФГБУ «ИПГ», г. Москва, Россия, romanov@ipg.geospace.ru*

[2]*КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, ianosikov@wdizmiran.ru*

Реализация метода обратного трансионосферного радиозондирования ионосферы (ОТИЗ) предполагает совместную работу наземного передатчика радиосигнала в КВ-диапазоне и приёмника на космическом аппарате (КА). В сравнении с методом прямого трансионосферного радиозондирования (ТИЗ) ОТИЗ имеет преимущество в энергетическом потенциале из-за большей мощности наземного передатчика, эффективности излучающей антенны и низкого уровня фоновых электромагнитных помех. Метод ОТИЗ позволяет измерять значение наименьшей частоты прохождения сигнала насквозь ионосферы на трассе между наземной передающей станцией (ионозонд «Парус-А») и КА «Ионосфера-М», которая может быть пересчитана в значение критической частоты слоя F2 в точке пересечения радиолучом максимума ионосферы (фиолетовые цвет на рис. 1 слева). Измерения могут проводится без излучения на борту КА, что важно при наличии ограничений к излучению бортовой аппаратуры. Измерение частот сигналов, прошедших сквозь слой F2 (след ОТИЗ на рис. 2 справа) на участке траектории пролёта КА методом ОТИЗ и совместное сопоставление результатов наземного и внешнего радиозондирования позволяет восстановить горизонтальный градиент концентрации электронов.

В 2025 г. проведены пилотные эксперименты по реализации ОТИЗ с использованием ионозондов «Парус-А» двух среднеширотных ионосферных станций: ст. "Электроугли" и ст. "Калининград". Приём сигналов осуществлялся на КА «Ионосфера-М» №1, №2 и №3 бортовыми ионозондами «Лаэрт». Эксперименты проводились сеансам в период с середины октября по декабрь. Расписание сеансов КА №1 и №2 предполагали зондирование по два сеанса в сутки: утром и вечером местного времени, КА №3 – ночью и днём. Одновременная работа двух передатчиков наземных станций позволила в том числе измерить параметры ионосферы в условиях высокого угла возвышения спутника над одной станцией, одновременно с низким углом возвышения КА над горизонтом для второй станции.

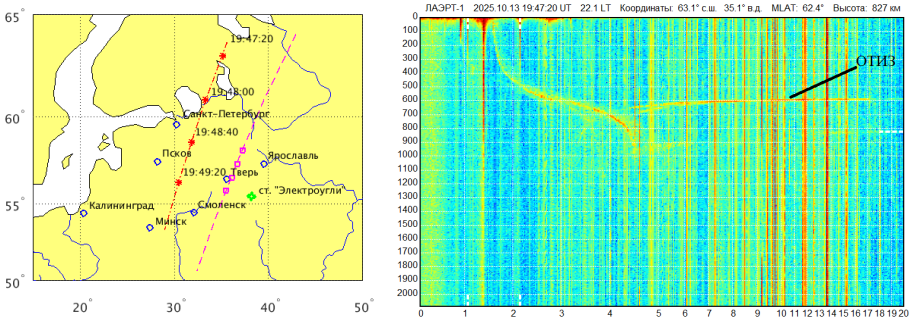


Рисунок 1 – слева карта с демонстрацией следов орбиты КА «Ионосфера-М», справа – ионограмма ионозонда ЛАЭРТ-1 со следом ОТЗ.

Полученные в экспериментах результаты подтвердили принципиальную возможность организации работы по трансионосферному радиозондированию с помощью космического и наземного сегментов системы ионосферных наблюдений. Данные ещё требуют детальной обработки, валидации и анализа с параллельной разработкой методов и инструментов ассимиляции данных в систему мониторинга ионосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМОГО ТРАНСИОНОСФЕРНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ «ЛАЭРТ» (КА «ИОНОСФЕРА-М») – «ПАРУС-А» (ОБСЕРВАТОРИЯ КФ ИЗМИРАН)

Носиков И. А.[1], Романов И. В.[2], Пулинец С. А.[3], Могилевский М. М.[3], Котонаева Н. Г.[2] Клименко М. В.[1], Тимченко А. В.[1], Янковский И. С.[1]

[1]*КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, ianosikov@wdizmiran.ru*
[2]*ИПГ, г. Москва, Россия, romanov@ipg.geospace.ru, kotonaeva@ipg.geospace.ru*
[3]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pulse@cosmos.ru, mikhail.mogilevsky@romance.iki.rssi.ru*

В рамках проекта «Ионозонд» получены первые результаты прямого трансионосферного радиозондирования (ТИЗ). Эксперимент по синхронизации бортового ионозонда «ЛАЭРТ» космических аппаратов «Ионосфера-М» с наземными ионозондами «Парус-А» сети станций ФГБУ «ИПГ» был осуществлен в октябре, ноябре и декабре 2025 г. В ходе проведения эксперимента были получены ионограммы (ВЗ) с характерными следами ТИЗ одновременно на ионосферной станции «Электроугли» (Московская обл.) и магнитно-ионосферной обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН (Калининградская обл.). В работе представлены особенности полученных данных в зависимости от геометрии эксперимента и гелиогеофизических условий. Обсуждаются перспективы использования данных ТИЗ для решения различных задач.

ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ ПО КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЕ СЛОЯ F2 КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ «ИОНОСФЕРА-М» С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АНОМАЛИИ ИЗМИРАН

Карпачев А.Т.[1], Котонаева Н.Г[2]., Цыбуля К.Г[2].

1 ФГБУН «ИЗМИРАН», г. Троицк, Россия, karp@izmiran.ru

2 ФГБУ «ИПГ», г. Москва, Россия

Проведено тестирование данных внешнего радиозондирования на 4-х космических аппаратах (КА) «ИОНОСФЕРА-М» космической системы «Ионозонд». Для этого использованы данные с ионозондов ЛАЭРТ за период 25-28 декабря 2025 г. Данные относятся к спокойным (Кр=1-3+) условиям высокой солнечной активности (F10.7=170-185) в секторах местного времени 15 LT и 21 LT. Данные сравниваются с моделью экваториальной аномалии (ЭА), построенной в ИЗМИРАН на основе данных спутника Интеркосмос-19 (ИК-19) [1], работавшего в условиях высокой солнечной активности (F10.7=200). Значения критической частоты ионосферы foF2 были получены при автоматической обработке ионограмм внешнего зондирования по алгоритму, разработанному в ФГБУ «ИПГ» и в случаях существенного отклонения от ожидаемых результатов скорректированы посредством ручной обработки. Алгоритм позволяет обработать около 85% ионограмм в секторе местного времени 15 LT и меньше в секторе 21 LT, где F-рассеяние на ионограммах значительно сильнее. В целом автоматическая обработка данных позволяет вполне адекватно описать структуру экваториальной аномалии в терминах foF2. При этом значения foF2, полученные по данным 4-х спутников при F10.7 = 170-185 оказались намного ниже, чем по данным ИК-19 при F10.7 = 200. В среднем, степень развития ЭА (отношение foF2 в гребнях к foF2 в провале над экватором) оказалась гораздо выше по новым данным, чем по данным ИК-19. В 21 LT напротив новые данные регистрируют менее развитые гребни ЭА при совпадении в экваториальном провале. При более развитой ЭА гребни аномалии дальше отходят от экватора, но разница между двумя экспериментами небольшая, максимумы гребней аномалии расположены на широте 15-18° по обе стороны от геомагнитного экватора.

КА «Ионосфера-М» проводят ограниченное число зондирований в районе Бразильской геомагнитной аномалии в связи с особенностями функционирования ионозондов ЛАЭРТ в условиях повышенная радиационной обстановки на высотах КА. Поэтому покрытие области Бразильской аномалии неполное, но этот недостаток будет устранен на большем временном интервале.

Радиозондирование на 4-х КА одновременно со скважностью 10 с требует использования именно автоматической обработки, особенно при работе в оперативном режиме. Однако особенности работы алгоритма в настоящий момент не позволяют выделить в полном объеме следы отражений в условиях частичного поглощения сигнала или при наличии следов боковых отражений. Поэтому для подтверждения согласованности данных КА «Ионосфера-М» и ИК-19 необходимо проводить проверку обработки интерактивным образом.

1. Карпачев А.Т., Пустовалова Л.В. Модель экваториальной аномалии в foF2 по данным ИСЗ Интеркосмос-19 для высокой солнечной активности // Геомагнетизм и Аэрономия, 2022. Т. 62, С. 227. 10.31857/S0016794022020109.

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ОНЧ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В ИНТЕРЕСАХ ПРОГРАММЫ «ИОНОЗОНД»

Сивоконь В.П.,

ИКИР ДВО РАН, п. Паратунка, Россия, vsivokon@mail.ru

В рамках программы «Ионозонд» на спутниках «Ионосфера-М» установлен комплекс аппаратуры позволяющий регистрировать ОНЧ излучения естественного и искусственного происхождения в диапазоне 10 Гц – 23 кГц. Анализ наблюдаемых на борту сигналов наземных передатчиков позволяет исследовать взаимодействие ОНЧ-волн с магнитосферной плазмой. В качестве источников таких сигналов в ранее проводившихся исследованиях, например, уширения спектра, использовались передатчики с монохроматическим излучением. В силу ряда причин, количество таких передатчиков значительно уменьшилось, что делает актуальным поиск альтернативных источников излучений для подобных исследований.

Является актуальным изучение возможности регулируемого сброса энергичных частиц из радиационных поясов Земли путем закачки в магнитосферу ОНЧ излучения наземных передатчиков, В этом случае для оценки степени просачивания этого излучения через ионосферу необходим контроль за его наземными параметрами. Поставленные задачи можно решить, используя технологию мониторинга, разработанную в ИКИР ДВО РАН.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 124012300245.

ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ПРИЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ

Колпак В.И.[1,2], Могилевский М.М.[2], Евдокимова М.А.[2], Чугунин Д.В.[2], Титова Е.Е.[2], Чернышов А.А.[2], Андреевский С.Е.[1], Шлюгаев Ю.В.[3], Жильцов М.П.[4], Чернева Н.В.[5], Малкин Е.И.[5]

1. ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

2. ИКИ РАН, Москва, Россия

3. НИРФИ ННГУ, Н.Новгород, Россия

4. ООО «НПП «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА», Орел, Россия

5. ИКИР ДВО РАН, Паратунка, Россия

Приводятся результаты анализа спектральных характеристик излучения двух наземных низкочастотных передатчиков: JJI/NDT, расположенного в Японии, работающего на частоте 22,2 кГц и NPM, расположенного на Гавайях, работающего на частоте 21,4 кГц. Измерения волновой формы сигнала проводились на борту спутников «Ионосфер-М» и в пункте наблюдений «р.Карымшина» (ИКИР ДВО РАН, Паратунка).. Излучение, прошедшее ионосферу над передатчиком, представляет собой квазишумовой сигнал без явных признаков модуляции. В сопряженной области шумовой спектр излучения преобразуется в последовательность радиоимпульсов, частота заполнения которых изменяется в диапазоне +/- ~100 Гц от центральной частоты излучения. Период следования импульсов носит квазипериодический характер и постепенно изменяется от 1,5 до 0,2 секунд. Дисперсия импульсов в большинстве измерений положительная и варьируется в пределах 100 – 400 Гц/сек. В отдельных случаях наблюдается отрицательная дисперсия импульсов. Проводится сравнение измерений на спутниках «Ионосфера-М» и ДЕМЕТЕР. Обсуждается возможный физический механизм, приводящий к трансформации спектра сигналов.

Обработка и интерпретация бортовой информации выполнена К.В.И., М.М.М., Е.М.А., Ч.Д.В., Ч.А.А. при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059). Наземные измерения были проведены Ч.Н.В. и М.Е.И. при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059) и частично в рамках государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № 124012300245-2).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ПЕРЕДАТЧИКОМ ЗЕВС В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ, ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ ИОНОСФЕРА М

Савельева Н.В., Пилипенко В.А., Чугунин Д.В., Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Могилевский М.М., Чернышов А.А.

Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия, nasa2000@yandex.ru

Низкоорбитальный спутник Ионосфера-М №3 (высота орбиты ~820 км) при пролетах над Кольским полуостровом регистрировал излучение передатчика ЗЕВС. Электрические и магнитные датчики бортового низкочастотного волнового комплекса (НВК) зафиксировали узкополосное излучение на частоте 82 Гц в интервале расстояний между источником и приемником от ~60 до ~700 км. Максимальные измеренные амплитуды электрической и магнитной компонент сигнала оказались равны $|E| \approx 5-7$ мкВ/м и $|B| \approx 2-4$ пТл, соответственно. На земле магнитная компонента крайне низкочастотного (КНЧ) излучения ЗЕВС зарегистрированная на станции Ловозеро на расстоянии ~90 км от установки ЗЕВС, в среднем имела амплитуду на порядок больше, $|B| \sim 54.2$ пТл. Амплитуда излучения на спутнике испытывала гораздо более сильные флуктуации, чем давали наземные наблюдения. Измерения вдоль орбиты, проходящей над передатчиком ЗЕВС, позволили впервые определить темп спадания амплитуды излучения в ионосфере по мере удаления от источника. В диапазоне расстояний ρ~200-700 км спадание амплитуд электрической и магнитной компонент излучения можно аппроксимировать степенной зависимостью ρ^{-S} с показателем степени S~1.4±0.4. Результаты измерений согласуются с результатами моделирования пространственной структуры волнового поля в верхней ионосфере, возбуждаемого переменным горизонтальным током конечной длины. При анализе пространственно-временного распределения амплитуды излучения на частоте 82 Гц обнаружено, что точки максимума амплитуды и минимума горизонтального расстояния «источник-приемник» не совпадают. Анализ профилей электрический и магнитной составляющих показал, что наблюдаемый максимум амплитуды смещен в сторону более низких широт на ~47 км для $|E|$ и на ~41 км для $|B|$. Подобный эффект возникает из-за смещения фронта КНЧ волны магнитным полем, когда центр волнового пучка смещается к низким широтам. Смещение области максимальной амплитуды излучения по спутниковым данным оказалось примерно в два раза меньше, чем отклонение линий магнитного поля, рассчитанное по модели IGRF. Результаты наблюдений могут быть использованы для оценки эффективности активных экспериментов по возбуждению искусственных возмущений в околоземной среде и изучения возможного влияния КНЧ излучателей на околоземную среду.

ДИНАМИКА РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В НОЯБРЕ 2025 г. ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СПУТНИКАХ «ИОНОСФЕРА-М»

Свертилов С.И., Яшин И.В., Богомолов В.В., Богомолов А.В., Васильев Н.А., Еремеев В.Е., Июдин А.Ф., Марченко О.А., И.Н. Мягкова

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, sis@coronas.ru

В ноябре 2025 г. на Солнце в активной области AO14274 произошли очень мощные солнечные вспышки класса X по классификации GOES, которые привели к сильным геомагнитным возмущениям. В частности, вспышки 9, 10 и 11 ноября сопровождались корональными выбросами массы (КВМ), во вспышках 10 и 11 ноября также произошло ускорение частиц – образовались солнечные космические лучи (СКЛ), причем во вспышке 11 ноября были ускорены протоны до энергий более 500 МэВ. По-видимому, взаимодействие двух КВМ – от вспышек 9 и 10 ноября привело в ночь с 11 на 12 ноября к очень сильной магнитной буре (в максимуме геомагнитные индексы достигли значений: K_p = 9-, D_{st} = -238 нТ), а также дополнительному возрастанию потока протонов и электронов в околоземном космическом пространстве (ОКП). Достигший орбиты Земли КВМ, связанный с интенсивной вспышкой ноября, вызвал в ночь с 12 на 13 ноября менее интенсивную магнитную бурю (K_p = 7, D_{st} = -156 нТ), а также дополнительное возрастание потоков протонов и электронов СКЛ.

В работе представлены результаты наблюдений вариаций потоков заряженных частиц во время указанных выше событий по данным приборов СПЭР/1, установленных на космических аппаратах (КА) «Ионосфера-М». Спектрометры плазмы и энергичной радиации СПЭР/1 предназначены для измерения потоков и дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов в диапазоне энергий 0.05 - 20 кэВ, а также заряженных частиц средних и высоких энергий: электронов в энергетическом интервале ~0.15 – 10 МэВ и протонов в энергетическом интервале ~2.0 – 160.0 МэВ. Приводятся данные измерений потоков энергичных электронов и протонов в период с 9 по 14 ноября 2025 г., в том числе анализируется динамика заполнения полярных шапок частицами СКЛ. Кроме того, рассматриваются вариации пространственных распределений потоков суб-релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе во время геомагнитных возмущений 11 - 13 ноября, а также динамика потоков низкоэнергичных (0.05 – 1.0 кэВ) электронов и протонов на разных широтах в ОКП. Для указанного выше временного интервала проведено сопоставление данных по потокам заряженных частиц с показаниями приборов, обеспечивающих контроль магнито-волновой обстановки на спутниках «Ионосфера-М».

НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ, АСТРОФИЗИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРОВ СГ/1 НА СПУТНИКАХ «ИОНОСФЕРА-М»

Богомолов В.В., Свертилов С.И., Яшин И.В., Богомолов А.В., Васильев Н.А., Еремеев В.Е., Июдин А.Ф., Кучеренко И.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, bogovit@rambler.ru

Осуществлено развертывание группировки из четырех космических аппаратов (КА) «Ионосфера-М», предназначенных в том числе для мониторинга физических процессов в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, а также патрулирования вспышечной активности Солнца. На каждом из указанных КА установлены приборы СГ/1, представляющие собой сцинтилляционные гамма-спектрометры на основе кристаллов CsI(Tl) цилиндрической формы объемом ∅8·8 $см^3$. Приборы СГ/1 предназначены для мониторинга гамма излучения из атмосферы Земли, а также контроля вспышечной активности Солнца в жестком рентгеновском и гамма. Гамма-спектрометры СГ/1 обеспечивают измерение в околоземном пространстве потоков и дифференциальных энергетических спектров жесткого рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий 0.02 – 10.0 МэВ при энергетическом разрешении 7.2% на линии ^{137}Cs (0.662 МэВ), а также потоков заряженных частиц (главным образом электронов с энергиями более 0.3 МэВ) и нейтронов.

В работе представлены результаты наблюдений солнечных вспышек в жестком рентгеновском и гамма диапазонах, которые произошли в 2024, 2025 гг.. Приводятся примеры временных профилей всплесков солнечного излучения в разных энергетических интервалах, рассматривается методика восстановления энергетических спектров по показаниям в широких энергетических интервалах, а также по измерениям в спектральной моде. Особое внимание уделено событиям в начале ноября 2025 г., которые привели к сильным геомагнитным возмущениям.

В работе также приводятся примеры регистрации космических гамма-всплесков с помощью приборов СГ/1, а также анализируются возможности этой аппаратуры по детектированию гамма-вспышек из атмосферы Земли. В частности, рассматривается амплитудное распределение кратковременных (менее 1 мс) возрастаний скорости счета в каналах одного из приборов, полученное на основе наблюдений в течение нескольких месяцев, что позволяет оценить ожидаемое количество событий типа Terrestrial Gamma ray Flash (TGF).

ПРИЕМНАЯ БАЗА ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЮ ИОНОСФЕРЫ СИГНАЛАМИ ПРИБОРА МАЯК

Падохин А.М., Курбатов Г.А., Чернышов А.А., Андреевский С.Е., Саакян О.Т., Книжин С.И., Продан П.Е.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия
Полярный геофизический институт РАН, г. Мурманск, Россия
ИГУ, г. Иркутск, Россия

В 2024 и 2025 гг. на орбиту были выведены две пары спутников «Ионосфера-М» российского проекта «Ионозонд». Среди научного оборудования спутников находится прибор МАЯК — когерентный двухчастотный передатчик VHF/UHF диапазона. Таким образом впервые за многие годы появилась возможность проводить регулярные эксперименты по радиопросвечиванию ионосферы над территорией РФ с низких полярных орбит. Доклад посвящен особенностям проведения таких экспериментов с использованием имеющегося в научных организациях РФ приемного оборудования, включая специализированные приемники АДК-4М и ITS30(3)S, а также разработке прототипа нового цифрового приемника, на основе технологий программно определяемого радио (SDR) и популярных плат ВЧ прототипирования HackRF и USRP, включая алгоритмы обработки и анализа данных, применяемые для оценки полного электронного содержания TEC. Обсуждаются результаты сопоставления экспериментальных данных, полученных на специализированных приемниках и разработанном прототипе, в том числе в условиях интенсивных радиочастотных помех. В докладе анализируются результаты первых экспериментов с использованием прибора МАЯК, предложен оригинальный метод локальной коррекции ионосферной модели NeQuick2 по данным одноточечных наблюдений, обсуждаются перспективы восстановления работы российской трансконтинентальной РТ системы и развертывания новых приемных пунктов.

Работа выполнена с использованием, оборудования, полученного в рамках Программы развития МГУ.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА СУРА – ИОНОСФЕРА-М

Грач С.М., Чернышов А.А., Падохин А.М., Шиндин А.В., Когогин Д.А., Насыров И.А., Белецкий А.Б., Ткачев И.Д., Чугунин Д.В., Легостаева Ю.К., Емельянов В.В., Евдокимова М.А, Щенников А.В., Солин А.Е.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия; Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия; Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия; Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия; ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия; МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Представлены первые результаты эксперимента по исследованию взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой при пролете ИСЗ Ионосфера-М над стендом СУРА. В экспериментах 20.08 и 22.08.2025 ИСЗ на высоте 820 км пересекал центральную часть проекции диаграммы направленности (ДН) стенда на небосвод в северо-южном направлении практически вдоль геомагнитного меридиана. Во время пролётов ИСЗ воздействие осуществлялось волной накачки (ВН) обыкновенной поляризации, эффективная мощность передатчиков стенда превышала 200 МВт. Частота ВН f_0 составляла 20 августа f_0=5350 кГц, ДН была наклонена на 12º к югу от вертикали в плоскости геомагнитного меридиана; 22 августа – f_0=5828 кГц, ДН была направлена вертикально вверх. Время пролета спутника над ДН стенда шириной ≈ 12º (по уровню −3 дБ) составляло ≈ 25 с. ВН 20.08 включалась в 18:37 UT, за ≈ 4 мин., а 22.08 – в 18:18 UT за ≈ 28 мин. до входа ИСЗ в область засветки излучением стенда, т.е. за время, достаточное для развития искусственных ионосферных возмущений. В ходе эксперимента регистрировались ионограммы вертикального зондирования с помощью ионозонда CADI вблизи стенда, просвечивание ионосферы с помощью бортового маяка когерентными сигналами с частотами 150 МГц и 400 МГц, регистрация которых осуществлялась в 20 км к югу от стенда СУРА, регистрация искусственного радиоизлучения и искусственного оптического свечения ионосферы (ИОС) с длинами волн λ=630 нм, 557,7 нм (атомарный кислород, пороги возбуждения 1,96 и 4.17 эВ) и 391,4 нм (ион молекулярного азота, порог возбуждения ≈ 19 эВ) с помощью трёхканального фотометра вблизи стенда и 5 ПЗС камер в трех разнесенных на 120−270 км регистрационных пунктах, один из которых расположен вблизи стенда, а также регистрация магнитной и электрической компонент электромагнитного поля в низкочастотном диапазоне 1−23 кГц с помощью бортового прибора НВК, оснащённого магнитным и электрическими датчиками.

Экспресс анализ данных экспериментов показал следующее: 20 августа расположение областей генерации ИОС и пониженной (в результате воздействия ВН) электронной концентрации практически совпадали и находились вблизи «магнитного зенита», т. е. смещены к югу относительно центрального луча ДН; наблюдавшееся уменьшение яркости ИОС в линиях 557,7 и 391,4 нм во время пролёта ИСЗ связано, по всей видимости, с увеличением высоты ионосферы; 22 августа область пониженной электронной концентрации была несколько смещена к северу относительно центрального луча ДН (регистрация ИОС не велась из-за сильной облачности); во время пролетов над работающим стендом наблюдалось

некоторое усиление и уширение спектра низкочастотных электромагнитных шумов в диапазоне 10-20 кГц, регистрировавшихся на спутнике. Полученные результаты нуждаются в боле детальном анализе.

Работа выполнена с использованием УНУ «Стенд СУРА», оборудования УНУ «Оптические инструменты», оборудования, полученного в рамках Программы развития МГУ, а также при поддержке грантов РНФ 23-77–10029 и 25-72-20019.

СВИСТЯЩИЕ АТМОСФЕРИКИ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ТРАДИЦИОННУЮ ЗАДАЧУ

Евдокимова М.А.[1], Могилевский М.М.[1], Чугунин Д.В.[1], Шкляр Д.Р.[1], Жемчужников А.Д.[1], Александров Д.Л.[1], Просветов А.В.[1], Андреевский С.Е.[2], Шлюгаев Ю.В.[3], Жильцов М.П.[4]

[1]Институт космических исследований РАН, Москва, Россия, evdokimari@mail.ru
[2]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В.Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия
[3]Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия
[4]ООО «НПП «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА», Орел, Россия

На спутниках «Ионосфера-М» проводятся непрерывные измерения низкочастотных полей в диапазоне частот 10 Гц – 23 кГц с использованием приборов НВК-2, магнитного датчика МД и электрических датчиков ЭД. Мы использовали эти измерения для анализа свистящих атмосфериков (СА), пришедших на спутник различными путями: только через ионосферу (частично диспергированные – ЧД), через ионосферу и однократно прошедших по магнитосферной траектории из полушария, противоположного наблюдению, а также многократно прошедших через магнитосферу. Был проведен статистический анализ с использованием автоматического выделения СА из динамических спектрограмм излучений, зарегистрированных на спутниках. Результаты анализа представлены в виде пространственного распределения частоты регистрации СА, проецируемого на поверхность Земли: односкачковые СА наблюдается ближе к высоким широтам, ЧД СА — ближе к экватору. За пределами проекции плазмосферы, в высоких широтах, СА практически не наблюдаются.

Полученное пространственное распределение СА сравнивается с распределением молниевых разрядов на поверхности Земли, полученным при помощи наземной сети локаторов Blitzortung.org [1]. Из сравнения наземных и бортовых измерений изолированного СА было определено местоположение его источника. Из сравнения пространственного распределения частоты регистрации СА и молниевых разрядов выделены районы, где более высокая частота регистрации СА совпадает с большей плотностью молниевых разрядов. Однако в Северной Америке и Евразии наблюдается обратная зависимость плотности молниевых разрядов и частоты регистрации СА.

Обсуждаются возможные физические механизмы, приводящие к расхождению зависимости региональной плотности СА и частоты регистрации молниевых разрядов.

Работа Могилевского М.М. и Чугунина Д.В. была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059).

1. https://www.blitzortung.org/en/archive_data.php.

ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ И ДЕТЕКЦИЯ СВИСТОВ В ДАННЫХ ПРОЕКТА ИОНОЗОНД

Жемчужников А.Д., Александров Д.Л., Просветов А.В., Евдокимова М.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Андреев А.В., Назаров В.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия,

Разработан программный комплекс на базе искусственного интеллекта для автоматического анализа данных низкочастотного волнового комплекса (НВК-2), получаемых в рамках проекта «Ионозонд». Необходимость создания автоматизированной системы обусловлена значительным потоком информации со спутников «Ионосфера-М» (8-10 Гбайт/сутки для каждого спутника), что делает экспертный поиск событий трудоемким. Реализованный подход включает два этапа: выделение общих аномалий с помощью вариационного автокодировщика (VAE) и целенаправленную классификацию свистящих атмосфериков на основе размеченной выборки. Внедрение комплекса позволяет сжать анализируемый поток данных, предоставляя исследователям только релевантные фрагменты для дальнейшего изучения.

Метод детектирования аномалий на основе вариационного автоэнкодера (VAE) базировался на сжатии и последующей реконструкции входных данных. Аномалии выявлялись путем анализа остаточной ошибки между исходной спектрограммой и ее восстановленной копией. Изображение классифицировалось как аномальное, если количество пикселей с существенной ошибкой реконструкции превышало установленный порог (95-й перцентиль эмпирического распределения ошибок). Данный подход позволил успешно выделить классы типовых событий, таких как хоровые излучения, сигналы низкочастотных передатчиков и другие.

Детектирование свистящих атмосфериков проводилось на временном интервале длительностью 1 секунда (в отличие от 10-минутных интервалов в задаче с VAE), что обусловлено характерным временем данных сигналов. Анализ выполнялся для двух частотных диапазонов: 0–1 кГц и 0–10 кГц. В качестве архитектуры использовалась сеть EfficientNet, на вход которой, помимо спектрограмм, подавались параметры орбиты спутника.

Модель продемонстрировала высокую вероятность правильного определения свистящих атмосфериков: метрика F1-score составила 0.83 для диапазона 0–1 кГц и 0.70 для диапазона 0–10 кГц. Интерпретация результатов методом SHAP подтвердила, что модель фокусируется непосредственно на сигнатурах свистящих атмосфериков, игнорируя фоновый шум. В дальнейшем планируется расширение обучающей выборки, оптимизация архитектуры, а также применение разработанного классификатора к полному массиву данных четырех спутников для сбора характеристик аномалий.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКОВ ИОНОСФЕРА-М

Синевич А.А.[1,2], **Чернышов А.А.**[1], **Пулинец С.А.**[1], **Чугунин Д.В.**[1], **Могилевский М.М.**[1]

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

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

Поляризационный джет (Polarization Jet, PJ), в англоязычной литературе известный как субавроральный ионный дрейф (SubAuroral Ion Drift, SAID), формируется в субавроральной области ионосферы (геомагнитные широты 70°-50°) и представляет собой узкую по широте (1°-2° широты) полосу сильного ионного дрейфа на запад на высотах F-слоя вблизи границы проекции плазмопаузы. Скорость дрейфа ионов в такой полосе может достигать нескольких километров в секунду, а неоднородности плазменных параметров внутри могут иметь масштабы вплоть до десятков-сотен метров. Такие высокие скорости и такая структурированность плазмы влияют на прохождение радиосигнала и проявляются на ионограммах, полученных наземными ионозондами. Однако исследование параметров PJ/SAID наземными ионозондами затруднено, поскольку для этого необходимо, чтобы географическое расположение PJ/SAID совпало с направлением зондирования ионозонда, что бывает достаточно редко. Кроме того, зондирование с Земли ограничено высотой главного ионосферного максимума, что не позволяет исследовать PJ/SAID в верхней части F-слоя – на высоте измерений ионосферных спутников (450-800 км). Зондирование, осуществленное бортовым ионозондом с высоты орбиты космических аппаратов «Ионосфера-М» (800 км), позволяет получить ионограммы верхней части F-слоя ионосферы в полосе PJ/SAID над любой географической точкой (в том числе над океаном) и сравнить их с данными измерений других спутников, оборудованных дрейфметрами и зондами Ленгмюра. Кроме того, это дает возможность одновременного зондирования PJ/SAID наземным и бортовым ионозондом. В данной работе впервые использованы измерения ионозонда ЛАЭРТ на борту спутника «Ионосфера-М» для исследования структуры ПД. Кроме того, было проведено сравнение как с данными измерений других приборов на различных спутниках, так и с измерениями наземных ионозондов.

Работа поддержана грантом РНФ (№ 25-12-00059).

ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ГАПОНОВА-МИЛЛЕРА

Могилевский М.М.[1], Чугунин Д.В.[1], Чернышов А.А.[1], Гущин М.Е.[2], Андреевский С.Е.[3], Шлюгаев Ю.В.[4], Жильцов М.П.[5]

[1] ИКИ РАН, Москва, Россия,

[2] ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия,

[3] ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия,

[4] НИРФИ ННГУ, Нижний Новгород, Россия,

[5] ООО «НПП «Астрон Электроника», Орел, Россия.

Представлены результаты анализа данных волнового комплекса НВК на спутниках «Ионосфера-М» во время работы прибора ЛАЭРТ в режиме ионосферного локатора. В этом режиме в магнитной компоненте НВК наблюдаются парные импульсы: первый импульс большой отрицательной амплитуды – 0,5 – 1 нТл, второй импульс имеет положительную амплитуду, величина которой увеличивается в зависимости от частоты накачки. Время между импульсами в паре изменяется от 0,8 сек до нескольких мсек в зависимости от частоты накачки. Длительность первого импульса (~ 80 мксек) меньше длительности импульса накачки (100 мксек). Амплитуда второго импульса меньше амплитуды первого, а длительность второго импульса, как правило, больше чем у первого, и уменьшается при увеличении частоты накачки. Время повторения пар импульсов соответствует периоду импульсов накачки. Мы предполагаем, что наблюдаемые импульсы магнитных возмущений связаны с прохождением спутника через области электрических токов, возбуждаемых в магнитоактивной плазме под действием усредненной пондеромоторной силы в высокочастотном поле антенны прибора ЛАЭРТ - силы Гапонова-Миллера [1], в том числе – на границах каверны, возникающей в ионосферной плазме около спутника Размеры каверны, образующейся за счет вытеснения заряженных частиц под действием продольных (относительно направления магнитного поля) составляющих силы Гапонова-Миллера [2], определяются наиболее тяжелыми ионами. На высоте орбиты спутников «Ионосфера» такими ионами являются ионы кислорода. Оценки показывают, что за время накачки может образоваться каверна с размерами порядка нескольких метров. Проводится сравнение полученных результатов с результатами лабораторного эксперимента [3].

7. Гапонов А.В., Миллер М.А., ЖЭТФ, Т. 34, № 2, с. 242–243 (1958)
8. Литвак А.Г., в сб. «Вопросы теории плазмы», под ред. М.А. Леонтовича, вып.10, М.: Атомиздат, (1980)
9. Айдакина Н.А., Гущин М.Е., Зудин И.Ю. и др., Письма в ЖЭТФ, Т. 93, вып.9, с. 555–560 (2011)

ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНЫХ РАДИОИМПУЛЬСОВ С ПЛАЗМОЙ В АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ С НИЗКООРБИТАЛЬНЫМИ ИСЗ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ «КРОТ»

Айдакина Н.А.[1], Вершинин И.М.[1], Гущин М.Е.[1], Дмитриев В.Д.[1], Елясина И.А.[1], Зудин И.Ю.[1], Истомин А.А.[1], Кондрашов К.Ю.[1], Коробков С.В.[1], Кочедыков В.В.[1], Лоскутов К.Н.[1], Могилевский М.М.[2], Николенко А.С.[1], Плешков Д.С.[1], Пулинец С.А.[2], Стриковский А.В.[1]

1- *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mguschin@ipfran.ru*
2- *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Особенностями проводимых в настоящее время с использованием ИСЗ «Ионосфера-М» космических экспериментов являются, во-первых, сильная модификация ионосферной плазмы радиоимпульсами, возбуждаемыми передающими антеннами ионозонда, во-вторых – возможность синхронных наблюдений электромагнитных сигналов и потоков заряженных частиц вдоль орбиты как в естественных (фоновых) условиях, так и при включении различных радиоисточников. В свою очередь, лабораторные плазменные установки, крупнейшей из которых в России является стенд «Крот», позволяют исследовать нелинейные эффекты, развивающиеся в плазме, окружающей радиоимпульсные антенные устройства, а также взаимодействие с замагниченной плазмой потоков энергичных заряженных частиц. При этом только на крупномасштабных лабораторных установках удается реализовать режим «безграничной» плазмы, т.е. свести к минимуму или вовсе исключить влияние внешних границ плазмы или стенок вакуумной камеры на исследуемые процессы, что приближает условия лабораторного эксперимента к космическим. Обоснованный выбор безразмерных параметров моделирования обеспечивает подобие физической картины явлений в космосе и в лаборатории, что, в свою очередь, позволяет в лабораторных условиях воспроизводить отдельные явления не только качественно, но и количественно. С учетом таких достоинств лабораторного эксперимента как, например, возможность многократного воспроизведения исследуемых явлений со сканированием по внешним параметрам, этот подход позволяет не только устанавливать качественную картину и ключевые механизмы взаимодействия волн и частиц с плазмой, но и, в перспективе, валидировать расчетные модели ионосферы на результатах лабораторных экспериментов.

В докладе приведены примеры выбора параметров лабораторного эксперимента, соответствующего условиям на орбите ИСЗ «Ионосфера-М». Рассмотрено несколько классов проблем, которые, на наш взгляд, важны для космического эксперимента:

- генерация потоков ускоренных электронов, возмущений концентрации плазмы и токов в ближней зоне передающих антенн ИСЗ: особый интерес представляют явления быстрого неамбиполярного переноса частиц замагниченной плазмы, сопровождаемые возбуждением вихревых электрических токов [1,2];
- механизмы формирования частотного спектра электромагнитного шума при взаимодействии мощных радиоимпульсов и надтепловых электронных потоков со слабостолкновительной замагниченной плазмой [3].

Результаты, полученные на стенде «Крот», сопоставляются с данными, полученными в экспериментах с различными ИСЗ, включая «Ионосфера-М».

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24–12–00459.

1. Aidakina N.A., Korobkov S.V., Gushchin M.E. et al. // Phys. Plasmas 2024. V. **31.** P. 122110.
2. Aidakina N., Gushchin M., Zudin I. et al. // Phys. Plasmas 2025. V. **32.** P. 072101.
3. Зудин И.Ю., Гущин М.Е., Стриковский А.В. и др. // Письма в ЖЭТФ 2024. Т. **129**. С. 27.

ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 12-13 НОЯБРЯ 2025 ГОДА В РАЗЛИЧНЫХ ДОЛГОТНЫХ СЕКТОРАХ ВОСТОЧНОГО ПОЛУШАРИЯ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО И СПУТНИКОВОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Котонаева Н.Г., Цыбуля К.Г.

ФГБУ «ИПГ», г. Москва, Россия, kongt@yandex.ru

Очень сильная (почти уровне G5) магнитная буря, произошедшая 12 - 13 ноября 2025 года, вызвала заметный ионосферный шторм в различных регионах ионосферы Земли. Его зафиксировали как наземные ионозонды, так и ионозонды на космических аппаратах (КА) «Ионосфера-М», которые показали согласие между своими измерениями величины критической частоты ионосферы.

Динамика изменений среднеширотной и экваториальной ионосферы прослеживается на широтных разрезах критической частоты ионосферы *foF2*, полученных КА «Ионосфера –М», в частности в докладе рассматриваются данные КА «Ионосфера – М» №3, который пересекает экватор в одно и тоже локальное время 15 LT, характеризующееся развитыми гребнями экваториальной аномалии (ЭА). Рассмотрены широтные разрезы в трех долготных секторах, соответствующих расположению наземных ионозондов Москва, Новосибирск, Петропавловск. В долготном диапазоне восточной Европы, где начало геомагнитного шторма пришлось на вторую половину ночи, ионосферное отрицательное возмущение началось синхронно с геомагнитным и составило 40-50%, в дальневосточном регионе начало шторма пришлось на день, когда в ионосфере еще развиты слои D и E, здесь была зафиксирована положительная стадия с повышением концентрации в F слое и смещением гребней ЭА к полюсам на 10°, и только через 20 часов к концу следующей ночи по местному времени ионосфера отреагировала падением критической частоты на всех широтах на 20-25% и возвращением расположения гребней ЭА на климатические широты. Среднеширотная ионосфера на долготе Новосибирска отреагировала на магнитный шторм в целом как ионосфера восточно-европейской части: снижением критической частоты *foF2* на всех широтах в первые сутки, слиянием гребней ЭА на экваторе. На второй день ионосферный шторм в средних широтах привел к заметному повышению *foF2,* но был менее выражен в экваториальной зоне.

В первые часы ионосферной бури наземные ионозонды фиксировали ионограммы со сложными следами отражений, свидетельствующими об изменении свойств ионосферных слоев, проявлении существенной горизонтальной анизотропии.

….Интересно изменение плазменной частоты *fps* на высоте 830 км, соответствующей высоте КА на выбранных разрезах. В спокойной обстановке распределение концентрации электронов на этих высотах над геомагнитным экватором имеет один максимум, вызванный фонтан-эффектом. В первый день бури 12 ноября 2025 г. эффект ЭА – разделения на два гребня – достиг и высоты КА. В момент через 4 часа после начала ионосферной бури характер распределения плазмы на высоте 830 км резко отличается от климатического. Изменение магнитного поля было настолько сильным, что резко усилило фонтан-эффект, гребни ЭА проявились и на высоте 830 км. Плазменные частоты на этой высоте на всем диапазоне широт вне ЭА выросли в 2 раза. 13 ноября 2025 г. и позже этот эффект уже не наблюдался и все эффекты магнитного шторма наблюдались на высотах максимума слоя F2.

В работе приведены широтные графики плазменных частот на высоте КА, графики распределений критической частоты вдоль орбиты КА в рассматриваемых долготах, графики временного распределения критической частоты над наземными ионосферными пунктами. Приведены ионограммы с наземных наблюдательных платформ и бортовых ионозондов.

1. Pulinets S., Kotonaeva N., Depuev V., Tsybulya K. // DOI: https://doi.org/10.20944/preprints202512.2625.v1

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ РЕЗОНАНСНОГО ЗОНДА НА СПУТНИКЕ «САМСАТ-ИОНОСФЕРА»

Галка А.Г., Костров А.В., Малышев М.С., Зиновьева Е.И.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, galasnn@ipfran.ru

Впервые разработан и изготовлен уникальный резонансный зонд для локальных измерений концентрации ионосферной плазмы и ее пространственно-временных флуктуаций в диапазоне 10^3-10^6 ед. в куб. см. Зонд представляет собой резонансную систему из двух жестких параллельных проводников длинной 30 см, расположенных на расстоянии 5 см друг от друга. Собственная частота колебательного контура без плазмы составляет 100 МГц, добротность 200. Присутствие плазмы с диэлектрической проницаемостью меньше единицы около проводников приводит к увеличению резонансной частоты. Малые частотные сдвиги резонансной кривой, пропорциональные концентрации плазмы, определяются методом фазового сдвига, суть которого заключается в измерении набега фазы сигнала, прошедшего через резонатор с плазмой [1]. Плазменный и опорный сигналы смешиваются на фазовом детекторе, и выходное напряжение с датчика пропорционально концентрации плазмы. Частота сигнала 100 МГц превышает все характерные частоты в ионосферной плазме, что упрощает аналитическое описание измерительной системы. Датчик прошел предварительные испытания и был прокалиброван в плазменной камере «Ионосфера» (Институт прикладной физики РАН) в условиях максимально близких к ионосферным.

Датчик установлен на наноспутнике «СамСат-Ионосфера», изготовленном в Самарском университете им. С.П. Королева. Спутник выведен на орбиту во время пуска ракеты носителя «Союз-2.1б» с космодрома «Восточный» 5 ноября 2024 года и к настоящему времени работает в штатном режиме. Размеры спутника 10x10x30 см, скорость 8 км/с, орбита с высотой 500 км достигает полярных широт 80 градусов. Основное преимущество датчика заключается в корректном воспроизведении флуктуации плотности плазмы в частотном диапазоне 0-500 Гц, и, в принципе, зонд может работать на порядок быстрее, выдавая данные с микросекундным временным разрешением.

Больше года датчик безотказно функционирует и передает по запросу с Земли данные о состоянии ионосферы. Повитковые осциллограммы хорошо описываются современными моделями ионосферы, демонстрируя типичные особенности структуры околоземной плазмы, в том числе гребни экваториальной аномалии и флуктуации плотности в полярных широтах. В докладе приводится техническое описание первого демонстрационного образца датчика и результаты измерения концентрации ионосферной плазмы по ходу движения спутника.

Авторы доклада благодарны И.В. Белоконову и его профессиональной команде из Самарского университета за возможность впервые установить датчик параметров плазмы на спутнике и провести экспериментальные исследования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 24-12-00459).

1. Галка А.Г., Костров А.В., Малышев М.С. // ЖТФ 2023. Т. **93**. С. 81.

НОВАЯ ВЕРСИЯ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫСЫПАНИЙ APM_GEO

О.В. Мингалев, М.Н. Мельник, В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина

Полярный геофизический институт, г. Апатиты (*Мурманская обл.*)

В ПГИ разработана и в течение многих лет совершенствуется эмпирическая модель авроральных высыпаний электронов и протонов для северного полушария APM_GEO (модель Воробьева–Ягодкиной), которая много лет широко используется в российском научном сообществе. Входными параметрами модели являются дата, время по UT и значения геомагнитных индексов Dst и AL. В модели в исправленных геомагнитных координатах и в географических координатах рассчитываются границы зон высыпаний, а также рассчитываются распределения средней энергии и плотности потока энергии высыпающихся электронов и протонов на сетке, регулярной по долготе и с фиксированным числом точек по широте в каждой из присутствующих зон высыпаний. Границами статистической обоснованности модели являются условия Dst ≥ −200 нТл и AL ≥ −1500 нТл. В более ранних версиях модели с ростом модулей значений индексов Dst и AL вне указанных диапазонов появляются нефизические нарушения выпуклости границ зон высыпаний, а также зоны высыпаний слишком сильно приближаются к экватору.

Проведена доработка и проверка на данных измерений новой версии модели APM_GEO с целью обеспечить физически правильную форму зон высыпаний при любых значениях индексов и их соответствие с известными данными для экстремально сильных магнитных бурь. Доработанная версия модели сохраняет физически правильную выпуклую форму границ для любых больших значений модулей индексов Dst и AL вне указанных диапазонов статистической обоснованности, а также соответствует известным данным для очень сильных магнитных бурь и суббурь.

Создан комплекс программ модели APM_GEO на языке FORTRAN, который максимально оптимизирован и использует параллельные вычисления на ядрах центрального процессора с помощью системы Open MP.

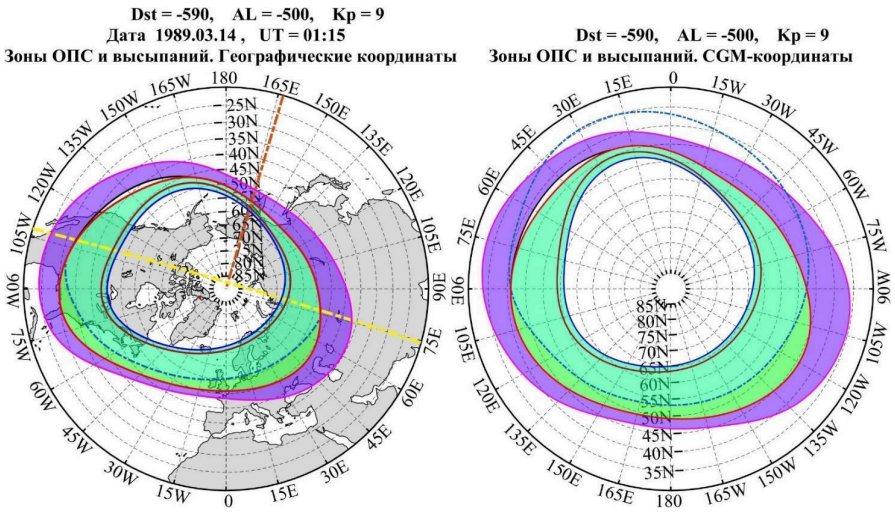


Рис. 1. Положение зон высыпаний во время магнитной бури 13−14.03.1989 г. в момент минимума Dst = −590 нТл при умеренно возмущенном AL = −500 нТл и максимальном Kp = 9.

ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Кривохлябина М.Я.[1], **Синевич А.А.**[1,2], **Чернышов А.А.**[1], **Чугунин Д.В.**[1], **Могилевский М.М.**[1]

[1] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия revanstears37@gmail.com*
[2] *ИЗМИРАН, г.Троицк, г. Москва, Россия*

Экстремальная геомагнитная буря 10-12 мая 2024 года является наиболее интенсивной в двадцать первом столетии. Столь сильные геомагнитные возмущения значительно повлияли на параметры ионосферной плазмы Земли. В данной работе используются результаты измерений спутников Swarm для исследования авроральной и субавроральной областей ионосферы, определение экваториальных границ авроральных областей происходит в результате анализа плотности электронов, а также их температуры при пролете спутников над соответствующими широтами. Далее исследуется корреляция границ авроральных областей с геомагнитными индексами. Благодаря работе с данными двух спутников из системы Swarm (Swarm A и Swarm B) рассматриваются пролеты, соответствующие 17–20 MLT и 21-24 MLT. Также проведено сравнение полученных результатов с измерениями во время Октябрьской бури 10-12 октября 2024 года, для которой анализ проводился аналогичным образом.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №25-12-00059.

ПРИЗНАКИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА В ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ

Шагимуратов И. И., Ефишов И. И., Тепеницына Н. Ю., Якимова Г. А.

Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, shagimuratov@mail.ru

Поляризационный джет (ПД) проявляется как узкая по широте область быстрого ионного дрейфа, направленного в западном направлении на высотах F области. Ширина полосы ПД по широте составляет 1°–2°, а его скорость — более 1 км/с. Для идентификации ПД широко используются измерения спутников DMSP. В наземных наблюдениях проявление ПД выявлено на основе анализа ионограмм вертикального зондирования. Большая статистика проявления ПД получена на якутском меридиане [1]. В работе представлен анализ признаков ПД в вариациях полного электронного содержания (TEC). Плотная разветвленная сеть GPS/ГЛОНАСС станций обеспечивает получение TEC на регулярной основе в глобальном масштабе.

Анализ проявления ПД представлен для геомагнитного возмущения 20 апреля 2020 г. Вероятность формирования ПД максимальна в равноденствия, что предупредило рассмотрение данного события. Минимальное значение Dst приходилось на 13 UT и составляло -68 nT. Геомагнитный индекс SME превышал 1200 nT на интервале 08-14 UT. Поляризационный джет обычно формируется в возмущенных условиях, в то же время может проявляться и при относительно спокойных условиях. Установлена высокая корреляция параметров ПД с Dst, AE и Bz IMF. По данным DMSP для данных геомагнитных условий ПД был зарегистрирован на долготах Канады. Особенность рассматриваемого события обусловлена тем, что ПД регистрировался по местному магнитному времени 04-06 MLT. Известно, что ПД наблюдается в основном в вечерне-предполуночном секторе местного времени (18:00–24:00 MLT) на инвариантных широтах 55°–65° [2].

Для анализа проявления ПД использовались измерения TEC базы Мадригал. По этим данным формировались карты TEC. Разрешение карт составляет 1 × 1° по широте и долготе, временное разрешение 5 мин. В периоде авроральной активности на интервале 08-11 UT по данным спутников DMSP было зарегистрировано несколько случаев проявления ПД. Во время существования ПД на картах TEC наблюдался узкий по широте, вытянутый по долготе глубокий провал. Провал регистрировался на субавроральных широтах экваториальнее области высыпаний. Провал располагался на географических широтах 45°-52°N около 62°-57° магнитной широты (MLAT) в утренние часы (~05 MLT). Зарегистрировано хорошее пространственно-временное соответствие проявления ПД и провала в TEC вариациях. Анализ свидетельствует, что узкий по широте, глубокий провал, расположенный на субавроральных широтах, является признаком проявления ПД в TEC измерениях.

1. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Кобякова С.Е. и др. // Косм. исследов. 2023. Т. **61**. С. 277.
2. He F., Zhang, X.-X., Chen B. // J. Geophys. Res. 2014. V. **11**. P. 5076.

РАЗЛИЧИЕ В ПАРАМЕТРАХ СДВ РАДИОСИГНАЛОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СРЕДНЕШИРОТНОМ И ПОЛЯРНОМ РЕГИОНАХ

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

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

В работе исследовались особенности распространении СДВ (3-30 кГц) сигналов в среднеширотном и полярном регионах. Для анализа использовались сигналы СДВ передатчика системы точного времени Beta РЙХ-77, расположенного в Архангельске (64° 22 с.ш. 41° 35 в.д.). Передатчик работает ежедневно с 9 до 10 часов UT на частотах 20.5, 23, 25, 25.1 и 25.5 кГц в различных режимах. Среди этих режимов есть режим работы на несущей частоте (без модуляции), который и использовался в данном исследовании.

Непрерывная регистрация радиосигналов с 21.07.2024 по 25.08.2024 г велась пространственно – распределенной системой СДВ приемников, расположенных в ГФО «Михнево» (54.957 с.ш., 37.758 в.д., длина трассы 984 км), обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН - «Ульяновка» (54.603 с.ш., 20.211 в.д., длина трассы 1613 км) и на научно исследовательском судне (НИС) «профессор Молчанов», который работал в Северном Ледовитом океане на широтах 75° - 80°. При таком расположении передатчика и приемников трассы Архангельск- ГФО «Михнево» и Архангельск-«Ульяновка» можно считать среднеширотными, а трассу Архангельск – НИС «Профессор Молчанов» - высокоширотной. В качестве датчика в ГФО «Михнево и на НИС использовались магнитометры MFS-07. В обсерватории «Ульяновка» регистрация велась на рамочные антенны «Плутон», разработанных в ИДГ РАН.

Сравнительный анализ амплитудно-фазовых шумов на этих трассах показал, что при одинаковом соотношении амплитуды сигнал/шум на полярной и среднеширотных трассах, величина фазовых шумов на полярной трассе превышает таковую для среднеширотных трасс. Это может быть связано с большей нестабильностью полярной ионосферы.

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

МНОГОЛЕТНИЕ ВАРИАЦИИ И ТРЕНДЫ АТМОСФЕРНОЙ ЭМИССИИ [OI] 557.7 НМ: К 100-ЛЕТИЮ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Михалев А.В.

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

Наблюдения эмиссии атомарного кислорода [OI] 557.7 нм имеют долгую и интересную историю, включая обнаружение и идентификация этой эмиссии в конце XIX – начале XX веков. А первая серия многолетних абсолютных измерений интенсивности эмиссии [OI] 557.7 нм ($I_{557.7}$) была выполнена Рэлеем в 1923-1935 гг. [1]. До настоящего времени наиболее длинный ряд многолетних вариаций $I_{557.7}$ (1923-1992 гг) был опубликован в ряде работ в конце 90-х годов прошлого столетия (см., например, цитируемую литературу в [2]), в которых был получен статистически значимый положительный тренд $I_{557.7}$ ~ 0.6 % в год.

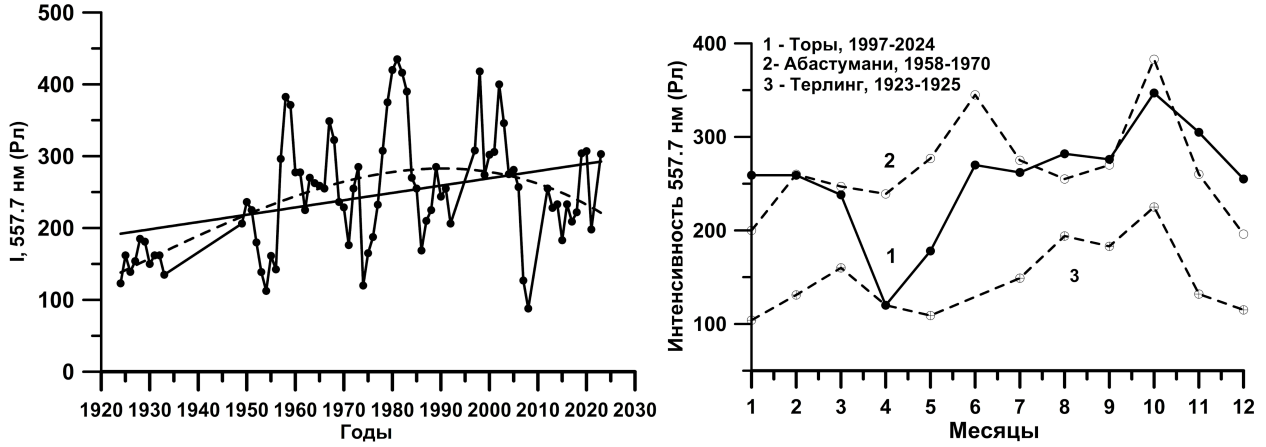


Рис.1 Многолетние вариации среднегодовых значений $I_{557.7}$ (слева) и сезонные хода в различные периоды наблюдений в 20-21 веках на 3-х среднеширотных станциях (справа).

В настоящей работе представлены многолетние вариации среднегодовых значений $I_{557.7}$ за период 1923-2024 гг, являющиеся комбинацией опубликованных данных наблюдений среднеширотных станций северного полушария на Евроазиатском континенте за 1923 - 1935 гг. [1], 1948 - 1992 гг. [3] и данных наблюдений, полученных в Геофизической обсерватории «Торы» ИСЗФ СО РАН за период 1999 - 2024 гг. Линейная аппроксимация дает положительный тренд временного ряда за 1923 - 2024 гг. для $I_{557.7}$ ~ 0.39 % в год, что несколько меньше значения, полученного ранее ~ 0.6 % в год для временного интервала 1923 - 1992 гг. [2]. Рассматриваются возможные причины и явления (солнечная активность, глобальная циркуляция атмосферы и др.), определяющие межгодовые и многолетние вариации, а также тренды $I_{557.7}$ и особенности сезонных ходов $I_{557.7}$ в различных широтно-долготных зонах в разные периоды XX - XXI веков. Высказывается предположение, что атмосферный эмиссионный слой 557.7 нм в начале XX века мог располагаться на большей высоте по сравнению с современным состоянием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. В работе использовались данные оптического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [http://ckp-angara.iszf.irk.ru].

1. Lord Rayleigh, Spencer Jones H. The light of the night sky: analysis of the intensity variations at three stations // Proc. Roy. Soc. 1935. V. 151. N A872. P. 22 – 55.

2. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

3. Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Лысенко Е.В. и др. Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1996. Т. 32. № 3. С. 329–339.

РЕАКЦИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ГЛАВНЫЙ ТОЛЧОК ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С МАГНИТУДОЙ 8,8, ПРОИЗОШЕДШЕГО 29 ИЮЛЯ 2025 ГОДА В РАЙОНЕ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА, ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Когогин Д. А., Максимов Д. С., Насыров И. А., Загретдинов Р. В.

КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

В работе методом радиопросвечивания ионосферы сигналами ГНСС зарегистрирован ионосферный отклик на главный толчок землетрясения, произошедшего 29 июля 2025 года в районе Камчатского полуострова с магнитудой 8,8. По данным пространственно-разнесенной сети ГНСС станций были получены ряды вариаций ПЭС для лучей «спутник-приемник» в исследуемом регионе, построены карты вариаций ПЭС и диаграмма «дальность время».

Анализ динамики распределения интенсивности вариаций ПЭС выявил концентрические возмущения, исходящие из очага землетрясения. Возмущения распространялись преимущественно в юго-западном направлении, формируя V-образную структуру. Следует отметить, что данное направление является наиболее плотно покрытым ГНСС-приёмниками.

Оценка скорости переноса возмущений по медианному уровню вариаций ПЭС между тремя выделенными секторами составила от ~900 м/с до ~1350 м/с. Анализ диаграммы «дальность-время» позволил выделить две фазы распространения возмущения: начальную быструю фазу со скоростью 800-1300 м/с в первые ~20 минут и последующую медленную фазу со скоростью 180-330 м/с, наблюдаемую спустя ~40 минут после толчка. Наблюдаемые наклонные лучи на диаграмме сходятся к моменту и месту главного толчка землетрясения.

Принимая во внимание крайне низкое количество ГНСС станций в данном регионе, важным является поднятие вопроса об увеличении количества ГНСС станций на Камчатском полуострове. В настоящий момент на коммерческом рынке имеется большое количество доступных малым научным группам ГНСС-модулей и отладочных плат на их основе, поддерживающих приём всех действующих сигналов ГНСС с дискретностью 1 сек и обеспечивающих приемлемое качество данных для решения задач исследования ионосферных возмущений методом радиопросвечивания ионосферы [1].

Также необходимо наращивать количество постоянно действующих ГНСС станций в рассматриваемом регионе, оснащенных профессиональным геодезическим оборудованием, для улучшения качества проводимых геодинамических ГНСС наблюдений. Отдельным аспектом является также возможность публикации данных в открытом доступе для использования в научных исследованиях.

Авторы благодарны Центрам SONEL, SOPAC / UNAVCO и Федеральному центру навигационных данных за открытые ГНСС данные, использованные в работе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029, https://rscf.ru/project/23-77-10029/.

1. Kogogin D.A., Sokolov A.V., Nasyrov I.A., // Journal of Communications Technology and Electronics. 2023. Vol.68, Is.6. P.682-691. DOI: 10.1134/S1064226923060074

НАБЛЮДЕНИЯ ОНЧ СИГНАЛОВ ПРИ МОДУЛИРОВАННОМ ВЧ НАГРЕВЕ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СТЕНДА «СУРА»

Гущин М.Е.[1,2], Демехов А.Г.[1], Котик Д.С.[2], Першин А.В.[2], Рябов А.В.[1,2], Шиндин А.В.[2]

1 - ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

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

Приводятся результаты наземных наблюдений электромагнитных сигналов очень низкочастотного диапазона (ОНЧ, ~1 — 10 кГц), генерируемых при модулированном нагреве ионосферы мощным ВЧ излучением стенда «Сура». Измерительная кампания проводилась с 24 по 28 ноября 2025 года во время небольшой геомагнитной бури класса G1 (Kp индекс – 4.67), сопровождавшейся значительной суббуревой активностью. Нагрев ионосферы осуществлялся в дневное время с помощью волн накачки необыкновенной поляризации (X моды) с амплитудной манипуляцией на частоте 2381 Гц, излучаемых вертикально вверх (центральная секция антенны стенда «Сура») и с отклонением 4^{o} на север и на юг (соответственно для южной и северной секций антенны стенда «Сура»). Сигналы ОНЧ диапазона принимались в п. Пустынь на расстоянии 163 км к юго-западу от нагревного стенда.

ОНЧ сигналы на частоте амплитудной модуляции волны накачки были зарегистрированы в сеансах с 25 по 27 ноября 2025 года. Их амплитуда составила от 4 до 8 фТл при усреднении за 10 минутный интервал модулированного нагрева.

На основании результатов проведенных измерений и аналитических оценок амплитуды модулированного сигнала и их сопоставления с известными результатами численных расчетов оценивается плотность ионосферного тока в зоне формирования источника ОНЧ сигналов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 24–12–00459.

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА АВРОРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОВСПЛЕСКОВ

Щелканов К.Д.[1,2], **Николаева В.Д.**[1], **Климов П.А.**[1,2]

[1]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, shchelkanov.kd18@physics.msu.ru*
[2]*Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия.*

В рамках проекта PAIPS (Pulsating Aurora Imaging Photometer System) — системы УФ-фотометров с высоким временным разрешением на Кольском полуострове — был обнаружен новый класс авроральных явлений — оптические микровсплески (OMB) [1]. OMB представляют собой серии вспышек продолжительностью от 10 секунд до 3 часов с выраженными отдельными пиками порядка 100 мс. OMB наблюдаются в вечернем секторе MLT. За три сезона наблюдений (с 2021 по 2024 г.) зарегистрировано 93 группы таких событий; каталог, кривые свечения и условия наблюдений доступны на сайте проекта: https://uhecr.sinp.msu.ru/paips.html. Механизм образования OMB остается неясным.

Для исследования пространственного распределения OMB планируется расширение меридиональной сети PAIPS, что требует автоматизации обработки больших массивов данных. С этой целью разрабатываются нейросетевые методы распознавания OMB в данных PAIPS, которые позволят упростить поиск OMB и повысить эффективность отбора событий как в архивных данных, так и во вновь поступающих с расширяемой сети наблюдений.

На данный момент реализован бинарный классификатор на гибридной архитектуре, состоящей из сверточного (CNN) и LSTM-блоков. Точность классификации на тестовой выборке составляет 94%. В качестве проверки работы на реальных данных был выбран набор данных с 15.11.2024 по 23.11.2024. Классификатор верно распознал все серии, обнаруженные ранее при визуальном анализе с простым пороговым триггером и также обнаружена одна дополнительная серия OMB, что говорит об эффективности разработанного алгоритма.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-62-00010.

1. Klimov P. A., Nikolaeva V. D., Saraev R. E., Shchelkanov K. D., Belov A. A., Kozelov B. V., Murashov A. S., Roldugin A. V., Sharakin S. A. // 2024. Advances in Space Research. **V. 74(8)**. P. 3556—3568.

ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВРЕМЯ АВРОРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОВСПЛЕСКОВ

Николаева В.Д.[1], Климов П.А.[1,2], Артемьев А.В.[3], Демехов А.Г.[4], Федоренко Ю.В.[4], Козелов Б.В.[4], Сигаева К.Ф.[1,2], Щелканов К.Д.[1,2], Ролдугин А.В.[4]

[1]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, nikolaeva.vera@gmail.com*

[2]*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

[3]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[4]*ПГИ, г. Апатиты, Россия*

В ходе исследования тонкой пространственно-временной структуры полярных сияний в проекте PAIPS [1] были обнаружены авроральные оптические микровсплески (OMB). OMB представляют собой кратковременные вспышки оптического излучения с характерной длительностью порядка 100 мс. Вспышки возникают группами общей длительностью от 10 секунд до 3 часов. За 3 сезона наблюдений с 2021 по 2024 было обнаружено 102 серии OMB. База данных представлена на сайте проекта: https://uhecr.sinp.msu.ru/uv-microbursts.html. За редким исключением, OMB происходят в вечернем секторе MLT, во время фазы восстановления геомагнитных бурь или суббурь. Эти события связаны с кратковременными импульсными высыпаниями энергичных электронов, которые, вероятно, обусловлены взаимодействием электронов с пакетами ОНЧ волн в магнитосфере. Для определения связи OMB с волновыми процессами, для всех серий были проанализированы данные ОНЧ приемников на станциях Ловозеро и Соданкюля и для трети событий зафиксирована ОНЧ-активность.

Отдельно рассмотрено событие, состоящее из нескольких серий микровсплесков на протяжении 3х дней во время спокойных геомагнитных условий (Kp<1) в январе 2024 г. Для этих серий обнаружено соответствие времени появления и длительности волновых пакетов (на частотах от 2 до 4 кГц) и OMB. Однако число волновых пакетов превышает количество серий OMB, что можно объяснить узким полем зрения фотометра PAIPS. Ранее было показано, что яркие OMB можно обнаружить и в камерах всего неба, в виде слабого и флуктуирующего повышения интенсивности свечения в части поля зрения на время регистрации OMB. При дополнительном анализе кривых свечения для камер всего неба, действительно были обнаружены дополнительные серии OMB в других областях неба, также совпадающие по длительности с пакетами ОНЧ волн. Эти наблюдения указывают на связь OMB с ОНЧ активностью и позволяют получить дополнительную информацию о механизме формирования OMB.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-62-00010 (https://rscf.ru/project/22-62-00010/).

1. Klimov, P.A., Sharakin, S.A., Belov, A.A., et al. // 2022. Atmosphere. **V. *13*(10)**. P. 1572.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОЗОНДА ПАРУС-А

Буряк Н. В.[1,2], **Носиков И. А.**[2]

БФУ им. И. Канта, г. Калининград, Россия, bnikolay2005@gmail.com
КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, ianosikov@wdizmiran.ru

В работе выполнено моделирование высотно-временных характеристик ионозонда вертикального зондирования (ВЗ). Расчеты выполнялись на основе численной модели распространения коротких радиоволн в неоднородной ионосфере с учетом влияния геомагнитного поля [1]. Валидация результатов расчетов осуществлялась на основе данных ВЗ ионозонда «Парус-А», функционирующего в обсерватории Калининградского филиала ИЗМИРАН. При построении профиля ионосферы использовалась аналитическая зависимость [2], при этом суточный ход критических частот главного ионосферного максимума рассчитывался по модели ГДМИ [3]. Сравнение данных наблюдений и результатов моделирования за период 16–21 июня 2025 г. показало качественное согласие суточного хода рабочих частот, а также выявило отдельные периоды расхождений, связанных со спорадическим слоем Es. Дальнейшее развитие работы предполагает создание системы ассимиляции ионосферных данных, объединяющей поток информации от ионозонда в реальном времени с программными комплексами моделирования ионосферы и условий распространения радиоволн.

Авторы выражают благодарность В. Н. Шубину за возможность провести численный эксперимент с использованием модели ГДМИ. Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 25-77-00033, https://rscf.ru/project/25-77-00033/.

1. Nosikov I. A. et al. // *Radio Sci. 2025. V. 60.* №. 3. *P*. e2024RS008092.
2. Nosikov I. A. et al. // *IEEE Trans. Antennas Propag*. 2019. Т. 68. №. 1. С. 455-467.
3. Шубин В. Н., Деминов М. Г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59. №. 4. С. 461-473.

АНОМАЛЬНЫЕ СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ NmF2 В РАЙОНЕ МОРЯ УЭДДЕЛЛА, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИОНОЗОНДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА АРГЕНТИНСКИХ ОСТРОВАХ В ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Павлов А.В., Павлова Н.М.

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

Исследованы суточные вариаций статистических характеристик относительной межсуточной изменчивости электронной концентрации *NmF*2 максимума слоя *F*2 ионосферы для каждого месяца М года в геомагнито-спокойных условиях при низкой солнечной активности по данным часовых измерений критической частоты слоя *F*2 ионосферы за периоды 1957–1959 гг. и 1962–1995 гг. по данным среднеширотного ионозонда на Аргентинских островах. В работе вычислялись математическое ожидание $NmF2_E$(UT,M), арифметически среднее $NmF2_A$(UT,M), стандартное отклонение σ_E(UT,M) и коэффициент вариаций CV_E(UT,M) величины *NmF*2(UT,M) от $NmF2_E$(UT,M), соответственно, где UT – мировое время. Используя закон больших чисел впервые показано, что непрерывная аппроксимация случайной величины *NmF*2 дает более точные результаты, чем дискретная аппроксимация *NmF*2. Вычисленный коэффициент вариации изменяется от 14% до 118%, в то время как арифметически средний за сутки коэффициент CV_E достигает максимального значения 44% в августе и минимальной величины 25% в январе, феврале и октябре. Впервые статистический анализ подтверждает ранее описанные характеристики аномалии *NmF*2 в районе моря Уэдделла в суточных вариациях $NmF2_E$ с учетом межсуточной изменчивости *NmF*2: величина $NmF2_E$ увеличивается при переходе от дневных к ночным условиям с максимумом $NmF2_E$ в ночное время в ноябре, декабре, январе и феврале. Выявлены новые аномалии в суточных вариациях $NmF2_E$: дополнительные локальные максимумы $NmF2_E$ формируются в марте и октябре в ночных условиях, причем ночной локальный максимум в октябре соответствует максимальному значению $NmF2_E$.

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ ВБЛИЗИ МЕРИДИАНА 30° Е НА МАГНИТНЫЕ БУРИ В ОКТЯБРЕ 2024

Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

НИИФ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, oamaltseva@sfedu.ru

Вблизи максимума 25 цикла имели место самые мощные в этом столетии магнитные бури в мае и октябре 2024, которые вызвали большой интерес и поток публикаций. Интересно отметить, что в последних работах авторы часто сравнивали результаты исследований этих бурь, причем использовали особые подходы, например, в статье [1] интерпретация относилась к поведению LSTID, в статье [2] к интерпретации были привлечены особенности поведения плазмосферы. Авторы данного доклада в работе прошлого года исследовали асимметрию отклика ионосферы двух полушарий на майскую бурю на примере широтных распределений TEC и его отклонений δTEC вдоль меридиана 30° Е и 4-х выбранных моментов.

В данной работе такое исследование для сравнения проведено для магнитных бурь октября 2024. Основное внимание уделено второй буре (10-12 октября), для которой приведены распределения TEC и δTEC и их интерпретация для 4-х моментов: 1) 15:16UT 10 октября – SSC, скачок Vsw, 2) 01:46UT 11 октября – минимум Dst=-335 нТ, 3) 19:38UT 11 октября – промежуточная точка фазы восстановления [1], 4) 16:00UT 12 октября – конец фазы восстановления (в отличие от 00:26UT в [1] из-за долготной зависимости). В первый период наблюдались явное расширение экваториальной аномалии по направлению к полюсам и связанная с этим асимметрия отклика ионосферы в двух полушариях с максимумом δTEC~120%, гораздо меньшим, чем в мае 2024. Во втором периоде наблюдалось быстрое уменьшение TEC на всех широтах с минимумом ~-80%, которое может свидетельствовать о роли плазмосферы, отмеченной в [2]. В третьем периоде δTEC изменяется от -60% до -20% в обоих полушариях. В четвертый период все отклонения лежали в пределах вариаций день ото дня, т.е. ситуация близка к восстановлению. Для предварительной оценки роли различных индексов IMF, Bz, Np, Vsw, Kp, Dst, ap, F10.7 были рассчитаны их коэффициенты корреляции с TEC и δTEC для полного месяца и для периода, включающего обе бури (6-14 октября). Наибольшие значения относились к F10.7 и Dst. Коэффициенты для F10.7 в северном полушарии (80° - 20° N) составили ~0.7, в экваториальной зоне и в южном полушарии они малы или близки к нулю. Коэффициенты для Dst почти симметричны относительно экватора с максимальным значением 0.6 в северном полушарии и 0.8 в южном и могут влиять в определенной степени на широтную зависимость TEC и δTEC.

Такое же исследование проведено и для первой бури 7-8 октября для 3-х моментов: 1) 00UT-04UT 7 октября, когда наблюдалось положительное возмущение и максимум δTEC~120%, 2) 06UT-08UT 8 октября - минимум Dst=-136 нТ, 3) 12UT-14UT 8 октября (фаза восстановления).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание ГЗ110/23-10-ИФ).

1. Paul, K.S. et al. Remote Sens. 2025, 17, 2329. https://doi.org/10.3390/rs17132329.
2. Pierrard, V. et al. Atmosphere 2025, 16, 299. https://doi.org/10.3390/atmos16030299.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ ПО ЛУЧЕВОМУ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ВЧ СИГНАЛОВ В ИОНОСФЕРЕ

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, lundin.bv@gmail.com

Модифицированная [1] форма классического дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в холодной плазме используется для высоких частот значительно превышающих фоновую ионную плазменную, когда ионы задают лишь фоновую концентрацию электронов и вносят дополнительный вклад в частоту электронных столкновений с иными тяжелыми конгломератами плазменного фона.

Использование введенных модификаций уже позволило в условиях холодной приземной плазмы умеренной плотности эффективно проанализировать особенности дисперсии и поляризации волн электронного свистового мода во всем диапазоне прозрачности для частот существенно меньших электронной плазменной.Для низких частот диапазонов прозрачности смежных волновых мод типа электронных и ионных свистов найден метод вычисления величин относительной зарядовой плотности для двух типов «легких ионов» плазменного фона с максимальными удельными зарядами (включая отрицательные) по частотам ионной отсечки [2]. Эти две величины адекватно определяются (без бортовых масс-спектрометров), если гирочастоты этих «легких ионов» существенно превышают гирочастоты остальных. Выявлена также возможность сближения дисперсионных кривых смежных ионных и электронных свистов на частотах близких к частотам отсечки [3]. Эффект может проявиться на частотах определяемых по относительным зарядовым плотностям пары «легких ионов» и локального отрицательного фона «тяжелых ионов». В более экзотичных условиях был обнаружен новый эффект, а именно: сужение частотных интервалов прозрачности (вплоть до малой окрестности ионной плазменной) для плоских волн в зонах существенных локальных загрязнений фоновой плазмы при адгезии электронов фона молекулами газов и пылевыми конгломератами с повышенным сродством к электронам. Отмечено [4], что для корректного моделирования процессов в почти чисто ионной плазме, к примеру, на базе заряженных фуллеренов требуется обеспечить долю остаточных электронов примерно в 27 раз меньшую чем на базе ионов водорода.

Для более высоких частот необходим учет вклада токов смещения; но как и прежде знание проекций волновых векторов на направления лучей вполне позволяет отслеживать эволюцию спектральной плотности потока энергии вдоль лучевых траекторий. При этом изменения интенсивности компонентов поля в волновом пакете «условно рассредоточенном в трубке близких сопутствующих лучей» обычно упрощенно оценивают по изменениям площади ее сечения при сохранении полного потока в «трубке». Кроме того, подчеркнем: всюду, где вклад ионов в дисперсию высокочастотных волн не существенен, параметр (зависит от частоты) выделенный авторами в модифицированной форме дисперсионного уравнения тождественно равен единице, причем он не меняется даже при учете частоты электронных столкновений по совокупности со всеми массивными частицами неподвижного плазменного фона. Эти параметры удобно использовать для текущей оценки работы вычислительных программ и контроля за эволюцией важных физических параметров вдоль лучей при численных расчетах.

1. Lundin B.V., Krafft C. // J. Plasma Physics 2002. V. **67**. № 2-3. P. 149.
2. Lundin B.V., Krafft C. // Phys. Plasmas 2009. V. **16.** P. 052104.
3. Лундин Б., Краффт К. // Физика плазмы 2009. Т. **35**. N 6. С. 551.
4. Lundin B.V., Krafft C. // Phys. Plasmas 2011. V. **18.** P. 102114.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПОГЛОЩЕНИЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ТЕТА-ПИНЧА В ИК ЛИНИИ HE I (23S) 1083 НМ

Руменских М.С.[1,2], А.Г. Березуцкий[1], В.Г. Посух[1], С.С. Шарипов[1], М.П. Голубовский[1], А.А. Чибранов[1], А.Е. Иванов[1], М.В. Логинов[1], Е.Д. Савинцева[1], И.Ф. Шайхисламов[1]

[1] ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, marina_rumenskikh@mail.ru

[2] Институт Земного Магнетизма, Ионосферы И Распространения Радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

Комплекс физико-химических процессов, протекающих в верхних слоях планетных атмосфер, определяет глобальные эволюционные тренды. Для Земли это в первую очередь изменение климата, которое оказывают воздействие на многие аспекты человеческой жизни. Получение исчерпывающих данных по формированию, развитию и изменчивости атмосферы нашей планеты, несмотря на доступность измерений - задача невыполнимая. Однако за пределами Солнечной системы существует огромное количество экзопланет, находящихся на разных этапах эволюции. Они нередко обладают атмосферами, причем многие из атмосфер включают сложные химические соединения. То есть, имеется возможность анализировать эволюцию и особенности взаимодействия с излучением звезды атмосфер планет, подобных земной и получать информацию, недоступную иными способами.

На данный момент подтверждено существование 7347 экзопланет, причем разных типов. Сейчас внимание исследователей смещается к атмосферам экзопланет, определению их состава и параметров. Единственный информативный подход для этой задачи - транзитная спектроскопия, основанная на поглощении излучения звезды при транзите планеты. Получение количественной информации об атмосфере основано на определении параметров среды по её спектру поглощения. Для этого измеренные транзитные спектры сравниваются с результатами расчетов численными моделями. Однако численных моделей недостаточно, поскольку необходимо иметь проверенные данные о множестве физико-химических кинетических процессов в сложной газоплазменной среде, а также точные значения скоростей протекания химических реакций. Поэтому существует необходимость моделирования определенных аспектов планетных атмосфер в лабораторных условиях.

На стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН проведено лабораторное моделирование поглощения в гелиевой плазме тета-пинча. Параметры экспериментов соответствуют верхним слоям атмосфер экзопланет с первичной гелийсодержащей атмосферой – таких, по которым в данный момент получено наибольшее количество наблюдательных данных. Для наблюдения поглощений была задействована оптическая схема многопроходной ячейки Херриота, ранее не применявшейся в экспериментах по моделированию космической плазмы. Эта схема позволила увеличить длину оптического пути на два порядка, что согласно предварительным оценкам позволит измерить поглощение на уровне ~1%.

В докладе будут освещены особенности постановки лабораторного эксперимента, нацеленного на измерение скоростей протекания физико-химических реакций, и первые результаты наблюдений поглощений в гелиевой плазме тета-пинча в условиях разлета плазмы в магнитное поля, водородный и гелиевый газ и вакуум.

Работа выполнена при поддержке направления 10 НЦФМ.

РАЗЛЕТ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ФОНОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ И ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ: ЭКСПЕРИМЕНТ НА СТЕНДЕ НПМ-01 И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Воеводин С.В., Блинова О.М., Горохов В.В., Жмайло В.А. Долотов А.С., Коблова О.Н., Лимонов А.В., Перминов А.В., Поколева М.Ю., Тренькин А.А., Янбиков Н.Р.

ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" г. Саров, Россия, voevodin@ntc.vniief.ru

Представлены результаты эксперимента на стенде НПМ-01 по изучению разлета лазерной плазмы в соленоидальном магнитном поле $B_0 = 0{,}1$ Тл и фоновой замагниченной гелиевой плазме $n_0 \sim 10^{12}$ см$^{-3}$. Регистрировались динамика свечения лазерной плазмы (ЛП) с помощью скоростной (длительность экспозиция 3 нс) фотосъемки и возмущение магнитного поля на расстоянии 8, 58 и 108 см от мишени трехкомпонентным индукционным датчиком. Лазерная плазма создавалась при облучении алюминиевой цилиндрической мишени направленным вдоль B_0 излучением неодимового лазера 1,06 мкм с гауссовым временным профилем импульса, длительностью 4 нс на полувысоте. Диаметр пятна и величина энергии излучения на мишени 1 мм и 0,7 Дж, соответственно.

Светящаяся область ЛП сферически расширяется до радиуса 0,5 см в течение $t = 50$ нс, затем из нее вдоль магнитного поля прорастает струя в направлении, противоположном лазерному излучению. Через $t = 250$ нс после облучения формируется новая светящаяся область в форме двух крыльев, параллельных центральной струе (рис.1).

В результате взаимодействия ЛП с фоновой плазмой генерируются альвеновские волны, а также другие возмущения магнитного поля, связанные с движущейся плотной лазерной плазмой. Волны распространяются от мишени и, как наблюдается, становятся резонансами (~120 кГц) столба фоновой плазмы длиной 5 м и шириной 15 см . Характерная амплитуда поперечной компоненты возмущения поля на расстоянии ~ 1 м от мишени находится в диапазоне 100 – 300 мкТл, продольной 5 – 10 мкТл.

Результаты экспериментов использованы для калибровки численной методики ЭГАК - НМГД [1]. Выполнены двумерные и трехмерные расчеты взаимодействия ЛП с фоновыми магнитным полем и плазмой. Сравнения расчета и эксперимента показало удовлетворительное согласие двумерных расчетов (с диффузией) и эксперимента по параметрам поперечной компоненты магнитного поля. Получено качественное согласие расчетов с опытом по эволюции и размерам светящейся области.

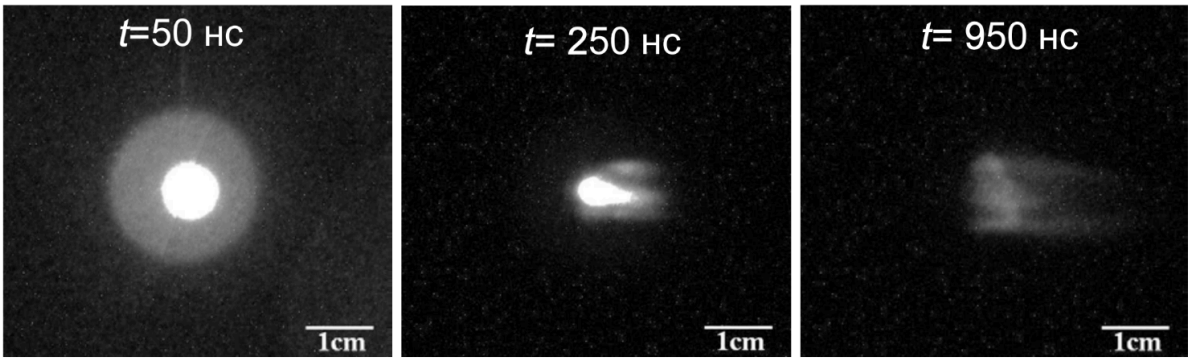


Рис.1

1. Янилкин Ю.В., Шанин А.А., Ковалев Н.П. и др. Комплекс программ ЭГАК для расчетов двумерных течений многокомпонентной среды. ВАНТ, серия ММфП, 1993 г., Вып.4, стр 69-75.

ИОНОСФЕРНЫЕ ЗАДАЧИ, НЕ ИМЕЮЩИЕ, НО ТРЕБУЮЩИЕ «СВОЕЙ ФИЗИКИ»

Э.Г. Мирмович

ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье», г. Химки, Россия, mirmovich1940@mail.ru

Термину «ионосфера», который ввёл в научную жизнь Роберт Уотсон-Уатт, создатель радиолокации, в этом году исполнилось 100 лет, а нерешённых задач, «белых пятен» всё ещё много. Так, автор считает, что большинство полученных им результатов ещё в 70-е и 80-е годы в области ионосферы остались не объяснёнными, либо вовсе незамеченными. Примеры.

1. Во время среднеширотных «термосферно-ионосферных возмущений» (ТИВ), введенных автором как альтернатива термину «ионосферно-магнитное», или точнее «магнитно-ионосферное» [1, 2], нейтральный «материал» поступает по E-F-«долине», т.е.высотам ~ 140 км из нижних широт, а не из высоких в рамках циркуляции.

2. Открытый автором эффект опережения начала магнитной бури отдельным классом положительных ТИВ в послеполуденные часы с началом иногда почти одновременно с солнечной вспышкой [1, 3–5] популярен сегодня в отечественной и зарубежной печати, но адекватного объяснения пока не получил. К его объяснению автор хотел бы привлечь воздействие рентгеновской и нейтронной компонентой не только на область D, но и на молекулярный состав термосферы, повышая концентрацию её атомной составляющей;

3. Необходимость корректировки критериев, выработанных и введенных учёными и специалистами Гидрометеослужбы России ещё в 1993 году как в ионосферно-магнитной, так и в радиационной составляющей [6]. Так, нет влияния магнитных бурь на объекты энергетики, здоровье людей, работу любых космических аппаратов (КА) и учёта загрязнения ближнего космоса «спутниковым» и другим мусором, угрожающим космическим исследованиям посредством КА. Нужен также пересмотр состава солнечных космических лучей и количества нейтронов в них, что важно для безопасности полётов на длинных авиатрассах и космонавтов, изменения взглядов на роль нейтронов в энергетике Солнца;

4. Эффект квазипериодической вариации суточного хода foF2 в дневное (освещённое) время с периодами ~ 3 часа в зимний и ~ 5 часов в равноденственные периоды, и почти отсутствие его в летнее время. Наибольшая амплитуда этих ТИВ отмечена над ДВ регионом и, в особенности, над Японией (например, Wakkanai и др.). Наблюдается в спокойное время и исчезает при усилении магнитной активности. К источнику такого рода ТИВ автор относит волны разрежения от обтекания крупных горных систем (Тибет, Кордильеры и др.) [1, 7].

1. Мирмович, Э.Г. Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений / Автореф. дисс… канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 1981. 23 с.

2. Мирмович, Э.Г. «Три источника – три составные части» генерации термосферно-ионосферных возмущений (статья) / «Physics of auroral phenomena». 44th Annual Seminar, 15–19 марта 2021 г. Апатиты. ПГИ РАН. С. 137-141.

3. Mirmovich, E.G. Ionospheric Behavior during August 2-11, 1972… over Khabarovsk. Report UAG, №.28, WDCenter A, Boulder, Colorado, USA, 1973, part II. PP. 557–561.

4. Данилов, А.Д. / Мирмович Э.Г., Морозова Л.Д. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагн. и аэроном. Т.25, №5. 1985. С. 768–772.

5. Мирмович, Э.Г. Термосферно-ионосферные возмущения, опережающие магнитные как краткосрочные предвестники прогноза магнитных бурь / «Physics of auroral phenomena». 45th Annual Seminar, 14–18 марта 2022 г. Апатиты. ПГИ РАН. С. 61.

6. Мирмович, Э.Г. Потенциальные источники чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического характера / Там же. С. 74.

7. Мирмович Э.Г. Квазипериодическая структура дневного хода foF2. Экспресс-информация ВНИИГМИ-МЦД, метеорология. Обнинск, 1976, вып. 3(47). С. 14–18.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БОРТОВОГО ПЕРЕДАТЧИКА НАУЧНОЙ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Полякова Т.В.[1,2], **Косов А.С.**[1]

[1] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[2] *МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, tpolyakova@bmstu.ru*

Задача включает в себя проработку теоретических основ и практических расчетов методом конечных элементов (МКЭ) для моделей бортового оборудования КА. Механическая конструкция прибора (БУСНИ ТГК) для реализации быстрого канала передачи научной информации бортового ионозонда на наземные приемные станции должна удовлетворять ряду требований, в том числе, выдерживать синусоидальные вибрации и ударные нагрузки во время запуска. КЭМ должна позволять рассчитывать положение центра масс составных частей прибора, резонансные частоты колебаний, значения ускорений в различных точках прибора, возникших от внешних воздействий (удары, вибрация) на прибор.

Методология Крейга-Бэмптона широко используется в аэрокосмической промышленности для преобразования характеристик больших конечно-элементных моделей в набор относительно небольших матриц, содержащих информацию о массе, жесткости и форме колебаний, которые задают основные низкочастотные характеристики конструкции. Она широко рассмотрена в ряде российских и зарубежных статей [1, 2].

Рассмотрена задача подготовки геометрической модели для анализа динамики с использованием метода статической и динамической конденсации космического прибора в составе многокомпонентной механической системы, используется МКЭ и метод Крейга-Бэмптона для редукции матриц МКЭ-модели тела. Определены инерционно-массовые характеристики компонентов оборудования внутри блока и построены связи с системами креплений для каждого компонента соответственно. Для модели SEND, являющейся нижней фиксирующей частью платформ прибора, был выполнен модальный анализ. (1) Была проведена подготовка геометрии платформы SEND с гибридной совместной сеткой, построенной вытяжкой внутри блоков. Половина модели (до применения симметрии) содержит 323 компонент (из них 297 блоков сетки), построенных вручную (количество узлов в модели: 330195, элементов: 290964). (2) На полученной модели платформы SEND с использованием MPC элементов был выполнен расчет по модальному анализу (количество узлов в модели: 584341, элементов: 484316). Основной результат работы – развитие методов проектирования КЭМ бортовой аппаратуры при испытаниях ее на внешние воздействующие факторы. Базовые основы методики в перспективе могут быть использованы для космических проектов.

1. Юдаков А.А. Принципы построения общих уравнений динамики упругих тел на основе модели Крейга–Бэмптона и их практически значимых приближений // Вестник Удмуртского университета. Серия 1: Математика. Механика. Компьютерные науки. 2012. Вып. 3. С. 126–140.
2. Полякова Т.В., Косов А.С. Разработка геометрической модели космического прибора в составе многокомпонентной механической системы. // Труды XXIII Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов «Научные исследования и разработки в области авиационных, космических и транспортных систем» (АКТ-2022) – Воронеж, ООО Фирма «Элист», 2022. С.115-121.

ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, gubenko@fireras.su

Спорадические *E*-слои представляют собой тонкие слои повышенной ионизации на высотах от 90 до 130 км в нижней ионосфере Земли. Распространение внутренней гравитационной волны (ВГВ) модулирует структуру изначально горизонтального спорадического *E*-слоя, что приводит к наклону указанного слоя относительно плоскости локального горизонта. На основе того факта, что ВГВ обусловливает угол наклона спорадического *E*-слоя, разворачивая плоскость ионизации слоя параллельно ее фазовому фронту, нами был разработан метод определения характеристик внутренних атмосферных волн на ионосферных высотах [1, 2]. Данный метод позволяет изучать взаимосвязи между внутренними атмосферными волнами и спорадическими *E*-слоями в ионосфере Земли, что существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы. Здесь, наклонные спорадические *E*-структуры в ионосфере планеты служат в качестве детектора внутренних гравитационных волн. При восстановлении волновых характеристик используются дисперсионное уравнение и поляризационные соотношения для ВГВ, а также данные стандартной модели для оценки частоты плавучести (Брента-Вяйсяля) на высотах нижней ионосферы Земли.

Радиозатменные измерения миссий *CHAMP* и *COSMIC-1* были использованы нами для определения и анализа спорадических *E*-слоев в нижней ионосфере Земли. Параметры спорадических структур в высокоширотной и приэкваториальной ионосфере определялись на основе изучения высотных зависимостей эйконала (фазового пути) и мощности радиозатменных сигналов, зарегистрированных на несущей *GPS*-частоте 1575,42 МГц (длина волны ~19 см) с помощью низкоорбитальных спутников *CHAMP* и *COSMIC-1*. В случае нарушения сферической симметрии, разработанный метод позволял оценить смещение спорадического слоя по отношению к перигею радиолуча, определить угол наклона слоя к локальному горизонту и найти фактическую высоту его расположения. Установлены типы спорадических *E*-структур (дискретные и двойные слои) и рассмотрены механизмы их формирования. Представлены результаты восстановления характеристик внутренних гравитационных волн, обусловливающих наклоны спорадических *E*-слоев в нижней ионосфере Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

1. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Kirillovich I.A., Liou Y.-A. // Advances in Space Research 2018. V**. 61**. P. 1702, https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001

2. Gubenko V.N., Kirillovich I.A. // Solar-Terrestrial Physics 2019. V. **5**. P. 98, https://doi.org/10.12737/stp-53201912.

ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ «ЯКУТСК» ЗА 6 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

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

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

Проведен статистический анализ данных вертикального зондирования ионосферы на станции «Якутск» (62.01° с. ш., 129.43° в. д., 57.12° MLAT) за период с 1956 по 2017 гг., включающий 6 циклов солнечной активности, с целью выявления долговременных изменений в F2-слое субавроральной ионосферы, их связи с солнечной и геомагнитной активностью. Рассмотрены вариации одного из основных параметров слоя F2 ионосферы – критической частоты. Показано, что в течении шести циклов солнечной активности (19 – 24 циклы) наблюдаются отрицательные тренды среднегодовых значений критических частот слоя F2 как в полуденные, так и в полуночные часы. Проведено сравнение полученных трендов с трендами по данным эмпирической модели IRI-2016. Выявлена положительная корреляция между линейными трендами критической частоты слоя F2 и индексом солнечной активности F10.7.

СЕКЦИЯ «Магнитосфера»

ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ: МЕХАНИЗМЫ РАССЕЯНИЯ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ РАЗНЫХ ЭНЕРГИЙ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Иванова А.Р.[1,2], Калегаев В.В.[2,1], Демехов А.Г. [3], Яхнина Т.А.[3], Миронова И.А.[4]

1 Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, *г. Москва, Россия,* ivanova.ar20@physics.msu.ru
2 НИИЯФ МГУ, *г. Москва, Россия*
3 ПГИ, г. Апатиты, Россия
4 СПБГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

По данным спутников NOAA POES/METOP была собрана статистика высыпаний релятивистских и субрелятивистских электронов из внешнего радиационного пояса Земли, вызванных разными механизмами рассеяния, во время геомагнитных возмущений двух типов. Рассматривались два события: слабая, но продолжительная магнитная буря типа HILDCAA (11-16.10.2017) и мощная, но короткая изолированная магнитная буря (23-30.03.2023). Рассматривались высыпания, вызванные резонансным взаимодействием с волнами свистовой моды, ЭМИЦ волнами и рассеянием на кривизне магнитной линии. Основным исследуемым параметром являлся наклон энергетического спектра (как мера соотношения потоков электронов разных энергий) высыпаний.

Особый интерес представляют высыпания, ассоциированные с ЭМИЦ волнами. Из теоретических представлений об ЭМИЦ волнах следует, что они могут резонансно взаимодействовать только с релятивистскими электронами. В действительности взаимодействие может происходить и с энергичными электронами, но с уменьшением энергии должна уменьшаться и эффективность рассеяния. Из полученных экспериментальных данных видно, что высыпания, ассоциированные с ЭМИЦ волнами, часто имеют достаточно мягкий энергетический спектр. Что может говорить либо о «замешивании» других типов волн, либо о том, что субрелятивистских частиц настолько много, что и при маленькой эффективности рассеяния они дают бОльший поток высыпающихся частиц. Для определения причины мягких спектров была рассмотрена эффективность рассеяния электронов разных энергий. Для некоторой доли событий было подтверждено «замешивание» электронов, рассеянных посредством других механизмов (наиболее вероятно свистовыми волнами). Для большинства событий, как и полагается, наблюдается бОльшая эффективность рассеяния релятивистской части спектра по сравнению с субрелятивистской, но нигде не наблюдается ожидаемая монотонно убывающая к меньшим энергиям зависимость. Возможно, это говорит о постоянном присутствии дополнительного механизма, рассеивающего энергичные электроны.

Рассмотрены диапазоны изменения наклона интегрального энергетического спектра, динамика этого показателя во время магнитных бурь разных типов, пространственно-временные характеристики высыпаний, вызванных разными механизмами рассеяния. Проведен сравнительный анализ.

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

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Груздов Д. С.[1,2], Калегаев В. В.[1,2], Власова Н. А.[2]

1 Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2 НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, gruzdov.ds20@physics.msu.ru

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

Вариации захваченных (на орбите космических аппаратов Van Allen Probes-A; -B) и квазизахваченных (на низкой полярной орбите спутника Метеор-М2) потоков электронов ВРПЗ изучались на разных фазах геомагнитных бурь разной интенсивности. Временные и пространственные профили потоков электронов в разных энергетических диапазонах (>0,1, >0.3, >0,7 и >2 МэВ) были восстановлены из спутниковых измерений, полученных во время нескольких пересечений радиационного пояса. Для анализа неадиабатических процессов ускорения электронов ВРПЗ были рассчитаны профили плотности электронов в фазовом пространстве в зависимости от параметра Родерера L^* L^* на основе данных Van Allen Probes о потоках электронов в зависимости от их локальных питч-углов и параболоидной модели магнитного поля A2000.

В работе рассмотрены три умеренно-слабые магнитные бури, сопровождаемые продолжительной суббуревой активностью: 01-05.02.2015, 6-12.11.2015 и 11-16.10.2017. Данные о потоках электронов в максимуме ВРПЗ на высоких широтах и вблизи геомагнитного экватора имеют сходство для всех трех событий, в связи с чем, при небольшой разнице во времени между измерениями двух спутников (не более 30 минут), можно ожидать похожую динамику потоков.

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

Во время события 11-16.10.2017 наблюдается характерный отклик ВРПЗ на суббуревые инжекции в начале события: предположительно последовательное воздействие индукционного электрического поля, генерируемого в ходе серии суббурь, на частицы меньших энергий приводит к возрастанию потоков, что наблюдается по градиенту плотности электронов в фазовом пространстве. Для событий 01-05.02.2015 и 06-12.11.2015 подобного явления не наблюдается.

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

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

ВЫСЫПАНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 10–16.10.2017 Г.

Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Попова Т.А.

ПГИ, г. Апатиты, Россия. demekhov@pgia.ru

Представлены результаты исследования высыпаний релятивистских (> 800 кэВ) электронов по данным низкоорбитальных спутников NOAA/POES в интервале 08–18.10.2017 г., включающем умеренную геомагнитную бурю, из внешнего радиационного пояса. Проанализирована динамика числа зарегистрированных высыпаний и потоков высыпающихся релятивистских электронов, вызванных различными механизмами, на разных стадиях геомагнитной бури. Высыпания за счет большой кривизны геомагнитных силовых линий и за счет взаимодействия со свистовыми волнами коррелируют с суббуревой активностью. Высыпания, обусловленные взаимодействием с электромагнитными ионно-циклотронными волнами, доминируют на главной фазе бури.

Наряду с высыпаниями в локальный конус потерь, обусловленными питч-угловым рассеянием под действием трех перечисленных выше механизмов, зарегистрировано также значительное число событий, в которых поток частиц в вертикальном детекторе превышал пороговое значение (10^3 см$^{-2}$ с$^{-1}$ стер$^{-1}$), но которые нельзя было связать ни с одним из трех механизмов. В подавляющем большинстве случаев (в 651 из 790 событий, т.е. ~82.5%) эти события наблюдались в зоне ослабленного магнитного поля на долготах 0–110° AACGMLon, 300–360°AACGMLon и на широтах 56.0–62.6 AACGMLat в южном полушарии, что соответствует периферийной области Южно-Атлантической магнитной аномалии. За исключением единичных случаев, все эти события наблюдались при выполнении хотя бы одного из двух условий: (1) фоновое магнитное поле меньше поля в геомагнитно сопряженной (по модели IGRF) точке на высоте спутника и (2) долготный градиент магнитного поля отрицателен. Эти особенности свидетельствуют в пользу связи таких событий с высыпаниями частиц, попавших в дрейфовый конус потерь.

Общим свойством высыпаний релятивистских электронов для локального рассеяния является малый размер области высыпаний по широте (~1°), большая интенсивность (потоки высыпающихся электронов 10^3 – 10^5 (см^2 с стер)$^{-1}$), довольно высокая изотропия потоков, регистрация в обоих полушариях. Напротив, зона каждого события, связанного с высыпанием релятивистских электронов в дрейфовом конусе потерь, может занимать большой диапазон широт (до ~8°), эти высыпания имеют относительно небольшую интенсивность (потоки высыпающихся электронов 10^3 – 10^4 (см^2 с стер)$^{-1}$) и анизотропный характер (потоки захваченных частиц больше, чем на порядок превышают потоки высыпающихся частиц).

ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ТЕЧЕНИЕ 23 - 25 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ИНТЕГРАЛ

А. Дмитриев[1], А. Позаненко[2], И. Человеков[2], П. Минаев[2], С. Гребенев[2]

[1.] *Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия*

[2.] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

Проведен анализ потоков энергичных электронов, измеренных в экваториальной области внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) детектором IREM на высокоапогейном КА ИНТЕГРАЛ в интервале с конца 2003 по 2024 гг., т.е. в течение практически 2-х солнечных циклов. Полученные данные позволяют проанализировать динамику потоков электронов внешнего РПЗ в трех меридиональных секторах: Европейском, Московском и Тихоокеанском. Показано, что минимальные потоки в РПЗ наблюдаются во время минимумов солнечных циклов в 2009 и 2020гг. Оценены тенденции интенсивности потоков от 23 к 25 солнечному циклу. В Европейском секторе наблюдается положительная, в то время как в Московском секторе наблюдается отрицательная тенденция. Полученная асимметрия может быть интерпретирована как изменение глобальной конфигурации геомагнитного поля Земли.

ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ ВО ВНУТРЕННЮЮ МАГНИТОСФЕРУ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ: АНАЛИЗ И СТАТИСТИКА ПО ДАННЫМ THEMIS И RBSP

Шустов П.И, Французов В.А., Артемьев А.В.

Институт Космических Исследований РАН, г. Москва, Россия, p.shustov@gmail.com

Инжекции энергичных частиц ($10 - 300$ кэВ) из плазменного слоя хвоста магнитосферы играют ключевую роль в динамике геомагнитных бурь. Они не только вносят непосредственный вклад в формирование кольцевого тока, но и служат источником («seed population») для релятивистских электронов внешнего радиационного пояса. Несмотря на значимость этого процесса, эффективность проникновения инжекций из ближнего хвоста ($L{\sim}7 - 10$) глубоко во внутреннюю магнитосферу ($L < 6$) остается предметом дискуссий.

В работе представлен статистический анализ вероятности проникновения инжекций во время геомагнитных бурь ($Dst <- 50$ нТл) за период 2013–2019 гг. Использовались данные спутников THEMIS (в области $L > 6$, ночной сектор) и Van Allen Probes (RBSP, в области
$4 < L < 6$). Всего было идентифицировано более 4000 событий инжекций на THEMIS и порядка 2000 на RBSP. Для сопоставления событий применялся метод обратного трассирования дрейфовых траекторий в дипольном приближении, что позволило исключить повторные регистрации сильно диффузных инжекций («дрейфовое эхо») и выделить первичные проникновения. Для корректной оценки вероятности проводилась нормировка количества событий на время нахождения спутников в различных секторах MLT.

Анализ подтверждает факт того, что наличие быстрых потоков плазмы (BBF) или диполизация магнитного поля в хвосте не являются достаточным условием для глубокой инжекции. Получена оценка средней условной вероятности проникновения инжекции из области ближнего хвоста во внутреннюю магнитосферу во время бурь: $P_{pen} = 0.30 \pm 0.08$. Это свидетельствует о том, что лишь около трети активаций в хвосте эффективно преодолевают энтропийный барьер и достигают внутренней магнитосферы без потерь на магнитопаузе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-72-00152)

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ 20.12.2015 Г. И 25.08.2018 Г.

Азра-Горская К.Ж. [1,2], **Калегаев В.В.** [1,2], **Власова Н.А.** [1], **Демехов А.Г.**[3]

[1] *НИИЯФ МГУ*

[2] *Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

[3] *ПГИ, г. Апатиты, Россия*

azragorskayaCG@my.msu.ru

Представлены результаты исследования динамики потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли во время двух магнитных бурь 20.12.2015 и 25.08.2018 гг., близких по интенсивности, но развивающихся под воздействием на магнитосферу различных условий в межпланетной среде. Первая магнитная буря ($|Dst_{min}|$=170 нТл) началась и развивалась под воздействием пришедшей к Земле гелиосферной структуры, сформировавшейся при взаимодействии двух корональных выбросов масс. Вторая буря ($|Dst_{min}|$=205 нТл) началась с приходом относительно слабого межпланетного коронального выброса массы, а на фазе восстановления бури магнитосфера Земли находилась под воздействием высокоскоростного потока солнечного ветра из корональной дыры.

Выполнены исследования потоков электронов в широком энергетический диапазон, от ~200 кэВ до ~3 МэВ, полученных прибором MagEIS на космическом аппарате Van Allen Probes-A. Проведен сравнительный анализ динамики и спектральных характеристик потоков электронов на разных фазах развития двух бурь.

Для оценки роли адиабатических и неадиабатических процессов использованы профили плотности потоков электронов в фазовом пространстве для каждого пролета спутника через внешний радиационный пояс, сгенерированные на сайте https://rbspgway.jhuapl.edu/ по модели TS04. Анализ динамики профилей позволяет оценить роль различных конкурирующих процессов ускорения-переноса и потерь частиц на разных фазах бурь. В первой буре в диапазоне энергий до E> 300 кэВ наблюдаются адиабатические изменения потоков электронов. Понижение потоков электронов релятивистских и субрелятивистских энергий на главной фазе связано с суббуревыми диполизациями, приводящими к рассеянию и инжекциям частиц на фоне адиабатического охлаждения. На фазе восстановления электроны, инжектированые во время суббурь, постепенно пополняют магнитосферу и ускоряются за счет радиальной диффузии внутрь магнитосферы.

Во второй буре наблюдается похожее развитие потоков всех энергетических популяций. На главной фазе наблюдается адиабатическое охлаждение в потоках электронов всех энергий, более сильное для энергичных частиц и локальное ускорение электронов 100-300 кэВ, связанное с волновой активностью. На фазе восстановления, под воздействием последовательных суббуревых инжекций, связанных с приходом высокоскоростного потока солнечного ветра, происходит восстановление внешнего радиационного пояса вплоть до релятивистских энергий.

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

ВЛИЯНИЕ НОЧНОЙ АВРОРАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГЛУБОКИЕ ИНЖЕКЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ОБЛАСТЬ L<1.2

Суворова А.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, suvorova@dec1.sinp.msu.ru

Представлен анализ условий глубоких инжекций энергичных электронов внутреннего РПЗ на дрейфовые оболочки L<1.2. Для анализа выбраны три геомагнитные бури разной интенсивности, во время которых наблюдались мощные западные электроджеты с амплитудой SML<–2500 нТл, так называемые супер-суббури [1]. Использованы данные низковысотных спутников NOAA/POES, интернет-ресурса SuperMag и межпланетных мониторов солнечного ветра (СВ) и ММП. На низких широтах наблюдались внезапные возрастания потоков квазизахваченных энергичных электронов (*forbidden energetic electron*, FEE). По одновременным возрастаниям потоков электронов в диапазоне энергий >30 – >300 кэВ определялся момент инжекции электронов РПЗ в область L<1.2. Инжекции FEE происходили как в ночном, так и в утреннем/дневном секторах (рис. 1). Мощные интенсификации западного электроджета происходили в широком ночном-утреннем секторе 18-00-06 LT (*westward electrojet*, WEJ) и/или узком утреннем секторе 03-09 LT (*dawnside* DWEJ). В случае DWEJ в полуночном секторе 21–03 LT амплитуда SML была мала, поэтому мощные DWEJ не соответствуют классу суббурь и не являются супер-суббурями.

Для инжекций FEE и электроджетов определены возможные драйверы в СВ и ММП. Ключевыми факторами межпланетной среды для FEE являются возмущения типа прямых и обратных скачков давления СВ (±p) и повороты вектора ММП (разрывы, транзиентные дневные форшоки). Анализ показал отсутствие причинно-следственной связи между FEE и электроджетами. FEE и WEJ взаимоисключающие явления, в то время как DWEJ и инжекции FEE независимые явления, иногда почти одновременные.

Важным условием для глубокой инжекции является отсутствие ночной авроральной активности (21–03 LT) или суббури/WEJ. Слабый магнитный эффект от электроджета указывает на слабую ионизацию ионосферного E слоя. Такое состояние магнитосферно-ионосферной системы в ночном секторе в момент воздействия драйвера создает благоприятные условия для проникновения высокоширотных электрических полей на низкие широты вследствие нарушения экранировки внутренней магнитосферы. Проникновение транзиентных азимутальных электрических полей на низкие широты приводит в действие механизм электрического дрейфа и быстрого радиального переноса энергичных частиц поперек магнитного поля на низких L оболочках. Величина электрического поля, достаточ-ная для одноэтапной глубокой инжекции, оценивается порядка 10 мВ/м [2].

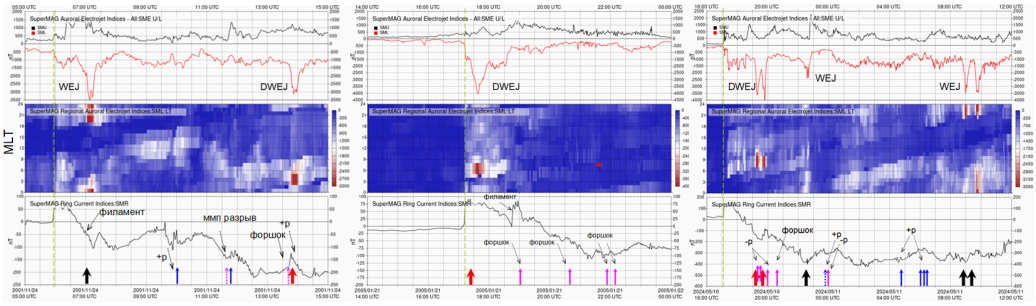


Рис. 1. Авроральная активность (WEJ -черные и DWEJ -красные) и инжекции FEE (ночные – синие и дневные – розовые) во время бурь 24/11/2001, 21/01/2005 и 10-11/05/2024.

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

1. Tsurutani B.T., et al. // Ann. Geo. Communicates. 2015, V. **33**. P. 519.
2. Суворова А.В, Дмиттриев А.В. // Геомаг. Аэроном., 2025, Т. **65**. С. 861.

ОЦЕНКА КРИВИЗНЫ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ВО ВНЕШНЕМ РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ

Кохан Г. Р., Апатенков С.В., Сергеев В.А., Степанов Н.А.

1 - Санкт-Петербургский Государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия, g.r.kokhan@mail.ru
2 – ААНИИ, Санкт –Петербург, Россия

Одним из важных механизмов потерь электронов из внешнего радиационного пояса является механизм рассеяния на кривизне силовых линий. Рассеяние происходит, если гирорадиус частицы сравним с радиусом кривизны силовой линии. Таким образом, оценки радиуса кривизны в диапазоне радиальных расстояний 6-10 Re являются важной задачей. В эту область, к сожалению, почти не попадают 4х спутниковые миссии, позволяющие оценить всю матрицу градиентов.

При помощи спутников CLUSTER мы тестируем новый метод оценки радиуса кривизны по двум спутникам, сравнивая с расчетами по полному тетраэдру. Для точных локальных координат мы применяем эмпирическую модель нейтрального слоя TAG-14. Для уменьшения ошибок, связанных с радиальным разносом спутников, мы раскладываем поле на вклад дипольного (IGRF) и одномерного токового слоя. Одномерность и ориентация слоя проверяется и подтверждается с помощью метода MVA. Мы получили критерии применимости метода для пар спутников, зависимости точности метода от разноса спутников в паре, а также сравнили работу метода с использованием локальной системы координат и без нее (в GSM). Также мы представляем первые результаты применения нового метода к данным пар спутников THEMIS.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00441

ГЛОБАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ИЗОТРОПНОЙ ГРАНИЦЫ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛЕЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Сергеев В.А.[1], **Н.А. Цыганенко**[1], **С.В. Апатенков**[1], **Н.А. Степанов**[1,2]

1-Санкт-Петербургский госуниверситет, г.С-Петербург, Россия, victor40sergeev@gmail.com

2- ААНИИ, г. С-Петербург, Россия

Как известно, заметные изотропные высыпания высокоэнергичных электронов (ЭЭ) сосредоточены в узкой по широте зоне (на гм широтах 64-67^{o}) в секторе ± 3 часа у магнитной полуночи. Предполагается, что указанная локализация связана с низким уровнем потоков ЭЭ в большей части плазменного слоя, где выполняется условие неадиабатического рассеяния в токовом слое, что препятствует возможности наблюдения изотропной границы ЭЭ (ИГЭ) в других секторах местного времени. Это ограничение снимается в редких случаях событий СКЛ с сильной электронной компонентой, когда вся магнитосфера заполнена энергичными электронами измеряемой интенсивности.

Для интерпретации эксперимента с помощью эмпирической магнитосферной модели TA15 в области замкнутых силовых линий были рассчитаны дрейфовые оболочки и границы неадиабатического рассеяния ЭЭ в магнитосфере в изучаемые периоды длительного события интенсивных солнечных электронов в мае 2013г. По этим данным область изотропных высыпаний имеет форму «перевернутого гриба» в координатах Ф-MLT с осью симметрии на ~23ч. MLT, низкоширотная часть которого в возмущенных условиях имеет полуширину от 4 до 6ч на энергиях от 100кэВ до 1 МэВ.

По данным измерений 6 спутников POES рассмотрена глобальная конфигурация изотропных границ ЭЭ с привязкой к границе полярной шапки (полярной границе авроральных высыпаний) и изотропной границе протонов в течение двух длительных событий интенсивной конвекции (с AE до 800 нТл). Подтверждено, что однородные потоки (плато) солнечных электронов в полярной области на всех MLT проникают внутрь аврорального овала, вплоть до границы радиационного пояса в ночном-утреннем секторах, и во всех секторах внутри овала уверенно регистрируется изотропная граница ЭЭ с признаками характерными для неадиабатического рассеяния в токовом слое.

Хотя в целом конфигурация зоны изотропных высыпаний ЭЭ соответствует расчетам, наблюдается значительная динамика; также в пролете может фиксироваться несколько островков изотропных высыпаний, указывающих на структурность магнитного поля.

В предполуночные часы ИГЭ может опускаться в экваториальную часть овала, приближаясь к протонной ИГ и проникая вглубь замкнутых дрейфовых оболочек радиационного пояса, в этих случаях потоки ЭЭ значительно превышают потоки солнечных электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00441.

НОЧНАЯ МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ КАК УСКОРИТЕЛЬ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Семенов В.С.

СПбГУ, г. Санкт Петербург, Россия, v.s.semenov@spbu.ru

Проблема ускорения заряженных частиц до высоких (релятивистских) энергий до сих пор остается одной из центральных проблем космической физики. В магнитосфере Земли были проведены многочисленные спутниковые измерения динамики хвоста магнитосферы. Было показано, что преобразование магнитной энергии в энергию плазмы происходит во время магнитного пересоединения в магнитосферном хвосте, в результате чего протоны получают энергию в диапазоне кэв, в то время как наиболее энергичные (мэв) частицы наблюдаются в радиационных поясах во внутренней магнитосфере. Для решения этой дилеммы предложен двухступенчатый механизм ускорения. Во-первых, в процессе пересоединения образуются ускоренные до альвеновской скорости потоки плазмы (BBF Bursty Bulk Flows), которые переносят магнитный поток, массу и энергию из хвоста к Земле. Важным новым элементом является то, что BBFs также переносят часть электрического тока хвоста и соответствующее электрическое поле. Проникая во внутреннюю магнитосферу, BBF создают токовый клин суббури (SCW Substorm Current Wedge) с сильным индукционным электрическим полем внутри области возникающей диполяризации. Протоны и электроны, пересекающие зону SCW из-за градиентного и центробежного дрейфа, испытывают бетатронное ускорение и получают энергию. В результате набор энергии происходит в две стадии: до кэвных энергий в хвосте магнитосферы из-за магнитного пересоединения и до мэвных энергий вследствие пересечения заряженными частицами многочисленных SCWs.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ С ПЕРИОДОМ ~30 МИНУТ НА ДНЕВНОЙ СТОРОНЕ МАГНИТОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ GOES

Белаховский В.Б.[1,2], **Костарев Д.В.**[2], **Пилипенко В.А.**[3]

[1] – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*
[2] – *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*
[3] – *Институт космических исследований РАН, г. Москва*

belakhov@mail.ru

Впервые обнаружены геомагнитные пульсации с необычайно большим периодом 30-40 минут на дневной стороне магнитосферы. Мы условно относим эти уникальные колебания к Pc6 типу. Пульсации были зарегистрированы на восстановительной фазе магнитной бури 7 января 2015 г. по данным геостационарных спутников GOES-13, GOES-14, GOES-15. Пульсации наиболее выражены в радиальной (B_r) и продольной ($B_{||}$) компоненте магнитного поля. Pc6 пульсации модулируют потоки электронов и протонов в широком диапазоне энергий, при этом наблюдается противофазность пульсаций в магнитном поле и в потоках заряженных частиц. В данных наземных магнитометров эти колебания не проявляются, что может свидетельствовать об их мелкомасштабности и экранировании ионосферой. При этом наблюдаются аналогичные Pc6 пульсации в полном электронном содержании (ПЭС) ионосферы, определяемом по данным GPS приемников.

Аналогичных колебаний не наблюдалось в параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, что говорит о внутримагнитосферном источнике колебаний. По своим характеристикам зарегистрированные колебания очень похожи на компрессионные Pc5 пульсации (storm-time Pc5), но отличаются очень большим периодом и несинусоидальной формой. В период появления пульсаций наблюдался рост потоков энергичных протонов (95 кэВ) на геостационарной орбите.

Наблюдаемые пульсации явно не могут быть альфвеновскими колебаниями, поскольку на геостационарной орбите длина силовой линии недостаточна для столь длиннопериодных волн. Противофазность колебаний в магнитном поле и в потоках заряженных частиц говорит о том, что Pc6 пульсации представляют собой медленную магнитозвуковую моду. Мы полагаем, что возбуждение Pc6 пульсаций на дневной стороне вызвано энергичными протонами в результате развития кинетических неустойчивостей. Обсуждается возможный вклад различных кинетических неустойчивостей в возбуждение данных колебаний.

Ранее длиннопериодные пульсации с периодом > 20 минут наблюдались либо на ночной стороне магнитосферы, где длина силовых линий была достаточна для поддержания столь низкочастоных колебаний, либо в полярных областях, которые соответствуют пограничным областям магнитосферы. Обнаружение столь длиннопериодных пульсаций на дневной стороне магнитосферы, в области геостационарной орбиты, расширяет представления о классификации и механизмах генерации геомагнитных пульсаций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10012.

ВНЕЗАПНОЕ НАЧАЛО ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ ПО ДАННЫМ С СЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЙ, ВЫЗВАННЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ С МАЛЫМ УГЛОМ ОТКЛОНЕНИЯ НОРМАЛИ К ИХ ФРОНТУ ОТНОСИТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЯ «СОЛНЦЕ-ЗЕМЛЯ»

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

1 - ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, yuliazagainova@mail.ru

2 - ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

На примере ряда отобранных SC-событий, связанных с воздействующими на магнитосферу межпланетными ударными волнами (МУВ) с малым углом отклонения нормали к ним относительно направления «Солнце-Земля», рассмотрена проблема одновременности регистрации внезапного начала (SC) и главного импульса (MI) геомагнитной бури, регистрируемых разными магнитными станциями. Отождествлены корональные выбросы массы (КВМ), связанные с МУВ и межпланетными КВМ на орбите Земли, вызвавшие исследуемые SC-события. Линейные проекционные скорости отождествленных с SC-событиями КВМ заметно различаются, что обеспечило также заметное различие скоростей связанных с ними МУВ. Для каждого рассмотренного SC-события по данным с секундным разрешением была установлена связь широты ϕ и долготы l магнитной станции на поверхности Земли с моментами начала регистрации SC и MI, обнаружены тренды в виде линейной или квадратичной зависимости. Мы использовали авторский подход к определению моментов начала регистрация SC и MI. Выявлены магнитные станции, первыми зарегистрировавшими SC и MI в каждом рассмотренном SC-событии. Сделан вывод, что разность времени регистрации SC и MI первой и последней магнитными станциями в каждом из отобранных для анализа SC-событий зависит от скорости связанной с этим событием МУВ.

БЫСТРЫЕ ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Котова Г.А., Чугунин Д.В., Чернышов А.А., Могилевский М.М., Безруких В.В.

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

По данным широкоугольного анализатора холодной плазмы, работавшего на спутнике МАГИОН-5 (проект «ИНТЕРБОЛ»), в плазмосфере Земли выявлены быстрые осцилляции плотности протонов с периодом около 30 с. В 84% рассмотренных пролетов спутника через плазмосферу амплитуда этих осцилляций относительно фоновой плотности превосходила 10%, при средней относительной амплитуде ~15%. В среднем амплитуда вариаций плотности пропорциональна фоновой плотности холодной плазмы. Вариации температуры протонов происходят в фазе с вариациями плотности. Предполагается, что наблюдаемые осцилляции плотности связаны с магнитозвуковыми волнами.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда №25-12-00059.

МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ВНУТРЕННИХ ХОЛЛОВСКИХ ПОЛЕЙ В ДИАМАГНИТНОЙ КАВЕРНЕ

Парамоник И.П. [1], **Дивин А.В.** [1], **Чибранов А.А.** [2], **Шайхисламов И.Ф.** [2], **Семенов В.С.** [1]

[1] *СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, igorparamonik@gmail.com*
[2] *ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Сферически симметричное расширение облака плазмы из точечного источника во внешнее магнитное поле является простой модельной задачей для описания различных астрофизических явлениях в космической плазме. Примерами таких событий, происходящих в широком диапазоне масштабов, могут служить взрывы сверхновых, выбросы корональной массы, взаимодействие солнечного или межзвездного ветра с галактическим магнитным полем, эксперименты в магнитосфере Земли (AMPTE, CRRES). Расширяясь, плазма вытесняет окружающее магнитное поле и образует диамагнитную каверну.

Лабораторные эксперименты с лазерной плазмой на стенде КИ-1 (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск) установили существования режима слабо замагниченных ионов, когда гирорадиус частиц расширяющегося облака сравним или превышает радиус торможения магнитным полем, при котором на поздней стадии процесса происходит аномально быстрое проникновение магнитного поля внутрь полости вместе с генерацией азимутальных холловских магнитных полей. Численное моделирование методом Частица-в-ячейке подтвердило наличие холловских полей в задаче и показало существование двойной вложенной квадрупольной структуры азимутального поля, состоящего из внешних и внутренних частей. Возникновение холловского поля вне каверны объясняется дифференциальным вращением электронов, создающих ток вокруг облака плазмы, в движение которых вморожены магнитные трубки. При этом внутренние холловские поля наблюдаются наиболее выражено при быстром вносе, но вопрос о механизме их генерации оставался до сих пор открытым.

В работе на примере численного решения уравнения индукции впервые демонстрируется, что возникновение внутренних холловских полей в диамагнитной каверне при расширение плазмы объясняется тем же механизмом дифференциального вращения, что и внешней структуры азимутального поля. В двухмерной постановке задачи показано, что знаки холловского поля определяются взаимным расположением магнитных трубок и азимутального тока электронов вдоль границы каверны, а также особенностью их закручивания на этапе расширения облака плазмы.

РАЗЛЕТ СФЕРИЧЕСКОГО ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ДИПОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА СТЕНДЕ КИ-1

Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф., Иванов А.Е., Логинов М.В.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov2013@yandex.ru

На лазерно-плазменном стенде КИ-1 [1, 2] был проведен эксперимент по разлету сферического облака лазерной плазмы (ОЛП) в дипольное магнитное поле. ОЛП создавалось облучением шарообразной полиэтиленовой мишени четырьмя лучами CO_2 лазера с суммарной энергией около 200 Дж в импульсе длительностью τ = 100 нс. Диполь позволял создавать магнитные поля с длительностью τ ≈15 мс и магнитным моментом ≈$1.4\cdot10^6$ Гс·см^3 ($1.4\cdot10^3$ А·м^2). Направление магнитного момента в центральном сечении вакуумной камеры могло изменяться вращением диполя вокруг оси. Измерения проводились с помощью системы совмещенных магнитных и электрических зондов, а также с помощью систем фоторегистрации.

В результате были получены трехмерные зондовые измерения диамагнитной каверны и плазменных потоков. Показано, что при разлете ОЛП в дипольном магнитном поле формируется неоднородная в пространстве диамагнитная каверна. При разлете ОЛП в сторону центра диполя (в область увеличения поля) радиус каверны составил R_b ≈ 7 см, при разлете от диполя – R_b > 11 см. В направлении к диполю зарегистрировано формирование узкого слоя ударного сжатия с повышением концентрации плазмы и магнитного поля.

Эксперименты выполнены при поддержке программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики. Работы по подготовке стенда КИ-1 к эксперименту производились Березуцким А.Г., Захаровым Ю.П. и Посухом В.Г. в рамках Госзадания № НИОКТР 121033100062-5.

1. Y.P. Zakharov et al //*AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics*, **369**, № 1, p. 357-362, (1996).

2. I. F. Shaikhislamov et al //*Plasma Physics and Controlled Fusion*, **56**, № 12, p. 125007, (2014).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ДАННЫМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ И ВЫСОКО АПОГЕЙНЫХ СПУТНИКОВ (СОБЫТИЕ 24 ОКТЯБРЯ 2012Г.)

Кирпичев И.П. [1], **Антонова Е.Е.** [2, 1]

[1] *ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва, ikir@cosmos.ru*
[2] *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Москва*

По измерениям спутников миссии THEMIS восстанавливается радиальный ход плазменного (ионное плюс электронное) давления на расстояниях 7-11 R_E. В соответствии с одновременными условиями в солнечном ветре (по данным OMNI) осуществляется проекция на ионосферные высоты (~900 км) вдоль модельных магнитных линий (модель TA16) с дальнейшим расчетом MLT и магнитной широты (модель AACGM). Данные спутников DMSP и NOAA использовались для нахождения одновременных плазменных профилей давления на этих широтах. Наблюдается совпадение (в пределах ошибок) величин давления, регистрируемого на низких высотах и спроецированного из внешней области кольцевого тока магнитосферы. Показано, что расстояния 7-11 R_E соответствуют широтам 67-70^0 (при спокойных геомагнитных условиях). Проводится сравнительный анализ дифференциальных спектров ионов и электронов в этих пространственно разнесенных областях.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ МАГНИТОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ ПРИ НЕЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ

Антонова Е.Е.[1,2], Кирпичев И.П.[2], Степанова М.В.[3], 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, elizaveta.antonova@gmail.com

[2]Институт Космических Исследований РАН

[3]University of Santiago de Chile

[4]Полярный Геофизический институт

Хорошо известно, что динамика крупномасштабных магнитосферных процессов, в основном, определяется параметрами солнечного ветра и крупномасштабного магнитного поля. Изменения подходов к описанию и моделированию таких процессов (смотри статью в 2025 в GRL (doi:10.1029/2024GL114315) требуют экспериментального и теоретического анализа конкретных процессов, особенно магнитных бурь и суббурь, не опирающегося на предположении о доминирующей роли магнитного пересоединения. При этом, необходим учет существования областей неэквипотенциальности магнитных силовых линий, масштабов таких областей и механизмов их возникновения. В настоящей работе кратко анализируются основные результаты измерений продольных полей на низколетящих и высокоапогейных спутниках. Выделена роль локального нарушения квазинейтральности на авроральных магнитных силовых линиях и в хвосте магнитосферы.

РАЗРАБОТКА МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРТА ДЛЯ МНОГОТОЧЕЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Уфимцев А.В.

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В представленной научно-исследовательской работе подробно описывается конструкция малого космического аппарата для изучения магнитосферы Земли. Особое внимание уделено разработке компактной платформы, оснащенной высокочувствительным магнитометром и системой регистрации низкочастотных электромагнитных волн. Проведенное проектирование и прочностной анализ подтвердили возможность использования аппарата в качестве элемента распределенной системы мониторинга пространственно-временной структуры магнитосферной плазмы.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТОКОВЫХ СЛОЕВ МАГНИТОСФЕРЫ МЕРКУРИЯ ПО ДАННЫМ МАГНИТОМЕТРА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА MESSENGER

Невский Д.В., Алексеев И.И., Лаврухин А.С.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, nevskii.dv17@physics.msu.ru

Анализ динамики магнитосферы Меркурия и автоматизация поиска положения токовых слоев сталкиваются с рядом специфических проблем, отличающих эту задачу от аналогичных исследований для Земли [1] или Сатурна [2]. Хотя на борту аппарата MESSENGER находился спектрометр энергичных частиц и плазмы (FIPS), он получал очень скудные данные о потоках солнечного ветра, так как большую часть времени находился в тени теплозащитного экрана, отражающего поток солнечного излучения. Это делает невозможным использование мультипараметрических алгоритмов, требующих данных о плотности и скорости плазмы.

В данной работе представлен метод автоматического детектирования токовых слоев, опирающийся исключительно на данные магнитометра (MAG) и геометрические параметры орбиты. Ранее нами был предложен и запатентован метод автоматического определения границ [3,4]. Для обеспечения масштабируемости метода и его применения к данным миссии BepiColombo, а также для космических аппаратов у других планет была разработана нейронная сеть, с помощью которой можно распознать уникальные признаки каждого токового слоя. Головная ударная волна идентифицируется по резкому скачку модуля магнитного поля и возрастанию уровня флуктуаций при переходе из солнечного ветра в переходный слой. Магнитопауза определяется по характерному вращению вектора магнитного поля. Токовый слой хвоста детектируется по смене знака Bx-компоненты поля (в солнечно-магнитосферных координатах) при локальном минимуме модуля поля.

Для повышения надежности классификации проводится предварительная обработка данных: вычитание модельного дипольного поля, так как, чтобы перейти к анализу разрыва, следует исключить стационарные источники поля, и расчет аналога индекса геомагнитной возмущенности для каждого витка. Кроме того, учитывается текущее гелиоцентрическое расстояние Меркурия, которое, согласно нашим недавним исследованиям [5], критически влияет на глобальную геометрию границ из-за вариаций динамического давления солнечного ветра. Обучение и валидация модели проводились на основе комбинации каталогов [6,7] и подготовленного нами датасета [8]. Разработанный подход показывает высокую эффективность в условиях отсутствия плазменных данных и позволяет существенно уточнить статистику пересечений для будущих исследований в рамках миссии BepiColombo, а также применять данный метод для космических аппаратов у других планет.

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

1. Nguyen G., Aunai N., Michotte de Welle B. et al. // Ann. Geophys. 2019. V. 37. P. 1069.
2. Cheng I.K., Achilleos N., Smith A. // Front. Astron. Space Sci. 2022. V. 9. P. 1016453.
3. Nevsky D.V., Lavrukhin A.S., Alexeev I.I. // Cosmic Research. 2023. V. 61. № 3. P. 189.
4. Алексеев И.И., Невский Д.В., Лаврухин А.С. Способ определения границ областей плазмы в космическом пространстве // Патент РФ № 2807968. 2023.
5. Nevsky D., Lavrukhin A., Alexeev I. // Universe. 2024. V. 10. № 1. P. 40.
6. Philpott L.C., Johnson C.L., Anderson B.J. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2020. V. 125. e2019JA027544.
7. Sun W. Lists of Magnetopause and Bow Shock Crossings... // Zenodo. 2023. doi:10.5281/zenodo.8298647.
8. Parunakian D., Lavrukhin A., Julka S., Nevsky D. et al. // Zenodo. 2021. doi:10.5281/zenodo.5733418

РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Б.Ю. Юшков

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

Одним из факторов, определяющих радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, являются галактические и солнечные космические лучи. Их потоки внутри магнитосферы во многом определяются эффектом геомагнитного обрезания, количественно описываемым величиной эффективной вертикальной жесткости обрезания. Данная величина непосредственно вычисляется численным интегрированием уравнений движения, что даже при современном быстродействии ЭВМ требует значительных затрат машинного времени и использования специальных программ. Поэтому в практических целях используются различные методы интерполяции или аппроксимации. Один из таких методов [1] обеспечивает вычисление эффективной вертикальной жесткости в зависимости от двух параметров – локального времени и Кр-индекса, характеризующего геомагнитную возмущенность. Метод использует базовые таблицы жесткости, рассчитанные в модели IGRF для высоты 450 км, формулу пересчета к произвольной высоте и поправочные коэффициенты, рассчитанные в модели Цыганенко-89. Сравнение рассчитанных жесткостей с другими работами подтверждает корректность результатов. С использованием модели IGRF14 рассчитаны базовые таблицы на эпохи 2025 и 2030 [2]. Рассмотрено влияние показателя спектра протонов на величину жесткости обрезания и оценена физическая точность определения жесткости. Дозы радиации, рассчитанные с помощью данного метода, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

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

1. Нымmик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. // Космические исследования. 2009. Т.**47**, С.211
2. Yushkov B.Yu. // Advances in Space Research, 2026. doi.org/10.1016/j.asr.2025.11.078

АДАПТИВНЫЙ ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ ВЫСОКОШИРОТНЫХ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

Воробьева Г.Р.[1], Воробьев А.В.[1,2]

[1]УУНиТ, г. Уфа, Россия, [2]ГЦ РАН, г. Москва, Россия vorobeva.gulya@yandex.ru

Исследование магнитосферы неизбежно сталкивается с проблемой дефицита и неполноты данных, как в пространстве, так и во времени. Наряду с хорошо известной пространственной неоднородностью сети магнитных обсерваторий, когда интересующие территории остаются неохваченными [1], не менее остро стоит проблема временных пропусков в рядах геомагнитных измерений. Природа этих пропусков неоднородна: технические сбои оборудования, профилактические работы, атмосферные помехи, человеческий фактор.

Анализ геомагнитных данных одной из наиболее востребованных магнитных обсерватоий – Ловозеро (LOZ) [2] выявил систематическую проблему неполноты временных рядов – значительное количество пропусков различной продолжительности. Наблюдаются как кратковременные пропуски, способные исказить фиксацию ключевых фаз геомагнитных возмущений, так и протяженные перерывы, существенно снижающие ценность данных для непрерывного мониторинга. Наличие таких разнородных пропусков в данных высокоширотных станций, наиболее важных для изучения космической погоды, определяет необходимость разработки специализированных методов восстановления [3].

Ключевой идеей предлагаемого в работе подхода является адаптивность, основанная на принципе ситуационного выбора стратегии восстановления геомагнитных данных. Вместо использования единого универсального метода, система динамически подбирает оптимальный алгоритм восстановления данных в зависимости от характера пропуска и текущих условий наблюдения. Анализируются такие параметры, как длительность пропуска, уровень геомагнитной активности, временные масштабы наблюдаемых вариаций и степень нестационарности сигнала. Установлено, что для кратковременных пропусков в периоды спокойной магнитосферы достаточная точность может быть достигнута с помощью более простых интерполяционных методов. Однако с увеличением длины пропуска и, особенно, с ростом уровня возмущенности, требуются более сложные и адаптивные алгоритмы.

Вычислительные эксперименты, проведенные на реальных данных высокоширотных обсерваторий, убедительно доказали эффективность и целесообразность предлагаемого адаптивного подхода. Полученные результаты свидетельствуют, что ситуационный выбор метода восстановления в зависимости от характеристик пропуска и геомагнитных условий позволяет достигать значительно более высокой точности по сравнению с использованием единого алгоритма для всех случаев. Практическая значимость работы подтверждается успешным применением методики для восстановления данных обсерватории Ловозеро, что открывает перспективы для ее внедрения в практику обработки геомагнитных наблюдений других высокоширотных станций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00143, https://rscf.ru/project/25-21-00143/.

1. Space Weather Effects Catalogue // ESA Space Weather Study (ESWS). ESTEC/Contract No. 14069/99/NL/SB, WP 310, ESWS-FMI-RP-0001, Issue 2.2, 2001.
2. Gjerloev J.W. // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2012. V. 117. A09213.
3. Vorobev A.V., Pilipenko V.A. // Solar-Terrestrial Physics. 2021. V. 7. № 2. P. 48-56.

К ВОПРОСУ ОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ НАЧАЛА МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ

Воробьев А.В.[1], Соловьев А. А.[1,2], Воробьева Г.Р.[3]

[1]ГЦ РАН, г. Москва, Россия, [1]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, [1]УУНиТ, г. Уфа, Россия, geomagnet@list.ru

Как известно, магнитосферная суббуря это интенсивный, но кратковременный процесс перестройки магнитного поля и плазмы в магнитосфере Земли, в следствие взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и сопровождающийся взрывным выделением энергии, накопленной от солнечного ветра. Это ключевой элемент взаимодействия Солнца и Земли.

Именно в периоды магнитосферных суббурь регистрируются наивысшие риски снижения уровня техносферной безопасности, связанные с эффектами воздействия космической погоды на технические системы и сети эксплуатируемые внутри границ аврорального овала. На сегодняшний день существует целый ряд способов идентификации начала суббуревой активности. При этом наибольшую популярность из них получили методы, описанные в [Newell et al, 2011], [Liou, 2010], [Ohtani et al, 2020], [Forsyth et al, 2015], [Frey, 2004]. Однако несмотря на обоснованность представленных исследований, результаты идентификации магнитосферных суббурь, выполненных каждым из способом существенно разняться. Так, например, за период с 1996 по 2007 гг, на основании метода, предложенного в [Forsyth et al, 2015] зарегистрировано 13593 событий, а на основании метода, расссмотренного в [Newell et al, 2011] – 12814 событий. Методы, описанные в [Ohtani et al, 2020] и [Frey, 2004] за тот же период позволили выявить 5276 и 4191 событий соответственно. При этом за 10 лет лишь 7 событий зарегистрированы 4-мя методами синхронно (2000-11-12 06:35:00, 2001-02-22 08:33:00, 2001-08-31 21:07:00, 2003-02-05 23:03:00, 2005-01-29 06:07:00, 2005-06-22 22:42:00, 2005-11-16 23:04:00).

Таким образом, точное предсказание момента начала изолированной суббури до сих пор остается нерешенной задачей, главным образом из-за её локального характера и зависимости от тонких взаимодействий в магнитосфере.

В настоящей работе рассматривается статистический подход к идентификации начала магнитосферных суббурь, обеспечивающий снижение уровня неопределенности при идентификации обозначенных событий и, таким образом способствующий повышению качества их обнаружения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00569, https://rscf.ru/project/25-21-00569/

1. Newell, P. T., and J. W. Gjerloev (2011), Substorm and magnetosphere characteristic scales inferred from the SuperMAG auroral electrojet indices, J. Geophys. Res., 116, A12232, doi:10.1029/2011JA016936.No. 14069/99/NL/SB, WP 310, ESWS-FMI-RP-0001, Issue 2.2, 2001.

2. Liou, K. Polar Ultraviolet Imager observation of auroral breakup, J. Geophys. Res., 115, A12219, doi:doi:10.1029/2010JA015578.

3. Ohtani, S., and J. Gjerloev, Is the Substorm Current Wedge an Ensemble of Wedgelets?: Revisit to Midlatitude Positive Bays, accepted, J. Geophys. Res, 2020.

4.Frey, H. U., Mende, S. B., Angelopoulos, V., and Donovan, E. F. (2004), Substorm onset observations by IMAGE‐FUV, J. Geophys. Res., 109, A10304, doi:10.1029/2004JA010607.

5. Forsyth, C., Rae, I. J., Coxon, J. C., Freeman, M. P., Jackman, C. M., Gjerloev, J., and Fazakerley, A. N. (2015), A new technique for determining Substorm Onsets and Phases from Indices of the Electrojet (SOPHIE), J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 10,592– 10,606, doi:doi:10.1002/2015JA021343.

ВКЛАД ГЕОМЕТРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ И ЗЕМНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ГЛОБАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ МАГНИТОСФЕРЫ И ГЕОМАГНИТНУЮ АКТИВНОСТЬ

Кузнецова Т.В.

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

Цель исследования – найти объяснение полугодовых (с пиками вблизи равноденствий) и Universal Time (UT) вариаций геомагнитной активности (ГА). Ранее были предложены три основных механизма. Осевая гипотеза Корти, 1912. Ключевой угол—гелиографическая широта Земли. В начале марта и сентябре Земля находится на максимальном угловом расстоянии от экватора Солнца. У гипотезы нет UT вариации ГА (поэтому она устарела).

Следующая гипотеза Бартельса, 1932. Ключевой угол между направлением скорости потока солнечного ветра (V) и осью диполя Земли (Ψ); активность максимальна (по неизвестным причинам) в дни равноденствий, когда Ψ=90°. Объясняет UT вариацию ГА. Третья гипотеза Рассела – Макферрона, 1973. Основана на предположении, что магнитные поля, лежащие в плоскости экватора Солнца имеют максимальную компоненту южного направления в геоцентричной системе координат GSM вблизи максимумов ГА в начале апреля или октября, в зависимости от их полярности.

Расчеты углов между направлением скорости V и Межпланетным Магнитным Полем (ММП), между компонентами электрического поля (E) и геомагнитным моментом (Me) вместе с индексами ГА позволили нам определить количественно вклад геометрии взаимодействия межпланетных и земных электромагнитных полей в ГА.

Показано, что равноденственная гипотеза Бартельса объясняет менее 15% статистической вариации индекса ГА Kp. Механизм пересоединения Данджи, используемый Расселом–Макферроном, объясняет примерно 35% вариаций Kp.

Предложенная нами компонента электрического поля Emv в целом объясняет ~95% наблюдаемых изменений Kp. Изменения только угла нашей модели между векторами E и Me объясняет 50% изменений индекса Kp.

Показано, что ГА может достигать уровня возмущения Kp=6 без южного направления ММП Bz<0 вдоль вектора Me, а путем изменения только величины компоненты электрического поля Em вдоль Me при северном направлении ММП Bz>0. Обнаруженное нами явное увеличение Kp индекса для ММП с Bz>0 мы объяснили ростом величины компоненты электрического поля Em вдоль геомагнитного момента Me.

На основе полученных результатов мы предложили новое объяснение полугодовой и UT вариаций ГА [1].

1. Kuznetsova T.V. and Laptukhov A. I. The contribution of the geometry of the interaction of interplanetary and terrestrial magnetic fields to the global state of the magnetosphere and geomagnetic activity. Advances in space Research v. 47, 978–990, 2010.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ПЛАЗМОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИСТЛЕРОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА КАМЧАТКЕ

Марченко Л.С., Паровик Р.И.

ИКИР ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край, Россия, marchenko@ikir.ru

Электромагнитные волны диапазона ОНЧ, распространяющиеся вдоль линий магнитного поля Земли, называются вистлерами. Известно, что используя вистлеры, возможно рассчитать концентрацию электронов плазмосферы, зная носовую частоту и абсолютное групповое время задержки (предельную дисперсию). Вместе с тем, на средних широтах, где находится Камчатка, регистрируются вистлеры в диапазоне ниже носовой частоты. Также, для определения времени задержки, необходимо знать инициирующий атмосферик (разряд молнии), что практически невозможно сделать на спектрограмме. Поэтому, чаще всего используются методы, основанные на экстраполяции следа вистлера из доступной части спектра [1,2].

В работе применен метод линейной экстраполяции динамических спектров вистлеров, зарегистрированных на Камчатке, для расчёта носовой частоты по методике работы [3]. Зная носовую частоту, можно дать оценку электронной концентрации плазмосферы с помощью методики Парка, например, в рамках модели диффузионного равновесия DE1 [4].

Разработан пакет программ, реализующих описанные выше алгоритмы. Проведены расчеты носовой частоты и предельной дисперсии для ряда вистлеров, зарегистрированных на Камчатке, на основе которых были даны оценки электронной концентрации в плазмосфере. Интересно отметить, что концентрация электронов на высоте 1000 км, полученная указанным методом, близка к значению концентрации электронов, полученной с использованием Международной эталонной модели ионосферы (IRI) [5]. Координаты для IRI выбирались таким образом, чтобы они были как можно ближе к наблюдательной станции Карымшина на Камчатке.

Работа выполнена за счет Государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2). Данные, использованные в данной работе, были получены из Центра Коллективного Пользования "Северо-восточный гелиогеофизический центр" (ЦКП СВГЦ) СКР_558279.

1. Шагимуратов И. И. Вариации электронной концентрации в плазмосфере по данным свистящих атмосфериков. Калининград: ИЗМИРАН ЗО, 1985. 189 с.

2. Марченко, Л. С. Алгоритм выделения следа искусственного сигнала вистлера в спектрограмме с помощью интегрированной среды разработки приложений PyCharm // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2024. – Т. 49, № 4. – С. 99-111. – DOI 10.26117/2079-6641-2024-49-4-99-111.

3. Dowden B. L., Allcock G. McK. Determination of nose frequency of non-nose whistlers // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1971. – Vol. 33. – P. 1125-1129. — DOI: 10.1016/0021-9169(71)90133-4.

4. Park C. G. Methods of determining electron concentrations in the magnetosphere from nose whistlers. 1972. NASA-CR-130353.

5. Forsythe V. V., Bilitza D., Burrell A. G., Dymond K. F., Fritz B. A., McDonald S. E. PyIRI: Whole-globe approach to the International Reference Ionosphere modeling implemented in Python // Space Weather. – 2024. – Vol. 22. – Art.№e2023SW003739. – DOI:10.1029/2023SW003739.

О ПРОВЕРКЕ МОДЕЛИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ Т-03 В СОБЫТИЯХ GLE

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

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, balabin@pgia.ru

Методика решения обратной задачи событий солнечных космических лучей (GLE), разработанная в лаборатории Космических лучей ПГИ, основана на прямом вычислении отклика нейтронных мониторов на анизотропный поток солнечных космических лучей (СКЛ). Результатом решения являются параметры потока СКЛ: энергетический спектр и питч-угловое распределение. С помощью этой методики получены решения для трех десятков событий GLE, произошедших в период 1956-2006 г. Результаты хорошо согласуются с данными о потоках СКЛ, полученных другими методами. При этом важным этапом решения является расчет асимптотических конусов приема нейтронных мониторов, входящих в мировую сеть. Используются модели магнитосферы Земли, созданные Цыганенко. В большинстве событий GLE применяется модель Т-01, как наиболее точно описывающая магнитосферу Земли в спокойном состоянии.

Модель Т-01 не предназначена для задания состояния магнитосферы Земли во время магнитных бурь. Это было выяснено на примере GLE, случившихся во время сильных магнитных бурь: GLE66 (29.10.2003) и GLE74 (11.05.2024). Во время этих событий Kp-индекс поднимался до 8-9, а Dst-индекс опускался ниже -400 нТл. Рассчитанные асимптотические конусы приемы для этих событий значительно отличались от типичных форм, а методика не давала удовлетворительного решения. Применение же буревой модели магнитосферы Т-03 для расчета асимптотических конусов обеспечило хорошее решение для GLE66 и GLE74. Анализ вычисленных конусов приема показывает, что во время магнитных бурь пороговая жесткость на средне- и низкоширотных станциях уменьшается на 0.7-1.0 ГВ, что также согласуется с данными. Пороговая жесткость является важной характеристикой станций нейтронных мониторов. Факт корректного расчета асимптотических конусов можно рассматривать как качественное подтверждение соответствия модели Т-03 реальному состоянию магнитосферы Земли во время сильных бурь.

СИЛЬНЕЙШИЕ МАГНИТНЫЕ БУРИ 2024-2025 ГГ. И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ

Громова Л.И.[1], Ишков В.Н.[1], Клейменова Н.Г.[2], Громов С.В.[1]

[1]ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия; gromova@izmiran.ru
[2]ИФЗ РАН, г. Москва

В 2024-2025 гг. было зафиксировано несколько больших и очень больших магнитных бурь (*Dst* < -200 нТл), и их количество сравнимо с подобными в солнечных циклах (СЦ) эпохи повышенной солнечной активности (СА) за одинаковый период развития, хотя общее число таких возмущений в текущем СЦ много меньше. В СЦ24, первом цикле эпохи пониженной СА, магнитная буря сопоставимой мощности была только одна. Рассмотрены глобальные характеристики магнитных бурь текущего СЦ: 10-11.05.24 (*Dst* = -412 нТл), 11-12.08.24 (*Dst*= -233 нТл), 10-11.10.24 (*Dst* = -335 нТл), 31.12.24 -1.01.25 (*Dst* = -213 нТл) и 11-13.11.25 (*Dst*= -217 нТл), и проанализированы вспышечные ситуации на Солнце и в межпланетном околоземном космическом пространстве (ОКП), обеспечившие их высокую геоэффективность. Установлено, что причиной каждой из бурь являлись корональные выбросы масс (КВМ) от вспышечных событий на Солнце, число и мощность которых в фазе максимума и начале ветви спада СЦ25 резко увеличились из-за значительного возрастания числа вспышечно активных областей.

Показано, магнитные бури 10-11.05.24 и 11-12.08.24 были вызваны схожими источниками. Плотная концентрация больших КВМ, последовательно уходящих из Солнца с различными скоростями привела к их слиянию с изменениями плотности, и значимо усилило воздействие на ОКП и вызвало экстремальную бурю 10-11.05.24. Найдено достаточно аргументов, что подобная картина взаимодействия КВМ стала причиной и большой магнитной бури 11-12.08.24, источником которой была большая вспышка класса X1.3/2B 8.08 и последовавшая через час длительная двойная вспышка класса M4.6/2N. Большая магнитная буря 11-13.11.25 также была вызвана взаимодействием КВМ от последовательных вспышек уровня X1.7, X1.2 и X5.1. Эти случаи позволили ввести понятие группы (кластера) условно связанных близких по времени КВМ, взаимодействие которых резко усиливает последующую магнитную бурю. Симпатические вспышки, т.е. вспышки, случившиеся с интервалом не более 30 мин в двух различных активных областях Солнца (X1.5 в северном полушарии и X1.1 в южном) послужили источником очень большой магнитной бури 31.12 24-1.01. 25 г. Подобная, довольно редкая, ситуация наблюдалась и для большой магнитной бури от 23-24.03.24, (*Dst* = -128 нТл). Суммарный поток, достигший уровня X1.1, и длившийся более 5 ч, сопровождался очень мощным и быстрым асимметричным КВМ (*V* = 1470 км/с) со сложной структурой и вызвал магнитную бурю, начавшуюся 31.12.24 Наиболее вероятным источником магнитной бури 10-11.10.24, стала длительная большая вспышка класса X1.3/2B из центра видимого диска Солнца с очень быстрым КВМ (*V* = 1450 км/с).

Анализ данных о межпланетном магнитном поле (ММП) и солнечном ветре показал, что наиболее продолжительные среди магнитных бурь с похожими солнечными источниками были обусловлены быстрыми и сложными КВМ, а также увеличением динамического давления солнечного ветра, связанного со скачками его плотности, и большими значениями *Bz*-компоненты ММП. Интенсивность кольцевого тока, выражаемая индексом *SymH*(минутного аналога индекса *Dst*), у бурь с похожими солнечными источниками (10-11.05.24 и 12-14.08.24, 31.12.24 и 23-26.03.24) отличалась в ~1.5-2 раза. Схожее развитие интенсивного кольцевого тока в бурях 11-13.11.25, 10-11.10.24 и 10-11.05.24 может быть связано с близкими значениями наиболее геоэффективных параметром ММП и солнечного ветра. Вопрос о том, чем непосредственно обусловлены различия в развитии магнитных бурь, драйверами которых являются схожие солнечные источники, требует дальнейших серьезных исследований.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ВОСТОЧНОГО ЭЛЕКТРОДЖЕТА

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

[1]ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия; gromova@izmiran.ru
[2]ИФЗ РАН, г. Москва

Известно, что авроральный электроджет состоит из двух противоположно направленных частей – восточного и западного тока, интенсивность которых оценивается с помощью индексов авроральной активности *AL* и *AU* соответственно. Если исследованию связи западного электроджета с параметрами межпланетной среды посвящено большое число работ, то зависимость восточного электроджета от этих параметров исследована явно недостаточно.

Для исследования такой связи были проанализированы случаи значительной интенсификации восточного электроджета (EE-усиление), т.е. возрастания *AU*−индекса ≥ 900 нТл, на основе анализа данных портала авроральных индексов WDC Киото (*AE Index Portal*) за период 2000–2025 гг. Было установлено, что, как правило, такие EE-усиления наблюдались только во время сильных (|*Dst*| > 100 нТл) магнитных бурь, во время бурь меньшей интенсивности (|*Dst*| < 90 нТл) они не наблюдалось совсем. За рассмотренный интервал было выявлено 16 бурь (из 113 сильных магнитных бурь, зарегистрированных в рассматриваемый период, 14% от общего числа), в которых наблюдался эффект EE-усиления. Анализ этих магнитных бурь показал, что примерно в половине магнитных бурь EE-усиления наблюдались неоднократно как на одной и той же, так и на разных фазах бури, в основном, на начальной и во время главной фазы бури. Обнаружено только 2 случая EE-усиления во время восстановительной фазы, причем, в одном случае он был единственным в течение всей сильной бури (*Dst* = −124 нТл), а во время супербури 10-11 мая 2024 г., (*Dst* = −412 нТл) EE-усиления наблюдались и на главной и на восстановительной фазе. Было выявлено, что EE-усиления являются кратковременными явлениями, их длительность не превышает 3 часов, а в большинстве случаев, она не превышает 1 часа. При этом вид кривой соответствующего *AU*-индекса напоминает или короткий всплеск с резкими подъемом и резким падением (*AU*-всплеск) или «холм», если наблюдается плавное возрастание и постепенное уменьшение значений индекса (*AU*-холм). Влияние параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра на интенсивность восточного электроджета изучалось по 13 из 16 выделенных магнитных бурь, для которых имеются данные OMNI. Было установлено, что EE-усиления наблюдались на фоне значительного усиления динамического давления солнечного ветра и только при положительном значении *By*-компоненты ММП, но как при положительном, так и при отрицательном значении *Bz*-компоненты.

Таким образом, было установлено, что значительная интенсификация восточного джета наблюдается только во время сильных магнитных бурь, при этом критическую роль играет положительное направление *By*-компоненты ММП. Физическая причина обнаруженного факта требует дальнейших исследований.

УСКОРЕНИЕ И ПЕРЕНОС ЧАСТИЦ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Жукова Е.И.[1], Попов В.Ю.[3,1,4], Малова Х.В.[2,1], Кислов Р.А.[5], Петрукович А.А.[1], Зеленый Л.М.[1]

[1] Институт Космических исследований РАН, г. Москва
[2] НИИ ядерной физики МГУ, г. Москва
[3] Физический факультет МГУ, г. Москва
[4] Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва
[5] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, Троицк
E-mail: jookove@mail.ru

Работа посвящена некоторым процессам ускорения частиц плазмы, взаимодействующих с фронтами ударных волн, наблюдаемым в так называемой области форшока. Чтобы описать различные механизмы, ответственные за ускорение частиц, построена теоретическая модель конфигурации магнитного поля, которая способствует описанию ускорения различных сортов частиц многокомпонентной плазмы. Путем численного моделирования получены энергетические спектры ускоренных ионов $H,^{+}He,^{+}O^{+}$ и электронов e^{-} с начальным максвеловским распределением по скоростям.

Показано, что частицы плазмы достаточно хорошо ускоряет крупномасштабное турбулентное электромагнитное поле.

Помимо этого установлена эффективность оценки ускорения, происходящего в результате одновременного прохождения частиц через фронт ударной волны и воздействия на них электромагнитной турбулентности. Также показано, что в рамках предложенной численной модели каждому сорту частиц соответствуют свои ограничения на максимальные энергии. Так, к примеру, наиболее сильное ускорение получают ионы кислорода O^{+}.

Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными космических аппаратов (КА) выявило, что разработанная теоретическая модель способна адекватно описать динамику высокоэнергичных частиц в форшок-области.

1. Artemyev A. V., Zelenyi L. M., Malova H. V. Zimbardo G. , Delcourt D.//.Nonlin. Processes Geophys. 2009. V. **16**. P. 631.
2. Delcourt, D. C. and Belmont, G.// J. Geophys. Res. 1998.V.**103**. P. 4605.
3. Кичигин Г.Н.//Геомагнетизм и аэрономия.2021.Т. **61**.С. 309-315
4. Zelenyi, L., Artemyev, A., Malova, H., Milovanov, A. V., and Zimbardo, G.// Phys. Lett.2008. V. **372**. P. 6284.

ДИНАМИКА ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЛИТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ 8 ЯНВАРЯ 2018 Г.

Зыкина А.А.[1,2], **Калегаев В.В.**[1,2], **Власова Н.А.**[2]

1 – Физ. фак. МГУ, 2 – НИИЯФ МГУ, г. Москва, anya.zykina@gmail.com

Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли под воздействием продолжительного (около 7 часов) импульса давления 8 января 2018 года. Проведен анализ вариаций параметров межпланетной среды и отклика внешнего радиационного пояса на внешнее воздействие. Работа основана на экспериментальных данных о потоках релятивистских электронов, полученных с геостационарного ИСЗ GOES и с КА Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B), орбита которых проходит через сердцевину внешнего радиационного пояса вблизи экваториальной плоскости.

Событие началось в 6:46 UT с резкого сжатия магнитосферы (расстояние до подсолнечной точки уменьшилось на 3L меньше, чем за минуту), что было спровоцировано приходом импульса давления солнечного ветра. Повышенное в 4 раза давление сохранялось еще около 6 часов, все это время магнитосфера находилась в сжатом состоянии. По данным VAP-A были построены пространственно-временные профили потоков электронов с энергиями 0,1-2,7 МэВ, для всех энергий в 6:46 было зафиксировано возрастание потока – реакция на сжатие магнитосферы.

Так же для энергий электронов 1-2,7 МэВ после начала события наблюдаются повторяющиеся кратковременные возрастания потоков на расстоянии 4-5 L. Период повторения возрастаний потоков различен для каждой энергии. Причиной этого могло быть возникшее электрическое поле, зафиксированное обоими КА VAP-A и VAP-B в момент прихода импульса давления и длившееся около 1 минуты. Электроны при прохождении через область с электрическим полем ускорились и были зафиксированы VAP-A несколько раз повторно с периодом, совпадающим с теоретическим периодом дрейфа различным для каждой энергии. Эти «пики» в потоках электронов были зарегистрированы в течении всего 6-часового события на обоих КА VAP при каждом прохождении через область ~3.5-4.5 L.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА ПОПЕРЕЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДЖЕТОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Иванов А.Е., Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г., Березуцкий А.Г., Чибранов А.А., Логинов М.В.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, arteemiyy.iv@gmail.com

В настоящее время изучение протяжённых плазменных потоков или джетов представляет значительный интерес, поскольку подобные структуры широко наблюдаются в различных астрофизических объектах, а также в активных экспериментах в околоземном пространстве [1-2]. Лабораторное моделирование позволяет исследовать специфические процессы, сопровождающие распространение таких плазменных потоков, а также выявлять ранее не рассмотренные особенности их динамики.

На установке КИ-1 [3] выполнена серия экспериментов по распространению плазменных джетов в поперечном магнитном поле и фоновой плазме. Плоские твердотельные полиэтиленовые мишени облучались импульсами CO_2-лазера, в результате чего формировались коллимированные потоки лазерной плазмы, распространяющиеся в замагниченную водородную плазму. Характерные длины распространения джета достигали ~1,0 м. Диагностика проводилась с использованием магнитных и электрических зондов, а также системы сверхскоростной фоторегистрации и спектральной диагностики.

В ходе экспериментов получены данные, описывающих динамику плазменных потоков при различных условиях: распространение одиночного джета и взаимодействие встречных джетов в вакуумном магнитном поле и в замагниченной фоновой плазме. Впервые в экспериментах данного типа измерена продольная компонента магнитного поля – альфвеновское «крыло». Генерация продольной компоненты обусловлена натяжением силовых линий магнитного поля. Наблюдались две характерные фазы продольной компоненты: высокоскоростная фаза алфвеновской волны и фаза синхронная с распространением джета. В обоих фазах компонента поля B_x имеет разный знак с разных сторон потока. Важным отличием является зависимость от знака внешнего поля B_0. В первой фазе продольная компонента B_x меняет знак, а во второй изменения не происходит, что характерно для Холловского процесса.

Таким образом, экспериментальные результаты позволили обнаружить новые процессы в динамике плазменных джетов.

Работа выполнена в рамках научной программы НЦФМ "Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика" и при поддержке проекта РНФ № 24-62-00032.

1.R.E. Pudritz, M.J. Hardcastle, D.C. Gabuzda, Space Sci. Rev. 169, 2012, P 27–72
2. Bernhardt P. A. et al. Observations and theory of the AMPTE magnetotail barium releases //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 1987. – Vol. 92. –№. A6. – P. 5777-5794.
3. Захаров Ю. и др. Лазерная плазма и лабораторное моделирование нестационарных космических процессов, 1988

ДИНАМИКА ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Калегаев В.В. [1,2], **Азра-Горская К.Ж.** [1,2], **Власова Н.А.** [1], **Зыкина А.А.** [1,2]

1 НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия
2 Физический факультет МГУ
klg@dec1.sinp.msu.ru

Импульсы давления солнечного ветра могут инициировать быстрое ускорение энергичных электронов во внешнем радиационном поясе Земли, которое обусловлено генерацией импульсного индукционного электрического поля в магнитосфере. Интенсивность этих процессов связана как с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, так и с состоянием магнитосферы. Мы исследуем влияние импульсного электрического поля на динамику внешнего радиационного пояса во время геомагнитных возмущений, произошедших 8 января 2018 года и 22 июня 2015 года.

НЕТИПИЧНАЯ СУПЕРСУББУРЯ, ПОСЛЕДОВАВШАЯ ЗА ВНЕЗАПНЫМ НАЧАЛОМ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ 10-11 ОКТЯБРЯ 2024 Г.

Клейменова Н.Г.[1], Громова Л.И.[2], Громов С.В.[2], Малышева Л.М.[1], Дэспирак И.В.[3], Любчич А.А.[3]

[1]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия; kleimen@ifz.ru
[2]ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия
[3]Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты, Россия

Экстремально большая магнитная буря 10 октября 2024 г. (Dst_{min} = −335 нТл) была связана с подходом к магнитосфере Земли обширной области сжатой турбулентной плазмы (Sheath) и следующим за ней магнитным облаком. Эта магнитная буря началась на восстановительной фазе предшествующей умеренной бури с пиковым значением Dst_{min} = −148 нТл, 8 октября. Внезапное начало рассматриваемой бури (SC) было зарегистрировано 10 октября около 15:20 UT на фоне северного ММП *(Bz* ММП > 0), которое в 15:30 UT сменилось на южное при одновременном смене знака *By* ММП на отрицательный и возрастании динамического давления солнечного ветра с ~25 до ~35 нПа. Сразу после SC в дневном секторе полярных широт началась суббуря (обсерватории BCL, YKC), которая быстро возрастала, распространяясь к юго-западу, и достигла пика порядка 4000 (!) нТл рано утром (04-06 MLT) в авроральных широтах (в окрестностях обс. CMO). При этом сформировалась двух-вихревая токовая система DP2, подтверждающая значительное усиление ионосферной конвекции. В отличие от классической “Akasofu-type” суббури, начало обсуждаемой суперсуббури было необычным: (а) суббуря началась в дневном, а не ночном секторе, (б) вблизи полярной, а не экваториальной границы аврорального овала, (в) в фазу развития суббури ионосферный ток быстро распространялся к более низким, а не высоким широтам, (г) пиковая амплитуда суббури достигла порядка 4000 нТл в очень локальной области пространства. Заметим, что на более восточных обсерваториях BLC и YKC (08-09 MLT) пик интенсивности суббури отмечался на 10-12 мин раньше, чем на более западных обсерваториях. BRW и CMO (04-05 MLT). В области вечернего вихря на меридиане IMAGE (18-20 MLT) в обсерваториях NAL-HOR, находящихся на полярном краю вихря, наблюдалась отрицательная бухта, а на более низких (TRO-ABK) – положительная, т.е. разрыв Харанга располагался между арх. Шпицберген и береговыми станциями. Согласно модели APM (*Auroral Precipitation Model*), разработанной в ПГИ, распределения высокоширотных высыпаний, полярная границы аврорального овала находилась вблизи обсерваторий NAL-HOR, а береговые станции TRO-ABK оказались вблизи экваториальной границы аврорального овала. Было высказано предположение, что источником суперсуббури могли быть не процессы в хвосте магнитосферы, а вызванная скачком давления неустойчивость ранее захваченных электронов замкнутой магнитосферы.

ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ПОТОКИ И Pi2, Pi3 ПУЛЬСАЦИИ ПРИ ИЗОЛИРОВАННОЙ СУББУРЕ

Ковражкин Р.А.[1], Баишев Д.Г.[2], Глазунов А.Л.[1], Владимирова Г.А.[1]

[1]ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rostis@bk.ru
[2]ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия

В докладе (Ковражкин и др., Сборник тезисов 20-ой конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, 205, 2025) были представлены результаты анализа потоков сверхтепловых электронов в авроральной зоне (спектрометр ION на спутнике ИНТЕРБОЛ-2) и Pi2 пульсации (цепь канадских магнитных станций вблизи геомагнитной долготы ~305°). Измерения были проведены 09.01.1997 в период взрывной фазы суббури. В данной работе представлены результаты комплексного анализа потоков электронов и протонов в авроральной магнитосфере, а также иррегулярных геомагнитных Pi2 и Pi3 пульсаций при развитии той же суббури. AE- и AL-индексы в этот период достигали ~ 500 нТл и ~ -400 нТл соответственно. Возбуждение Pi2 и Pi3 пульсаций происходило на низкоширотных станциях в момент начала суббури. Для этих станций пульсации наблюдались в областях, сопряженных со всей авроральной зоной, включая полярную границу высыпания частиц, однако зона возрастания амплитуды пульсаций проецируется на центральный плазменный слой. Для высокоширотных станций зона возрастания амплитуды Pi2 и Pi3 пульсаций проецируется на приполярную область ночной авроральной зоны. Таким образом выявлено наличие двух зон возрастания амплитуды пульсаций: ближней и дальней. Показано, что возрастания Pi2 пульсаций в дальней зоне связаны с потоками квазипериодических электронов 0.2-3.5 кэВ, причем наблюдается корреляция потоков электронов и волновой формы Pi2. Период Pi3 пульсаций в дальней зоне составляет 180 с; показано, что точно такой же период имеют наблюдаемые в этой зоне временные дисперсионные инжекции протонов TDIS. Наличие двух зон возрастания амплитуды пульсаций может свидетельствовать о двух различных механизмах возбуждения Pi2 и Pi3. Для низкоширотной зоны генерация быстрой магнитозвуковой волны может осуществляться в результате резкого спада потока частиц и его торможения в плазменном слое при переходе силовых линий от вытянутых к дипольным, то есть – процессу диполизации магнитосферного поля. Взаимосвязь возникновения дисперсионных инжекций протонов TDIS в приполярной авроральной зоне с усилением Pi3 пульсаций в сопряженной области может означать одновременное образование вспышечных потоков протонов и альвеновской волны в результате импульсного магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы.

ЗАВИСИМОСТЬ ПЛАНЕТАРНОЙ И АВРОРАЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ОТ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ПОЛЯРНЫЕ ШАПКИ

Кузнецова Т.В.

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

Известно, что основным проявлением планетарной геомагнитной активности (ГА) являются магнитные бури, а основной вклад в изменение магнитного поля вносит возмущенный кольцевой ток. Dst индекс (Disturbance storm-time index)—ключевой показатель ГА, измеряющий возмущения магнитного поля Земли в низких широтах. Известно также, что при компоненте межпланетного магнитного поля (ММП), параллельной магнитному диполю Земли (Ме), определяющую роль в развитии больших возмущений играет скорость поступления энергии солнечного ветра к области взаимодействия межпланетного и земного магнитных полей на магнитопаузе, которая связана со скоростью пересоединения. Для описания мощности э/м источников солнечного ветра и направления их распространения используется вектор Пойтинга P, равный P=[ExB], где (E и B) – вектора электрического и магнитного полей солнечного ветра. В работе исследуется зависимость возмущенности от одной из трех независимых компонент вектора Пойтинга P – компоненты (Pm), параллельной вектору Ме и рассчитанной с учетом изменения взаимной ориентации векторов P и Ме при годовом и суточном движениях Земли [1]. Для расчета Pm используются измерения компонент ММП и скорости солнечного ветра (V) за 4 цикла солнечной активности (база данных omni). Показано, что при возмущениях до Dst-индекса ~ -80 nT Dst растет линейно с увеличением Pm независимо от его знака. Компонента Pm>0, связанная с э/м потоком солнечного ветра в северную шапку, довольно быстро выходит на режим насыщения (Dst не меняется при увеличении Pm). При Pm<0, то есть э/м потоке из северной шапки (от ионосферы) в южную шапку (к ионосфере) Dst растет постоянно до самых больших Dst ~ -350 nT в данных, без признаков насыщения. Итак, возникновение больших и очень больших бурь связано с компонентой вектора Пойтинга Pm<0. Ранее мы получили полугодовую вариацию Pm с пиками в мае и ноябре [2], поэтому в этой работе ищем связь этих пиков с взаимной ориентацией ММП и Ме. Расчеты показывают, что в первой половине мая компонента южного направления ММП Bm будет у ММП с $B_y<0$ независимо от знака B_x, а в первой половине ноября южная Bm будет при $B_y>0$ также независимо от знака B_x (GSE с.к.). Расчеты показывают, что самые большие значения южной Bm в мае будут при $B_x<0$, $B_y<0$, а в ноябре при $B_x>0$, $B_y>0$. Анализ показывает, что такое направление ММП отличается от спирали Паркера и наблюдается часто при пересечении гелиосферного токового слоя. Результат о пиковых значениях Bm южного направления в мае и ноябре также позволяет объяснить известный результат Нишиды о максимумах в мае и ноябре в полугодовой вариации (AL-индекса), описывающего интенсивность западного аврорального электроджета. Наземные наблюдения, на основе которых получают AL, выявляют только эквивалентные токи Холла, а токи Педерсена и FACs не имеют магнитных вариаций внизу ионосферы.

1. Kuznetsova T.V. and Laptukhov A.I. Contribution of geometry of interaction between interplanetary and terrestrial magnetic fields into global magnetospheric state and geomagnetic activity. Advances in Space Research. v. 47, 978–990, 2011.

2. Кузнецова Т.В. и Лаптухов А.И. Ответ полярной ионосферы на изменения в ориентации вектора Пойтинга вблизи орбиты Земли относительно геомагнитного момента. Солнечно-земная физика, вып. 12, том 2, стр. 215–217, 2008.

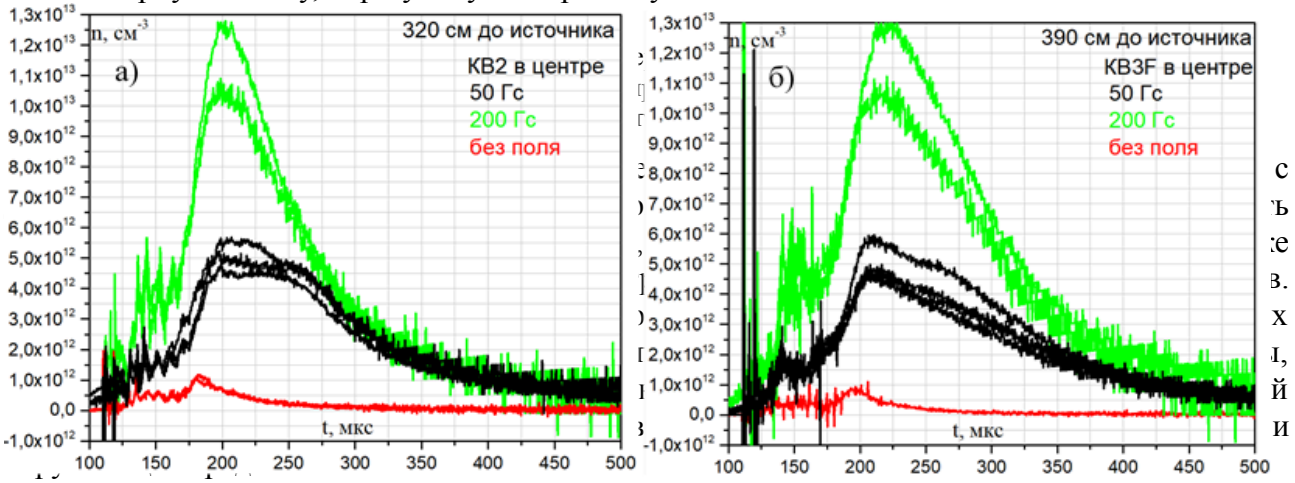
МОДЕРНИЗАЦИЯ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ В УСЛОВИЯХ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Логинов М.В., Шайхисламов И.Ф., Посух В.Г., Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Иванов А.Е.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, misha.logv@gmail.com

В 2025 году для исследовательской установки КИ-1[1-2] был разработан и запущен в работу новый измерительный зонд — двунаправленный коллектор ионов «КВ3». Его создание связано с потребностью в более точных и детальных методах диагностики, необходимых для лабораторного изучения нестационарных космических процессов на крупных экспериментальных лазерно-плазменных стендах.

В представленной работе описывается конструкция этого устройства, представляется принцип его действия и приводятся полученные с его помощью результаты. Произведено сравнение данных, полученных с помощью нового коллектора, с измерениями эталонного прибора «КВ2», который уже используется на установке (рисунок 1). Ключевая особенность «КВ3» заключается в возможности независимых одновременных измерений в двух направлениях. Это позволило исследовать как фоновую плазму, создаваемую тета-пинчем, так и лазерную плазму, образующуюся при облучении полиэтиленовой мишени.



Работа выполнена в рамках научной программы НЦФМ «Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика»

1. Y.P. Zakharov et al //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics, 369, № 1, p. 357-362, (1996).

2. I. F. Shaikhislamov et al //Plasma Physics and Controlled Fusion, 56, № 12, p. 125007, (2014).

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ИНДЕКСОВ AU, AL, ASY-H И SYM-H

Макаров Г.А.

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

За период времени с 1981 по 2015 гг. по среднесуточным значениям исследуются сезонные вариации геомагнитных авроральных *AU*, *AL* и среднеширотных *SYM-H*, *ASY-H* индексов при разном состоянии солнечного ветра (СВ) и разном направлении межпланетного магнитного поля (ММП). Весь массив данных подразделялся на 5 групп в зависимости от скорости *V* СВ, кроме того, данные рассматривались отдельно в отрицательном (–) и положительном (+) секторах ММП. Как и следовало ожидать, эффект секторов ММП в индексах четко проявляется: в (–) секторе ММП максимальные отклонения наблюдаются в первую половину года, в (+) секторе ММП – во вторую половину года. Такая картина прослеживается во всех группах *V*, при этом интенсивности *I* всех индексов увеличиваются пропорционально скорости СВ при сохранении формы кривых.

Чтобы выделить эффект секторов ММП в индексах были составлены разности их сезонных вариаций между (+) и (–) секторами ММП. Во всех группах получаются простые волны с максимальными отклонениями в осенние месяцы. Гармонический анализ этих волн показывает, что амплитуды первых гармоник разностей значительно превышают амплитуды вторых гармоник: *r1/r2* >10 для всех индексов. Фазы максимальных возмущенностей первых гармоник в среднем по 5-ти группам приходятся на октябрь: *f1(ΔAU)* на 1 число, *f1(ΔAL)* на 19, *f1(ΔASY-H)* на 11, *f1(ΔSYM-H)* на 13 октября, что согласуется с [1]. Установлено, что по мере увеличения <*V*> фазы *f1* всех индексов проявляют тенденцию к сдвигу на более раннее время: *ΔAU* на ~9 дней, *ΔAL* на ~2 дня, *ΔASY-H* и *ΔSYM-H* на ~7 дней. Аналогично меняется угол *α* между осью *R* системы координат *RTN* и касательной к силовым линиям ММП, определяющий направление потока ***S*** электромагнитной энергии СВ, набегающего на магнитосферу [2]. Угол *α*, рассчитанный по значениям *Br* и *Bt* компонент ММП, уменьшается от –52° в 1-й группе до –40° в 5-й группе, что соответствует «выпрямлению» силовой линии ММП по мере увеличения <*V*> [3] и изменению направления потока ***S***.

От эффекта секторов ММП можно освободиться, образуя полусуммы *Σ* сезонных вариаций индексов в (+) и (–) секторах ММП. Вариации *Σ(AU)*, характеризуются годовой волной с максимумом в летние месяцы во всех группах данных. Вероятно, это обусловлено воздействием освещенности в авроральной зоне [4]. Вариации *Σ* других индексов отличаются наличием равноденственных максимумов. Были составлены отношения *r2* полусумм *Σ* месячных значений индексов *AU*, *AL*, *ASY-H*, *SYM-H*, а также *Dst* и *Ap* к их среднегодовым уровням *I* в зависимости от <*V*>. Получилось, что отношения *r2(Σ)/I* для *AU*, |*AL*|, *ASY-H* и *Ap* меньше 0.2 и практически не зависят от скорости СВ. Для *SYM-H r2(Σ)/I* <–0.5, для *Dst r2(Σ)/I* <–1.4 и с ростом <*V*> они спадают как полиномиальные функции 3-й степени. Такой спад можно использовать для уточнения результатов, полученных в работах [5; 6], о том, что большие полугодовые вариации *Dst* возникают при малых уровнях возмущений. Подобие уменьшения отношений *r2(Σ)/I* для индексов *SYM-H* и *Dst* по мере увеличения <*V*> свидетельствует о том, что полугодовые вариации *Dst* при малых возмущениях обусловлены такими вариациями симметричной компоненты кольцевого тока *SYM-H*.

1. Russell C.T., McPherron R.L. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 22.
2. Данилов А.А., Макаров Г.А. // Геомагнетизм и аэрономия. 1982. Т. 22, №5. С.791.
3. Акасофу С.И., Чепмен С. // Солнечно-земная физика. 2-я ч. М.: Изд. МИР. 1975, 512 с.
4. Burch J.L. // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. P. 1047.
5. Mursula K, Karinen A. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. L14107.
6. Lockwood M. et al. // J. Space Weather and Space Climate, 2020. V. 10. P. 23.

ТРИГГЕРНОЕ ПРЕКРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ PC1 (ЖЕМЧУЖИН)

Пархомов В.А.[1], **Мишин В.В.**[2], **Марчук Р.А.**[2], **Еселевич В.Г.**[2], **Хомутов С.Ю.**[3], **Сафаргалеев В.В.**[4]

1. Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Россия,
2. Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия
3. Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка, Камчатский край
4. С-Пб филиал Института земного магнетизма, аэрономии и распространения радиоволн РАН, г. Санкт-Петербург

Обширные литературные данные, в том числе свежий обзор [Guglielmi & Dovbnya, 2025], показывают, что генерации геомагнитных пульсаций типа Pc1 (T = 0.5 – 5 с) (жемчужин) либо предшествует стадия трудноуловимых процессов в магнитосфере Земли, приводящих к развитию ионно-циклотронной неустойчивости в радиационных поясах, либо Pc1 индуцируются воздействием межпланетных ударных волн на магнитосферу или развитием в ней взрывных процессов типа суббури. Как отмечают авторы цитированного обзора, несмотря на долгую историю исследований пульсаций Pc1, их природа остается еще далеко не выясненной.

В представляемом докладе приводятся результаты наблюдений пульсаций типа Pc1 на широко разнесенных по долготе наземных станциях в событии 23.02.2014. Пульсации наблюдались в интервале, когда в солнечном ветре на спутнике WIND наблюдалось резкое усиление концентрации альфа частиц (до $n_\alpha \leq 4см-3$). Частота пульсаций соответствовала гирочастоте альфа частиц на L–оболочках станций, где эти пульсации наблюдались. Резкое прекращение генерации жемчужин наблюдалось на обсерваториях ночного MLT–сектора после резкого импульса давления солнечного ветра и южной компоненты ММП, что вызвало сжатие дневной магнитопаузы почти на $2R_E$ и взрывное усиление индекса геомагнитной активности SME в течение 4 мин от 60 нТл до 336 нТл при необычном преобладании восточного электроджета: SMU=266 нТл. Т.о., резкое усиление геомагнитной активности вызвало срыв генерации пульсаций Pc1.

1. Guglielmi A.V., Dovbnya B.V. // Trigger excitation of "pearls" in the Earth's magnetosphere: On the 90th anniversary of the discovery of Pc1 waves // 2025// arXiv:2601.01148 [physics.geo-ph]

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ В ИНТЕРВАЛЕ 08-18.10.2017 Г. ПО ДАННЫМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ NOAA/POES

Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Попова Т.А.

ПГИ, г. Апатиты, Россия

tyahnina@gmail.com

В работе проведен анализ высыпаний энергичных (~40кэВ) протонов в интервале 08-18.10.2017 по данным низкоорбитальных спутников NOAA/POES. Этот интервал включает умеренную магнитную бурю. Рассматриваемые изолированные высыпания энергичных протонов в анизотропной зоне к экватору от границы изотропии протонов были разделены на две группы. Первая группа включала высыпания, не связанные с высыпанием релятивистских (~800 кэВ) электронов, во второй группе протонные высыпания всегда сопровождались высыпанием релятивистских электронов. Проведено сравнение характеристик, таких как: количество случаев наблюдения, поток высыпающихся частиц, геомагнитная широта и локализация по MLT для указанных групп. Показано, что количество высыпаний первой группы примерно в 6 раз превышало количество высыпаний второй группы. При этом интенсивность высыпаний первой группы заметно уступала интенсивности второй группы. Геомагнитная широта высыпаний первой группы в среднем была выше на 5 градусов, чем для второй группы. Максимальное число случаев первой группы наблюдалось в предполуденном секторе MLT, тогда как высыпания второй группы, т.е связанные с высыпаниями релятивистских электронов, - в послеполуденном секторе MLT. Наряду с высыпаниями протонов в окрестности проекции их источника (обс. Ловозеро) анализировались пульсации диапазона Pc1. Полученные результаты могут быть использованы для локализации области ионно-циклотронной неустойчивости и определения ее характеристик.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЖНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ (3-4 R_E) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Н.Ф.Смирнова[1], Г.Станев[2]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nsmirnova@romance.iki.rssi.ru*
[2]*ИКИТ БАН, г. София, Болгария, geoantstan@gmail.com*

Результаты измерения потенциала спутника *ИНТЕРБОЛ-2* относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 используются для изучения концентрации электронов в зависимости от геомагнитной активности. *ИНТЕРБОЛ-2* был запущен 29 августа 1996 года, через три месяца после начала 23-го цикла и находился ~2.5 года на орбите с наклонением 62.8°, перигеем 769 км и апогеем 19211 км. В этой работе анализируются результаты, полученные с октября 1996 по март 1998 годов. Этот интервал характеризуется очень низкой солнечной активностью. Индекс Kp=7, характеризующий сильный шторм (в среднем 200 раз за цикл), наблюдался только 8 раз за изучаемый период. В докладе приводятся примеры определения концентрации электронов при Kp=7-, а также при Kp=5-,5 (слабый шторм), Kp=4 (активно), Kp=3-,3 (слабая активность), Kp=0+,1-,2- (тихо).

Для определения концентрации электронов на основе измерения потенциала спутника применяется методика А. Педерсена, основанная на том, что при положительном потенциале спутника относительно потенциала плазмы баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании концентрации электронов [1]. Эта методика проверена на многих космических аппаратах, но имеет ограничения. В настоящее время известна работа [2], в которой на основе данных миссии *MMS* показано, что при большой волновой активности потенциал спутника может возрасти, и определение плотности на его основе может привести к физически неверным результатам. Согласно методу А. Педерсена потенциал измеряется только датчиком электрических полей. На спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* потенциал измерялся датчиком электрических полей ИЭСП-2, а также другим зондовым прибором, датчиком электронной температуры КМ-7. Плотность фототока насыщения Jph0 определяется на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника V_S относительно плазмы ИЭСП-2 и КМ-7. ИЭСП-2 измерял потенциал с частотой опроса 400 мс, а цикл работы КМ-7 составлял 5.12 с, поэтому плотность фототока насыщения Jph0 и электронов определялись с интервалом 5.12с [3]. Для определения концентрации электронов применялась модель: $Jph(V)=Jph0\exp(-V_S/2.1)$ [4].

На аппарате *POLAR,* который летал одновременно с *ИНТЕРБОЛ*-2, определялась концентрация электронов на основе измерения датчиком электрических полей (EFI) потенциала спутника с частотой менее 1мс [5]. Измерения с большой частотой на спутнике *POLAR* позволяют выявить мелкие вариации концентрации электронов. По данным спутника *POLAR* наибольшие значения плотности электронов регистрируются в отсутствие геомагнитной активности (Kp=0..1). Это подтверждается результатами *ИНТЕРБОЛ-2,* которые, дополнительно, показывают, что при Kp<3 и отсутствии вспышек фототок и концентрация электронов не изменяются в течение 5.12 с, цикла работы КМ-7. Отметим, что фототок слабо связан с рентгеном, но влияние вспышек на фототок объясняется тем, что всплески крайнего ультрафиолетового излучения ($250<\lambda<1350$ Å) сопровождают рентгеновские вспышки. Концентрация электронов в полярной шапке составляла, в основном, 1-10 см$^{-3}$, в более спокойные периоды до 15 см$^{-3}$; в авроральной области 10-45 см$^{-3}$.

1. Pedersen A. //*Ann. Geophys.*, V.13, pp.118–121, 1995.
2. Graham D.B., Vaivads A., Khotyaintsev Yu.V. et al. //2018, *JGR*, doi: 10.1029/2018JA025874
3. Smirnova N.F. and G. Stanev //Geom. Aeron., 2009,V.49, N 8, P.1204-1207
4. Смирнова Н.Ф.,Станев Г. //Космич. исслед. 2023. Т. 61. № 3. С. 202-214
5. Laakso H., Opgenoorth H., Wyganth J., et al. //ESA SP-415. 1997. P.53-58.

НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭФФЕКТ ДЛЯ АНИЗОТРОПИИ ПИТЧ-УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, smolinsv@inbox.ru

Предложена новая феноменологическая модель [1] предсказания (прогнозирования) перпендикулярного (для питч-угла 90 градусов) индекса анизотропии питч-углового распределения заряженных частиц на геостационарной (геосинхронной) орбите (ГСО) в магнитосфере Земли, а также на любой круговой орбите в зависимости от местного времени LT на орбите и Kp – индекса геомагнитной активности. Проведено сравнение модели с многочисленными экспериментальными данными спутника CRRES. Доказано, что общая аналитическая зависимость перпендикулярного индекса анизотропии питч-углового распределения заряженных частиц на ГСО, полученная в первом приближении, может быть использована для магнитоспокойных условий ($0 \le Kp \le 3$) для количественных прогнозов и сравнений с экспериментальными данными на ГСО. Теоретически предсказан нелинейный эффект для разности между максимальным значением перпендикулярного индекса анизотропии питч-углового распределения заряженных частиц и минимальным значением перпендикулярного индекса анизотропии (в местную полночь LT = 0 ч) на ГСО от Kp – индекса геомагнитной активности. Нелинейный эффект для анизотропии питч-углового распределения заряженных частиц будет, вероятно, в той или иной степени и на других радиальных расстояниях от Земли.

1. *Smolin S.V.* Nonlinear Effect for Anisotropy of Charged Particle Pitch Angle Distribution at Geostationary Orbit // J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys., 2024. V. 17. N 5. P. 644–653. EDN: VXURMY.

ЭКСПЕРИМЕНТ «УФ АТМОСФЕРА» НА МКС В КОНТЕКСТЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Суровцев Н.В.[1], Николаева В.Д.[2], Климов П.А.[1,2], Артемьев А.В.[3], Сараев Р.Е.[1,2]

[1]*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия, surovcevnv@my.msu.ru*

[2]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*

[3]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

На борту Международной космической станции (МКС) одновременно работают несколько научных приборов, позволяющих проводить исследования динамики энергичной компоненты радиационных поясов и их воздействия на верхнюю атмосферу.

На японском модуле расположены астрофизические приборы CALET и MAXI, основными научными задачами которых является исследование ускорения космических лучей и гамма-всплесков. Однако в составе CALET расположены детекторы, которые могут использоваться для измерения потока электронов с энергией приблизительно >1,6 МэВ и >3,6 МэВ. В MAXI имеется монитор радиационных поясов, RBM, измеряющий потоки электронов с энергией >0,3 МэВ с временным разрешением 1 с.

Телескоп «УФ атмосфера» работает с 2019 года на российском сегменте МКС и, одновременно, обладает широким полем зрения (40°), высокой чувствительностью (площадь входного окна 490 см^2) и высоким временным разрешением (2,5 мкс). Это позволяет регистрировать различные транзиентные типы свечения в атмосфере Земли. В основном, «УФ атмосфера» нацелен на исследования грозовых явлений (ELVES, sprites, blue jets), но в высоких широтах может регистрировать как пульсирующие полярные сияния (ППС), так и открытые недавно оптические микровсплески (OMB). Подобные исследования ранее не проводились при помощи данной аппаратуры.

Наклонение орбиты МКС (~52°) не позволяет детектору пролетать над овалом полярных сияний на каждом витке орбиты, однако в восточном полушарии в районе США и Канады это возможно, особенно в условиях умеренных и сильных геомагнитных возмущений, когда овал расширяется и его экваториальная граница смещается на юг. С 2019 года проведено более 150 сеансов измерений, в течение каждого сеанса МКС совершает от 6 до 10 оборотов вокруг Земли на разных долготах и периодически оказывается в Канадском секторе.

Для всех сеансов был проведен анализ геофизической обстановки, буревой и суббуревой активности (Dst-вариация и AU-, AL-индексы). Во время наиболее интенсивной суббури, зафиксированной во время работы детектора “УФ атмосфера” (Сеанс №87, 17.07.2023, 18:38 — 18.07.2023, 7:53 UT), был произведен анализ данных наземной сети канадских магнитометров CARISMA и показано, что геомагнитные возмущения распространяются на юг до широт пролета МКС. При этом камеры всего неба сети THEMIS регистрировали пульсирующие полярные сияния. Для этого события были проанализированы измерения энергичных заряженных частиц с CALET и MAXI одновременно с оптическим откликом атмосферы по данным детектора “УФ атмосфера”.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-62-00010 (https://rscf.ru/project/22-62-00010/).

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ НА ЭЛЕКТРОННЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ МАСШТАБАХ В ПРИСУТСТВИИ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ: САМОСОГЛАСОВАННАЯ СТРУКТУРА И УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М.

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

В работе исследуется самосогласованная конфигурация интенсивных токовых слоев электронного масштаба (Electron-Scale Current Sheets - ECS), наблюдаемых вблизи нейтральной плоскости в присутствии ведущего поля ($\mathbf{B}_M$), во время распространения быстрого плазменного потока в экстремально горячем плазменном слое.

Исследуемые ECS с плотностью тока j~100 нА/м^2 имеют специфическую одномерную плоскую конфигурацию, которая самосогласованно поддерживается тонким балансом между центральным продольным током и поперечными токами в южном и северном краях слоя. Продольный ток переносится сверхтепловым высокоскоростным электронным пучком, тогда как поперечные токи обеспечиваются диамагнитным и **E**x**B** дрейфами вследствие наличия сильного амбиполярного электрического поля (~50 мВ/м).

Показано, что сильный электрический ток в ECS может существовать без сильной электронной анизотропии благодаря вкладу диамагнитного и **E**x**B** дрейфов. Было установлено, что основной вклад в вертикальный баланс давлений в ECS вносит не увеличение ведущего магнитного поля, а рост электронного давления. Обнаружено, что связанное с ECS сильное амбиполярное электрическое поле может ускорять продольные электронные пучки, обеспечивая прирост энергии до ~ (6–8) кэВ. Такое ускорение может иметь каскадный характер, порождая новые ECS в других областях плазменного слоя.

Результаты исследования проливают новый свет на механизмы формирования интенсивных ECS и иллюстрируют разнообразие магнитных структур, которые могут существовать в горячей бесстолкновительной плазме.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-42-00028.

МНОЖЕСТВЕННЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА, И ИХ РОЛЬ В ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Григоренко Е.Е., Леоненко М.В., Du C., Зеленый Л.М., Fu H.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, elenagrigorenko2003@yandex.ru

В работе выполнено исследование структуры и эволюции интенсивных электронных Сверхтонких Токовых Слоев (СТС), наблюдаемых вблизи области вторичного электронного микро-пересоединения в Плазменном Слое (ПС) геомагнитного хвоста спутниками MMS. Множественные СТС часто наблюдаются в ПС во время распространения ионных потоков, ускоренных в первичном макро-пересоединении. СТС генерируются электронными пучками, ускоренными в источниках отличных от источника, ускорившего ионный поток. Одним из возможных источников ускорения электронных пучков в ПС считается вторичное микро-пересоединение, происходящие на электронных кинетических масштабах.

В данной работе мы сообщаем о возможности дополнительного ускорения электронных пучков в процессе эволюции самих СТС, которые по свей сути являются динамическими токовыми структурами. Наблюдения MMS вблизи области вторичного микро-пересоединения, но за пределами его Электронной Диффузионной Области (ЭДО), показали, что ускоренные в ЭДО электронные пучки формируют токовые филаменты параллельные магнитному полю (**B**). В процессе своей эволюции филаменты сливаются в 1D слой с током **J** параллельным **B**. В результате генерируется индукционное электрическое поле, направленное вдоль электрического тока в слое и способное ускорять токонесущую компоненту вдоль **B**, приводя к дальнейшей интенсификации и утоньшению электронного слоя. При наличии в СТС достаточно большой плотности замагниченных электронов, самосогласованное усиление индукционного электрического поля, направленного вдоль **J,** не приведет к развитию токовой неустойчивости и разрушению слоя. Вместо этого ток J поворачивается в направлении перпендикулярном магнитному поля, за счет дрейфа замагниченных электронов **ExB** вблизи краев слоя. Так как толщина слоя порядка электронного гирорадиуса, то ионы в этом дрейфе не участвуют, и, в результате формируется новый СТС с уже перпендикулярным током, переносимым дрейфующей электронной популяцией $J_{ExB} \sim -e \cdot n \cdot [E \times B]/B^2$ $J_{ExB} \sim -e \cdot n \cdot [E \times B]/B^2$. Возникновение нового перпендикулярного СТС сопровождается генерацией нового индукционного электрического поля, направленного уже вдоль тока $\mathbf{J}_{ExB}$. Это поле будет дополнительно ускорять дрейфующую токонесущую электронную популяцию, что приведет к усилению $\mathbf{J}_{ExB}$ и соответствующему ослаблению «материнского» продольного тока. Дальнейшая интенсификация перпендикулярного тока ограничена временем существования первичного индукционного электрического поля, обеспечивающего **E** x **B** дрейф. Наблюдаемые индукционные поля имеют амплитуду порядка нескольких мВ/м и способны дополнительно ускорить токонесущую электронную компоненту до энергий ~ 1 кэВ. Эти ускоренные электроны, в свою очередь, сформируют новые СТС в соседних областях ПС. Таким образом, динамические СТС могут быть источниками дополнительного ускорения электронов и тем самым способствовать каскадной генерацией СТС в ПС без необходимости множественных актов вторичных микро-пересоединений. Необходимым внешним триггером для запуска такого каскадного процесса является распространение быстрого ионного потока и хотя бы одно вторичное микро-пересоединение, ускорившее «затравочные» электронные пучки.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-42-00028, https://rscf.ru/project/25-42-00028/»

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ, БЛАГОПРИЯТНЫХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТОКОВЫХ СТРУКТУР В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА

Петровский И.Д., Григоренко Е.Е., Леоненко М.В., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, petrovskii.id@phystech.edu

В работе выполнен статистический анализ частоты наблюдения Электронных Сверхтонких Токовых Структур (ЭСТС) в зависимости от макроскопических характеристик в Плазменном Слое (ПС) геомагнитного хвоста. Данное исследование направлено на изучение вопроса о возможных триггерах, необходимых для генерации множественных интенсивных (плотность тока $J \geq 30$ нА/м^2) ЭСТС в различных областях ПС. Для анализа рассмотрено 2580 интервалов наблюдения спутников MMS в быстрой моде за 2017–2023 гг. Интервалы были разделены на 2 группы согласно положению MMS вдоль линии Солнце-Земля: 1) $10\ R_E \leq |X| < 15\ R_E$ («ближний» ПС); 2) $|X| \geq 15\ R_E$ («средний» ПС). Затем каждая группа интервалов была разделена еще на 3 подгруппы согласно секторам хвоста: i) утренний ($-1 \leq Y/|X| \leq -0.5$); ii) полуночный ($-0.5 < Y/|X| < 0.5$); iii) вечерний ($0.5 \leq Y/|X| \leq 1$); X, Y – координаты MMS в системе GSE. Для каждого интервала была рассчитана частота (f) наблюдения пиков тока с $J \geq 30$ нА/м^2, которая рассматривалась как мера числа ЭСТС. В результате, обнаружено наличие асимметрии “утро-вечер” в распределении числа ЭСТС — на утреннем секторе ПС среднее значение f меньше в ~3 раза, чем на вечернем или полуночном секторе ПС для области «ближнего» ПС и меньше в ~2 раза для «среднего» ПС.

С целью выяснения макро-триггеров для генерации ЭСТС, для каждого интервала были определены следующие параметры: максимум модуля и среднеквадратичное отклонение 1) компоненты ионной потоковой скорости $\boldsymbol{V}_{i,xy}$ (для «ближнего» ПС) или $\boldsymbol{V}_{i,x}$ (для «среднего» ПС); 2) плотности кинетической энергии ионного потока $n\boldsymbol{V}_i^2$, 3) электрического поля конвекции $\boldsymbol{E}^{conv} = [\boldsymbol{B}\times\boldsymbol{V}_i]$ и 4) компоненты магнитного поля $\boldsymbol{B}_y$. Исследованы корреляции между указанными выше макро-параметрами и частотой наблюдения ЭСТС f, а также вычислены распределения доли интервалов с ненулевыми значениями частоты f в зависимости от этих параметров.

Обнаружено, что все рассматриваемые статистические параметры во всех исследуемых областях ПС имеют умеренную положительную корреляцию (со значением коэффициента корреляции Кендалла τ ~0.45-0.55) с величиной f. Вместе с возрастанием любого из этих параметров, доля интервалов с ненулевыми значениями f постепенно возрастает, приближаясь к 1. В частности, условия на ионную потоковую скорость $\max|\boldsymbol{V}_{i,x(y)}| > 800$–$1000$ км/с или на поле конвекции $\max|\boldsymbol{E}^{conv}| > 10$-$15$ мВ/м фактически являются достаточными для наличия ЭСТС. Но для каждого из параметров невозможно определение порогового значения, разделяющего интервалы с нулевыми и ненулевыми значениями f — любое такое значение приводит как минимум к ~15-20% ошибок. Таким образом, определение необходимого и достаточного условия для генерации ЭСТС с использованием рассматриваемых макро-параметров пока не представляется возможным.

Помимо этого, для каждого интервала из выборки определено число биполярных вариаций ($N_{\delta Bz}$) компоненты магнитного поля $\boldsymbol{B}_z$ на протяжении интервала. Установлено, что для данной выборки интервалов выполнение условия $N_{\delta Bz}>0$ гарантирует ненулевое значение f. Однако, в ~80% интервалов с ненулевой частотой f имеем $N_{\delta Bz}=0$. Невозможность определения параметра(ов) в ПС необходимого и достаточного для генерации ЭСТС может

быть связана с их не локальной генерацией в ПС, а также с каскадным характером их генерации в ПС, для развития которого необходимо некоторое время.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-42-00028.

СВЕРХТОНКИЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В ВЕДУЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ: ПРЕДЕЛЫ ПРИМЕНИМОСТИ СТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ

Царева О.О., Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Малова Х.В., Попов В.Ю., Зеленый Л.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, olga8.92@mail.ru

Одномерная самосогласованная модель сверхтонкого токового слоя (СТС), включающая квазиадиабатические ионы и электроны, а также замагниченную электронную популяцию, обобщена на случай конфигурации с ненулевым ведущим (шировым) магнитным полем $B_y(z)$ [1]. В рамках модели построен равновесный переход от интенсивных СТС, поддерживаемых квазиадиабитическими электронами при слабом шире ($B_y^{max}/B_\infty \leq 0.3$), к более толстым и слабым токовым слоям, поддерживаемым замагниченными электронами при сильном шире ($B_y^{max}/B_\infty \geq 0.7$), что приближает систему к квази-бессиловой конфигурации.

Сравнение модели с анализом 181 MMS пересечения СТС в хвосте магнитосферы, выявило фундаментальное противоречие. Наблюдаемые слои в сильном ведущем поле остаются сверхтонкими и интенсивными, демонстрируют явную нестационарность и сопровождаются генерацией сильного электрического поля, тогда как любые стационарные равновесные решения модели (включая случай с искусственно фиксированной 20% размагниченной электронной популяцией, что соответствует данным MMS) предсказывают для сильного ведущего поля существенно более толстые и слабые слои.

Таким образом, стационарная модель не воспроизводит ключевые параметры наблюдаемых СТС в сильном ведущем поле, что указывает на принципиально динамическую, неравновесную природу этих образований.

Также представлены предварительные результаты двумерной модели, в которой ведущее поле $B_y(x, z)$ медленно убывает с удалением от Земли вдоль x, что позволяет сохранять квазиадиабатический инвариант $I_z = (2\pi)^{-1} \oint p_z dz$ для быстрых колебаний вдоль z. Данная модель служит для дальнейшего изучения самосогласованных конфигураций в рамках стационарного подхода.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 25-42-00028.

1. Tsareva, O.O., Leonenko, M.V., Grigorenko, E.E., et al.// JGR 2025. V. 130. P. e2025JA034238.

СВЕРХТОНКИЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ: ОСНОВНЫЕ КЛАССЫ И СВОЙСТВА

Малова Х.В.[1,2], Попов В.Ю.[2,3], Царева О.О.[2], Левашов Н.Н.[2], Зеленый Л.М.[2]

[1]НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, hmalova@yandex.ru
[2]ИКИ РАН, г. Москва, Россия
[3]Физ.ф-т МГУ, г. Москва, Россия

В процессе спутниковых исследований обнаружено, что на ночной стороне магнитосферы Земли находится низкоширотный протяженный токовый слой толщиной порядка 10-20 тыс. км. Долгое время теоретические модели описывали его как двумерное МГД равновесие, поддерживаемое градиентами давления плазмы [1]. Во время магнитосферных возмущений токовый слой магнитосферы утоньшается, превращаясь в почти одномерный плоский слой толщиной от одного до нескольких протонных гирорадиусов. Он оказался кинетическим плазменным равновесием, для которого характерны многомасштабность, анизотропия давлений и различная динамика плазменных популяций. Так, основные токовые носители - протоны движутся в квазиадиабатическом режиме, размагничиваясь в нейтральной плоскости, а электроны могут быть полностью или частично замагниченными. Баланс давлений в таком слое поддерживается инерцией ионов, пересекающих слой. Наблюдения многоточечных миссий CLUSTER, THEMIS и др. привели пониманию триггерной роли тонких слоев в процессах преобразования энергии во время магнитосферных возмущений, солнечных вспышек, корональных выбросов масс [2]. Благодаря миссии космических аппаратов MMS с высоким разрешением в плазменном слое магнитосферного хвоста был выявлен еще один тип токовых структур - сверхтонкие токовые слои с толщинами электронных масштабов - от одного до нескольких десятков км. В ряде случаев протонные токи были пренебрежимо малы по сравнению с интенсивными токами, переносимыми электронной популяцией. Подобные сверхтонкие слои оказались нестационарными структурами, которые быстро образовывались и быстро разрушались, причем в их окрестности, как предполагается, каскадным образом возникали новые сверхтонкие слои [3]. Проведенный анализ позволил выделить отдельные классы токовых слоев, различные по происхождению, структуре и динамике. Обсуждаются дальнейшие пути развития теории сверхтонких электронных слоев в космической плазме.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-42-00028.

1. Зелёный Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А. // Физ.Плаз. 2011. Т. **37.** Р. 137.
2. Зеленый Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю. // УФН 2016. Т. **186**. С. 1153.
3. Зелёный Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю., Царева О.О, Леоненко М.В. //УФН 2025. Т.**195.** С. 807.

ВЛИЯНИЕ НОРМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОКОВОГО СЛОЯ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА

Домрин В.И. [1], **Малова Х.В.** [1,2], **Попов В.Ю.** [3,2,4], **Калегаев В.В.** [1], **Мингалев О.В.** [5], **Григоренко Е.Е.** [2], **Зеленый Л.М.** [2]

[1]*НИИЯФ МГУ, Москва, Россия*
[2]*ИКИ РАН, Москва, Россия*
[3]*Физ. Ф-т МГУ им М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[4]*НИУ «Высшая школа экономики»,Москва, Россия*
[5]*Прикладной Геофизический Институт, Апатиты, Россия*
hmalova@yandex.ru

В рамках численной модели исследованы процессы эволюции токового слоя магнитосферного хвоста во время геомагнитных возмущений, когда происходит его утоньшение от десятков тыс. км до толщины порядка нескольких протонных гирорадиусов (до 1 – 4 тыс. км). В подобной предельно тонкой токовой структуре движение большинства протонов становится квазиадиабатическим – они размагничиваются в нейтральной плоскости, при этом один из интегралов движения (I_z - аналог магнитного момента) приближенно сохраняется [1-2]. До сих пор неясен вопрос о влиянии нормальной магнитной компоненты на формирование тонкого токового слоя, его структуру и динамику. Построена численная кинетическая модель, основанная на методе крупных частиц, которая описывает процесс утоньшения токового слоя из «толстого» состояния в «тонкое». Нормальная магнитная компонента считалась внешним варьируемым параметром в системе. Расчеты показали, что нормированная на тангенциальное магнитное поле на краях слоя величина нормальной магнитной компоненты b_n, в случае ее увеличения, оказывает существенное влияние на динамику протонов – носителей тока, способствуя их переходу на квазизахваченные траектории. Выявлено критическое значение безразмерного параметра b_n>0.4, при превышении которого формирование стационарной токовой конфигурации не реализуется, чему мешают отрицательные локальные токи популяции квазизахваченных протонов на хаотических траекториях, которые деформируют профиль плотности тока и вызывают хаотические колебания решений, препятствуя установлению самосогласованной конфигурации. Определен диапазон параметров b_n от 0.05 до 0.3, при котором тонкий слой может формироваться [3].

Работа выполнена в рамках РНФ гранта 25-42-00028.

1. Зелёный Л.М., Малова Х.В., Артемьев А.В., Попов В.Ю., Петрукович А.А. // Физ.Плаз. 2011. Т. **37.** С. 137.
2. Büchner J., Zelenyi L.M. // J. Geophys. Res. 1989. V. **94**. P. 11821.
3. Домрин В.И., Малова Х.В., Попов В.Ю., Калегаев В.В., Мингалев О.В., Григоренко Е.Е., Зеленый Л.М. // Косм. Иссл. 2026. Т. **64**. (принято к печати)

О РОЛИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА В ПРОНИКНОВЕНИИ ПЛАЗМЫ МАГНИТОСЛОЯ ЧЕРЕЗ ДНЕВНУЮ МАГНИТОПАУЗУ

Коурова Е.А.[1], Дмитриев А.В.[1], Мишин В.В.[2]

[1] *НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, kourovaea@my.msu.ru*

[2] *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Исследуется проникновение плазмы в дневную магнитосферу при локальной деформации магнитопаузы во время взаимодействия с быстрыми плазменными струями магнитослоя по данным миссии THEMIS. Согласно теоретическим представлениям [1], ускоренные движения магнитопаузы могут усиливать неустойчивость Кельвина-Гельмгольца за счёт эффекта Рэлея-Тейлора, возникающего при ускоренном расширении магнитосферы. Анализ последовательных пересечений магнитопаузы тремя спутниками THEMIS, разнесенными на десятые доли Re, позволил определить два значения скорости границы, по которым было рассчитано ее ускорение. Метод использует эмпирическую модель магнитопаузы для ее описания в моменты пересечения и вычисления её смещения вдоль нормали. Величины ускорения варьируются в диапазоне от ~0.01 до ~10 км/с². Установлено, что проникновение плазмы, как правило, не наблюдается при ускорениях, меньших 1 км/с². Проникновение и значительные ускорения преобладают на удалении более 20° от подсолнечной точки, где стабилизирующее влияние магнитного поля ослаблено, и возникают значительные тангенциальные потоки плазмы, что благоприятно для развития неустойчивости Рэлея-Тейлора. Совместный анализ длительности и величины ускорения показал, что проникновение плазмы происходит преимущественно при высоких скоростях смещения границы. Проведена оценка инкремента неустойчивости Рэлея-Тейлора для случаев без проникновения, и определен нижний порог для проникновения ~0.04 $с^{-1}$. Полученные результаты согласуются с моделью, в которой ускорение границы, вызванное взаимодействием с быстрыми струями магнитослоя, приводит к развитию неустойчивости, обеспечивающему транспорт плазмы через магнитопаузу.

1. Mishin V.V. Accelerated motions of the magnetopause as a trigger of the Kelvin-Helmholtz instability// J. Geophys. Res. 1993 V. 98, No A12, P. 21365-21371.

MAGNETOPAUSE CURRENT SHEET PROPERTIES IN THE SPERF LABORATORY PLASMA FACILITY

Apatenkov S.V., , He X., Mao A., Yang X., Wang X.

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia, apatenkov@mail.ru

Harbin Institute of Technology, Harbin, China

The laboratory experiment simulating the solar wind and Earth dipole interaction has been conducted in Harbin at SPERF facility. The electric current pulse in the coils produces plasma with increasing plasma density and frozen-in magnetic field, the plasma propagates toward the dipole coil with low density plasma. This interaction produces the structure resembling the Earth's magnetopause.

In this study we investigate the structure of the magnetopause current sheet. The array of up to 50 magnetic sensors allows to get the structure of the electric current, its geometry, profiles and kinematic properties such as propagation speed and directions. We show the deceleration of the magnetopause when approaching to Earth, the current density and thickness evolution. Also we discuss the current carriers which are mostly electron in this case and possible physical mechanism of the current formation.

ОСНОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ ВСПЫШЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ

Франк А.Г.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

Основная цель исследования токовых слоёв в лабораторных экспериментах состоит в реализации вспышечных явлений в замагниченной плазме, изучении этих явлений и сопоставлении с процессами в космическом пространстве. Для этого необходимо, прежде всего, обеспечить эффективную концентрацию магнитной энергии в процессе формировании токового слоя. Затем, при определённых условиях, может происходить явление типа вспышки, т.е. быстрое преобразование магнитной энергии в энергию потоков плазмы, ускоренных частиц и излучений.

Эффективная концентрация магнитной энергии при развитии токового слоя возможна, если магнитное поле «вморожено» в плазму и переносится при её движениях. Критерием вмороженности является достаточно большое значение магнитного числа Рейнольдса: $Re_m = 4\pi\sigma Lv/c^2 >> 1$. Если для объектов в космосе это условие всегда выполняется в силу гигантских пространственных масштабов L, то при проведении лабораторных экспериментов необходимо, чтобы проводимость плазмы σ была достаточно высокой. Проблема вмороженности осложняется развитием неустойчивостей при возбуждении в плазме электрического тока, что приводит к резкому уменьшению проводимости, которая становится аномально низкой, т.е. значительно ниже кулоновской проводимости, и имеет «турбулентный» характер. Таким образом, требуется обеспечить условие вмороженности при ограниченных масштабах лабораторных установок, и, главное, при аномально низкой турбулентной проводимости плазы. Как показали предыдущие эксперименты, удовлетворительное решение данной проблемы может быть получено при соответствующем выборе начальных условий. Одно из наиболее существенных условий – это значительное увеличение плотности начальной плазмы, что приводит к заметному увеличению проводимости. В результате удается обеспечить выполнение условия вмороженности в течение интервала времени порядка нескольких микросекунд и сформировать токовый слой, обладающий значительным запасом магнитной энергии.

В большинстве случаев токовые слои отличаются высокой стабильностью, что препятствует следующей стадии процесса, т.е. разрыву токового слоя и преобразованию накопленной магнитной энергии в потоки плазмы и ускоренных частиц высокой энергии. Тем не менее, удалось экспериментально установить, что разрыв токового слоя может происходить, если слой формируется в магнитном поле с достаточно большим поперечным градиентом, при высоком значении протекающего в плазме тока и при достаточно низкой плотности начальной плазмы.

Отсюда видно, что эти два требования противоречат друг другу. Исходя из таких ограничений, необходимо очень тщательно подбирать условия эксперимента, при которых следует ожидать, как концентрации магнитной энергии, так и её высвобождения, т.е. реализации процесса вспышечного типа. Различные режимы формирования токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях должны оцениваться с помощью специально разработанных методов диагностики, которые должны оперативно определять основные тенденции изменения параметров токовых слоев при изменении условий формирования слоя.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЗАМКНУТЫХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ ПРИ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЯДАХ В ПЛАЗМЕ

Мозговой А.Г.

ФИАН РАН, г. Москва, Россия, amozgovoy@gmail.com

Экспериментально замкнутые витки (слои) с током в плазме исследуются с 50-годов прошлого века. Такую осесимметричную конфигурация витка называют компактным тором или FRC -- Field Reversed Configuration. Торы можно ускорять, сталкивать и сжимать внешними магнитными полями, что и используют в исследованиях по термоядерному синтезу и для создания электроракетных двигателей [1]. В Princeton Plasma Physics Laboratory PPPL создана установка FLARE для лабораторных экспериментов по физике магнитного пересоединения (при столкновении двух FRC происходит объединение их магнитных полей) одного из самых фундаментальных, но до сих пор не до конца изученных явлений во Вселенной. При обрыве при обрыве тока в витке, возникающее высокое напряжение будет сопровождается импульсом излучения в широком диапазоне вплоть до жесткого рентгена, за которым следует более быстрый поток коллективно ускоренных частиц - образуется солнечный ветер. Экспериментальные результаты наблюдений подтверждают это предположение [2].

В настоящее время в в Лос Аламосе строится новая экспериментальная платформа по FRC. Американская компания Tri Alpha Energy (освоено более $ 1.2 млрд., из них 50 млн. от Роснано). В Helion Energy инвестировано с 2021 г. $ 1 млрд. CFR2 из University of Washington and MSNW. Китайские установки с FRC HHMAX-Energy, NovaFusionX, Xingneng Xuanguang, еще есть японские). Helion Energy даже заключила контракты с Майкрософт и с крупнейшей сталелитейной компанией Америки Nucor на поставку реакторов от 50 МВТ начиная с 2028 г. (суммарно до 500 МВТ). Начато строительство. В ТРИНИТИ также ведут подобные эксперименты по столкновению плазменных сгустков.

В ранее проведенных исследований [3] в ФИАН по взрыву проволочек на установке ГВП 1 (Генераторе Взрывающихся Проволочек с нап ряжением 20 кВ, ток до 10 кА T=3 мксек) было показано возбуждение замкнутых токовых витков в плазме вокруг взорванной проволочки.

Взрыв 8-12 проволочек симметрично расположенных на поверхности кольцевого (диэлектрика (диаметром 20 см, односторонний фольгированный гетинакс, фторопласт) также выявил образование кольцевого тока в образующейся плазме, но уже большего диаметра и его ускорение от поверхности. Замена проволочек тонким проводящим слоем графита поверхности диэлектрика картины не меняет, что значительно упрощает проведение экспериментов, но требует увеличение энергетики до нескольких кДж. Проведены данные по измерениям скорости движения замкнутых токовых витков в плазме.

Таким образом можно возбуждать компактные торы более простым способом, чем испытанный и запатентованный нами ранее способ генерации FRC в индуктивных накопителях энергии. Такой способ позволит перейти на частотный режим работы, что необходимо как для коллайдеров, так и для электроракетных двигателей.

1. Мозговой А.Г., Тиликин И.Н., Реакторы на природном уране с внешним источником быстрых нейтронов - это будущее энергетики и космонавтики, Сборник материалов XVII Международной конференции Забабахинские научные чтения, г. Снежинск, 2025, стр. 244

2. Kai E. Yang at.al. // The Astrophysical Journal, 959:54 (19pp), 2023 December 10 https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad077d

3. Мозговой А.Г., Огинов А.В., Тиликин И.Н., Шпаков К.В., Структура тока при электрическом взрыве тонких проводников, КСФ, №12, стр. 91, 2024, DOI: 10.3103/S1068335624601912

СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ПЛОЩАДЬ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 21-25 ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ

Тлатов А.Г., Березин И.А.

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

Созданы каталоги форм и свойств корональных дыр (КД) по данным наблюдений обсерватории Китт-Пик в линии He10830A в период 1975-2003 гг., SOHO/EIT в линии FeXII 195Å в период 1996-2025 и SDO/AIA 193Å 2010-2025. Каталоги включают обработку как ежедневных наблюдений, так и синоптических карт. Для создания каталогов применены оригинальные методы обработки наблюдений, включая методы калибровки исходных ежедневных изображений. Корональные дыры выделялись на основе метода выращивания с ограничением скорости роста. КД являются источниками высокоскоростного солнечного ветра. Как правило, КД совпадают с областями открытого магнитного потока. Исследованы долговременные изменения площади КД, реконструированные по данным наблюдений и площадей областей открытого магнитного потока, вычисленных по данным наблюдений различных магнитографов (WSO, GONG, SOLIS, HMI, STOP). Мы обнаружили, что открытый поток показал близкие значения с данными измерений КД из наблюдений.

Созданные каталоги дали нам возможность исследовать связь между свойствами КД и вариациями высокоскоростных потоков солнечного ветра в зависимости от различных параметров КД в том числе широты, площади и другие. Мы создали индексы корональных дыр, зависящие от площади и широты, имеющие высокую корреляцию со скоростью солнечного ветра вблизи Земли. Показано, что ряды данных КД, созданные на Кисловодской Горной астрономической станции, имеют наилучшее соответствие со скоростью солнечного ветра.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В 2025 ГОДУ

Абунина М.А., Шлык Н.С.

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

Представлен комплексный анализ наиболее мощных событий в межпланетной среде, вызвавших наибольший отклик в геомагнитной активности. Изучены вариации параметров солнечного ветра, геомагнитной активности, космических лучей в периоды 1-2 января, 16 апреля, 1-3 июня, 11-13 ноября 2025 года. Для всех событий отождествлены солнечные источники и обсуждаются их особенности.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ И ПОЗИЦИОННОГО УГЛА КОРОНАЛЬНОГО ВЫБРОСА МАССЫ НА ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ

Давыденков И.И., Ожередов В.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, davydenkov.ii@phystech.edu, ozheredov2016@gmail.com

Анализ взаимосвязи параметров корональных выбросов массы (КВМ) и солнечных протонных событий (СПС) позволил установить, что вероятность возникновения СПС в течение 80 часов после эрупции зависит не только от начальной КВМ, но и от его позиционного угла. При достаточно высоких скоростях влияние угла становится статистически значимым, что указывает на важность пространственной ориентации ударной волны КВМ для эффективного ускорения протонов.

Основные результаты базируются на статистическом анализе данных каталога SOHO LASCO CME Catalog [1]. Для каждого события определялись начальная скорость (по разности расстояний между первыми двумя точками наблюдения) и позиционный угол. Факт регистрации протонного события определялся по данным прибора EPHIN на обсерватории SOHO [2], где пики потока протонов выделялись при помощи аппроксимации линейных комбинаций собственных решений уравнения Шредингера для временного ряда с обратным знаком, рассматриваемого как потенциальная яма.

Для количественной оценки влияния параметров КВМ на вероятность возникновения СПС применялась модель логистической регрессии. Модель предсказывает вероятность появления протонного события в течение 80 часов в зависимости от начальной скорости и позиционного угла КВМ. Анализ показал, что при высоких скоростях КВМ вероятность СПС зависит от угла выброса: для КВМ, направленных в плоскости эклиптики, вероятность увеличивается, тогда как при отклонении от этого направления вероятность снижается.

Таким образом, параметры КВМ, включая его пространственную ориентацию, играют важную роль в оценке риска возникновения солнечных протонных событий. Полученные зависимости должны учитываться в моделях прогнозирования космической погоды.

1. SOHO LASCO CME Catalog [Электронный ресурс].
URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ .
2. EPHIN Data [Электронный ресурс].
URL: http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ПО ДАННЫМ SDO

Ширяев А.О.[1,2], Капорцева К.Б.[1], Шугай Ю.С.[1], Баринова В.О.[1]

[1]НИИ Ядерной Физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[2]Факультет космических исследований МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
anton.o.shiryaev@gmail.com

Корональные дыры являются источником квазистационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра со скоростями порядка 500–800 км/с [1]. Долгоживущие корональные дыры приводят к формированию областей взаимодействия потоков солнечного ветра (SIR/CIR), которые характеризующихся повышенной плотностью и могут вызывать магнитосферные возмущения умеренной интенсивности и рекуррентные магнитные бури.

Ассоциация корональных дыр с высокоскоростными потоками солнечного ветра позволяет использовать их площадь для вычисления скорости солнечного ветра [2] у Солнца и на околоземной орбите. Для выделения контуров корональных дыр и оценки их площади требуется сегментация изображений Солнца, полученных в каналах 193Å и 211Å. В этих диапазонах корональные дыры проявляются как области пониженной интенсивности [3,4]. Существуют алгоритмы сегментации, основанные на порогах (threshold) яркости. Такие алгоритмы требуют ручного подбора параметров и работают лучше всего на ограниченных интервалах времени из-за изменения фоновой яркости в связи с солнечным циклом активности. Использование нейронной сети, натренированной на отобранных результатах работы порогового алгоритма, может служить более устойчивым во времени методом сегментации корональных дыр, так как нейронная сеть может определять их по их морфологической структуре в дополнение к относительной яркости.

В качестве входных данных для разработанной модели используются изображения SDO/AIA в канале 193Å, а в качестве обучающей выборки применяются маски корональных дыр, полученные на основе применения порогового алгоритма из работы [2]. Для задачи сегментации используется нейронная сеть архитектуры U-Net. Рассмотрено несколько вариантов обучающих выборок, и проведена оценка их влияния на качество работы нейронной сети. Прогноз скорости солнечного ветра, основанный на корональных дырах, выделенных нейронной сетью, лучше согласуется с данными КА ACE, чем прогноз на основе порогового алгоритма (RMSE 114 км/с против 117 км/с).

Дополнительно предложен метод повышения точности сегментации за счёт удаления филаментов из масок корональных дыр. Для их отделения используются морфологические критерии [5], сопоставление с магнитограммами, а также наблюдения в канале 304 Å, где филаменты проявляются как тёмные области. В работе приведены результаты применения этих методов фильтрации.

1. Veselovsky I. S., Dmitriev A. V., Suvorova A. V. Algebra and statistics of the solar wind // Cosm. Res. 2010. Т. 48, № 2. С. 113–128.
2. Shugai Yu. S. Analysis of Quasistationary Solar Wind Stream Forecasts for 2010–2019 // Russ. Meteorol. Hydrol. 2021. Т. 46, № 3. С. 172–178.
3. Garton T. M., Gallagher P. T., Murray S. A. Automated coronal hole identification via multi-thermal intensity segmentation // J. Space Weather Space Clim. 2018. Т. 8. С. A02.
4. Heinemann S. G. и др. CME–HSS Interaction and Characteristics Tracked from Sun to Earth // Sol. Phys. 2019. Т. 294, № 9. С. 121.
5. Reiss M. и др. Identification of coronal holes and filament channels in SDO/AIA 193Å images via geometrical classification methods: arXiv:1408.2777. arXiv, 2014.

ПРОГНОЗ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ОСНОВЕ БАЗЫ ДАННЫХ RATAN ACTIVE REGION PATCHES (RARPs)

Корелов М.С., Князева И.С., Курочкин Е.А., Макаренко Н.Г., Деркач Д.А.

ГАО РАН, mskorelov@gmail.com

В данной работе мы представляем применение новой базы данных радиоспектров активных областей Ratan Active Region Patches (RARPs), созданной на основе долговременных патрульных наблюдений радиотелескопа РАТАН-600 с помощью программного пакета RATANSunPy [1].

База RARPs содержит стандартизированные многоканальные (3–18 ГГц) радиоспектры и сопутствующие метаданные для тысяч активных областей, что делает возможным как статистический анализ, так и исследование их индивидуальной эволюции. Мы демонстрируем использование радиоспектров RARPs для построения прогностической модели и анализа эволюционных кривых.

Для построения модели прогнозирования вспышечной активности на основе методов машинного обучения использовался следующий подход: радиоспектры активных областей сжимались в компактное признаковое пространство с помощью сверточного автоэнкодера, после чего полученные признаки использовались для обучения и тестирования прогностической модели, в данном случае — логистической регрессии. Качество прогнозов сравнивается с результатами, полученными с использованием стандартных фотосферных магнитных параметров SHARPs [2], с применением общепринятых метрик оценки прогнозов солнечных вспышек [3]. Показано, что признаки, извлечённые из радиоданных, обладают самостоятельной прогностической ценностью и дополняют информацию, содержащуюся в магнитных измерениях.

Помимо прогностических задач, стандартизированный формат RARPs открывает возможность для анализа временной эволюции радиоизлучения отдельных активных областей на протяжении их жизни, выявляя изменения спектральных и поляризационных характеристик.

Таким образом, база данных RARPs открывает новые возможности для интеграции корональной радиодиагностики в исследования активных областей и для построения мультимодальных моделей прогнозирования космической погоды.

1. Knyazeva, I., Lysov, I., Kurochkin, E., Shendrik, A., Derkach, D., Makarenko, N., 2025. Ratansunpy: A robust preprocessing pipeline for ratan-600 solar radio observations data. Astronomy and Computing 51, 100918.
2. Bobra, M.G., Wright, P.J., Sun, X., Turmon, M.J., 2021. Smarps and sharps: Two solar cycles of active region data. The Astrophysical Journal Supplement Series 256, 26.
3. Bloomfield, D.S., Higgins, P.A., McAteer, R.J., Gallagher, P.T., 2012. *Toward reliable benchmarking of solar flare forecasting methods*. ApJL 747, L41.

ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПАРАМЕТРА ® НА ЭВОЛЮЦИЮ СВЯЗИ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАГНИТОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Зотов О.Д.[1,2], **Клайн Б.И.**[1], **Куражковская Н.А.**[1]

[1]*ГО "Борок" ИФЗ РАН, п. Борок, Россия*
[2]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, ozotov@inbox.ru*

В работе представлено исследование долговременной вариации связи энергии солнечного ветра с магнитосферой Земли и влияние на нее плазменного параметра ® (равного отношению теплового давления к магнитному) на интервале пяти солнечных циклов (1964–2019 г.г). Поступление энергии солнечного ветра в магнитосферу оценивалось с помощью следующих энергетических параметров: функция Акасофу (∑), характеризующая поток электромагнитной энергии, проникающей в магнитосферу, параметр Ньювелла (dφ/dt), учитывающий скорость изменения потока открытых силовых линий на магнитопаузе и электрическое поле пересоединения Кана-Ли (E_{KL}). Параметр ® характеризует уровень турбулентности плазмы солнечного ветра. При значениях ® близких к 1 степень турбулентности плазмы солнечного ветра максимальна, при возрастании ® турбулентность плазмы существенно уменьшается.

В работе использованы среднечасовые значения параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) из базы данных OMNI (http://nssdcftp.gsfc.nasa/gov/omniweb).

Обнаружено, что динамика рассмотренных энергетических параметров на протяжении пяти циклов солнечной активности практически подобна. Коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями энергетических параметров в среднем составляют 0.79. В каждом солнечном цикле энергия потока солнечного ветра, поступающая в магнитосферу Земли, в фазе роста солнечной активности значительно меньше, чем в фазе спада. Показано, что функция Акасофу, параметр Ньювелла и электрическое поле Кана-Ли зависят от параметра ®, увеличение которого приводит к уменьшению величины энергетических параметров (Рис. 1). Функция Акасофу, параметр Ньювелла и параметр Кана-Ли достигают максимальных значений при ® ~ 1, когда турбулентность плазмы солнечного ветра максимальна. Полученные результаты позволяют предположить, что турбулентность плазмы солнечного ветра является одним из факторов, контролирующих поступление энергии солнечного ветра в магнитосферу Земли. Высокая степень турбулентности солнечного ветра в фазе спада солнечной активности обеспечивает наибольшее поступление энергии в магнитосферу Земли.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН.

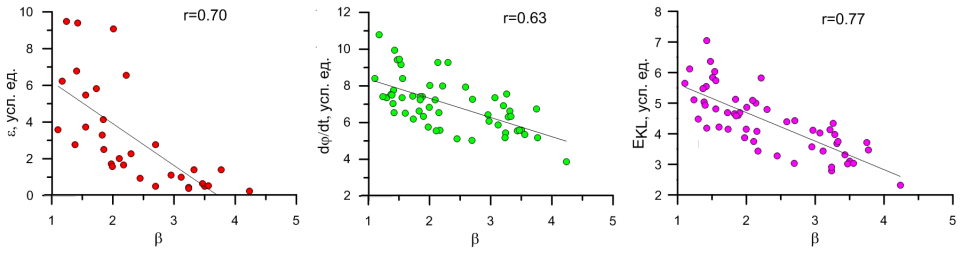


Рис. 1. Зависимости ∑, dφ/dt и E_{KL} от параметра ® (среднегодовые значения). r – коэффициенты линейной корреляции.

ПРОГНОЗ РЕАКЦИИ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА СОЛНЕЧНЫЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ И ЯВЛЕНИЯ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Ишков В.Н.

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

По последним наблюдательным данным разбирается вопрос об экстремальных событиях происходящих в околоземном космическом пространстве (ОКП), источником которых являются высокоэнергичные динамические явления (корональные выбросы вещества (КВВ) и ударные волны (УВ), переходящие в развитии в межпланетные структуры) во вспышечных солнечных событиях (вспышках и выбросах солнечных волокон). В настоящее время такие воздействия принято оценивать в пятибалльной шкале интенсивностей, введённой NOAA USA, по трем позициям: (1) электромагнитный удар – воздействие электромагнитного излучения во время развития мощной солнечной вспышки в основном на ионосферу (внезапные ионосферные возмущения), нарушая радиосвязь (Radio Blackouts) на временном интервале до нескольких часов (R1 – 5), оценка по рентгеновскому классу вспышки; (2) солнечные протонные события – приход в ОКП солнечных заряженных частиц, которые воздействуют на радиационную обстановку в окрестности Земли, вызывают рост электронной концентрации над полярными шапками (ППШ), нарушая радио связь на полярных трассах (S1 – 5), оценка по интенсивности потока протонов с энергией ≥10 МэВ; (3) возмущения геомагнитного поля (магнитные бури) – следствие прихода в ОКП потоков солнечной плазмы повышенной плотности, скорости и температуры с усиленным магнитным полем (G1 – 5), оценка по максимальному значению трёхчасового Кр-индекса.

К экстремальным событиям принято относить возмущения максимальных классов данной шкалы (R5, S4, G5), как по всем позициям сразу, так и по отдельным позициям, если они занимают достаточно длительное время. Мощнейшая, экстремальная по интенсивности вспышка вблизи лимбов не проявится в ОКП как экстремальное событие в позициях 3 и 2, так как и солнечные протоны и корональный выброс вещества будут направлены в сторону от Земли (1.06.1991 г., 6.03.1989 г., 4.11.2003 г.). Последние исследования значимо подняли роль вспышечных КВВ, и, особенно, последовательностей соседних по времени корональных выбросов от значимых вспышек (кластеров КВВ) и МУВ в увеличении потока высокоэнергичных протонов и их энергий, а также и в усилении реальной мощности геомагнитных возмущений регистрируемых в ОКП. На данной статистике большинство экстремальных солнечных вспышечных событий происходят в переходные периоды между эпохами повышенной и понниженной солнечной активности и более редко внутри эпох. Прогноз проявления мощного солнечного вспышечного события как экстремального в ОКП требует достаточно быстрого анализа его развития в межпланетном пространстве.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ МЕЖСЛОЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ В ФЕВРАЛЕ 2025 С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ «IONOVIEW»

Серебренникова С.А.[1], Иванова В.А.[1], Подлесный А.В.[1], Цедрик М.В.[1], Поддельский А.И.[2]

[1]ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, sova@mail.iszf.irk.ru

[2]ИКИР ДВО РАН, Камчатский край, с.Паратунка, Россия, podd-igor@yandex.ru

Ионосфера Земли существенно влияет на условия распространения электромагнитных волн. Слои D, E и F ионосферы особенно сильно влияют на сигналы декаметрового диапазона, вызывая их искажение, преломление и отражение. К одному из самых интересных явлений при этом можно отнести межслоевое распространение электромагнитных волн. Изучение этого явления может помочь передавать сигналы на более низких частотах или с меньшей мощностью [1]. В данном исследовании рассматриваются два механизма межслоевого распространения сигнала: через ионосферный волновой канал (ИВК) и спорадический слой Es [2].

Исследование условий межслоевого распространения проводились по результатам зондирования ионосферы сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) на сети ЛЧМ-ионозондов ИСЗФ СО РАН в диапазоне частот 4-30 МГц с периодом в 5 минут. Была проанализирована регулярность появления межслоевых отражений ЛЧМ-сигналов на трассе наклонного зондирования (НЗ) Магадан — Торы в феврале 2025 года, который характеризовался слабой геомагнитной активностью. Протяженность трассы Магадан – Торы составляет 3200 км, координаты станции Магадан – 60° с.ш., 150,7° в.д. и станции Торы – 51,8° с.ш., 103° в.д. Рассматриваемый период относится к середине солнечного цикла, поэтому критическая частота первого скачка превышала рабочую частоту сети и анализ проводился по сигналу второго скачка. Данные ЛЧМ-ионозонда обрабатывались с помощью ПО «IonoView», разработанного в ИСЗФ СО РАН.

В результате исследования были получены следующие выводы: максимальные значения предельной частоты межслоевого сигнала и спорадического слоя Es наблюдаются в дневное время. Кроме того, эти явления наблюдались достаточно регулярно, что говорит об актуальности проводимых исследований. Слабые геомагнитные возмущения практически не влияют на условия распространения сигнала 2F2, в то время как для межслоевого сигнала существенно уменьшается диапазон частот прохождения. Спорадический слой Es чаще всего регистрировался при значениях индекса DST меньше -10 нТ, там же находились локальные максимумы МНЧ слоя. Время жизни Es слоя в среднем составило 5 часов. Максимальная длительность непрерывной регистрации слоя Es за рассматриваемый период составила 38 часов.

1. Иванова В.А., Подлесный А.В., Науменко А.А., Ткачев И.Д. Межслоевое отражение ЛЧМ-сигналов на трассе Хабаровск - Торы в феврале 2014 г // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сборник докладов XXV Международного симпозиума. Электрон. текстовые, граф. Данные. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН. – 2019. – E – 165 – E -168.
2. Haldoupis, C. (2011). A Tutorial Review on Sporadic E Layers. In: Abdu, M., Pancheva, D. (eds) Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. IAGA Special Sopron Book Series, vol 2. Springer, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1_29

ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Гуляева Т.Л.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, Россия, tam.gulyaeva@gmail.com

В литературе имеются многочисленные работы по исследованиям ионосферных предвестников землетрясений, но целенаправленных исследований ионосферных предвестников геомагнитных бурь до сих пор не проводилось. В данной работе выполнен анализ ионосферной зональной дисперсии (Net Volume, NT), отображающей разность положительных и отрицательных отклонений TEC от спокойного состояния в выбранной зоне. Для оценки NT использованы значения TEC в сетке узлов по картам JPL полного электронного содержания GIM–TEC, преобразованным из географических к геомагнитным координатам. Рассмотрены 6 зон геомагнитной широты F: авроральные широты в Северном и Южном полушариях, превышающие ±60°; средние широты от ±40° до ±60°: при–экваториальные широты от ±2.5° до ±37.5°. Исследования проведены для 97 интенсивных бурь с 1995 по 2025гг методом совмещения эпох при нулевой отметке эпохи в момент пика геомагнитного индекса Apo ≥ 132 нТл, при Hpo ≥ 7, электрическом поле солнечного ветра Em ≥ 5 мВ/м, Dst ≤ −100 нТл, и планетарном ионосферном индексе Wp ≥ 5.П оказано, что наблюдается асимметрия ионосферной изменчивости NT в северных и южныхзонах с доминированием положительной (отрицательной) величины NT в местную зиму (лето) [1]. При этом интенсивность ионосферных бурь убывает от высоких к низким широтам. Предложена модель прогноза интенсивности геомагнитных бурь Apo индекса в зависимости от межпланетного электрического поля Em и ионосферных предвестниковгеомагнитной бури в виде диапазона ионосферной возмущенности DdTEC = dTECmax – dTECmin во время главной фазы бури. Противоположный сценарий используется для оценки интенсивности ионосферной бури на этапе восстановления, а именно – прогноз положительного возмущения dTECp и отрицательного возмущения dTECn в шести магнитных широтных зонах в зависимости от пика Apo и сезона (дня в году).

1. Gulyaeva T.L. Sequence of space storm effects in ionospheric anomalies and geomagnetic activity. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2026. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106710.

УСИЛЕНИЯ ПОТОКА СУБРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ ВНЕ СИЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ. СТАТИСТИКА И АТЛАС СОБЫТИЙ

Стуков Д.А.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, dstkov922@yandex.ru

Потоки электронов с энергиями в десятки и сотни кэВ являются промежуточным звеном между авроральными (от долей до нескольких кэВ) и релятивистскими (порядка и выше нескольких МэВ) электронами. Такие электроны во внутренней магнитосфере являются затравочной популяцией для релятивистских электронов внешнего радиационного пояса . Кроме того, нерелятивистские электроны характеризуются более высокими потоками, чем релятивистские, и суммарный эффект от их воздействия на спутники оказывается значимым [1]. К настоящему времени хуже всего исследованными остаются достаточно быстрые усиления потока вне магнитных бурь и сильных суббурь. Среди параметров вне магнитосферы на поток электронов наиболее сильное влияние оказывают скорость солнечного ветра и вариации динамического давления, а среди глобальных геомагнитных возмущений – авроральные суббури [2, 3].

В настоящей работе для анализа используются данные дифференциального по энергии потока электронов по измерениям на геостационарном спутнике GOES-15 в период с 2013 по 2017 гг. Представлены результаты сравнения методом наложенных эпох параметров межпланетного магнитного поля и солнечного ветра в периоды усилений и для контрольной выборки. Создан атлас отобранных событий, представляющий собой интерактивную среду с графическим интерфейсом, которая позволяет провести визуализацию и первичный анализ параметров вне и внутри магнитосферы при усилениях и в предшествующие несколько часов. Возможно использование ранее отобранных событий или отбор событий по заданным пользователем параметрам. В настоящее время доступна тестовая версия Атласа, написанная на языке Python.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

1. Gussenhoven, M. S., E. G. Mullen, R. C. Filz, D. H. Brautigam, and F. A. Hanser // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. V. 34. P. 676.

2. Christodoulou, E.; Katsavrias, C.; Kordakis, P.; Daglis, I.A. // Universe. 2025. V. 11. P. 101.

3. Sillanpää, I., Ganushkina, N. Y., Dubyagin, S., Rodriguez, J. V. // Space Weather. 2017. V. 15. P. 1602–1614. https://doi.org/10.1002/2017SW001698.

ПРОГНОЗ СУТОЧНЫХ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ В 24-ОМ СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Азра-Горская К.Ж. [1,2], **Калегаев В.В.** [1,2], **Власова Н.А.** [1]

[1] *НИИЯФ МГУ*

[2] *Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

azragorskayaCG@my.msu.ru

Выполнены исследования вариаций суточных потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите в 24-ом цикле солнечной активности и разработана модель прогноза суточных флюенсов на основе методов машинного обучения.

Для проведения исследований и настройки модели использован набор данных измерений потоков спутника GOES-15, охватывающий практически весь 24-й солнечный цикл: с 01.01.2011 до 21.12.2019 гг. В качестве входных параметров использованы параметры солнечного ветра, индексы геомагнитной активности, расстояние до подсолнечной точки магнитосферы и потоки электронов (E>2 и E>0.8 МэВ). Для оценки качества прогноза для каждого года основной набор данных поделен на четырехлетние выборки с шагом один год методом скользящего окна. Два первых года использованы для обучения, следующий — для валидации, а последний — для тестирования. Прогностические модели разработаны на основе алгоритма классического обучения CatBoost и нейронных сетей LSTM.

Результаты статистического анализа динамики потоков электронов в течение солнечного цикла свидетельствуют об отрицательной корреляции между фазой солнечного цикла и суточными потоками релятивистских электронов на ГСО. Качество прогноза проявляет зависимость от распределения интенсивности потоков электронов: увеличение потоков приводит к уменьшению R^2 и увеличению RMSE. Таким образом, точность прогнозирования ухудшается по мере развития фазы спада солнечного цикла, и эта зависимость становится более выраженной при увеличения горизонта прогнозирования. Также исследован вклад входных параметров, усредненный за каждый год. Показано, что наибольшую значимость имеют так называемые «чистые параметры», не являющиеся производными, такие как Kp и SYM-H индексы, температура ионов и скорость солнечного ветра.

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

ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ЭМИССИИ 427.8 НМ 1NG N_2^+

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, zhanna@pgia.ru

Оценка параметров потока авроральных электронов по данным спектрофотометрических наблюдений представляет собой одну из актуальных задач в области диагностики состояния ионосферной плазмы в полярных сияниях. Традиционный подход в данном направлении основывается на исследовании зависимости отношения интенсивностей двух эмиссий от средней энергии потока авроральных электронов $E_{ср}$. При этом выбранные эмиссии должны характеризоваться разной степенью дезактивации с увеличением глубины проникновения электронов в атмосферу. При использовании данных наземных наблюдений обычно рассматривается отношения интенсивностей эмиссий 630.0 нм OI и 427.8 нм 1NG N_2^+. Впервые использование отношения интенсивностей эмиссий $I_{630.0}/I_{427.8}$ для оценки средней энергии потока авроральных электронов было предложено в работе [1].

В докладе показана возможность оценок средней энергии потока высыпающихся электронов по измерению интенсивности излучения одной линии полярного сияния ⌊427.8 нм. В основу предложенной методики положена экспериментальная зависимость отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности $I_{427.8}$. Согласно экспериментальным данным, отношение $I_{630.0}/I_{427.8}$ демонстрирует непрерывное уменьшение с увеличением интенсивности эмиссии 427.8 нм. Поскольку отношение интенсивностей этих эмиссий слабо зависит от величины потока высыпающихся электронов, можно полагать, что увеличение интенсивности эмиссии 427.8 нм для «среднестатистического» полярного сияния в основном определяется увеличением средней энергии авроральных электронов. Рост жесткости потока приводит к более глубокому проникновению авроральных электронов в ионосферу и, как следствие, к уменьшению интенсивности эмиссии 630.0 нм из-за возрастающей роли процессов гашения этой эмиссии.

Результаты численных расчетов зависимости средней энергии потока авроральных электронов $E_{ср}$ от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$, сделанные в рамках нестационарной модели авроральной ионосферы [2] показали, что влияние на данную зависимость формы энергетического спектра авроральных электронов, содержания атомарного кислорода нейтральной атмосферы и концентрации нечетного азота NO не превышает 20%. Принимая во внимание экспериментальную зависимость отношения интенсивностей $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности эмиссии 427.8 нм и смоделированные зависимости средней энергией $E_{ср}$ от отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ можно установить связь между $E_{ср}$ и интенсивности эмиссии 427.8 нм.

Такая зависимость средней энергии потока авроральных электронов от интенсивности излучения эмиссии 427.8 нм в полярных сияниях была рассчитана в рамках модели авроральной ионосферы [2]. Аналитическая аппроксимация полученной зависимости может быть использована в разработке методик оперативной диагностики и прогнозирования состояния ионосферной плазмы в области полярных сияний.

1. Rees M.H., Luckey D. // J. Geophys. Res. 1974. V.79. P.5181.
2. Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. // Космические исслед. 2017. Т.55. С. 94.

СОПРЯЖЕННЫЕ СВОЙСТВА И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЛЬСАЦИЙ Pc3-4 И Pi В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ

Ягова Н. В.

ИФЗ РАН, Москва, Россия, nyagova@ifz.ru

Геомагнитные пульсации Pc3-4 оказываются значимым источником геоиндуцированных токов (ГИТ), особенно на средних и низких широтах. Одновременно они являются фоном, который необходимо исключать при анализе «аномалий» - сигналов немагнитосферного происхождения, в том числе сейсмоэлектромагнитных. Физические механизмы и свойства основных типов пульсаций диапазона Pc3-4 достаточно полно исследованы. Несмотря на это, точность количественного описания параметров пространственного распределения поля пульсаций часто оказывается недостаточной для прикладных задач. Еще хуже исследованы квазипериодические вариации с широким спектром в том же диапазоне частот. Кроме того, в прикладных задачах возникает необходимость использовать данные станций, для которых вклад техногенных помех в том же диапазоне частот не мал. Для разделения пульсаций магнитосферного-ионосферного происхождения и вариаций от других, природных и техногенных, источников необходим анализ пульсаций в квазисопряженных точках и в одном полушарии на разных удалениях от исследуемой точки. Настоящая работа посвящена анализу сопряженных свойств и пространственного распределения поля пульсаций диапазона Pc3-4, в том числе накануне землетрясения. Показаны возможные источники ошибок интерпретации сигналов как связанных с сейсмичностью и даны оценки оптимальной плотности сети измерений для задач сеймоэлектромагнетизме и вкладе пульсаций в ГИТ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

ГЕОМАГНИТНОЕ ОБРЕЗАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Дмитриев А.В.

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

Исследована динамика широты обрезания солнечных космических лучей (СКЛ) во время трех сильных магнитных бурь в сентябре 2017, мае 2024 и ноябре 2025, которые сопровождались солнечными протонными событиями. Использовались данные о потоках высокоэнергичных протонов с энергиями от 16 до >70 МэВ, полученные на низковысотных спутниках миссии POES/METOP. Определены широты обрезания СКЛ в северном и южном полушариях, как в спокойное время, так и во время магнитных бурь. Экспериментальные результаты сравниваются с эллиптической моделью обрезания СКЛ [1]. Показано, что в среднем модель неплохо описывает экспериментальные данные в динамическом диапазоне своих входных параметров. Однако вне пределов своего динамического диапазона, прежде всего в области углов наклона геомагнитного диполя и уровня геомагнитной активности, модель дает существенные ошибки, что указывает на необходимость ее дальнейшего улучшения. Обсуждаются перспективы совершенствования моделирования геомагнитного обрезания СКЛ во время сильных магнитных бурь на основе новых экспериментальных данных.

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

1. Dmitriev, A. V., P. T. Jayachandran, and L.-C. Tsai (2010), Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006, *J. Geophys. Res.*, 115, A12244, doi:10.1029/2010JA015380

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ: СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Голденков С.В.[1,2], **Базилевская Г.А.**[1], **Махмутов В.С.**[1,2], **Маурчев Е.А.**[3]

1.ФИАН, г. Москва, Россия, goldenkov.sv@phystech.edu
2. МФТИ, г. Москва, Россия
3. ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

В работе представлены результаты численного моделирования на основе программного комплекса PLANETOCOSMICS/GEANT4 прохождения потоков солнечных протонов в земной атмосфере для ряда солнечных протонных событий 2001-2005 гг. и 12 ноября 2025 г. Данные вычислений сравниваются с результатами измерений потоков частиц в атмосфере, полученными в стратосферном эксперименте Долгопрудненской научной станции ФИАН (ДНС ФИАН). Проведенный анализ показал разумное согласие результатов численного моделирования с первичным спектром солнечных протонов, восстановленным из измерений потоков вторичных частиц в земной атмосфере. Этот вывод подтверждается и для наблюдения вторичных “каскадных” частиц, зарегистрированных в атмосфере 12 ноября 2025 г. от вспышки 11 ноября 2025 г. в эксперименте ДНС ФИАН на широте Москвы.

ОТКЛИК НАЗЕМНОГО НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОГО ПРОТОННОГО СОБЫТИЯ 11 НОЯБРЯ 2025 Г.

Махмутов В.С.[1,2], Базилевская Г.А.[1], Голденков С.В.[1,2], Маурчев Е.А.[3], Филиппов М.В.[1], Ролан Ж.-П.[4]

1. ФИАН, г. Москва, Россия, mahmutovvs@lebedev.ru
2. МФТИ, г. Москва, Россия
3. ИЗМИРАН, г. Москва, Россия
4. CRAAM, г. Сан-Пауло, Бразилия

В работе представлен анализ данных наблюдений на оригинальных наземных установках КОВЕР и Нейтронный Детектор, расположенных на Долгопрудненской научной станции ФИАН (ДНС ФИАН) и в обсерватории CASLEO (Аргентина), в сравнении с данными измерений наземной сети нейтронных мониторов (NMDB), а также измерений потоков частиц на спутнике GOES-16, во время солнечного протонного события (GLE77) 11-14 ноября 2025 г. Источником этого события явилась мощная солнечная вспышка 11 ноября 2025 г. балла X5.1 в активной области NOAA 4274. Основное внимание в работе уделено анализу данных Нейтронного Детектора (ДНС ФИАН), зарегистрировавшего увеличение темпа счета на ~32 % в максимуме события 11 ноября. При этом использованы результаты численного моделирования прохождения потоков солнечных протонов в земной атмосфере, полученные с помощью программного комплекса PLANETOCOSMICS/GEANT4.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ ВСПЛЕСК ГЕОИНДУКТИРОВАННОГО ТОКА В НОЯБРЕ 2025г.

Сахаров Я.А.,[1] Федоренко Ю.В.,[1] Селиванов В.Н.,[2] Билин В.А.,[1] Мёрзлый А.М.[3]

[1] Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, sakharov@pgia.ru
[2] Центр физико-технический проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты
[3] Институт космических исследований РАН, г.Москва, Россия

В докладе представлены результаты регистрации одного из геомагнитных возмущений на Кольской Арктической геофизической инфраструктурной сети ПГИ, расположенной на Северо-Западе России.

Ряд вспышек на Солнце явился причиной удивительного магнитосферного возмущения, произошедшего 10 – 15 ноября 2025г. 11 ноября Землю настиг поток космических лучей (GLE77). Последовательное развитие вспышек X1.8 , X1.5 и X5.2 привели 12 ноября к возмущению порядка Кр 9 с достаточно низким значением
Dst ~217 нТли продолжительным развитием магнитной бури.

На фоне развития аврорального возмущения (Al ~2700 нТл) при значительном уровне высыпания энергичных электронов (CAN ~ 6 dB) на обсерватории LOZ развилась бухта в H-компоненте ~ 1400 нТл с пиковым выбросом ~ 2000 нТл. На подстанции Выходной линии Карельский транзит в это время зафиксирована пиковая величина ГИТ ~ 100А. Такое значение ГИТ является, по-видимому, самым большим за всё время наблюдений на данной энергетической сети.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FMES-2025-0003) и частично поддержана Грантом Российского научного фонда № 25-29-01240, https://rscf.ru/project/25-29-01240/.

ВАРИАЦИИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ 10-100 КЭВ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Pc5/Pi3 НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Зворыгина Е. С.[1], Ягова Н. В.[2]

[1] *МФТИ (НИУ), г.Долгопрудный, Россия, zvorygina-el@yandex.ru*

[2]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, nyagova@ifz.ru*

Ультранизкочастотные электромагнитные волны миллигерцового диапазона (пульсации Pc5-6/Pi3) и электроны внешнего радиационного пояса могут обмениваться энергией на частотах дрейфового и дрейфово-зеркального резонанса [1]. Статистически установлена связь между мощностью УНЧ и потоком электронов [2], а для отдельных событий – случаи согласованных колебаний потока и магнитного поля [3]. При этом подробного исследования потока электронов с энергиями 10-100 кэВ и геомагнитных пульсаций Pc5-6/Pi3 по измерениям на одном и том же геостационарном спутнике до сих пор не было.

Настоящая работа посвящена связи УНЧ волн и потоков электронов на геостационарной орбите по данным спутников GOES. В работе используются данные одновременных измерений вариаций магнитного поля и дифференциального по энергии и направлению потока электронов в диапазоне от 40 до 475 кэВ на спутнике GOES-15 в сентябре-октябре 2016 г.

Целью работы является выявление когерентных пульсаций потока электронов и магнитного поля и анализ зависимости кросс-спектральных параметров от частоты спектральных максимумов, поляризации волн и энергии электронов. Показано, что когерентные пульсации потока и магнитного поля наблюдаются уже при амплитудах пульсаций порядка 1 нТл как для пульсаций с выраженными спектральными максимумами (Pc), так и для широкополосных (Pi). Когерентные пульсации потока электронов и геомагнитного поля возникают во всем исследованном диапазоне энергий.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН (Н.Я.)

1. Климушкин Д.Ю., Магер П.Н., Челпанов М.А., Костарев Д.В. // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 4. С. 35–69. DOI: 10.12737/szf-74202105.
2. Mann I.R., O'Brien T.P., Milling D.K. // Journ. Atmosph. Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66. P. 187-198. DOI: 10.1016/j.jastp.2003.10.002.
3. Claudepierre, S. G., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 4491–4497. DOI:10.1002/grl.50901.

СЛУЖБА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ МГД-МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС

Кодуков А.В., Павлов Д.А., Субботин М.О.

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

В работе представлен анализ прогнозов оперативной службы моделирования солнечного ветра и корональных выбросов массы (КВМ) в околоземном пространстве [1, 2, 3], основанная на численном решении уравнений магнито-гидродинамики (МГД) в коде PLUTO [4]. Служба использует ежедневно обновляемые граничные карты от Национальных центров прогнозирования окружающей среды (NOAA/NCEP), которые формируются на основе синоптических магнитограмм GONG и данных коронографов SOHO/LASCO и STEREO-A.

Проведено ретроспективное сравнение прогнозов, полученных с использованием стационарного и эволюционирующего фона, с прогнозами SWPC и прямыми измерениями параметров солнечного ветра вблизи Земли (база данных OMNI). Анализ включает наиболее интенсивные геомагнитные бури 2024-25 годов, от G3 до G5 по шкале SWPC. Результаты показывают, что точность предсказания времени прихода ударных волн КВМ в модели PLUTO аналогична модели ENLIL, используемой SWPC.

Для перехода от модельных параметров солнечного ветра вблизи Земли к прогнозу индексов геомагнитной активности в работе проведён анализ различных эмпирических функций связи, описывающих передачу энергии от солнечного ветра к магнитосфере. В модель добавлена трассировка полярности магнитного поля, что позволило использовать больше характеристик солнечного ветра вблизи Земли. Исследованы функции, коррелирующие с ключевыми индексами, такими как Kp и Dst.

Таким образом, разработанная служба демонстрирует работоспособность открытого МГД-кода PLUTO для оперативного прогнозирования космической погоды. Интеграция в службу анализа функций связи между характеристиками солнечного ветра и геомагнитной активностью вблизи Земли дает основу для построение для построения комплексного прогностического инструмента.

1. Arutyunyan S., Kodukov A., Subbotin M., Pavlov D. // Space Weather. 2025. V. 23. №. 12. C. 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.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ

Аксенович Т.В.[1], **Селиванов В.Н.**[1], **Сахаров Я.А.**[1,2], **Билин В.А.**[1,2]

[1]*ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, t.aksenovich@ksc.ru*
[2]*ПГИ, г. Апатиты, Россия*

С начала работы системы мониторинга ГИТ в Кольско-Карельской магистральной электрической сети в 2011 г. было создано более 20000 файлов, содержащих данные токов в нейтралях автотрансформаторов. Общий размер этих файлов составляет около 33 ГБ на начало 2026 г. Для эффективного анализа непрерывно растущего объема регистрируемых данных был предложен метод автоматического анализа ГИТ в нейтрали автотрансформатора, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании данных тока в нейтрали для получения скейлограмм (двумерных изображений вейвлет-спектров) и их последующей бинарной классификации с помощью обученной сверточной нейронной сети (СНС). На основе этого метода была разработана программа нейросетевой классификации ГИТ. Результатом анализа суточного файла является гистограмма, содержащая максимальные по модулю значения ГИТ в те часы, когда СНС определила наличие квазипостоянных токов в нейтрали автотрансформатора. Для проверки правильности предсказаний классов разработанной программой был проведен тестовый анализ данных, которые не входили в обучающий и валидационный датасет на примере геомагнитной бури, наблюдавшейся с 10 по 11 Мая 2024 г.

Был проведен автоматический анализ данных с подстанций VKH и LKH за период 24-го солнечного цикла (декабрь 2008 г. – декабрь 2019 г.) с использованием разработанной программы. Исследование квазипостоянных токов на этих подстанциях позволило сравнить различие в откликах Кольско-Карельской электрической сети в разных точках в период геомагнитной бури. Результаты автоматического анализа показали, что топология сети оказывает сильное влияние на результирующие величины ГИТ, протекающие в нейтралях силовых автотрансформаторов. Проведенное исследование подтвердило эффективность работы и точность результатов программы нейросетевой классификации ГИТ.

Работа выполнена в рамках проекта № 25-29-01240 при поддержке Российского научного фонда.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 5-МИНУТНЫХ ДАННЫХ О ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДЕКСА DST

Гаджиев И.М.[1], Мягкова И.Н.[2], Баринов О.Г.[2], Доленко С.А.[2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет

[2]НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

ismailgadzhievff@gmail.com

В докладе рассматривается задача прогнозирования индекса Dst, используемого как характеристика геомагнитных возмущений. Показывается, что использование 5-минутных характеристик межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ), а также временных разностей переменных улучшает качество прогнозирования по сравнению с использованием только часовых средних.

Прогнозирование индекса Dst имеет важное практическое применение – сильные геомагнитные возмущения приводят к нежелательным эффектам, таким как сбои в системах радиосвязи и спутниковых навигационных системах. В докладе рассматривается прогнозирование на период до 12 часов вперед. Задача решается с помощью одного из методов машинного обучения – градиентного бустинга (в реализации CatBoost).

Ранее авторами было показано, что использование 5-минутных данных улучшает качество прогнозирования геомагнитного индекса Kp. При этом интерпретация полученной модели показала, что полученные в результате существенные признаки соответствуют физической картине процесса. Так, например, важным признаком для прогнозирования геомагнитных возмущений оказалось минимальное за час значение Bz, подсчитанное по 5-минутным данным. Так как индекс Dst отличается от индекса Kp как по способу его вычисления, так и по положению магнитных станций, на основании данных которых вычисляется соответствующий индекс (приэкваториальные для Dst и приполярные для Kp), представляло интерес проверить, воспроизводится ли результат при прогнозировании индекса Dst.

В докладе сначала демонстрируются результаты только с использованием часовых средних, исследуется эффект от учета истории временных рядов (погружения). Демонстрируется, что, как и в случае Kp-индекса, использование погружения дает значительный прирост качества. Результаты сравниваются с тривиальным инерционным прогнозом, для которого в качестве прогнозируемого значения берется последнее известное значение.

Далее показывается, что использование 5-минутных характеристик ММП и СВ дополнительно улучшает качество прогнозирования. Производится интерпретация полученной модели, выделяются существенные признаки и сравниваются с существенными признаками, полученными при прогнозировании Kp. Делается вывод о применимости полученных моделей для практического использования на разных горизонтах прогнозирования.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА DST ОТ ПОЛОЖЕНИЯ И ДЛИНЫ НАБОРОВ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ "СИВИЛЛА"

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

[1]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

[2]Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ)

Одной из характеристик, которую принято использовать для количественного измерения возмущения магнитосферы Земли, является геомагнитный индекс Dst. Прогнозирование его значения необходимо в связи с тем, что геомагнитные возмущения могут оказывать негативное влияние на работу технических устройств на земле и на околоземной орбите, а также на самочувствие некоторых людей.

Методы машинного обучения (ММО) эффективно решают задачу прогнозирования геомагнитного индекса Dst 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 объясняется прежде всего сменой фаз солнечного цикла и 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 индекса Dst с горизонтом 1, 3 и 6 часов. Режим позволяет запускать в пакетном автоматическом режиме большое количество экспериментов с сохранением и агрегацией результатов моделирования для дальнейшего сравнения моделей с различными параметрами и различными данными в качестве обучающих, что помогает в исследовании зависимости качества прогноза от параметров тренировочного и тестового наборов для различных ММО. С помощью пакетного режима были проведены эксперименты со скользящими тренировочными и тестовыми наборами данных.

Суть первого эксперимента состоит в фиксации тренировочного набора и анализе изменения ошибки прогноза при различных положениях тестового набора; величина тестового набора на протяжении эксперимента остается постоянной. Такие эксперименты были проведены для различных значений величины и положения тестового набора и для различных значений величины тренировочного набора. Второй эксперимент проводился аналогичным образом для скользящих тренировочных наборов и различных фиксированных тестовых наборов.

На основании полученных данных были построены и проанализированы графики зависимостей качества прогноза от положения и величины тренировочного и тестового наборов для различных моделей ММО и горизонтов прогноза.

В работе представлены полученные зависимости и приведен анализ результатов проведенных экспериментов для задачи прогнозирования индекса Dst.

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

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ.

С.В. Кузин, С.А. Богачев, А.В. Трифонов, М.О. Рязанцева, А.А.Петрукович

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, s.v.kuzin@cosmos.ru

В последнее время сильно выросли требования к повышению достоверности прогнозирования состояния космической погоды (КП). Это связано с несколькими факторами: развитием космической группировки, миниатюризацией космической техники и обусловленной этим повышенной чувствительностью к факторам КП, интенсификацией межпланетных перелетов, повышением надежности работы и точности работы систем спутниковой навигации и т.п.

Поскольку в основном КП определяется активными процессами, происходящими в верхних слоях Солнца, то результаты мониторинга этих процессов являются основой для практически всех типов прогнозов КП – от краткосрочного (несколько суток) до долгосрочного (на периоды, сравнимые с циклом солнечной активности). Поскольку различные проявления активности Солнца (АС) дают вклад в разные типы прогноза, то для обеспечения данными всех типов прогнозов требуется комплексный мониторинг АС. АС наиболее заметно проявляется в короне Солнца, среда которой представляет собой высокотемпературную разреженную плазму, с максимумом излучения в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах спектра, наблюдение в которых возможно только с борта космических аппаратов.

Для эффективной реализации краткосрочных и сверхкраткосрочных (1-3 часа) прогнозов КП необходима дополнительная информация о локальных условиях космического пространства вблизи орбиты Земли. В частности, с помощью измерений в точке либрации L1 можно с высокой степенью достоверности селектировать геоэффективные явления солнечной активности и спрогнозировать степень их воздействия на магнитосферу Земли.

В настоящее время данные по АС получают с комплексов аппаратуры, установленных на специализированных спутниках мониторинга АС (например, SWFO и Aditya), метеорологических космических аппаратах (например, GOES, США, ЭЛЕКТРО-Л, Россия) или с научных обсерваторий (в основном SOHO, ЕС/США и SDO, США).

В России прорабатываются 2 комплекса аппаратуры для мониторинга АС и космической погоды: на борту специализированной солнечной обсерватории «Геофизика-Либрация» и на платформе с солнечной ориентацией на метеорологическом космическом аппарате нового поколения «Электро-М».

Оба солнечных комплекса имеют набор аппаратуры, обеспечивающий получение данных для всех типов прогнозов КП. В состав аппаратуры входят: телескопы ВУФ и МР диапазонов, коронографы ВУФ, УФ и оптического диапазона и рентгеновский спектрофотометр. В комплекс аппаратуры «Геофизика-Либрация» дополнительно входят 2 оптических прибора – оптический радиометр для измерения солнечной постоянной и магнитограф для построения карты магнитного поля на фотосфере, а также плазменный комплекс для локальных измерений параметров плазмы солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и потоков энергичных частиц. Эти КА имеют разные орбиты, которые диктуют специфику работы комплекса для оперативного получения данных.

В докладе обсуждаются научные задачи комплекса приборов, их устройство, характеристики, а также специфика работы в зависимости от космического аппарата, на который они установлены, в том числе возможности по использованию приборов комплекса в составе группировки наноспутников.

Исследование в части научных задач и перспектив использования аппаратов типа кубсат выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 23-72-30002).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Селиванов В.Н.[1], Аксенович Т.В.[1], Билин В.А.[1,2], Сахаров Я.А.[1,2]

[1]ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru
[2]ПГИ, г. Апатиты, Россия

Кольским научным центром РАН совместно с Полярным геофизическим институтом создана региональная система мониторинга геоиндуцированных токов (ГИТ) в нейтралях трансформаторов, накопившая значительный массив информации о влиянии геомагнитных возмущений на электрическую сеть в Мурманской области и Карелии протяженностью 800 км [1, 2].

Система измеряет следующие компоненты полного тока: постоянную составляющую, несущая информацию непосредственно о ГИТ; амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоник, которые позволяют оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании ГИТ значительной амплитуды.

В ходе аналитических исследований влияния ГИТ на насыщение магнитопровода трансформатора выявлено неоднозначное изменение содержания высших гармоник: с ростом величины ГИТ возможно как увеличение, так и уменьшение амплитуды гармоник [3], что обусловлено нелинейностью вольтамперной характеристики силового трансформатора.

В данной работе представлены результаты обработки измерений токов в нейтралях четырех трансформаторов за период с 2011 по 2025 гг. Построены графики зависимостей амплитудных значений токов первой, второй и третьей гармоник от величины ГИТ в нейтралях трансформаторов в Выходном, Ревде, Лоухах и Кондопоге в дни наиболее сильных геомагнитных возмущений. Выполненный анализ подтверждает нелинейный характер корреляционных зависимостей для разных гармонических последовательностей трехфазной системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01240, https://rscf.ru/project/25-29-01240/.

1. Barannik M.B., Danilin A.N. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2012. Vol. 55. No. 1. P. 110.
2. Selivanov V.N., Aksenovich T.V. et al. // Solar.-Terr. Phys. 2023. Vol. 9. No. 3. P. 93.
3. Selivanov V.N., Sakharov Y.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. Vol. 85. No 3. P. 303.

ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ (ГИТ) И ОЧЕНЬ ИНТЕНСИВНЫЕ СУББУРИ В ОКТЯБРЕ 2024

И.В. Дэспирак[1], П.В. Сецко[1], А.А. Любчич[1], Я.А. Сахаров[1], В.Н. Селиванов[2]

[1] *ПГИ, г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com*
[2]ЦЭС *КНЦ РАН, Апатиты, Россия*

С 6 по 12 октября 2024 года произошло две последовательных магнитных бури, одна из которых была экстремально сильной, так называемая супербуря, Dst ~ −333 нТл. Первая буря (Dst ~ −148 нТл) началась 6 октября и на фазе ее восстановления в ~ 15:20 UT 10 октября произошла вторая магнитная супербуря, которая была одной из самых сильных бурь 25 солнечного цикла. В ходе этих двух бурь были зафиксированы чрезвычайно интенсивные геомагнитные возмущения, так называемые суперсуббури (CCC: SML <−2500 нТл). Согласно базе данных SuperMAG, было зафиксировано несколько событий SSS и очень интенсивных суббурь: ~ 15:50 и ~17:08 UT 10 октября, ~ 08:06 и 08:16 UT 11 октября, ~ 10:24 UT 12 октября 2024 года. Обсуждаются различные особенности развития ионосферных электроджетов и распределения FAC во время этих пяти случаев сильных суббурь и их возможная связь с появлением или отсутсвием интенсивных ГИТ. Для этой цели были использованы картины планетарных пространственно−временных распределений магнитных возмущений, полученные с использованием данных, собранных наземными сетями (SuperMAG, INTERMAGNET и IMAGE), а также магнитных регистраций спутников проекта AMPERE; параметры солнечного ветра и ММП определялись по данным базы OMNI. Используя прямые измерения ГИТ в нейтралях трансформаторов, расположенных в нескольких точках регистрации на Карело−Кольской линии электропередачи (Выходной, Лоухи, Кондопога), проведен детальный анализ появления интенсивных ГИТ на Северо−Западе России во время этого сложного события космической погоды 6−12 октября 2024 года состоящего из двух сильных магнитных бурь. Показано, что самый сильный ГИТ (~30А) был зарегистрирован в ~15:30 UT 10 октября на станции Выходной и был связан с приходом ударной волны второго коронального выброса массы. Однако ГИТ на главных фазах развития обоих бурь и во время их фаз восстановления не превышали ~ 10−15А, в том числе и во время развития очень сильных суббурь и суперсуббурь. Обсуждаются различные особенности развития суббурь во время этих пяти случаев и возможные причины отсутствия интенсивных ГИТ на подстанциях Северо−Запада России во время их развития.

СПЕКТРОМЕТР КОДИЗ-2 ДЛЯ СПУТНИКА СПОРПИОН

Золотарев И.А., Бенгин В.В., Нечаев О.Ю., Антонюк Г.И., Садыков А.М., Седых П.В., Сазонова А.В., Лебедев М.О., Свертилов С.И., Богомолов В.В., Оседло В.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, zolotarev@sinp.msu.ru

Эксперимент КОДИЗ-2 проводится на борту спутника “Скорпион” и направлен на изучение радиационных условий космического полета. Спектрометры ионизирующих излучений на основе полупроводниковых детекторов — это распространённые приборы на крупных спутниках для изучения космической погоды, в том числе они используются на наноспутниках, таких как кубсаты [1,2].

Особенность прибора КОДИЗ-2 заключается в сочетании трех телескопических сборок детекторов с ортогональными направлениями регистрации частиц. Таким образом КОДИЗ-2 позволяет восстанавливать угловое распределение частиц. Прибор находится в процессе летных испытаний, по окончании которых он будет переведен в мониторинговый режим. Также предусмотрены режимы по-событийной записи для каждой частицы и технический режим анализа формы импульсов.

Спутник «СКОРПИОН» был запущен в 28.12.2025 года, в состав аппаратуры спутника кроме приборов КОДИЗ-2 и ТГС, которые предназначены для исследования радиационных условий, входит прибор БИОЛ-2 с фотолюминесцентными штаммами E.Coli на борту и БИОЛ с хлореллой. Такая комбинация приборов позволит учесть факторы, влияющие на биологические объекты в околоземном пространстве.

1. Angelopoulos V, Tsai E, Bingley L, Shaffer C, Turner DL, Runov A, Li W, Liu J, Artemyev AV, Zhang XJ, Strangeway RJ. Space science reviews. 2020 Aug;216(5):103.
2. Johnson, A. T., Shumko, M., Griffith, B., Klumpar, D. M., Sample, J., Springer, L., ... & Blake, J. B. (2020). Review of Scientific Instruments, 91(3).

ПЛАНЕТАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ И ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПО ДАННЫМ ПРИБОРОВ ДЕПРОН И КОДИЗ

Антонюк Г.И.[1,2,*], **Бенгин В.В.**[1,3], **Золотарев И.А.**[1], **Юшков Б.Ю.**[1]

1. НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия. 2. *Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*. 3. *ГНЦ ИМБП РАН, г. Москва, Россия*. * antonjuk.gi15@physics.msu.ru

Анализ планетарного распределения частиц на орбите Земли является прикладной задачей, позволяющей как оценить корректность работы научной аппаратуры по известным особенностям, так и проследить динамику поведения этих частиц на заданной орбите.

В настоящей работе использованы данные двух приборов разработки НИИЯФ МГУ, установленных на малых космических аппаратах. Первый прибор – ДЕПРОН – работал на борту МКА «Ломоносов» в 2016 году [1]. Второй прибор – КОДИЗ – работал на борту МКА «Монитор-1» в 2022 году [2]. Оба прибора были разработаны в Лаборатории радиационного мониторинга НИИЯФ МГУ как компактная аппаратура, оснащенная набором детекторов для измерения различных сортов частиц. Спутники были запущены на схожую орбиту – круговую солнечно-синхронную орбиту, высотой около 500 км, с наклонением 97°.

Совместное изучение потоков нейтронов и заряженных частиц по данным выбранных детекторов показало различия в их поведении в разных географических областях. Также ведется анализ динамики этих потоков в зависимости от геомагнитных возмущений. Дополнительный интерес вызывает различие условий солнечной активности во время работы аппаратуры – ДЕПРОН работал в конце 24 солнечного цикла, в то время как КОДИЗ в начале 25 солнечного цикла.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ при поддержке Программы развития МГУ (проект № 24-Ш01-05), научно-образовательного проекта Space-π и Фонда содействия инновациям.

1. Планетарное распределение мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения по данным эксперимента ДЭПРОН на ИСЗ Ломоносов / И. А. Золотарев, В. В. Бенгин, Б. Ю. Юшков [и др.] // Космические исследования. – 2022. – Т. 60, № 2. – С. 99-104. – DOI 10.31857/S0023420622020078. – EDN BFCLQI.

2. Monitoring of radiation fields in near-earth space with the use of kodiz instrument on-board cubesat monitor-1 / G. I. Antonyuk, V. V. Benghin, I. A. Zolotarev et al. // Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors (Proceedings of the XIII International Conference). — Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. — Switzerland: Springer Nature, 2023. — P. 159–165. – DOI 10.1007/978-3-031-50248-4/_17.

НАБЛЮДЕНИЯ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА В 2025 Г. НА СПУТНИКАХ ФОРМАТА КУБСАТ МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Богомолов А.В., Богомолов В.В., Еремеев В.Е., Июдин А.Ф., Мягкова И.Н., Оседло В.И., Свертилов С.И.

МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, aabboogg@srd.sinp.msu.ru

В рамках реализуемой в МГУ программы «Созвездие-270» в настоящее время функционирует группировка, состоящая из пяти кубсатов, выведенных на орбиту 27 июня 2023 г. (Авион, Монитор-2, Монитор-3, Монитор-4, UTMN2) и двух кубсатов, запущенных 5 ноября 2024 г. (Альтаир. АрктикСат). На каждом из них установлены сцинтилляционные детекторы для регистрации жесткого рентгеновского и гамма-излучения и заряженных частиц, специально разработанные в НИИЯФ МГУ для подобных экспериментов. Данные кубсатов МГУ доступны на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php в виде графиков и таблиц данных мониторинга с временным разрешением до 1 с.

Кубсатами группировки МГУ наблюдалось жесткое рентгеновское излучение >30 кэВ от более сорока солнечных вспышек, в основном, имеющих класс M и X по мягкому рентгеновскому излучению, хотя наблюдались и более слабые события. Каталог вспышек также представлен на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ. На этих же кубсатах проводятся мониторинговые измерения космической радиации, в том числе потоков СКЛ, ускоренных во вспышках, регистрируемых на околоземной орбите в области полярных шапок. Использование группировки из нескольких кубсатов даже при ограниченном ресурсе каждого аппарата, функционирующего уже несколько лет, обеспечило фактически непрерывные наблюдения, например, во время активного периода начала ноября 2025 г. Другим преимуществом использования нескольких аппаратов является верификация данных, в частности, по солнечным вспышкам.

28 декабря 2025 г. состоялся запуск еще одного кубсата МГУ – «Скорпион» (формат 12U), в настоящее время проводятся его летные испытания. Приборы, установленные на этом аппарате, позволяют решать задачи мониторинга вспышечной активности и космической радиации еще более успешно.

ПРОСТРАНСВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В 2024-2025 ГГ. ПО ДАННЫМ ГРУППИРОВКИ НАНО-СПУТНИКОВ МГУ «СОЗВЕЗДИЕ-270»

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

МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, irina@srd.sinp.msu.ru

В работе представлены результаты наблюдений пространственно-временной динамики потоков электронов суб-релятивистских энергий внешнего радиационного пояса Земли во время магнитных бурь разной интенсивности 2024-25 гг., вызванных приходом к Земле как корональных выбросов массы, так и высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр.

Данные наблюдения выполнялись в экспериментах на кубсатах, входящих в группировку «Созвездие-270». Рассматриваемые вариации являются одним из важнейших явлений космической погоды, поскольку приводят к существенным изменениям радиационных условий в околоземном космическом пространстве. Суб-релятивистские электроны могут негативно влиять на работу космических аппаратов (КА), поскольку высокие уровни их потоков могут с большой вероятностью повредить чувствительные электронные компоненты спутниковой аппаратуры, причем в условиях дальнейшей миниатюризации электроники в космических экспериментах негативное влияние электронов внешнего радиационного пояса будет возрастать.

На сегодняшний день в рамках реализуемой в МГУ программы «Созвездие-270» на околоземной орбите функционирует группировка, состоящая из семи кубсатов: пять из них - Авион, Монитор-2, Монитор-3, Монитор-4, UTMN2 - были выведены на орбиту 27 июня 2023 г., и два кубсата – Альтаир, АрктикСат – 5 ноября 2024 г. Для регистрации заряженных частиц (суб-релятивистсвких электронов) используются установленные на каждом из кубсатов сцинтилляционные детекторы, специально разработанные в НИИЯФ МГУ для данной программы. Одновременное функционирование на орбите нескольких спутников позволяет разделить пространственные и временные изменения в заданной области околоземного космического пространства, что не осуществимо для эксперимента, выполняемого на единственном КА.

Спутники Авион, Монитор-2 и Альтаир наряду с традиционными радиопередатчиками в УКВ-диапазоне оснащены передатчиками в S-диапазоне, позволяющими проводить фактически непрерывные измерения. Данные кубсатов МГУ с временным разрешением до 1 секунды доступны на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ по адресу https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИО ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ РАДИОСВЯЗИ В КОРОТКОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Моисеев И.А.[1], Козлов В.А.[2], Моисеева В.В.[1], Мёрзлый А.М.[1], Никишов В.В.[3]

[1] ИКИ РАН, г. Москва, Россия

[2] ИЗМИРАН, г. Троицк Москва, Россия

[3] ООО «ОКБ «Эланор», г. Москва, Россия

Для организации коротковолновой (КВ) радиосвязи важное значение имеет знание характеристик полярной ионосферы. Оценку некоторых параметров полярной ионосферы с учетом неоднородностей в ее структуре и плазменных неустойчивостей в ее различных секторах в целях организации радиосвязи в КВ диапазоне можно проводить с использованием технологии программно-определяемого радио (SDR-технологий).

Предложено наложить архитектуру КВ радиосвязи, включающую мобильные SDR приемники, на систему мобильных устройств (смартфоны) с ГНСС приемниками, описанную в работе [1] и дополнить ее радиоустройствами с фазированной антенной решеткой (ФАР) с активными элементами (от 8 до 64). Передатчики с ФАР размещаются в полярной зоне на удалении между ними 700-1300 км.

SDR технологии позволяют совместить функции радиосистем по получению необходимых данных об ионосфере, предоставлению абонентов услуг связи (в том числе в КВ диапазоне частот) и обмен между радиоустройствами специализированной информацией в диапазоне частот до 6 ГГц. То есть могут участвовать в радиообмене, принимать отраженные сигналы ионозондов от ионосферы и другие радиосигналы от спутников.

Первый этап предлагаемой системы основывается на базе Межведомственной экспериментальной радиотрассы (МЭРТ) ИКИ РАН. В рамках МЭРТ данные в виде параметров принятых SDR приемниками сигналов возможно автоматически транслировать в информационно-аналитическую систему ИКИ РАН.

1. И.А. Моисеев, В.В. Моисеева Предложения по повышению качества прогнозов условий прохождения радиоволн в коротковолновом диапазоне для мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности, том 22, 2025, № 3(85)

АНОМАЛИИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ БОЛЬШИХ МАГНИТНЫХ БУРЬ 24 И 25 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Лукьянова Р.Ю.

ИКИ РАН, Москва, *renata@aari.ru*

Во время магнитных бурь плотность и состав термосферы претерпевают резкие изменения вследствие джоулева нагрева из-за диссипации ионосферных электрических токов, передачи импульса при усилении конвекции ионосферной плазмы, высыпания энергичных частиц, изменения состава ионов и нейтралов. Для крупных магнитных бурь Dst<-100 нТл построены глобальные распределения нейтральной плотности на высоте орбит спутников Swarm. Наблюдается увеличение плотности на сотни процентов относительно предбуревого фонового уровня. С ростом солнечной активности увеличивается шкала высот расширяющегося газа и происходит размывание структуры подобия с высотой. Между полюсами существуют чередующиеся области повышения плотности и депрессии, которые имеют вид стоячей волны. Рассеяние джоулева тепла вызывает крупномасштабные перемещающиеся атмосферные возмущения между полюсами с периодом несколько часов.

Влияние магнитной бури мая 2024 года на мезосферу и термосферу высоких широт было изучено с помощью одновременных наблюдений спутников TIMED/SABER в мезосфере-нижней термосфере и Swarm в верхней термосфере. Обнаружены температурные и динамические возмущения, асимметричные как внутри северного полушария, так и между полушариями. Анализ изменений нейтральной плотности позволяет оценить возможную величину деградации орбит КА при сильных бурях.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С ГЛОБАЛЬНЫМИ КАРТАМИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

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), интегрального параметра, описывающего общее количество электронов в ионосферном столбе единичной площади. Такие карты в настоящее время являются одними из основных источников информации о состоянии ионосферы в реальном времени.

В исследовании представлено сравнения Глобальной Динамической Модели Ионосферы GDMI, созданной в ИЗМИРАН, Международной модели ионосферы IRI-2016 и модели NeQuick-2 с GIM, построенными в центре обработки ионосферных данных Лаборатории реактивного движения NASA (JPL). Сравнения моделей с GIM были проведены для спокойных геомагнитных условий, низкой и высокой солнечной активности. Для анализа эффективности моделей были использованы геомагнитно-спокойные дни разных сезонов (зима, весна, лето, осень). Для количественной оценки качества моделей для каждого дня были рассчитаны такие статистические показатели, как среднеквадратическая ошибка RMSE (Root Mean Square Error) и средняя абсолютная ошибка MAE (Mean Absolute Error). В результате проведенного анализа было получено, что RMSE и MAE всех моделей увеличиваются с ростом солнечной активности. При этом, статистические показатели RMSE и MAE Глобальной Динамической Модели Ионосферы демонстрируют лучшую эффективность по сравнению с NeQuick-2 и IRI-2016.

Для низкой солнечной активности: $RMSE_{GDMI}$ = 2.7 – 3.8 TECu; $RMSE_{NeQuick-2}$ = 2.8 – 4.3 TECu и $RMSE_{IRI-2016}$ = 3.1 – 4.9 TECu. Для высокой солнечной активности: $RMSE_{GDMI}$ = 8.1 – 12.6 TECu; $RMSE_{NeQuick-2}$ = 9.1 – 18.1 TECu и $RMSE_{IRI-2016}$ = 8.7 – 20.5 TECu.

Для низкой солнечной активности: MAE_{GDMI} = 2.1 – 2.9 TECu; $MAE_{NeQuick-2}$ = 2.1 – 3.0 TECu и $MAE_{IRI-2016}$ = 2.5 – 3.7 TECu. Для высокой солнечной активности:MAE_{GDMI} = 6.0 – 9.4 TECu; $MAE_{NeQuick-2}$ = 7.8 – 12.4 TECu и $MAE_{IRI-2016}$ = 8.5 – 16.0 TECu.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ОСНОВЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ УЧАСТКА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Билин В.А.[1], **Селиванов В.Н.**[2], **Сахаров Я.А.**[1]

[1] *Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия* bilinvlad@gmail.com

[2] *Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты*

В работе рассмотрен участок электроэнергетической сети Мурманской области, для которого была разработана эквивалентная электрическая схема с целью анализа геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ). В рамках исследования была сформирована база данных, содержащая детализированную информацию о подстанциях, трансформаторах и линиях электропередачи рассматриваемого участка сети. Такая структура данных обеспечивает возможность воспроизводимого моделирования ГИТ и отражает реальные топологические и параметрические особенности энергосистемы, что является необходимым условием для корректной оценки воздействия геомагнитных возмущений.

На основе сформированной эквивалентной схемы был разработан прототип модели и выполнен расчёт ГИТ для двух базовых сценариев однородного геоэлектрического поля с напряжённостью 1 В/км, ориентированного в северном и восточном направлениях. Полученные результаты позволили проанализировать распределение токов в элементах сети и подтвердить работоспособность реализованного расчётного подхода. Дополнительная валидация функциональности модели была проведена путём включения в базу данных гипотетической тестовой сети, предложенной в статье Horton (2012), и сопоставления полученных результатов с опубликованными эталонными значениями. Это подтверждает универсальность разработанного инструментария и его применимость как для реальных, так и для эталонных сетевых моделей.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 25-29-01240, https://rscf.ru/project/25-29-01240/.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РАЗЛИЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА НА РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ЛЭП МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Белаховский В.Б.[1], Пилипенко В.А.[2,3], Сахаров Я.А.[1], Селиванов В.Н.[4]

[1] – Полярный геофизический институт, г. Апатиты
[2] – Институт физики Земли им О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва
[3] – Институт космических исследований РАН, г. Москва
[4] – Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты

belakhov@mail.ru

В работе проведен сравнительный анализ влияния геомагнитных пульсаций типа Pg и низкочастотных пульсаций Pc5-6, Pi3 типа на рост геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линии электропередач (ЛЭП) Мурманской области с использованием данных магнитометра в обсерватории ПГИ «Лопарская» (LOP) и данных с подстанции «Выходной» (VKH), расположенной вблизи Мурманска.

Ранее в научной литературе не рассматривался вопрос влияния Pg-пульсаций (pulsations giant) на рост ГИТ, поскольку данные пульсации имеют относительно небольшую амплитуду (в пределах нескольких десятков нТл) и встречаются достаточно редко в данных наземных магнитометров. Pg пульсации относятся к Pc4 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 Pg-пульсации более ярко выражены в Y-компоненте геомагнитного поля. Pg-пульсации благодаря своей монохроматичности могут быть использованы в качестве маркера для оценки влияния частоты геомагнитных возмущений на рост ГИТ.

Проанализирована порядка десяти событий. Несмотря на то, что Pg пульсации приводили к большему скачку вариабельности геомагнитного поля dB/dt, чем Pc5-6/Pi3 пульсации, амплитуда ГИТ во время регистрации пульсаций Pg 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 (Pc6-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 Pg и Pc6-пульсаций показывают согласие данного механизма с экспериментальными наблюдениями.

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

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.

ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ГРАДИЕНТНЫМ БУСТИНГОМ И БЭГГИНГОМ ДЛЯ ПРОГНОЗА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ foF2 СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ F2

Шагурин И.А., Мерзлый А.М., Филатов Г.С., Янаков А.Т.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, iashagurin@mail.ru

Критическая частота F2 слоя (foF2) – ключевой параметр для радиосвязи и навигации, особенно в условиях чрезвычайных ситуаций [1]. Традиционные методы и нейросетевые модели (LSTM) [2, 3] сталкиваются с проблемами при резких изменениях ионосферы.

В работе исследуется новый подход: применение ансамблевых методов градиентного бустинга и бэггинга не к решающим деревьям, а к ансамблям нейронных сетей. Цель – сравнительный анализ эффективности классического подхода (бустинг/бэггинг деревьев) и предлагаемого (бустинг/бэггинг нейросетей) для прогноза foF2.

В работе исследовано качество прогноза, полученного при сочетании способности нейросетей выявлять сложные временные зависимости [3, 4] с регуляризующим эффектом ансамблей. Исследование проводится на данных ионосферной станции ИЗМИРАН (Москва) с использованием метрик MAE и R^2.

Результаты направлены на создание более надежных моделей для систем поддержки принятия решений в интересах МЧС России.

1. Bilitza D., et al. International Reference Ionosphere 2016 // Space Weather. 2017.
2. Салимов Б.Г., Хмельнов А.Е. Предсказание foF2 с помощью LSTM // Ляпуновские чтения. 2020.
3. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural computation. 1997.
4. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2 СЛОЯ (foF2) НА ОСНОВЕИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТИ LSTM И ГЛОБАЛЬНОЙ МЕДИАННОЙ МОДЕЛИ F2СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ (ГММF2) ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

Филатов Г.С.,Верещагина В.М., Мерзлый А.М., Моисеев И.А., Никифоров О.В., Шагурин И.А., Шубин В.Н., ЯнаковА.Т.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, g.filatov@cosmos.ru

В работе представлены результаты развития метода оперативного прогноза критической частоты foF2 на основе рекуррентной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (LSTM), а также глобальной медианной модели F2 слоя ионосферы ГММF2[1].

Проведено исследование возможности применения метода для ряда станций, расположенных в различных географических и геофизических условиях: Москва (средние широты), Архангельск (субавроральные широты).

В качестве критерия точности использовалась средняя абсолютная ошибка (MAE) [2].

Целью работы является оценка адаптивности и универсальности разработанной нейросетевой архитектуры и методов её коррекции при прогнозировании ионосферных параметров в регионах с разным уровнем влияния солнечной и магнитной активности. Показано, что применение адаптивных способов коррекции позволяет устойчиво повышать точность прогноза foF2 на ст. Москва и ст. Архангельск для рассмотренных гелио-геофизических условий.

1. Шубин В.Н. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614796, Глобальная медианная модельF2слоя ионосферы(ГММF2)// 2021.

2. Филатов Г.С. и др. Применение модели нейронной сети оперативного прогноза критической частоты ионосферы для мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций// Технологии гражданской безопасности. Передана в редакцию 17.11.2025.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ ПРИ ПОМОЩИ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРИЁМНИКА ГНСС НА ОСТРОВЕ ЗЕМЛЯ АЛЕКСАНДРЫ

Куприянов А.О.[1], Мингалёв И.В.[2], Мёрзлый А.М.[3], Морозов Д.А.[1], Петрукович А.А.[3], Сахаров Я.А.[2], Янаков А.Т.[3]

[1] *ФГБОУ ВО МИИГАиК, г. Москва, Россия, gnss@miigaik.ru*

[2] *Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия*

[3] *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

Аппаратно-программные комплексы (АПК) основанные на специализированных приёмниках сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как NovAtel GPStation-6, обладают уникальной способностью регистрировать сырые данные радионавигационных сигналов, включая высокоточные измерения фазы и амплитуды несущей. Эта функциональность позволяет исследователям анализировать кратковременные флуктуации сигнала, вызванные ионосферными неоднородностями, и на их основе вычислять ключевые индексы ионосферных сцинтилляций – такие как сигма фазы (σφ), характеризующая флуктуации фазы сигнала, и индекс S4, отражающий степень вариаций его амплитуды. Благодаря высокой частоте дискретизации и поддержке многоканальных, многочастотных измерений, приёмники подобного класса становятся незаменимыми инструментами для мониторинга и изучения динамики ионосферы, особенно в условиях повышенной геомагнитной активности.

В апреле–мае 2025 года на острове Земля Александры (архипелаг Земля Франца-Иосифа) была проведена специальная полярная экспедиция, посвящённая мониторингу высокоширотной ионосферы в условиях весеннего переходного периода. Для наблюдений ионосферных возмущений в ходе экспедиции использовался аппаратно-программный комплекс мониторинга ионосферы (АПК ИМ) и входящее в его состав специальное программное обеспечение. Основу измерительного комплекса составил приёмник NovAtel GPStation-6, специально адаптированный для работы в суровых арктических условиях. Возможности АПК ИМ непрерывно регистрировать сигналы ГНСС на нескольких несущих частотах, удалось получить уникальные временные ряды, отражающие развитие ионосферных сцинтилляций и вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в приполярной зоне. Экспедиция является второй в рамках долгосрочной программы и продолжает полевые исследования, начатые на острове Земля Александры (архипелаг Земля Франца-Иосифа) в 2021 году.

Для всестороннего анализа данных, полученных в ходе экспедиций, был разработан специализированный программный комплекс, ориентированный на обработку данных, собранных приёмником GPStation-6. Он обеспечивает автоматизированный статистический анализ их временной и пространственной динамики ионосферных сцинтилляций и визуализацию данных.

В апреле–мае 2025 года на острове Земля Александры в отдельные интервалы времени наблюдались значительные фазовые и амплитудные ионосферные сцинтилляции. В рамках обработки данных был выполнен анализ временной эволюции и пространственного распределения этих возмущений с учётом параметров геомагнитной активности, зафиксированной в тот же период. Особое внимание уделялось событиям, сопровождавшимся геомагнитными бурями уровней G1–G3: для каждого такого события строились временные профили индексов S4 и сигма фазы, а также оценивалась их продолжительность и локализация.

КАТАЛОГ СОБЫТИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ДЕТЕКТОРА ТЕЛЕСКОПА ART-XC ОБСЕРВАТОРИИ СПЕКТР-РГ В ТОЧКЕ ЛАГРАНЖА L2 СИСТЕМЫ СОЛНЦЕ-ЗЕМЛЯ

Зимовец И., **Филиппова Е., Арефьев В., Штыковский А., Кривонос Р., Самородова А., Лутовинов А.**

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

На основе анализа данных в канале 60-120 кэВ детектора телескопа ART-XC имени Павлинского на борту обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (Монитор радиационной обстановки окрестности точки L2, [1]) в интервале времени от начала регулярных наблюдений 1 февраля 2020 г. по декабрь 2025 г. на базе установленного критерия (порога отсечки) найдено 32 события надфонового возрастания интенсивности. Каталог содержит времена начала, пика и окончания событий, пиковые темпы счета, флюенсы и некоторые другие параметры. Другой каталог, полученный на основе иного алгоритма поиска событий, ранее был представлен в работе [2].

Анализ данных солнечных наблюдений показал, что все эти события имели солнечное происхождение – им предшествовали эрупции в атмосфере Солнца, включающие рентгеновские вспышки и/или корональные выбросы массы (КВМ), наблюдаемые в белом свете с помощью коронографов SOHO/LASCO. Для 23 (72%) событий родительские вспышки располагались на видимой части солнечного диска. В остальных случаях, кроме двух, рентгеновские вспышки детектировались на обратной (для околоземного наблюдателя) стороне Солнца телескопом-спектрометром STIX на борту космического аппарата Solar Orbiter. Для большинства родительских вспышек определены гелиографические координаты. Вспышки располагались в широком диапазоне гелиографических долгот вплоть до ±180°; 21 (65%) из них были в западной части видимого солнечного диска. По крайней мере 26 (81%) рентгеновских вспышек сопровождались радиовсплесками II типа (по данным [3]), свидетельствующими о возбуждении крупномасштабных ударных волн в солнечной короне. Все без исключения события ассоциированы с КВМ, некоторые события - с серией последовательных КВМ. В большинстве случаев КВМ имел тип “гало”. Диапазон линейных скоростей ассоцированных КВМ от 489 до 2792 км/с, при средней скорости 1555 км/с. Согласно каталогу NOAA/SWPC [4] 17 из 32 (53%) событий сопровождались протонными (с энергиями выше 10 МэВ) возрастаниями на геостационарной орбите по данным GOES.

Сделан вывод о том, что детектор телескопа ART-XC регистрирует события солнечных энергичных частиц и является полезным инструментом для мониторинга радиационной обстановки в окрестности L2 системы Солнце-Земля.

1. https://monitor.srg.cosmos.ru/
2. Ожередов В. и др. Создание каталога протонных возрастаний монитора радиационной обстановки Спектр-РГ // Сборник трудов всероссийской конференции “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2025)”, стр. 75. ИКИ РАН, Москва.
3. ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/
4. ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/SPE.txt

КРИВОЛИНЕЙНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ФОРМЫ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ МЕЖПЛАНЕТНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАСС

Ширяев А.О.[1,2], **Капорцева К.Б.**[1], **Лаврухин А.С.**[1], **Невский Д.В.**[1,3]

[1]*НИИ Ядерной Физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Росси*[2]*я*
[2]*Факультет космических исследований МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Росс*[3]*я*
[3]*Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*
anton.o.shiryaev@gmail.com

Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) — зарегистрированные в межпланетном пространстве выбросы солнечной плазмы. Геоэффективные МКВМ, вызывающие сильные геомагнитные возмущения, часто распространяются существенно быстрее окружающего солнечного ветра, и перед ними возникает магнитогидродинамическая ударная волна. Геоэффективность МКВМ определяется как магнитогидродинамическим давлением ударной волны, так и магнитной структурой тела МКВМ [1]. Наклон фронта ударной волны так же оказывает влияние на геоэффективность события: воздействие ударных волн с меньшим углом наклона приводит к более медленному изменению состояния магнитосферы [2][3]. Поэтому определение локальной геометрии формы фронта МКВМ имеет значение для решения задач космической погоды. Существует ряд стандартных методов, моделирующих фронт УВ как плоскость в пространстве. В работе рассмотрены результаты применения основанных на теореме магнитогидродинамической компланарности методов вычисления угла наклона плоскости ударной волны МКВМ [4] по данным спутников ACE, WIND, DSCOVR, THEMIS. Описан кинематический мультиспутниковый метод вычисления локальной нормали к ударной волне и показаны результаты применения его прямолинейной (как плоскость) и криволинейной (как сегмент поверхности сферы) формулировок к данным спутников ACE, WIND, DSCOVR, THEMIS, SOHO, MMS-1. Полученные результаты сравнены с нормалями, предоставленными в каталогах межпланетных ударных волн [5] и [6].

1. Kilpua E.K.J. et al. Solar Wind Properties and Geospace Impact of Coronal Mass Ejection-Driven Sheath Regions: Variation and Driver Dependence // Space Weather. 2019. Vol. 17, № 8.

2. Rudd J.T. et al. How do interplanetary shock impact angles control the size of the geoeffective magnetosphere? // Adv. Space Res. 2019. Vol. 63, № 1. P. 317–326.

3. Oliveira D.M. Geoeffectiveness of interplanetary shocks controlled by impact angles: past research, recent advancements, and future work // Front. Astron. Space Sci. 2023. Vol. 10. P. 1179279.

4. Paschmann G., Daly P.W. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. 1998.

5. CfA Interplanetary Shock Database [Electronic resource]. URL: https://lweb.cfa.harvard.edu/shocks/ (accessed: 18.03.2025).

6. Oliveira D.M. Interplanetary Shock Data Base. 2023.

ПОЛОЖЕНИЕ ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ОБНОВЛЁННЫМ ДАННЫМ КА IMAGE

Лаврухин А.С., **Алексеев И.И.**

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

Используя обновленные данные положения экваториальной и полярной границ авроpального овала, полученные при помощи детектора FUV на борту космического аппарата IMAGE [1] и значения геомагнитных индексов, полученные из каталогов OMNI (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow_min.html) и SuperMAG (https://supermag.jhuapl.edu/), мы анализируем взаимосвязь между ними. Данные о положениях границ представляют собой значения широт для 24 значений локального магнитного времени (MLT). Из геомагнитных индексов рассматриваются SYM-H, AL индексы каталога OMNI и SMR, SML индексы из каталога SuperMAG. В результате исследуются зависимости положения границ овала в зависимости от выбранных геомагнитных индексов. Полученная эмпирическая зависимость сравнивается с полученными в других работах зависимостями.

1. Chisham, G., Burrell, A. G., Thomas, E. G., & Chen, Y.-J. (2022). Ionospheric boundaries derived from auroral images. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127, e2022JA030622. https://doi.org/10.1029/2022JA030622

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ

Свентицкий А.В.[1,2], Руменских М.С.[2]

[1] *НГУ, г. Новосибирск, Россия, a.sventitskii@g.nsu.ru*

[2] *ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

Применение лабораторного моделирования, как способа изучения астрофизических явлений, позволило продвинутся в исследовании широкого спектра явлений: взаимодействие солнечного ветра и коронального выброса массы с магнитосферой Земли, магнитосферы горячих экзопланет, исследование туманностей и т.д. На основе принципа физического подобия на установке КИ-1 изучаются явления ближнего и дальнего космоса, происходящие в разреженной бесстолкновительной плазме [1,2,3].

В данной работе исследовалось в различных условиях разлёт облака лазерной плазмы (ЛП) в поперечном магнитном поле в вакууме и в замагниченной фоновой плазме тета-пинча, взаимодействие встречных джетов ЛП друг с другом и с фоновой плазмой тета-пинча. ЛП в виде джетов или облаков создавалась методом лазерной абляции сферических или плоских мишеней из полиэтилена (C_2H_4) излучением мощного CO_2 лазера с энергией ~200 Дж в импульсе ~70 нс.

Одним из методов диагностики было измерение спектрального свечения различных ионов. В ходе экспериментов были зарегистрированы линии излучения водорода и углерода в различных спектральных диапазонах. Установлено, что ионы углерода распространяются на большие расстояния в магнитном поле, чем водород. Получено, что коллимированные джеты имеют ширину порядка 4 см. Для сферического разлёта ЛП в замагниченном фоне наблюдалось снижение интенсивности излучения ионов углерода по сравнению с разлётом ЛП в вакуумном магнитном поле, что свидетельствует о взаимодействии углеродной фракции ЛП с фоновой плазмой.

Работа выполнена при поддержке направления 10 Национального центра физики и математики.

1. Лабораторное моделирование взаимодействия солнечного ветра с лунными магнитными аномалиями / М. С. Руменских, А. А. Чибранов, М. А. Ефимов [и др.] // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 111. – № 5-6(3). – С. 335-342.
2. West–east asymmetry of a mini-magnetosphere induced by Hall effects / I. F. Shaikhislamov, V. G. Posukh, A. V. Melekhov [et al.] // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2015. – Vol. 57. – № 7. – P. 075007.
3. Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования бесстолкновительных ударных волн в замагниченной космической плазме / Ю. П. Захаров, А. Г. Пономаренко, В. Н. Тищенко [и др.] // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – № 5. – С. 399-405.

СОЗДАНИЕ КАТАЛОГА ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ И ИХ ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ (ВСПЫШЕК И КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ) ПО ДАННЫМ МОНИТОРА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ СПЕКТР-РГ

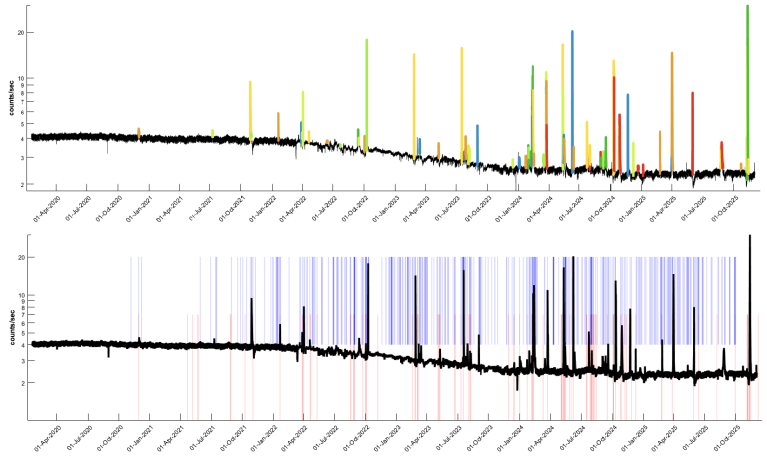
Ожередов В.А.[1], Струминский А.Б.[1], Григорьева И.Ю.[2], Садовский А.М.[1], Арефьев В.А.[1], Штыковский А.Е.[1], Самородова А.Д.[1]

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

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В данной работе предпринята попытка создания прототипа каталога протонных возрастаний, основывающегося на данных монитора радиационной обстановки Спектр-РГ, который регистрирует HXR-излучение в энергетическом диапазоне 60-120 кэВ (это могут быть как первичные фотоны, так и вторичные, рожденные в теле детектора под действием космических лучей). Индикатором протонного возрастания является подъем счета детекторов Спектр-РГ спустя более 10 минут после начала солнечного нетеплового излучения, который обнаруживается в автоматическом режиме при помощи усовершенствованной версии алгоритма, описанного в работе [1]. Предложенный метод эффективно выделяет фон и обнаруживает промежутки времени от момента t_1, когда сигнал начинает значимо превышать фон, до момента t_2, когда он опускается обратно. Будем говорить, что на промежутке $[t_1\ t_2]$ находится конгломерат, возможно, состоящий из отдельных протонных возрастаний, которые рассматриваемый алгоритм также обнаруживает. Метод был успешно протестирован на самом «урожайном» на протонные события периоде 25 цикла – мае-июне 2024 [1], а затем и на всем 25-м цикле вплоть до текущего момента [2]. В данной работе будут представлены выделенные конгломераты за период с 2020 по настоящее время и их разбиение на отдельные протонные возрастания, отождествленные с солнечными источниками (вспышками и корональными выбросами массы). Проводится сравнение созданного прототипа с каталогом НИИЯФ МГУ.

Рисунок ниже наглядно демонстрирует исходный сигнал с монитора Спектр-РГ (черная кривая) и расположение во времени протонных возрастаний (верхняя панель, цветные «всплески») и их источников – рентгеновских вспышек и корональных выбросов массы (соответственно, красные и синие вертикальные линии на нижней панели). В планах автоматическое разделение сигналов первичного солнечного HXC-излучения и вторичного сигнала от солнечных протонов.



1. В.А. Ожередов, А.Б. Струминский, И.Ю. Григорьева. Соотношение между максимальными потоками солнечных протонов и электронов: ускорение и/или распространение? // Космические исследования, в печати.

2. heaconf.cosmos.ru/file/conference/52bc63f3-a0b9-4a62-ae58-8d16586e5a1f/

К ОЦЕНКЕ РАССТОЯНИЙ ДО ОБЪЕКТОВ В КОСМОСЕ АКТИВНЫМ СПОСОБОМ

Э.Г. Мирмович
ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье», г. Химки, Россия, mirmovich1940@mail.ru

Расстояния до космических объектов (КО), измеренные активным способом (АС), обязанным рождением Роберту Уотсон–Уатту, требуют коррекции. Это связано с принятием в формуле $2R=c\Delta t$ скорости распространения локационного сигнала (ЛС) $v\equiv c$ по всей траектории. На самом деле в этих экспериментах всегда $v<c$, и формула для условно покоящихся объектов, т.е. радиальная компонента скорости которых $v_r<<v_a$, должнавыглядеть, как $2R=(v_a<c)\Delta t$, где v_a – средняя скорость для всего пути. Если принять, хотя бы, что $v_1\neq v_2$ на пути «туда и обратно», то средняя скорость $v_a=2v_1v_2/(v_1+v_2)$, и расстояниедо КО: $2R=v_a(\Delta t–(\tau_0+\tau_r+\tau_e))$, где τ_0 – временной микрофрагмент в зоне пуска ЛС с начальной скоростью «с»; τ_r – микровремя «работы» пришедшего ЛС в зоне приёма-отражения самого объекта, зависящее от длины волны, характеристики пакета ЛС, эффекта рефракции; τ_e – микрофрагмент в месте приёма отражённого от объекта ЛС, пока он появится на регистраторе; а Δt_1 и Δt_2 – времена распространения его «туда – обратно».

Главный «замедлитель» ЛС – зависимость v_a от показателя преломления n в среде распространения. Космическое пространство – это GRIN-среда, и в идеале необходим учёт интеграла от показателя преломления вдоль всего пути луча ЛС. В космической среде как в плазме [1] показатель преломления электромагнитных волн (ЭМВ) прямо связан (по М.В. Шулейкину) с плотностью свободных электронов Ne: чем выше Ne, тем больше ЭМВ«отстает» от скорости в вакууме. Вкладом в уменьшение v_a может быть и ограниченность принципа Ферма о «самовольном выборе» ЭМВ ЛС наиболее короткой траектории.Наверное, наибольший эффект замедления ЛС испытывает из-за влияния взаимодействия ЭМВ с ионосферой и солнечным ветром. В принципе создать такую примерную эмпирическую модель возможно, если провести ряд экспериментов по одновременным измерениям Δt_i от КО, находящихся на различных R в растре угла излучения ЛС типа зоны Френеля. Например, с цепочкой – низколетящий космический аппарат (КА), КА на стационарной орбите, Луна и т.д., с учётом параметров «космической погоды». Уместно упомянуть выдержку из письма А.Л. Чижевского от 31.03.1962 г. С.П. Королёву о том, что изучать траектории полёта КА необходимо с учётом солнечных выбросов, временем их появления и затухания, их расположение и движение в околосолнечном пространстве.

Актуальность. 11.08.2023 года автоматическая межпланетная станция «Луна 25» при переходе на посадочную орбиту столкнулась с поверхностью Луны и прекратила своё существование. По официальной гипотетической версии, причина – поздно переданы БКУт.н. «нулевые сигналы», что не позволило выключить двигательную установку КА. Известно, что за последние 50 лет о Луну разбился 51 космический аппарат. Это нельзя объяснить лишь аппаратными нарушениями. Здесь участвует недостоверность параметров в программном обеспечении полета и посадки КА, и в первую очередь таких, как время прохождения управляющих сигналов от центра управления полётом до КА и обратно, а также до самого объекта посадки. Отметим, что даже при $v_a<c$ на 0.01% для Луны ошибка в расстоянии будет ~30 км, для Венеры ~10^3, Меркурия и Марса ~10^4, а для Юпитера >10^5.

Заключение. Расстояния до любых объектов, измеренных АС с расчётом по формуле$2R=c\Delta t$, завышены, и они находятся ближе. Относительно движущихся источника и приёмника ЛС при оценке измерений можно адаптировать для нерелятивистских задач спорную т.н. БРТ – баллистическую теорию Ритца, которую этот уникальный математик не успел довести до полной адекватности в связи со своей смертью в 32 года. В военном деле при АС локации объектов такие микропоправки могут быть особо важны.

1. Zeleny, L.M., Veselovsky, I.S. Plasma heliogeophysics. Moscow. 2008. V. I. 672 p.

СОГЛАСОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ПО РАЗНЫМ КАТАЛОГАМ

Шлык Н.С., Абунина М.А.

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

Корональные выбросы массы (КВМ) оказывают влияние на состояние космической погоды, и значения начальной скорости КВМ во многих случаях являются обязательным входными параметрами для различных моделей прогноза геомагнитных возмущений или роста потоков высокоэнергичных частиц. В данной работе обсуждается проблема несоответствия значений начальных скоростей КВМ, определенных автоматически в режиме близком к реальному времени (каталог CACTUS, https://www.sidc.be/cactus/catalog.php), а также входящих в общедоступный каталог моделирования распространения межпланетных КВМ (DONKI, https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/), и рассчитанных со значительным запаздыванием после более тщательной обработки данных (каталог LASCO, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). В частности, рассмотрены межпланетные КВМ, достигшие орбиты Земли за период с 1997 по 2024 гг. (база данных FEID, https://tools.izmiran.ru/feid), для которых было установлено однозначное соответствие между всеми каталогами (для каталога DONKI – с 2010 г.). Получены оценки связи между значениями начальных скоростей для разных диапазонов скорости и типов КВМ, солнечных циклов и их фаз, которые могут быть использованы при составлении различных прогнозов в квази-реальном времени (с минимальной задержкой, предоставляемой CACTUS и DONKI).

АННОТИРОВАННЫЙ АТЛАС ПРИМЕРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМИССИЙ В АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ИМАДЖЕРАМИ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ОРБИТ КА. ЧАСТЬ 4. СТРУКТУРЫ В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ, ОТОБРАЖАЮЩИЕ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА «POLAR RAIN»

Кузьмин А.К., Крылова А.А., Мёрзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Янаков А.Т.

ИКИ РАН, alkkuzmin@mail.ru

В продолжение серии работ, выполненных в 2022, 2023 и 2025 гг., составлена часть 4 аннотированного атласа примеров изображений структур эмиссий и характеристик плазмы в авроральном овале и полярной шапке во время конкретных событий высыпаний супер-тепловых электронов от Солнца, называемых “polar rain” (полярный дождь). Основной мотивацией создания атласа стал дальнейший анализ опыта развития технологии подготовки и проведения орбитальных и наземных экспериментов, нацеленных на создание системы картографирования и диагностики многообразных динамичных авроральных явлений в полярной ионосфере, отражающихся в мгновенном поле градиентов *Ne* в различных высотных слоях, являющихся «виновниками» проблем при распространении трансполярных сигналов. Как и в частях 1-3, данная работа в основном акцентирована на примерах результатов наблюдений авроральных структур и распределений интенсивности конкретных эмиссий в них, полученных с орбит КА с полярным углом наклонения плоскости орбиты к плоскости экватора и изображающих камер, установленных на полярных станциях, а также на обзоре процессов, происходящих во время этих событий в соответствующих областях полярной ионосферы. Некоторые из представленных примеров из серий изображений эмиссий в конкретных событиях, полученных с поверхности земли, сопровождаются среднемасштабными изображениями структур в области полярной шапки в конкретных секторах MLT в относительно близкое к рассматриваемым событиям время, полученными в авроральных эмиссиях в диапазоне вакуумного ультрафиолета с орбиты КА TIMED и орбит конкретных КА DMSP. Они были зарегистрированы с помощью сканирующих поперек направления полёта изображающих ВУФ-спектрографов GUVI и SSUSI соответственно, одновременно со данными с анализаторов энергетических характеристик электронов и ионов SSJ4 и SSJ5 на орбитах КА DMSP. Приводятся данные измерений распределений характеристик потоков высыпающихся частиц, полученных с помощью спектрометра частиц LEP-EA на орбите КА Geotail, градиентов магнитного поля, а также, в некоторых случаях рассматриваются сопутствующие результаты локальных наблюдений градиентов *Ne* радарами некогерентного обратного рассеяния в соответствующих секторах полярной ионосферы в близкое к наблюдаемым событиям время. В данной работе акцент сделан на рассмотрении характеристик и анализе особенностей конкретных авроральных структур в полярной шапке, возбуждаемых при высыпаниях «лучевых» электронов (strahl electrons) непосредственно из солнечной короны в конкретных условиях. Будет затронута тема характеристик и некоторых механизмов генерации этих электронов, которая до сих пор волнует многих исследователей как экспериментаторов, так и теоретиков.

АППРОКСИМАЦИЯ ПРИЕМНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ШИРОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Кобелев П.Г., Янке В.Г.

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

При решении научных и прикладных задач, например, при проведении широтного мониторинга, важно из данных наблюдений корректно исключить первичные вариации космических лучей. Поэтому целью работы была разработка и реализация методики коррекции данных мониторинга, главным моментом которой было получение приемных коэффициентов как функции широты. В результате получена аппроксимация жесткостной зависимости коэффициентов нулевой и первой гармоники анизотропии космических лучей, рассчитанных для наземной сети детекторов космических лучей. Анализ полученных результатов показал, что аппроксимация выполнена с достаточной точностью, результаты пригодны для использования при проведении широтных измерений во время морских экспедиций.

МЕТОДИКА ДОМЕННОЙ АДАПТАЦИИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ МЕЖДУ ДАННЫМИ РАЗЛИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Пятикоп А.В.[1,2], Гаджиев И.М.[2], Баринов О.Г.[1], Доленко С.А.[1]

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ):
[1]Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), [2]Физический факультет
г.Москва, Россия, jkopqp@gmail.com

В настоящей работе рассматривается методика доменной адаптации при переходе между данными космических аппаратов (КА) ACE и DSCOVR, расположенных в точке Лагранжа L1 между Солнцем и Землёй. Эти данные используются в настоящей работе для прогнозирования значения геомагнитного индекса Dst, величина которого позволяет судить о наличии и величине геомагнитных возмущений. Различия в статистических свойствах измерений и конструктивных особенностях разных КА приводят к заметному снижению качества моделей при прямом совместном использовании данных различных КА. Поэтому возникает необходимость в применении доменной адаптации – специального класса методов, направленных на сглаживание различий между данными, полученными из разных источников (КА), и построение отображения данных из исходного домена в целевой.

В качестве входных признаков рассматриваются значения модуля и компонент межпланетного магнитного поля в системе GSM, параметров солнечного ветра (плотность, скорость, температура) и самого индекса Dst. Над всеми признаками выполняется погружение временных рядов (delay embedding), то есть учитываются данные за несколько предшествующих часов, что позволяет отражать предысторию системы и делает модель более устойчивой к кратковременным флуктуациям входных данных.

Для прогнозирования используются как классические модели машинного обучения – линейные модели (с регуляризацией), градиентный бустинг в реализации LightGBM, так и нейронные сети – полносвязные персептроны с несколькими скрытыми слоями, позволяющими аппроксимировать нелинейные зависимости между параметрами солнечного ветра. Для адаптации дополнительно рассматриваются метод проекции на латентные структуры и специальные нейросетевые архитектуры – доменно-состязательные сети (Domain-Adversarial Neural Network, DANN). Для оценки качества прогнозирования используются коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратичная ошибка (RMSE), которые вычисляются отдельно для различных горизонтов прогнозирования и для разных сценариев перехода между спутниками.

Результаты работы представляются в виде визуализированных сравнений соответствующих метрик качества для различных комбинаций моделей и схем доменной адаптации, что позволяет проанализировать поведение прогнозов в разных сценариях. На основании этих сравнений определяется, какие варианты доменной адаптации обеспечивают наилучшее качество прогноза, и проводится их сопоставление с моделями, обученными на исходных данных без применения адаптации.

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКОВ ДЕТЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ КОДИЗ-2 (МКА «СКОРПИОН») НА ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

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

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

КОДИЗ-2 (КОмбинированный Детектор ИЗлучения) - компактная детекторная система для регистрации и спектрометрии потоков заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. Прибор установлен на малом космическом аппарате «Скорпион» (запущен 28.12.2025 с космодрома Восточный) и реализован в виде трёх идентичных телескопов, ориентированных вдоль взаимно перпендикулярных осей (Рис. 1а, б).

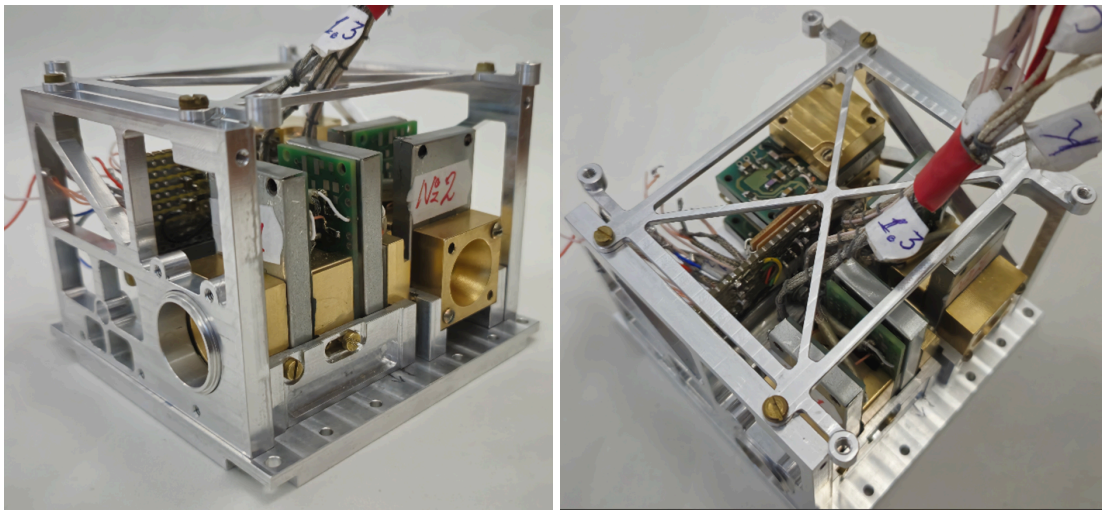


Рис. 1а, б. Фотографии детекторной системы КОДИЗ-2 в сборке спутника.

Каждый телескоп включает два кремниевых детектора толщиной 300 мкм (Si1, Si2) и сцинтиллятор CsI толщиной 3 мм, расположенный между ними; входная апертура формируется коллиматором. Для оценки характеристик регистрации выполнено численное моделирование отклика детекторной системы в среде Geant4 на потоки протонов (2 - 200 МэВ) и электронов (50 кэВ - 5 МэВ). Для расчетов была создана упрощенная модель в САПР AutoCAD, геометрия модели была конвертирована в формат GDML, а начальные условия задавались изотропным распределением частиц с использованием пакета General Particle Source.

По результатам моделирования определены пороговые энергии регистрации: для протонов - 3.1 МэВ, для электронов - 300 кэВ. В диапазоне энергий протонов от 20 до 200 МэВ рассмотрен режим совпадений по всем трём детекторам; минимальная энергия регистрации событий в этом режиме составляет порядка 30 МэВ. Для электронов характерно существенное рассеяние энергетических потерь, однако по структуре совпадений (Si1; Si1+CsI; Si1+CsI+Si2) удаётся ограничивать диапазон начальной энергии частицы; регистрация во всех трёх детекторах требует пороговую энергию электрона $\gtrsim$ 3.1 МэВ.

Для разделения протонов и электронов предложен подход в трёхмерном пространстве откликов (Si1, CsI, Si2) с построением разделяющей поверхности; на модельных данных достигнута точность распознавания составила 99.81% (по отдельности: протоны 99.91%, электроны 94.61%). Полученные результаты были использованы при разработке алгоритмов обработки данных и при формировании энергетических каналов КОДИЗ-2.

ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ СОЛНЕЧНЫМ ВСПЫШКАМ X-КЛАССА

Коган Л.П.[1], Вольвач А.Е.[2]

[1] ННГАСУ, г. Нижний Новгород, Россия; L_kog@list.ru, [2]КрАО РАН, Республика Крым, Россия.

Анализ статистических характеристик рентгеновского излучения Солнца позволил выявить эффект формирования квазидетерминированных линейных структур, возникающих накануне солнечных вспышек класса X. Исследование соответствующих зависимостей показывает, что за несколько суток до подобных событий динамика уровня хаоса в регистрируемом сигнале начинает демонстрировать почти регулярное поведение. Установлено, что этот эффект с высокой вероятностью присущ вспышкам именно X-класса. Моменты регистрации соответствующих статистических феноменов существенно «тяготеют» к времени их начала. В совокупности с другими известными признаками солнечной активности появление таких структур может рассматриваться как предвестники приближающейся вспышки X-класса, ожидаемой через несколько суток. Полученные результаты основаны на данных измерений рентгеновского излучения Солнца в двух энергетических диапазонах, полученных в период 2024–2025 годов.

На рис. 1 представлена статистика рентгеновского излучения Солнца в диапазоне длин волн 1–8 Å за интервал в 15 суток, в ходе которого имела место вспышка класса X1.8, произошедшая 4 ноября 2025 года. По горизонтальной оси отложено время в часах от начала отсчёта, по вертикальной — значения используемого статистического функционала, который характеризует уровень хаоса в исследуемом сигнале. Красной сплошной вертикальной линией отмечен момент начала указанной вспышки. На графике приведена серия структур с высокой степенью параллельности, проходящих через точки экстремумов зависимости $L(n)$. Эти экстремумы выбраны на основании строгого алгоритма с жёсткими ограничениями. Как и на рис. 1, для большого числа рассмотренных солнечных событий моменты завершения подобных квазилинейных структур тяготеют к времени начала солнечных вспышек высокой энергии и поэтому могут рассматриваться в роли их предвестников.

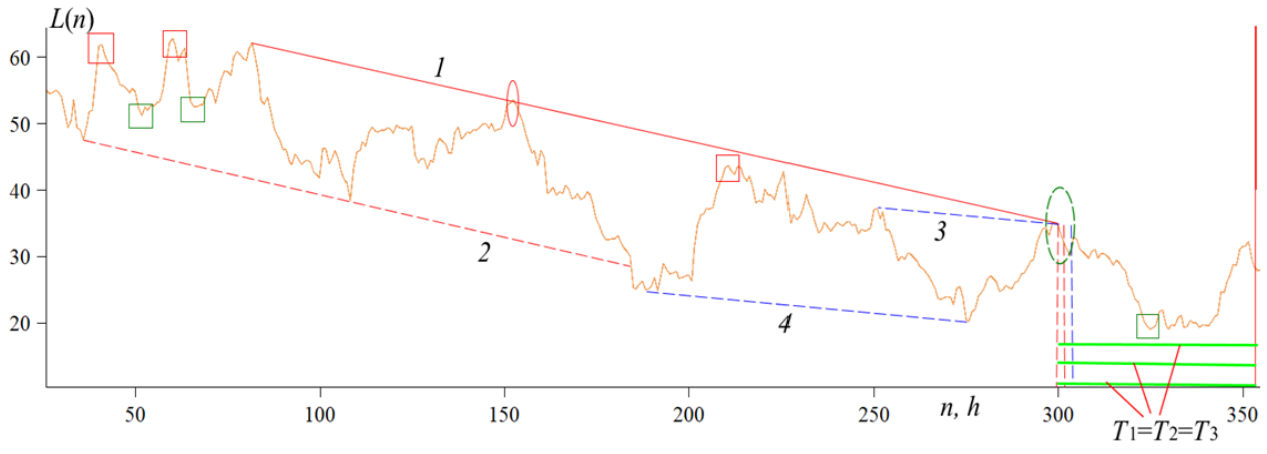


Рис. 1. Зависимость $L(n)$ характеризует уровень хаоса для интенсивности измерений рентгеновского излучения Солнца. Красная вертикальная прямая линия отвечает моменту вспышки класса X1.8, которая имела место 4 ноября 2025 года.

СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИИ ЭСКДАЛЕМЮР

Рябова С.А.[1,2]

[1]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, riabovasa@mail.ru*

[2]*ИДГ РАН, г. Москва, Россия*

Наблюдаемые вариации геомагнитного поля занимают достаточно широкий временной интервал – от миллисекунд до миллионов лет. Причины этих вариаций могут быть как внутриземные, так и внеземные. Например, внеземные процессы приводят к вариациям от миллисекунд (геомагнитные пульсации) до нескольких десятков лет, обусловленных 22-летним солнечным циклом.

При проведении настоящих исследований привлекались данные инструментальных наблюдений, выполненных на обсерватории Эскдалемюр – национальной обсерватории окружающей среды Великобритании. Рассматривались данные геомагнитного мониторинга, выполненного в течение 110 лет, а именно с 01.01.1913 по 31.12.2023. Данные регистрации компонент геомагнитного поля размещены на сайте Международной магнитной сети INTERMAGNET. Также использовались данные о суточных вариациях глобального числа Вольфа, представленные на сайте Центра анализа данных по влиянию Солнца (Бельгия).

С целью получения информации о частотном составе исследуемых цифровых рядов использовался спектральный анализ. Общепринятым подходом к спектральному анализу геофизических рядов является интерполирование пропущенных данных и получение рядов с равными временными интервалами между отсчетами, а затем оценка спектральной плотности с использованием различных методов (метод Блэкмена–Тьюки, методы многополосного и сингулярного спектрального анализа). В работе [1] отмечено, что интерполяция ряда во временной области приводит к усилению в спектре его низкочастотных компонент за счет искусственного занижения вклада высокочастотных компонент. В связи с этим в настоящей работе используется для спектрального анализа неравномерных по времени рядов подход, который в течение многих лет применяется в астрономии, — построение периодограмм Ломба–Скаргла. Метод спектрального оценивания Ломба–Скаргла хорошо зарекомендовал себя при анализе спектров вариаций магнитного поля Земли и вариаций критической частоты F2–слоя ионосферы на частотах близких к планетарным волнам [2, 3].

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и в рамках государственного задания ИДГ РАН № 125012700798-8 «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий».

1. Schulz M., Stattegger K. // Computers & Geosciences 1997. V. **23**. № 9. P. 929.

2. Рябова С.А., Шалимов С.Л. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана 2023. Т. **59**. № 6. С. 731. DOI: 10.31857/S0002351523060081

3. Рябова С.А., Шалимов С.Л. // Физика Земли. 2021. № **6**. С. 122. DOI: 10.31857/S0002333721060065

ЦИФРОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Вахнина В.В., **Федяй О.В.**

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия, VVVahnina@yandex.ru

В работе представлены результаты цифрового тестирования устройства защиты от воздействия геоиндуцированных токов (ГИТ) на силовые трансформаторы [1]. Цифровое тестирование выполнено в программном комплексе PSCAD при включении устройств защиты в нейтрали автотрансформаторов на одной из подстанций 330 кВ магистральной электрической сети «Северный транзит». Выбор подстанции осуществлен на основании многокритериальной теории полезности путем определения коэффициентов качества альтернатив для сформированных критериев важности для конкретного набора геофизических и электросетевых параметров каждого узла рассматриваемой сети. Для цифрового тестирования устройства защиты взят сигнал ГИТ из базы данных результатов геофизических наблюдений [2]. Результаты цифрового тестирования показали, что включение устройств защиты в нейтрали автотрансформаторов подстанции 330 кВ позволяет снизить уровень ГИТ ниже критических значений во всей магистральной электрической сети «Северный транзит».

1. Патент на изобретение № 2794749 РФ. Способ мониторинга геоиндуцированного тока в нейтрали силового трансформатора и управления режимом заземления / Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кретов Д.А., Федяй О.В., Бычков А.В., Пудовинников Р.Н.; опубл. 24.04.2023. Бюл. № 12.

2. Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А., Колобов В.В., Сахаров Я.А. // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. № 3.

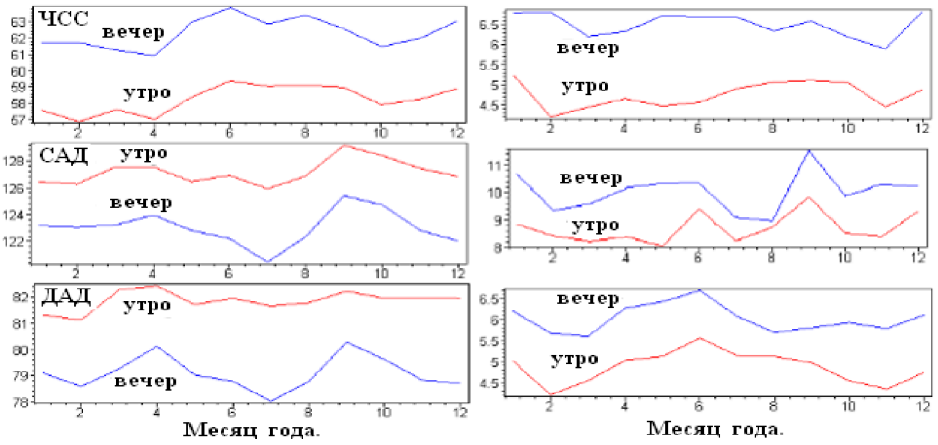
ДЛИТЕЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ПУЛЬСА С АРТЕРИАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ: ВРЕМЕННАЯ ИЕРАРХИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАНИЙ И ЕЁ ПРИЧИНЫ

Шибаев И.Г., Шибаев А.И.

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

В основу исследования положены длительные наблюдения систолического артериального давления (САД), диастолического артериального давления (ДАД) и частоты сердечных сокращений (ЧСС), на фоне приёма гипотензивных препаратов, взятые из дневника самоконтроля пациента (мужчина, 1940 г. рождения) с гипертонической болезнью II стадии 2-й ступени. Измерения проводились ежедневно дважды в сутки: утром, после сна, и вечером перед ужином.

Длительный и эффективный контроль за состоянием пациента, обеспечивающий его нормальную жизнедеятельность, позволяет исследовать влияние внешних факторов на гемодинамику организма. В предыдущих публикациях [1, 2] описана методика наблюдения (самоконтроля) и дана общая оценка показаний более чем за 17 лет. Упор делался на статистическое описание и спектральный анализ каждого из рядов наблюдения. Пример сезонного поведения ЧСС, САД и ДАД, т. е. среднего по годам для каждого месяца, иллюстрирует левая часть рисунка, справа – вариации соответствующих характеристик, по оси OX – месяц года.



Данная работа дополнена классификацией состояния пациента через корреляционные связи показаний АД и ЧСС, так как важен характер связи пульса с давлением и гибкость реакции организма на нагрузки и внешнее воздействие. Также оценивается степень взаимосвязи утренних и вечерних показаний.

В работе выделен целый ряд характерных периодов и рассмотрено их соответствие внешним факторам.

1. Isaikina O., Yu. Kuksa, I. Shibaev Estimation of Stability of Arterial Pressure and Pulse at Changes of Geomagnetic Data and Atmospheric Pressure / Annual Research & Review in Biology 9(1): 1-11, 2016. DOI: 10.9734/ARRB/2016/21656

2. Kuksa Yu., Shibaev I., Isaikina O. Continuous monitoring of arterial blood pressure and pulse: comparison of morning and evening readings// Annual Research & Review in Biology, 30(2), 2019, 1-11. DOI: 10.9734/ARRB/2018/45798

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОТЕРИ КОНЦЕНТРАЦИИ ВНИМАНИЯ ПРИ СТРЕССЕ И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДОЙ В 25-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ожередов В.А.[1], **Бреус Т.К.**[1]

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

В работе проверяется гипотеза о связи кратковременной потери концентрации внимания в стрессовой ситуации со всплесками солнечной активности, которая неоднократно высказывалась в основном в связи с авиационными происшествиями по вине летного состава. Выборка катастроф, на которой авторы [1-2] проверяли данную гипотезу, покрывает период 1910-2002гг. Более поздних данных в свободном доступе нет, однако в 25-циле солнечной активности появилась возможность изучать случаи потери концентрации внимания на базе данных сыгранных и проанализированных партий в шахматы, объем которой во время и после эпидемии SARS-CoV-2 очень быстро рос – во время самоизоляции большинство шахматистов начали играть онлайн. В качестве стрессовой ситуации в данной работе выступает партия в быстрые шахматы (bullet или blitz), которая длится не более 10мин (у обоих игроков по 3 мин + добавление пару секунд на ход). Созданное нами программное обеспечение собирает протоколы таких партий и анализирует наличие грубых зевков. На сайте lichess.org регистрируется начало партии с точностью до секунды (по UTC), поэтому ошибка привязки отклика по времени составляет не более 10мин. Отсюда получается временной ряд $x(t)$, где x – «средняя» степень грубости допущенных ошибок в партиях, привязанных к моменту времени t. В качестве воздействующих событий рассмотрены рентгеновские и оптические вспышки, данные по которым взяты с сайта [3], и корональные выбросы массы [4]. Обозначим буквой $E(i)$ тип солнечного события, начало и конец которого зарегистрированы соответственно в момент t_i^1 и t_i^2. Тогда мерой взаимосвязи между временным рядом $x(t)$ и событиями солнечной активности будет корреляция между $x(t)$ аппроксимацией

$$\breve{x}(t) = \sum_{\forall i} w\left[E(i)\right] \min\left[h\left(t-t_i^1\right), \exp\left(-\frac{t-t_i^2}{\lambda_i}\right)\right]$$

где w – вес солнечного события, λ_i – время отклика биологической системы и $h(\cdot)$ – ступенька Хэвисайда. На уже собранных к настоящему моменту данных с lichess мы уже видим значимую корреляцию $\breve{x}(t)$ с $x(t)$.

1. Fournier NM, Persinger MA. Geophysical variables and behavior: C. Increased geomagnetic activity on days of commercial air crashes attributed to computer or pilot error but not mechanical failure // Percept Mot Skills. 2004, v.98, #3, pp. 1219-1224
2. Григорьев П.Е. и др. Авиационные происшествия и космофизические факторы: ретроспективный анализ данных 1910-1940 гг. // Пространство и время, 2016, №3-4, с.251-260
3. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/
4. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

ЭКСПЕРИМЕНТ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В ОРБИТАЛЬНОЙ БИОЛАБОРАТОРИИ БИОЛ 2 НА СПУТНИКЕ СКОРПИОН

Золотарев И.А., Гарипов Г.К., Ткаченко Д.И., Антонюк Г.И., Сазонова А.В., Лебедев М.О., Ефимкин А.Н., Смирнов Д.Н., Свертилов С.И., Богомолов В.В., Топтун Д., Савин Я.Т., Золотарева Л.С., Силина Е.В., Оседло В.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, zolotarev@sinp.msu.ru

Эксперимент БИОЛ-2, как один из установленных на борту спутника “Скорпион”, направлен на изучение влияния условий космического полета на жизнедеятельность микроорганизмов, находящихся в 8 герметичных контейнерах, путем измерения уровня их флуоресценции. В работе над спутником участвовали студенты МАИ - конструкция прибора, программа для разработки и анализа данных - ФКИ МГУ, а также студенты и школьники из более чем 20 других школ Москвы.

Влияние космической погоды на живые системы актуально для понимания функционирования живых систем на Земле и во время космического полета. Планирование и проведение космических и контрольных наземных экспериментов с биологическими объектами имеет ряд ограничений из-за короткого времени жизни объектов в малом объеме. Интерпретация результатов затруднена из-за невозможности полного повторения условий, в которых изучаются процессы жизнедеятельности микроорганизмов. В работе представлено планирование параллельного наземного эксперимента и интерпретация данных космических экспериментов с живыми объектами в космосе.

Спутник «СКОРПИОН» будет запущен в конце 2025 года, в состав аппаратуры спутника входит прибор БИОЛ-2 с фотолюминесцентными штаммами E.Coli на борту.Отсутствие возможности полного воспроизведения на Земле условий космических экспериментов требует выработать подходы отличные от таковых в распространенных биологических наземных экспериментах.

В космическом полете, колонии бактерий, кроме микрогравитации и космической радиации, подвергаются воздействию изменений магнитного поля и необходимо знание особенностей размножения, развития и гибели в таких условиях [1].

1. Sykilinda N. N., Lukyanova .A.A., Lavrikova V.V., Kutnik I.V., Panin N.V., Staritsyn N.A.., Miroshnikov K.A. Applied Biochemestry and Microbiology. 2024, Vol.60, No.5, 908-914. pp. 908-914

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА БИОГЕОСИНХРОНИЗАЦИИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Зенченко Т.А., Бреус Т.К., Хорсева Н.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, zench@mail.ru

Факторы космической погоды, управляемые солнечной активностью, являются важным экологическим агентом, влияющим на живые организмы, в экстремальных случаях - вплоть до значительного ущерба здоровью. Обнаруженный нами ранее [1] эффект синхронизации сердечного ритма человека с вариациями геомагнитного поля (ГМП) миллигерцового диапазона (эффект биогеосинхронизации) является, по-видимому, проявлением нормальной повседневной реакции организма человека на действие окружающего его ГМП. Эти результаты подтверждают гипотезу, что низкочастотные вариации ГМП выступают эволюционно обусловленным ритмодатчиком для всех живых систем, а сильные магнитные бури (МБ) приводят к нарушению этой экологически важной связи, что вызывает у человека ухудшение самочувствия и обострение хронических заболеваний. Эта гипотеза на настоящий момент наиболее удовлетворительно объясняет имеющиеся результаты, однако требует дополнительных экспериментальных подтверждений.

Ранее [2] при изучении закономерности проявления эффекта биогеосинхронизации во время трех сильных магнитных бурь 2023-2024 гг. было обнаружено, что степень пространственной когерентности колебаний ГМП в диапазоне геомагнитных пульсаций PC5-6 является важной характеристикой геомагнитной обстановки для возникновения данного эффекта. В качестве численного параметра пространственной когерентности использовали значение коэффициента корреляции *Rm(NUR-SUA)* между отфильтрованными низкочастотным фильтром синхронными рядами вариаций H-компоненты ГМП по станциям Nurmijarvi (60°50′ N / 24°60′ E) и Surlari (44°70′ N / 26°30′ E).

Целью текущего этапа исследований была верификация обнаруженной ранее закономерности в других геомагнитных условиях. В качестве характеристики степени сходства/различия вейвлет-спектров рядов ЧСС и *H* ГМП было использовано значение $Q=(h_1,h_2)/|h_1|\cdot|h_2|$, где h_1 и h_2 - вектора значений спектральной мощности вейвлет-спектров в диапазоне периодов 7-30 мин [3].

На основании результатов анализа 110 записей ЭКГ одного и того же волонтера, (не включенных в ранее выполненный анализ [2]), было обнаружено, что статистически значимая корреляция ($p<0.01$) между параметрами Q и *Rm(NUR-SUA)* наблюдается как по всей выборке экспериментов, так и отдельно для выборок $Kp(3h)\leq 2$, $2.3\leq Kp(3h)\leq 4$, и $Kp(3h)>4$. Показано также, что параметр *Rm(NUR-SUA)* является крайне чувствительным к динамике плотности солнечного ветра в окрестности магнитосферы и его значение кардинально снижается в моменты прихода к Земле ударных волн СВ. Есть основания полагать, что нами обнаружен возможный сценарий передачи воздействия ударных волн СВ на сердечно-сосудистую систему человека через нарушение пространственной когерентности миллигерцовых колебаний ГМП во время главной фазы магнитных бурь и в периоды "магнитного молчания" (когда пульсации PC5-6 отсутствуют в магнитосфере).

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме "Плазма"ИКИ РАН.

1. Зенченко Т.А., Медведева А.А., Хорсева Н.И., Бреус Т.К. // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 4. С. 73

2. Zenchenko T.A., Khorseva N.I., Breus T.K., Drozdov A.V., Seraya O.Y. // Atmosphere 2025. V. 16. P. 219

3. Zenchenko T.A., Khorseva N.I., Breus T.K. // Atmosphere 2024. V. 15. P. 134

СЕКЦИЯ «Волновые явления в космической плазме»

НАЛОЖЕНИЕ КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ И КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНУТРИ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Беспалов П.А. [1,2]

[1] *ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, pbespalov@mail.ru*
[2] *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

В утреннем секторе субавроральной магнитосферы в спокойных геомагнитных условиях время от времени наблюдаются короткопериодические ОНЧ излучения (коротко называемые PE) с периодом повторения элементов динамического спектра 2-7 секунд. Индивидуальные спектральные фрагменты этих излучений похожи на фрагменты свистов от молниевых разрядов, но в отличии от многоскачковых свистов они повторяются без видимых изменений в спектральных формах. Объясняется это тем, что при подходящей функции распределения энергичных электронов по питч-углам за счет реализации особого режима циклотронной неустойчивости имеет место пассивная синхронизации мод, характеризующаяся компенсацией затухания и дисперсионного искажения спектра электромагнитного излучения. Данные наблюдений показывают примеры наложения PE излучений на квазипериодические излучения с морфологическими характеристиками типичными для QP 2 излучений и периодами повторения спектральных форм 30-150 секунд, которые часто наблюдаются в широких областях утренней и дневной магнитосферы. Наложение указанных излучений не случайно. Оно объяснятся тем, что оба указанных излучения возбуждаются в условиях близких ограничений на мощность источника энергичных электронов в плазменном магнитосферном мазере. Указанная своеобразная модуляционная неустойчивость имеет место при возбуждении PE излучений в волноводе плотности, наличие которого необходимо для реализации 1D процесса. В свою очередь QP 2 излучения могут возбуждаться и вне волновода, а фрагменты PE излучений могут проникать туда из-за эффектов рефракции вблизи ионосферы. Результаты исследований важны для подтверждения реализации режима пассивной синхронизации мод в плазменном магнитосферном мазере и количественного сравнения достижений теории с данными наблюдений.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 25-22-00237.

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДЫ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА СВИСТОВЫХ ВОЛН НА ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Грач В.С.[1], Демехов А.Г.[1,2], Артемьев А.[3]

[1] ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@ipfran.ru
[2] ПГИ, г. Апатиты, Россия
[3] Университет Калифорнии Лос-Анджелес, г. Лос-Анджелес, США

В работе рассматривается резонансное взаимодействие энергичных электронов с реалистичными пакетами свистовых волн, основанными на спутниковых данных. Рассматриваются три события: 18.04.2002 (данные спутника Cluster); 24.04.2013 (данные спутника Van Allen Probe A) и 06.07.2021 (данные спутника THEMIS E). Для каждого события рассматриваются варианты пакета с вариациями амплитуды (амплитудный профиль основан на спутниковых данных) и с постоянной амплитудой. В событиях 18.04.2002 и 24.04.2013 волновое возмущение имеет вид коротких хоровых элементов с дрейфом частоты; в этом случае анализ проводился для отдельных элементов. Событие 06.07.2021 характеризуется протяженным волновым возмущением с почти постоянной частотой.

Резонансное взаимодействие моделируется методом пробных частиц. Для каждого события для большого числа значений начальных параметров электронов рассчитаны изменение экваториального питч-угла и энергии в результате взаимодействия при однократном пролете каждой частицы через область волнового возмущения. В случае коротких элементов расчеты проводились для различных положений волнового пакета; в случая протяженного волнового возмущения расчеты проводились для различных временных интервалов.

Показано, что эффективные высыпания возможны как в линейном режиме взаимодействия, так в и нелинейном (режим бунчировки по фазе). Высыпания в нелинейном режиме имеют место для событий 24.04.2013 и 06.07.2021. При этом энергия высыпающихся частиц в результате взаимодействия практически не меняется (как в линейном, так и в нелинейном случае). Получены диапазоны энергий частиц, которые могут эффективно высыпаться в результате рассмотренного взаимодействия: 20-200 кэВ для события 18.04.2002, 5-400 кэВ для события 24.04.2013 и 25-300 кэВ для события 06.07.2021. Продемонстрировано, что при наличии вариаций амплитуды в распределений характеристик высыпаний появляется тонкая структура.

Получено отношение потоков высыпающихся и захваченных частиц: количественная характеристика высыпаний, которая может детектирована на низкоорбитальных спутниках. Показано, что наличие вариаций амплитуды приводит к флуктуациям в зависимости отношения потоков от энергии частиц, однако в целом вариации амплитуды слабо влияют на диапазон интенсивных высыпаний энергичных электронов.

СКОРОСТЬ ДРЕЙФА ЧАСТОТЫ ХОРОВЫХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ: АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ И СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Чекушева С.С., Демехов А.Г.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, s.chekusheva@ipfran.ru

Аналитические оценки скорости дрейфа частоты хоровых ОНЧ излучений, полученные в рамках существующих теоретических моделей [1 – 3], сопоставлены между собой и с экспериментальными данными. Показано, что оценка в рамках теории магнитосферной лампы обратной волны (ЛОВ), основанная на предположении о развитии сателлитной неустойчивости исходной квазимонохроматической волны, систематически отличается почти в 2 раза от оценок, полученных при поиске максимума нелинейного инкремента неустойчивости волны с изменяющейся частотой (в рамках модели «нелинейного резонансного тока»). При этом для рассмотренных наблюдений хоровых излучений оценка на основе модели ЛОВ лучше согласуется с экспериментом. Предложена модификация модели «нелинейного резонансного тока», основанная на введенной зависимости параметров «электронной дырки» в фазовом пространстве от скорости дрейфа частоты [4]. Такая модификация позволяет сблизить результаты этой модели с результатами модели ЛОВ и с данными рассмотренных наблюдений.

Работа выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (24-1-1-97-3).

1. Trakhtengerts V. Y. // J. Geophys. Res.: Space Phys., 1995. V. **100**. No. A9. P. 17205.
2. Omura Y., Katoh Y., Summers D. // J. Geophys. Res., 2008. V. **113**. No. A4. Art.no. A04223.
3. Tao X., Zonca F., Chen L. // J. Geophys. Res.: Space Phys., 2021. V. **126**. No. 9. Art.no. e2021JA029585.
4. Демехов А. Г., Чекушева С. С. // // Изв. вузов. Радиофизика. В печати.

СООТНОШЕНИЯ РЕНКИНА-ГЮГОНИО ДЛЯ МГД УДАРНЫХ ВОЛН В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ С ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Кузнецов В.Д., Осин А.И.

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

Построена система интегральных уравнений для бесстолкновительной плазмы с анизотропным давлением и тепловыми потоками, которая в непрерывных областях сводится к дифференциальным МГД уравнениям 8-моментного приближения, а на разрыве определяет соотношения Ренкина-Гюгонио (РГ) при произвольном угле распространения ударной волны к магнитному полю. Замыкающее интегральное уравнение в рассматриваемой модели описывает магнитный момент плазмы, обобщая первый адиабатический инвариант из модели Чу-Голдберга-Лоу. Два новых дополнительных соотношения РГ для тепловых потоков получены из предложенных интегральных уравнений, которые описывают две физические величины: часть общего потока энергии, связанную с параллельной степенью свободы, и параллельную компоненту потока магнитного момента плазмы. Получено соответствие граничных условий для известных решений в частных случаях параллельной и перпендикулярной ударной волны. Обсуждается получение решения для общего случая.

1. V.D. Kuznetsov, A. I. Osin. Integral equations and Rankine–Hugoniot relations for collisionless anisotropic plasma with heat fluxes. Phys. Plasmas 33, 022303 (2026); doi: 10.1063/5.0310804

ЦИКЛОТРОННЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ АРКЕ

Викторов М.Е.[1], **Елясин А.А.**[1], **Коржиманов А.В.**[1], **Корягин С.А.**[1], **Шустов П.И.**[2]

[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mikhail.viktorov@ipfran.ru*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Лабораторное исследование взаимодействия сверхзвуковых потоков высокоионизованной плазмы с магнитными полями арочной конфигурации важно для понимания физических механизмов ряда явлений в космическое плазме, прежде всего наблюдаемых во внутренних областях корональных петель на Солнце, где происходит ускорение заряженных частиц и генерация ими нетеплового электромагнитного излучения. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований на компактной лабораторной установке «Солнечный ветер» [1], в которой достигается бесстолкновительный режим удержания плазмы, типичный для космических условий. Исследуются процессы при столкновении двух сверхзвуковых потоков плазмы, инжектируемых вдоль силовых линий магнитной арки от ее подножий в противоположных направлениях. Потоки плазмы создаются двумя плазменными генераторами, которые испаряют материал металлического катода в результате вакуумно-дугового разряда. При взаимодействии потоков плазмы регистрируется нетепловое микроволновое излучение плазмы в электронно-циклотронном диапазоне частот, частота которого в точности соответствует напряженности магнитного поля в вершине магнитной арки.

В работе представлены результаты экспериментального исследования столкновения двух потоков плазмы в магнитной арке в широком диапазоне параметров эксперимента. С использованием теоретических оценок и численного моделирования [2] обсуждаются возможные механизмы, которые могут привести к образованию неизотропной фракции электронов при столкновении потоков плазмы, ответственной за возбуждение электромагнитного излучения плазмы.

Путём полностью кинетического электродинамического численного моделирования показано, что при столкновении двух сверхзвуковых плазменных потоков в магнитной арке в режиме доминирования магнитного давления развивается ионно-звуковая неустойчивость, приводящая к генерации электростатических ударных волн, в которых происходит ускорение и захват электронов с формированием немаксвелловского распределения по скоростям, уширенного вдоль направления магнитного поля. Анизотропия распределения приводит к развитию электромагнитной неустойчивости вейбелевского типа и разрушению ударной волны с последующим нагревом окружающей плазмы. Генерация нетепловых электронов сопровождается усилением излучения электронно-циклотронного диапазона, которое зарегистрировано экспериментально.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00317).

1. M. Viktorov, S. Golubev, and A. Vodopyanov, Plasma Phys. Control. Fusion, P.035001 (2019).
2. Korzhimanov A. V., Koryagin S. A., Sladkov A. D., Viktorov M. E., Phys. Plasmas. V.32. P.052305 (2025).

ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН ДЕКАМЕТРОВОГО И МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ОТ РАЗЛИЧНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛАЗМЫ В Е-СЛОЕ ИОНОСФЕРЫ

Мингалев И.В.[1], Суворова З.В.[1], Мерзлый А.М.[2], Янаков А.Т.[2]

[1]*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, mingalev_i@pgia.ru*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

В докладе представлены результаты численного моделирования отражения радиоволн декаметрового и метрового диапазонов от различных неоднородностей плазмы в Е-слое ионосферы. Обсуждается зависимость амплитуды отраженного сигнала от критической частоты плазмы внутри неоднородности и другие аспекты.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХАЛЬФВЕНОВСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЛАКОВ ПЛАЗМЫ С ЗАМАГНИЧЕННЫМ ФОНОМ

Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г., Чибранов А.А., Посух В.Г., Иванов А.Е., Логинов М.В., Захаров Ю.П., Руменских М.С., Мирошниченко И.Б.

Институт Лазерной Физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ShaikhislamovIldar@yandex.ru

Лабораторные опыты по воспроизведению явлений и процессов, характерных для естественных явлений и активных инжекций плазмы в околоземной космической среде являются незаменимым инструментом исследования, получения новых данных и верификации теоретических и численных моделей. Разлет плазменных облаков со сверх-Альфвеновской скоростью в замагниченную окружающую среду и бесстолкновительная передача энергии и импульса, вплоть до образования ударных волн, типично и для астрофизических явлений, например сверхновых, и для различных геофизических инжекций плазмы. Отдельный интерес представляют физические процессы на кинетических масштабах ионнного гирорадиуса и ионной плазменной длины [1].

В настоящей работе описываются результаты опытов с применением облаков плазмы, получаемых лазерным облучением мишеней. Высокая степень сферической симметрии разлета плазменных образований характерна для ряда явлений, и лабораторные квази-сферические облака для моделирования таких явлений впервые были реализованы на стенде КИ-1 [2]. Для исследования эффективности взаимодействия в зависимости от характерных безразмерных параметров задачи использовались облака плазмы различной полной энергии в диапазоне 8÷30 Дж. Варьирование таких параметров, как скорость разлета, внешнее магнитное поле, плотность фоновой плазмы позволило реализовать разные режимы магнитно-ламинарного механизма. Реализованный масштаб эксперимента ~50 см, превышающий кинетические масштабы плазмы, позволил осуществить подробные пространственно-временные измерения основных величин с применением магнитных и электрических зондов, быстрого фотографирования плазмы и спектральной диагностики различных ионов.

Работа выполнена при поддержке программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики.

1. Shaikhislamov I.F., et al., Plasma Physics Reports, 2015, 41(5), 399-407.
2. Berezutsky A.G. et al., Plasma Physics Reports, 2023, 49(3), 351-361.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СОЛНЦА: ВИХРИ ТИПА РОССБИ

Бабаев Э.Ф., Джалилов Н.С.

Шамахинская Астрофизическая Обсерватория им. Насиреддина Туси, г. Шамаха, Азербайджан, eminbabaye0505@gmail.com

Дифференциальное вращение Солнца является одним из фундаментальных свойств его внутренней динамики и играет ключевую роль в формировании магнитной активности и солнечного динамо. В отличие от твёрдого тела, Солнце как плазменная система демонстрирует широтную и радиальную зависимость угловой скорости: экваториальные области вращаются быстрее полярных, а вблизи границы между конвективной и радиативной зонами наблюдаются резкие изменения профиля вращения. Это делает задачу переноса углового момента одной из центральных проблем современной физики Солнца.

Численные и аналитические исследования показывают, что одного лишь конвективного переноса и магнитного торможения недостаточно для объяснения замедления вращения радиативного ядра и устойчивости дифференциального вращения. Это указывает на необходимость учёта волновых механизмов перераспределения углового момента, среди которых особое место занимают собственные глобальные колебания вращающейся солнечной плазмы — вихри типа Россби.

Солнечные вихри типа Россби представляют собой крупномасштабные вихревые структуры, возникающие в дифференциально вращающейся плазме под действием силы Кориолиса и β-эффекта. По своей природе они являются аналогами планетарных волн Россби, однако в условиях Солнца реализуются в сильно стратифицированной и магнитно-активной среде. Для таких колебаний характерно доминирование горизонтальных (тороидальных) скоростей при малых радиальных смещениях, что обеспечивает их устойчивость и возможность существования в глубинных слоях конвективной зоны.

С теоретической точки зрения солнечные вихри типа Россби соответствуют r-модам — инерционным собственным колебаниям вращающейся сферы. В условиях дифференциального вращения Солнца такие моды модифицируются, приобретая зависимость от широтных градиентов угловой скорости, что приводит к формированию спектра низкочастотных глобальных колебаний с периодами от месяцев до нескольких лет.

Важным физическим свойством солнечных вихрей типа Россби является их способность эффективно переносить угловой момент между различными широтами и слоями Солнца. Взаимодействуя с конвективными потоками и крупномасштабными магнитными полями, такие вихри могут играть роль связующего механизма между турбулентной конвекцией, дифференциальным вращением и процессами солнечного динамо.

Наблюдательные данные гелиосейсмологии и анализ вариаций поверхностных скоростей вращения подтверждают существование низкочастотных глобальных вихревых структур в конвективной зоне Солнца, параметры которых согласуются с теоретическими характеристиками солнечных вихрей типа Россби. Их обнаружение указывает на важную роль этих мод в формировании профиля дифференциального вращения и поддержании динамического равновесия солнечных слоёв.

Таким образом, собственные колебания дифференциально вращающегося Солнца в форме вихрей типа Россби являются фундаментальным элементом внутренней солнечной динамики и необходимы для понимания механизмов переноса углового момента и эволюции солнечной активности.

1. Dzhalilov N.S., Shtaude Yu. *Global Oscillations of the Sun*. Baku: Elm, 1989.
2. Pedlosky J. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer, 1987.
3. McIntosh S.W., Cramer W.J., Marcano M.P., Leamon R.J. // *Nature Astronomy* 2017. V. 1. Article 0086.

РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

Сапралиев М.Е, Горяев А.В., Михаляев Б.Б.

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

К одним из наиболее распространенных явлений в солнечной короне можно отнести волны сжатия, наблюдаемые в крайнем ультрафиолетовом диапазоне и широко освещаемые в специальной литературе на протяжении последних тридцати лет. Существуют свидетельства того, что они могут генерироваться мелкомасштабными процессами магнитного пересоединения в нижней атмосфере и спикульной активностью и переноситься вверх в корону. Хотя каждая отдельная волна имеет малые масштабы, их широкая распространенность практически по всей короне дает значительную величину переносимой ими энергии, которой по общим оценкам достаточно для нагрева корональной плазмы и ускорения солнечного ветра. Последнее обстоятельство относит волны сжатия в наиболее приоритетным объектам изучения в солнечной физике.

Наблюдения показывают, что спектры временных сигналов, получаемых при регистрации волн сжатия, имеют сложный вид. Они не дают определенной периодичности, спектральные максимумы многократно меняются в течение всего времени наблюдения, спектры широкие, что нехарактерно для обычной регулярной волны. Проведенное нами исследование акустических волн показало, что такие спектры могут формироваться акустическими импульсами [1, 2]. В спектре каждого импульса под действием теплопроводности могут формироваться два максимума, которые обычно рассматриваются как характерные периоды возмущения. Эти максимумы следует искать не в глобальном вейвлет-спектре, как это часто делается, а в локальном спектре. Пара максимумов или периодов дает информацию о свойствах акустического импульса, то есть может служить объектом корональной сейсмологии. По каждой паре периодов можно находить параметры корональной плазмы и начального акустического возмущения.

Для демонстрации такой возможности были использованы примеры временных сигналов, полученных по данным наблюдений AIA/SDO в линии 171 Å на сайте sdac.virtualsolar.org.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № 075-03-2025-420/4.

1. Mikhalyaev B.B., et al. // Solar Phys. 2023. V. **298**. P. 102.
2. Derteev S.B., et al. // Solar Phys. 2024. V. **240**. P. 141.

БЫСТРЫЕ МАГНИТОЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В МАГНИТОСФЕРЕ, СГЕНЕРИРОВАННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Смотрова Е. Е., Михайлова О. С., Магер П. Н.

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

15 февраля 2014 года рядом спутников Van Allen Probes A, B и THEMIS-E на дневной стороне магнитосферы была зарегистрирована длительная серия компрессионных колебаний диапазона Pc5. Продолжительность наблюдаемой серии превышала 8 часов. Частота колебаний варьировалась в диапазоне от 1 до 3.5 мГц, при максимальной амплитуде до 5 нТл.

Сопоставление вариаций продольной компоненты магнитного поля с колебаниями давления плазмы показало, что наблюдаемые колебания являются быстрыми магнитозвуковыми волнами. Установлено, что первые колебания в серии возникли в результате воздействия на магнитосферу ударной волны в солнечном ветре, а последующие колебания – в результате резких изменений динамического давления солнечного ветра.

Геомагнитные пульсации в частотном диапазоне наблюдаемой серии быстрых магнитозвуковых волн были обнаружены в данных большого количества наземных магнитометров, расположенных в Северном полушарии на широтах выше 50°. Пульсации регистрировались на нескольких меридиональных цепочках, что указывает на глобальный характер возмущений. Анализ фазовых соотношений между колебаниями магнитного поля на близко расположенных станциях выявил признаки альфвеновского резонанса, а оценка азимутального волнового числа показала, что его величина находится в диапазоне от $m = 0$ до $m = 5$, что свидетельствует о регистрации на поверхности Земли геомагнитных пульсаций вызванных азимутально- крупномасштабными альфвеновскими волнами, генерируемыми наблюдаемой в магнитосфере серией быстрых магнитозвуковых волн.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-77-10012).

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРЕ, ВОЗБУЖДАЕМОГО МГД ВОЛНАМИ

Позднякова Д.Д.[1,2,*], Федоров Е.Н.[1], Пилипенко В.А.[1]

[1] Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
[2] Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
**e-mail: d_pozdnyakova@live.ru*

Разработана модель распространения альвеновской и быстрой магнитозвуковой (БМЗ) мод через ионосферу к поверхности Земли. Модель основана на громоздких аналитических соотношениях, описывающих взаимодействие гармоник магнитогидродинамических (МГД) волн с плоскослоистой системой магнитосфера – «тонкая ионосфера» – атмосфера – Земля. Эта простая модель позволяет выявить влияние отдельных факторов на взаимодействие альвеновских и БМЗ волн с ионосферой – проводимости ионосферы, пространственного масштаба волны, геомагнитного наклонения, проводимости Земли, и т. п. – и даёт наглядное понимание физики процесса. Рассчитаны поляризационные структуры электрического и магнитного полей, формирующихся в верхней ионосфере при падении мод, а также амплитуда их наземного отклика. Для идентификации физической природы ультранизкочастотных волн и определения относительного вклада различных МГД мод в их структуру предложен метод кажущегося импеданса, основанный на отношении между ионосферным электрическим и наземным магнитным полями. Импедансы альвеновской и БМЗ мод при этом должны существенно различаться. Модель может служить простым инструментом для интерпретации совместных спутниковых, радарных и магнитометрических наблюдений пульсаций *Pc*3-5 и *Pi*2-3.

Работа поддержана грантом РНФ №24-77-10012.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ПРОХОЖДЕНИЮ АТМОСФЕРНОГО ХОЛОДНОГО ФРОНТА НАД МОСКОВСКИМ РЕГИОНОМ 20 ИЮНЯ 2024 Г.

Рябова С.А.[1,2], **Шалимов С.Л.**[1]

[1]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, ryabovasa@mail.ru*

[2]*ИДГ РАН, г. Москва, Россия*

В настоящей работе для регистрации прохождения атмосферного фронта использованы данные микробарографа, а также магнитометрические измерения в обсерватории «Москва». Предполагалось, что регистрация магнитных сигналов позволит получить дополнительную информацию об источнике и структуре сигналов, регистрируемых микробарографами. При этом основное внимание уделено сигналам, возникающим до момента прихода фронта в точку наблюдения. Отметим, что ранее, в работах [1–3] сообщалось об обнаружении магнитного сигнала до момента прихода атмосферного фронта.

Для исследования отклика в микробарических вариациях и вариациях восточной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли, приуроченных к прохождению холодного атмосферного фронта 21 ноября 2024 г., была применена полосовая фильтрация Баттерворта 6 порядка в диапазоне 5–90 мин (диапазон атмосферных внутренних волн).

Спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования свидетельствует о том, что перед холодным фронтом наблюдаются как вариации атмосферного давления, так и вариации геомагнитного поля в диапазоне от 19 до 68 мин. Это соответствует диапазону атмосферных внутренних гравитационных волн (ВГВ). Сигналы, опережающие приход фронта, могут обладать прогностическим потенциалом.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИФЗ РАН и в рамках государственного задания ИДГ РАН № 125012700798-8 «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий».

1. Спивак А.А., Овчинников В.М., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А., Харламов В.А. Сейсмические, атмосферно-волновые, электрические и магнитные эффекты мощных атмосферных фронтов // Физика Земли. 2022. № 4. С. 56–70. DOI: 10.31857/S0203030622040022.

2. Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А. Комплексный прогностический признак опасных атмосферных явлений // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 1. С. 69–74. DOI: 10.31857/S2686739722050152.

3. Спивак А.А., Рябова С.А. Геофизические эффекты сильных атмосферных фронтов // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 1. С. 26–31. DOI: 10.31857/S268673972201008X.

ГЕНЕРАЦИЯ СТРУЙ ЦУГОМ СГУСТКОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Мирошниченко И.Б., Шарипов С.С., Шайхисламов И.Ф.

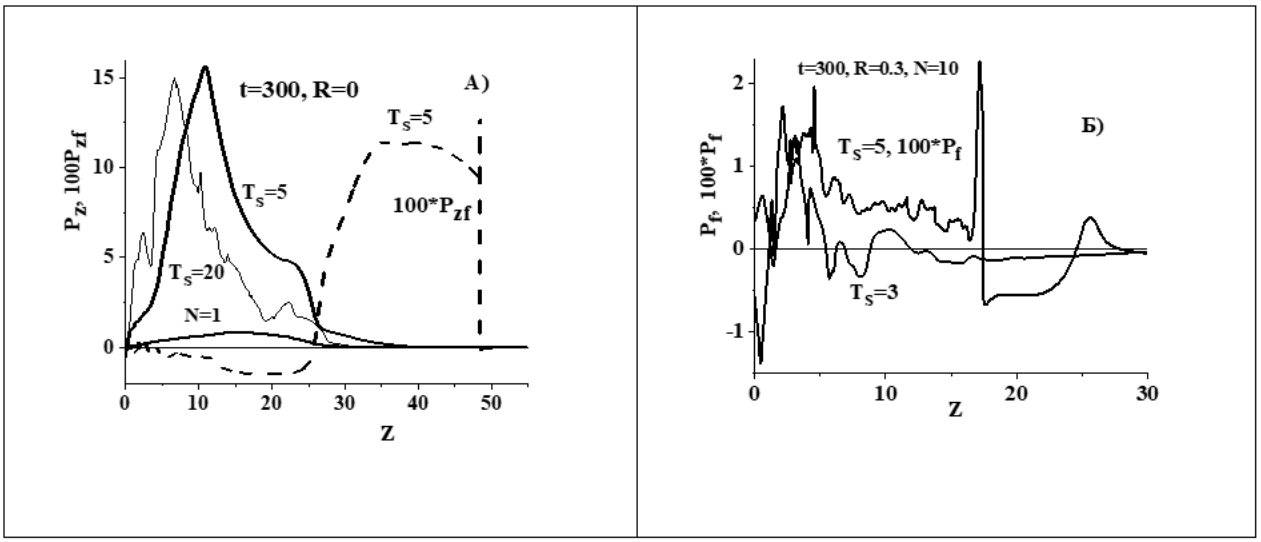
ИЛФ РАН, г. Новосибирск, Россия, tvn.25@yandex.ru

В ИЛФ СО РАН предложен метод генерации МГД волн периодическими сгустками лазерной плазмы в силовой трубке замагниченной плазмы (далее – фон). Волны и струя содержат ~ 80% энергии сгустков, длина много больше их радиуса при резонансе сгустков с фоном. Методы исследования – расчёты и эксперименты на стенде КИ-1.

Условия резонанса (далее – критерии) позволяют управлять типом волн, их длиной и интенсивностью. Так при Альфвеновских числах Маха $M_A \sim 1$ создаются медленная магнитозвуковая квазистационарная (МКВ), альфвеновская крутильная (АКВ) волны и струя. Возможны вистлеры. При $M_A \sim 0{,}2$ преобладают струя и АКВ большой длины.

С использованием расчётов показано, что при $M_A \sim 0{,}1$ формируется интенсивная струя, АКВ и МКВ слабые. Рисунок иллюстрирует некоторые результаты. Здесь T_S - период повторения сгустков, N = 1 и 10 их количество, P_Z и P_{Zf} – продольный импульс струи и МКВ, P_f – азимутальный импульс струи. Z – продольная координата вдоль оси симметрии струи, R – радиус, где P_Z и P_f максимальны, сгустки действуют в точке Z = R = 0. Параметры имеют безразмерный вид.

Сгустки создают единую струю при $T_S \sim 3 \div 50$, оптимально значение $T_S \sim 5$. Со временем амплитуда P_Z уменьшается, а длина растёт. Скорость передней части струи равна ~0,1. Продольный импульс МКВ в ~100 раз меньше импульса струи (см. рис А). Плазма струи вращается вокруг оси (рис. Б, T_S~3), а при нарушении некоторых критериев значение P_f уменьшается в ~ 100 раз (рис. Б, T_S~5). АКВ также как и МКВ слабая. Сгустки создают струю, если отношение давления плазмы фона много меньше давления магнитного поля.



А) Продольный импульс струи (P_Z) и МКВ (P_{Zf}) на оси симметрии в момент времени t = 300 N = 1 и N = 10. Б) Азимутальный импульс струи. Критерии не выполняются для T_S = 5.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0243-2021-0003.

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДАЛЬНЕМ КОСМОСЕ

С.И. Климов, Л.М. Зелёный, С.В. Куликов, Л.А. Лежен, Д.И. Новиков, А.А. Петрукович, Н.Е. Рыбьева, А. А. Скальский, Грушин В.А., [С.А. Романов], [С.П. Савин]

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

С начала 80-х годов ИКИ АН ССР активно включился в проведение волновых экспериментов в дальнем космосе, в особенности в диапазоне 0.2-20 Гц. С учетом того, что у отечественных космических аппаратов оси вращения направлены на Солнце (а не перпендикулярно направлению на Солнце, как на Западе), в ИКИ АН СССР была разработана оригинальная методика комбинированной волновой диагностики и конструкций штанг для проведения измерений электрических и магнитных полей. Во Вселенной именно волны и турбулентность часто определяют основные физические процессы. В докладе рассматриваются данные и методика волновых экспериментов на дальних космических аппаратах (КА), таких как ПРОГНОЗ-8, ИНТЕРШОК, ВЕГА, ФОБОС, ИНТЕРБОЛ-1 [1], а также их сравнение с аналогичными западными экспериментами. Вначале космической эры с помощью плазменно-волновых данных со спутников ожидалось продвижение в изучении удержания термоядерной плазмы. Электрические измерения данных проектов заполнили нишу 0.2 – 20 Гц, где помехи на гармониках частоты вращения западных спутников (0.25 –0.33 Гц) препятствуют измерениям и где сосредоточена энергетика процессов на внешних границах магнитосферы.

В ИКИ РАН метод комбинированной волновой диагностики (КВД), начавшейся на ПРОГНОЗЕ-8 и включающий измерения флуктуаций потока ионов и электрического тока плазмы. Это позволило оценивать длины и тип волн порядка нескольких ионных гирорадиусов из волновых данных с одного КА [2]. Особенностями измерений в дальнем космосе являются сравнимые величины Дебаевского радиуса и характерной длины антенн, а также то, что плотность плазмы много меньше плотности электронного фотооблака, вызванное фотоэффектом на поверхностях КА. Дальние спутники типа ПРОГНОЗ вращались вокруг оси, направленной на Солнце, которую приходилось один раз в 10-14 дней доворачивать на Солнце, что давало выигрыш в электропитании более чем в 2 раза, что позволило проекту ИНТЕРБОЛ-1 проработать 4 года. Из-за ориентации КА для проведения КВД необходимо использовать только жесткие многоколенчатые штанги размахом до 30 м. КВД позволяет разделять пространственно-временные вариации по измерениям в одной точке.

Вывод на орбиту проекта ИНТЕРБОЛ-1 (Прогноз-10) оказался уникальным. Практически с момента старта (космодром Плесецк) до выхода из ионосферы Земли, визуально наблюдался участниками проекта, находящимися в ИКИ РАН. Ниже приведён видеокадр, снятый 1-м каналом Телевидения по проекту НОЧНОЙ ДОЗОР.





1. Савин С. П., монография «Нелинейные взаимодействия и перенос плазмы на границе магнитосферы», LAMBERT Academic Publishing, (2012).

2. Romanov S.A., Klimov S. I., Mironenko P. A., Adv. Space Res., 11, 9, 19-24.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ Pc3-4 ПУЛЬСАЦИЙ

Белаховский В.Б.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, belakhov@mail.ru

Рассмотрен вопрос о механизме генерации геомагнитных Pc3-4 пульсаций с использованием современных наземных и спутниковых наблюдений. Использованы данные магнитометров сети CARISMA (Канада), данные геостационарных спутников GOES для регистрации Pc3-4 пульсаций, а также данные спутников MMS, Cluster для регистрации плазменных и электромагнитных возмущений в области форешока и магнитослоя. Традиционно считается, что источником Pc3-4 геомагнитных пульсаций в магнитосфере и на земной поверхности являются УНЧ волны в области форешока, которые генерируются за счет ионно-циклотронной неустойчивости при квазипараллельной ударной волне. Затем УНЧ волны должны проникать через магнитослой в магнитосферу Земли и вызывают в ней резонансные эффекты. Однако четких спутниковых наблюдений распространения УНЧ волн через магнитослой в магнитосферу в мировой литературе не имеется.

Для всех рассмотренных случаев по данным меридиональной цепочки станций сети CARISMA наблюдается увеличение периода пульсаций с увеличением геомагнитной широты, что является проявлением резонанса силовых линий (field-line resonance – FLR). Поэтому классическое эмпирическое соотношение $f = 6 \cdot B$ (где f – частота геомагнитных пульсаций, B – модуль межпланетного магнитного поля) для данных событий не может быть применено, поскольку частота пульсаций заметно (в 2 раза) изменяется с широтой.

Наблюдается высокая корреляция между Pc3-4 пульсациями в магнитосфере и на земной поверхности: в тороидальной hn-компоненте на спутнике GOES-13 и в X-компоненте на магнитосопряженной станции SNKQ, что говорит о единой природе данных колебаний и повороте эллипса поляризации волн на 90° при прохождении через ионосферу.

Наблюдения показывают, что Pc3-4 пульсации и УНЧ волны в области форешока регистрируются при квазипараллельной ударной волне ($\theta < 45°$). Анализ УНЧ волн в области форешока по данным спутников MMS, Cluster показал, что они имеют монохроматичную форму. Однако для возбуждения FLR в магнитосфере в широком диапазоне L-оболочек (как в рассмотренных случаях) магнитозвуковая волна, распространяющаяся от магнитопаузы, должна быть широкополосной.

В магнитослое не обнаружено УНЧ волн, аналогичных по свойствам волнам в форешоке. Высказывается точка зрения, согласно которой УНЧ волны в форешоке и в Pc3-4 пульсации имеют один общий источник – квазипараллельную ударную волну, но их возбуждение происходит независимо друг от друга. То есть УНЧ волны из форешока не обязательно должны проникать через магнитослой в магнитосферу Земли для появления Pc3-4 пульсаций. При квазипапаллельной ударной волне могут генерироваться широкополосные возмущения на магнитопаузе, которые затем трансформируются в резонансную структуру Pc3-4 волн.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВЕТРА НА ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В ИОНОСФЕРЕ

Сорокин В.М., Ященко А.К.

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

Ветер в проводящей ионосфере приводит к появлению силы Ампера, вертикальный градиент которой модифицирует свойства внутренних гравитационных волн (ВГВ). Наиболее существенное влияние градиентов силы Ампера сводится к экспоненциальному изменению амплитуды волны при ее распространении вдоль направления действия силы. Характеристики распространения ВГВ рассмотрены на основе полученных уравнений ВГВ в движущейся ионосфере с учетом силы Ампера. В выбранной модели ионосферы получены аналитические решения уравнений и проанализированы основные свойства волн. 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 знаком коэффициента поглощения. Знак коэффициента поглощения определяется знаком компоненты ветра. Относительные рост/затухание ВГВ на длине волны увеличиваются с уменьшением частоты. Максимальный рост амплитуды ВГВ достигается при ее распространении преимущественно нормально к направлению 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. Вне этой области вверх и вниз волна экспоненциально затухает. Внутри клина амплитуда волны растет или затухает в зависимости от знака компоненты ветра. Излучение точечного источника ограничивается конической поверхностью. Внутри конуса, в области, примыкающей к его оси газ колеблется синхронно с экспоненциально убывающей от источника амплитудой. Вне конуса от его поверхности расходятся волны, фазовые поверхности которых представляют собой гиперболоиды вращения. Амплитуда волны возрастает или убывает в направлении силы Ампера в зависимости от знака компоненты скорости ветра. 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 отражение ВГВ от ионосферы, причем с уменьшением частоты отражение возрастает. С ростом частоты коэффициент трансформации стремится к единице, а коэффициент отражения стремиться к нулю.

Выводы теории применены для интерпретации результатов наблюдения среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМПИВ). Показано, что сила Ампера может формировать спектр колебаний ионосферы в интервале периодов, соответствующих спектру ВГВ в атмосфере. Так как СМПИВ являются результатом воздействия атмосферных ВГВ на ионосферу, то выводы теории, полученные на основе проведенных расчетов, могут быть использованы для изучения свойств возмущений. В частности, влиянием силы Ампера на распространение ВГВ можно объяснить сезонную асимметрию движения СМПИВ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 1021060808637-6-1.3.8.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ВОЛН НА МОДЕЛЬНЫХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ СПЕКТРОГРАММАХ

Лужковский А. А.,

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

Работа посвящена исследованию динамики спектра ленгмюровских волн и функции распределения резонансных электронов в неустойчивой плазме. Для самосогласованного описания резонансного взаимодействия волн и частиц используется система уравнений, состоящая из кинетического уравнения Больцмана-Власова, определяющего эволюцию функции распределения в фазовом пространстве, и закона Ампера-Максвелла, описывающего динамику электрического поля. В используемой модели рассматривается двухкомпонентная плазма: плотная «холодная» компонента определяет дисперсионные свойства среды и не участвует в резонансном взаимодействии; энергичная компонента ответственна за рост или затухание волны посредством резонансного взаимодействия. Такой подход позволяет рассчитывать кинетическое уравнение только для функции распределения резонансных частиц, что существенно уменьшает объем вычислений. Важной особенностью предлагаемого подхода является возможность учета неоднородности плазмы, которая задается с помощью внешней потенциальной силы. Эволюция функции распределения энергичных частиц определяется решением кинетического уравнения Больцмана-Власова с использованием схемы Рунге-Кутты 4-го порядка по времени. Электрическое поле на каждом временном шаге определяется численным интегрированием закона Ампера-Максвелла.

Моделирование нелинейной динамики спектра волн проводится с использованием модифицированного дисперсионного соотношения для ленгмюровских волн в случаях однородной и неоднородной плазмы. Частотно-временной анализ электрического поля в обоих случаях выявил наличие квазипериодических структур на спектрограммах. Показано, что эти структуры возникают вследствие пространственной периодичности амплитуды поля, которая обусловлена регулярностью шага волновых чисел начального спектра. Перенос энергии с групповой скоростью приводит к преобразованию пространственной периодичности во временные модуляции, наблюдаемые на модельных спектрограммах.

КИНЕТИЧЕСКИЕ АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ПЛАЗМОСФЕРЫ И КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Власов А.А., Козлов Д.А.

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

В рамках модели экваториальной магнитосферы с учетом горячих ионов (протонов) кольцевого тока исследована дисперсия кинетических альфвеновских волн (КАВ). Для выбранной модели среды переход от «теплой» дисперсии, связанной с конечным гирорадиусом ионов во внешних областях, к «холодной» дисперсии, связанной с конечной инерцией электронов, происходит в области $L < 3L < 3$, где LL – параметр МакИлвейна. При малой примеси (или отсутствии) горячих протонов поглощение энергии КАВ частицами плазмы происходит в большей части плазмосферы, в области плазмопаузы и во внешней магнитосфере. Для электронов с энергиями порядка 2 эВ, которые считаются ответственными за генерацию стабильных красных авроральных дуг (SAR-дуг), область наиболее эффективного взаимодействия с КАВ расположена на границе плазмосферы вблизи плазмопаузы. С ростом концентрации горячих протонов ширина переходного слоя значительно уменьшается, а сам слой смещается к внутренней границе кольцевого тока. Таким образом, присутствие горячих протонов кольцевого тока снижает эффективность поглощения КАВ надтепловыми электронами в окрестности плазмопаузы.

МЕЖЧАСТИЧНЫЕ И АНОМАЛЬНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ В КВАЗИЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ МАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Кузнецов А.А., Кочаровский Вл.В.

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

Апериодическая неустойчивость вейбелевского типа, неизбежно возникающая в бесстолкновительной или слабо столкновительной плазме с анизотропным распределением электронов и/или ионов по скоростям, формирует случайное мелкомасштабное магнитное поле. Это турбулентное поле существенно изменяет кинетические свойства и динамику плазмы, даже если оно является относительно слабым, т.е. не содержит сильно нелинейных локализованных структур. Согласно имеющимся наблюдениям и экспериментам, различные анизотропные распределения частиц и обусловленная ими магнитная турбулентность характерны для многих переходных процессов в космической и лабораторной плазме и реализуются, например, при расширении неравновесной плазмы в фоновую. Быстрый расчет и анализ свойств данной турбулентности актуален для многих задач физики звездного ветра, магнитосфер звезд и планет, бесстолкновительных ударных волн, солнечных вспышек и др.

В настоящее время доминирующим подходом в исследовании этой, так называемой вейбелевской, турбулентности является численное описание с помощью метода частиц в ячейках. Расчеты с его использованием требуют больших вычислительных затрат и обычно сопровождаются высоким уровнем шумов. В то же время, как правило, они подтверждают тот факт, что вейбелевская турбулентность является слабой, а значит, может быть рассмотрена в квазилинейном приближении. В таком приближении эволюция усредненной по пространству компоненты функции распределения частиц по скоростям определяется интегральным нелинейным действием всех мод (пространственных гармоник) вейбелевской турбулентности. В свою очередь, их комплексные частоты задаются текущей формой этого распределения, т.е. динамика мод формально является линейной и легко рассчитывается.

В данном подходе, однако, обычно не учитывается рассеяние частиц турбулентным магнитным полем, также известное как «аномальное», которое в ряде случаев, как следует из сопоставления полноценного нелинейного двумерного моделирования методом частиц в ячейках с результатами указанных квазилинейных расчетов, оказывается существенным для нелинейной эволюции магнитной турбулентности. Для того чтобы описать эту эволюцию в квазилинейном моделировании, мы аналитически оцениваем поперечное сечение рассеяния частиц на турбулентности и добавляем аномальные столкновения в уравнение Власова в рамках простейшего БГК τ-приближения. В докладе показано, что такой эффективный учет аномальных столкновений позволяет корректно моделировать нелинейную эволюцию турбулентности в двумерном приближении на протяжении значительного промежутка времени её развития как в незамагниченной, так и в магнитоактивной плазме. На этой основе выявлен ряд ранее не известных эволюционных свойств магнитной турбулентности.

В то время как последовательный учет парных межчастичных столкновений при моделировании методом частиц в ячейках связан со значительными трудностями, в квазилинейном моделировании парные столкновения могут быть введены в рамках того же БГК τ-приближения. С использованием оригинального численного кода на основе описанного подхода нами найдена зависимость насыщающего неустойчивость магнитного поля от темпа межчастичных столкновений и величины анизотропии распределения частиц по скоростям. Анализ применимости подобного моделирования для описания последующей долговременной эволюции магнитной турбулентности выходит за рамки доклада.

Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС (проект № 24-1-5-94-1). Для численных расчетов использованы суперкомпьютерные ресурсы ЦКП ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВКИ НА АНОМАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ С МИКРОТУРБУЛЕНТНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.

Емельянов Н.А., Кочаровский Вл.В.

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

Нахождение аналитических выражений для кинетических параметров космической плазмы, которая, как правило, является бесстолкновительной, требует учета взаимодействия заряженных частиц с турбулентными флуктуациями электрических и магнитных полей, играющих в этом случае более существенную роль, чем межчастичные кулоновские столкновения. О свойствах такой плазмы говорят как об «аномальных», поскольку ее коэффициенты диффузии, вязкости, тепло- и электропроводности на много порядков по величине отличаются от своих «классических» значений, определяемых столкновениями частиц. Таким образом, турбулентные поля, возникающие, например, вследствие развития различных неустойчивостей, оказывают существенное влияние на транспортные характеристики космической плазмы и такие фундаментальные процессы, как ускорение заряженных частиц и магнитное пересоединение [1].

Изучению турбулентной плазмы посвящено большое количество статей и монографий (см., например, [2]). Значительная доля этих работ направлена на нахождение аномальных коэффициентов диффузии и сопротивления, обусловленных развитой ионной или ленгмюровской турбулентностью [3]. Тем не менее, присутствующие в космической плазме флуктуации магнитного поля могут значительно превосходить по величине флуктуации электрического поля и потому играют не меньшую роль в рассеянии частиц [4]. Однако детального исследования вклада магнитной микротурбулентности в сопротивление космической плазмы, по существу, не проводилось.

В докладе обсуждается влияние эффекта электромагнитной экранировки на аномальный транспорт заряженных частиц в космической бесстолкновительной плазме с возбужденной в ней магнитной микротурбулентностью [5]. В рамках квазилинейной кинетической теории получены коэффициенты диффузии частиц в пространстве скоростей, учитывающие влияние экранировки. С использованием этих коэффициентов найдено численное решение соответствующего кинетического уравнения. Для стационарного случая показано существование анизотропии функции распределения частиц, растущей вместе с параметром экранировки. Найдены приближенные аналитические формулы для эффективной подвижности частиц и проводимости плазмы с изотропной магнитостатической турбулентностью. В заключении рассматриваются возможные применения полученных аналитических и численных результатов для исследования ряда процессов в космической (в особенности корональной) плазме.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-12-00457.

1. Matthaeus W. H., Velli M. // Space Sci. Rev. 2011. V. **160**, No. 1, pp. 145-168.
2. Цытович В.Н., *Теория турбулентной плазмы* // М., Атомиздат, 1971.
3. Che H. // Physics of Plasmas. 2017. V. 24. No 8. P. 082115.
4. Shalchi A. // Space Sci. Rev. 2020. V. **216**, No. 2. P. 23.
5. Emelyanov N.A., Kocharovsky Vl.V. // arXiv:2512.09168 [physics.plasm-ph].

ПРОЯВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЯКУТИИ В РЕГИСТРАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ В ДИАПАЗОНЕ Pc5 В 24-М СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ С ПОМОЩЬЮ MAGDAS МАГНИТОМЕТРОВ

Моисеев А.В., Попов В.И., Баишев Д.Г., Йошикава А.

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

На основе 1-мин данных станций сети магнитометров MAGDAS в Якутии с геомагнитными координатами TIX MLat=65.67° MLong = 196.88°, ZGN MLat=61.01° MLong = 193.82°, YAK MLat=56.08° MLong = 200.51° изучаются свойства УНЧ-волн в диапазоне Pc5 пульсаций геомагнитного поля, которые были зарегистрированы в 2012-2021 г.

Пульсации возбуждались на частотах: 1.8, 2.4, 2.7, 3.3, 4.2, 4.6 мГц, соответствующих дискретным частотам резонансов силовых линий. Обнаружено, что пульсации на более высоких частотах преимущественно наблюдаются на дневной стороне. Выявлено, что частота на которой регистрируется максимальная амплитуда пульсаций, возрастает с уменьшением широты станции.

В сезонном распределении колебаний были обнаружены максимумы, соответствующие весеннему и осеннему равноденствию. В суточном распределении пульсаций в YAK присутствуют максимумы в 9-10 MLT и 15-16 MLT в ZGN и TIX регистрируются асимметричные относительно полудня распределения с основным максимумом в области полуночи.

Обнаруженные особенности пульсаций свидетельствуют об их резонансном механизме возбуждения, а также о влиянии региональных особенностей Якутии на суточное распределение вероятности наблюдения пульсаций.

СВОЙСТВА ПУЛЬСАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ PC5 В СОБЫТИИ 27 АВГУСТА 2014 Г.

Стародубцев С.А., Моисеев А.В.

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

На основе 1-мин данных высокоширотных станций сети магнитометров SuperMAG изучаются свойства УНЧ-волн в диапазоне Pc5 (T=150-600 с) пульсаций геомагнитного поля, которые были зарегистрированы в интервале времени 14:00-18:00 UT 27 августа 2014 г. С помощью методов спектрального и поляризационного анализов, примененных к данным наземных геомагнитных наблюдений установлены некоторые характеризующие их свойства: спектры мощности, направление распространения, плоскость и степень поляризации, эксцентриситет, направление и угол поляризации УНЧ-волн. Показано, что на ряде станций пульсации Pc5 носят характер присущий альфвеновским волнам, а на других компрессионным. Рассматриваются причины этого как результат распространения УНЧ-волн в магнитосфере и возможной их трансформации из одного типа в другой.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН № FWRS-2026-0058.

ДИФФУЗИЯ И ДРЕЙФ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ВБЛИЗИ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЗЕМЛИ: ГЛОБАЛЬНАЯ ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ

Кропотина Ю.А., Быков А.М..

ФТИ им А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, juliett.k@gmail.com

С помощью авторского кода „Maximus“ [1] создана глобальная гибридная модель магнитосферы Земли, в которой на декартовой сетке самосогласованно вычисляются электромагнитные поля и траектории заряженных ионов, а электроны представлены как нейтрализующая жидкость с нулевой плотностью. Рассчитаны пространственные распределения и траектории ионов, ускоряющихся на фронте ударной волны по механизму Ферми 1-го порядка. Результаты моделирования сопоставлены с предположениями квазилинейной модели Бережко--Танеева [2].

Результаты моделирования для случая строго радиального межпланетного магнитного поля:

- указывают на диффузионный характер распространения частиц;
- подтверждают предположение о малости поперечного коэффициента диффузии надтепловых частиц по сравнению с продольным;
- позволяют оценить численные значения продольного коэффициента диффузии, которые также согласуются с предсказаниями квазилинейной теории.

Однако были обнаружены и отличия результатов моделирования от предпосылок модели Бережко—Танеева:

- эффективность инжекции частиц в процесс ускорения Ферми выше, чем предполагалось, и достигает нескольких процентов в экваториальной области;
- размер области эффективной инжекции и ускорения примерно в два раза больше, чем предполагалось и составляет около 20 радиусов Земли.

Исследование конфигурации с наклонным межпланетным магнитным полем показало, что в этом случае важен $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейф, вследствие которого ускоряющиеся частицы перестают быть привязанными к магнитным силовым линиям и распространяются в поперечных направлениях.

Таким образом, гибридная модель показала, что квазилинейная модель ускорения частиц криволинейными ударными фронтами может использоваться с минимальными поправками: увеличенные эффективность и область инжекции, поперечный дрейф в случае межпланетного магнитного поля, отличного от радиального [3].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 25-72-20007. Моделирование осуществлялось с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. J. Kropotina, A. Bykov, A. Krassilchtchikov, and K. Levenfish, Commun. Comput. Inf. Sci. 965, 242 (2019).
2. Бережко Е.Г., Танеев С.Н., Космич. Исслед. 29, 582 (1991).
3. Кропотина Ю.А., Быков А.М., ПАЖ, 51, 4, 178 (2025).

ВОЛНОВОЙ ПЕРЕНОС ВЕЩЕСТВА В ПЛАЗМЕ

Трухачев Ф.М., Герасименко Н.В., Васильев М.М., Петров О.Ф.

ОИВТ РАН, г.Москва, Белорусско-Российский Университет, г. Могилев; ftru@mail.ru

Согласно традиционным определениям, волнами называют возмущениями среды, распространяющиеся в пространстве. Также считается, что материальные волны не переносят вещество среды распространения (переносят только энергию и импульс [1], [2]). В современных учебниках физики запрет на волновой перенос материи представляется как одно из фундаментальных свойств природы. Однако это не так. К настоящему времени известно, что традиционное определение волны справедливо для систем с фиксированными границами (струна, мембрана) или для линейных волн в системе со свободными границами. Реальные волны имеют ненулевую амплитуду, иногда довольно большую. Такие волны (с конечной амплитудой) начинают демонстрировать нелинейные эффекты. Одним из таких эффектов является ненулевой дрейф вещества, в котором распространяются волны. Эти явления можно классифицировать следующим образом:

I. Резонансные частицы. Некоторые частицы могут быть захвачены волной. Такие частицы называются захваченными (или резонансными) [3], они движутся вместе с волной с её фазовой скоростью. Резонансные частицы, как правило, не сильно влияют на исходную волну, более того, их можно не учитывать в первом приближении. При малых амплитудах доли резонансных частиц малы. Волны большой амплитуды способны захватывать и ускорять значительную часть частиц среды, что используется в ускорителях частиц [4].

II. Дрейф Стокса. Явление открыто Стоксом в конце 19 века для поверхностных волн [5]. В этом случае волна любой амплитуды перемещает все частицы среды, в которой она движется, на конечное расстояние. Для малых амплитуд стоксовским дрейфом обычно пренебрегают, как и другими нелинейными эффектами.

III. Солитонный перенос вещества. Третий тип рассматриваемых явлений – это перенос вещества солитонами акустического типа [6]. Солитонами называют уединенные волны, существующие благодаря балансу нелинейности и дисперсии. Односторонний перенос вещества солитонами KdV описан в [7]. Солитоны сжатия переносят вещество в направлении своего движения, а солитоны разрежения – в противоположном направлении. Односторонний перенос вещества является фундаментальным свойством солитонов. Иными словами, в отличие от первых двух случаев, солитонным переносом нельзя пренебрегать для волн любой амплитуды (включая сколь угодно малые).

1. I.E. Irodov, Wave processes. Basic laws: a tutorial / Moscow 2020. - 266 p. — ISBN 978-5-00101-673-1 (In Russian).
2. F.S Crawford, Jr (1968). Waves (Berkeley Physics Course, Vol. 3), McGraw-Hill, ISBN 978-0070048607.
3. I. B. Bernstein, Exact nonlinear plasma oscillations. Physical Review. V. 108. P. 546. (1957).
4. A. Modena, [et al.], Electron acceleration from the breaking of relativistic plasma waves. Nature. V. 377. P. 606–608. (1995).
5. G.G. Stokes, On the theory of oscillatory waves, Trans. Camb. Philos. Soc. 8. P. 441. (1847).
6. F. M. Trukhachev, N. V. Gerasimenko, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov. Matter transport as fundamental property of acoustic solitons in plasma. Phys. Plasmas. V. 30. P. 112302. (2023).
7. Dubinov A.E., Lebedeva X.I. // Chaos, Solitons & Fractals 2021. V. **152.** P. 111391.

МЕХАНИЗМ ПЕРЕНОСА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ МАГНИТОЗВУКОВЫМИ СОЛИТОНАМИ

Герасименко Н.В., Трухачев Ф.М.

Белорусско-Российский университет, Беларусь,gerasimenko_nikita@hotmail.com

Нелинейные волны и солитоны в частности играют важную роль в физических процессах, наблюдаемых в космической и лабораторной плазме. Традиционно транспорт частиц в полях нелинейных волн связывается с резонансным захватом или локальными динамическими механизмами. Однако в ряде моделей продемонстрирован более тонкий эффект: одиночный солитон способен вызвать конечное смещение фоновых частиц при полном восстановлении их асимптотического импульса.

В работе [1] было детально рассмотрено перемещение заряженных частиц поперек магнитного поля магнитозвуковым солитоном. Можно отметить, что динамика частицы обладает свойством $p(\pm\infty) = \text{const}, \qquad \Delta X \neq 0,$ где p — импульс, а X — координата. Смещение ΔX определяется исключительно параметрами солитона (амплитудой, шириной и скоростью) и имеет асимптотику $\Delta X \propto \sqrt{H_{\max} - 1}$ при $M \to 1$ (параметр M играет роль числа Маха для данного типа волн). С точки зрения гамильтоновой механики, взаимодействие частицы с солитоном описывается как замкнутая петля в фазовом пространстве импульсов, при которой сопряженная координата приобретает ненулевую голономию $\oint X = p(X(t),t)$. Поскольку это приращение инвариантно относительно изменения параметризации и определяется топологией пути в пространстве параметров, эффект имеет геометрическую, а не чисто динамическую природу.

В отличие от захваченных частиц, исследуемые частицы остаются асимптотически свободными. Это позволяет классифицировать данный перенос как макроскопический аналог фазы Берри, подобно фазовым сдвигам при столкновении солитонов, описанным в [2]. Универсальность механизма подтверждается его проявлением в ионно-звуковых солитонах плазмы [3], нелинейных линиях передачи [4] и волнах на мелкой воде [5]. Таким образом, солитон-индуцированный транспорт является фундаментальным топологическим свойством нелинейных систем.

1. Gerasimenko, N. V., et al. // Phys. Rev. E 112.4 (2025): 045201.
2. Alber, M. S., and J. E. Marsden. // Com. in math. phys. 149.2 (1992): 217-240.
3. Trukhachev, F. M., et al. // Physics of Plasmas 11 (2023).
4. Trukhachev, F. M., et al. // Chaos, Solitons Fractals 202 (2026): 117583.
5. Trukhachev, F. M., et al. // Nonlinear Phen. in Compl. Sys. 4 (2024): 398-403.

КОНВЕКЦИЯ РЭЛЕЯ-БЕНАРА В ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ ХОЛЛОВСКОЙ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Галстян Т.В., Петросян А.С.

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия
galstyan.tigran@phystech.edu

Естественная конвекция является одним из важнейших явлений как для космической и астрофизической плазмы, так и в лабораторных установках. Наличие газовой добавки существенным образом меняет динамику плазмы. Плазма с газовой добавкой называется частично ионизованной плазмой и состоит из электронной, ионной и нейтральной компонент. В работе развита теория холловской магнитной гидродинаимки вязкой и теплопроводящей плазмы в случае, когда нейтральная компонента является преобладающей и играет роль термостата. Показано, что в таком случае уравнение энтропии сводится к одножидкостному с использованием энтропии центра масс частично ионизованной плазмы. Для исследования явления конвекции полученные уравнения записаны в приближении Буссинеска. В таком приближении плотность зависит только от градиента температур и ее изменением пренебрегаем всюду, кроме слагаемого описывающего силу тяжести. Сформулирована и решена задача Рэлея-Бенара для слоя частично ионизованной плазмы подогреваемого снизу со свободными границами. Получены порог и инкремент нарастания неустойчивости как в случае отсутствия вращения, так и в присутствии вращения. Показано, что при отсутствии вращения эффект амбиполярной диффузии ослабляет связь магнитного поля с частично ионизованной плазмой из-за чего частично ионизованная плазма оказывается более неустойчивой, чем полностью ионизованная плазма. Вращение существенным образом повышает порог конвективной неустойчивости.

ХОЛЛОВСКАЯ МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛНОСТЬЮ ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ. СВИСТОВЫЕ ВОЛНЫ

Кошкина Д.А., Петросян А.С.

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия
koshkina.da@phystech.edu

Развита теория холловской магнитной гидродинамики для полностью ионзованной космической и астрофизической плазмы с учетом эффектов вращения в неинерциальной системе отсчета. Из исходных уравнений двухжидкостной магнитной гидродинамики получена система одножидкостных уравнений холловской магнитной гидродинамики с использованием характеристик центра масс плазмы. Показано, что учет вращения в ионной и электронной компонент полностью ионизованной плазмы существенным образом определяет динамику плазмы. В холловской магнитной гидродинамике вращение не только определяет силу Кориолиса, но также изменяет величину и направление холловского слагаемого. Исследованы линейные баротропные течения полностью ионизованной плазмы в рамках развитой теории. Показано, что в высокочастотном приближении, когда характерная частота течения много больше ионной циклотронной частоты, безразмерная глубина скин-слоя оказывается существенной. В таком случае получено дисперсионное соотношение нового типа свистовых волн, динамика которых существенным образом определяется вращением и безразмерной глубиной скин-слоя. Интересной особенностью полученных свистовых волн является отсутствие зависимости частоты волн от величины волнового вектора при больших волновых числах. В таком случае частота волны определяется только взаимной ориентацией волнового вектора, вектора магнитной индукции и вектора угловой скорости вращения.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА РЕФРАКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Лукьянцев Д. С., Афанасьев Н. Т., Калашникова Е. И.

ИГУ, г. Иркутск, Россия, cmeofs1997@mail.ru

В настоящее время для исследования космического излучения различных частотных диапазонов широко используются методы математического моделирования. Наиболее простым и наглядным методом моделирования транспорта излучения является лучевое приближение [1], позволяющее отследить динамику высокочастотной асимптотики волнового поля в космической среде. Достоинством лучевого приближения считается возможность единого описания рефракции волн в плазме и эффектов линзирования в гравитационном поле галактических и внегалактических объектов [2]. Для повышения оперативности геометрооптических расчетов в ряде случаев вводятся дополнительные приближения. Одним из таких приближений является использование локальной (квазисферической) системы координат [3]. В основе локального приближения лежит предположение о распространении излучения в плоскости, проходящей через центр сферической системы координат, источник и пункт наблюдения. Для правильной интерпретации данных радиоастрономических и астрофизических экспериментов важен высокоточный расчет рефракционных эффектов электромагнитного излучения в трехмерно-неоднородной космической среде. Поэтому требуется анализ достоверности локального приближения в условиях, когда плоскость падения излучения наклонена относительно плоскости дуги большого круга.

В докладе сделаны оценки возможностей квазисферического приближения для расчета траекторных характеристик электромагнитного излучения при распространении в поле тяготения астрофизических объектов, погруженных в космическую плазму. В сферической и локальной системах координат получены стохастические дифференциальные уравнения в форме Лагранжа-Эйлера на основе вариационного принципа Ферма. Выполнены численные расчеты строгих и приближенных уравнений для рефракционных характеристик излучения в космической среде с гравитационными и плазменными неоднородностями. Результаты моделирования представлены в виде проекций распределения лучевой структуры в картинной плоскости наблюдателя. Показано, что лучевая картина космического излучения, полученная на основе расчетов в локальной системе координат, подобна картине, рассчитанной в сферических координатах, когда плоскость падения излучения имеет смещение от плоскости дуги большого круга не более, чем $\pm 0.3\,rad$. Это позволяет в ряде случаев при интерпретации данных космических экспериментов использовать приближенную структуру излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (тема госзадания FZZE-2026-0006).

1. Kravtsov Yu. A., Orlov Yu. I. Geometrical Optics of Inhomogeneous Medium. Berlin: Springer-Verlag, 1990. 312 p.
2. Лукьянцев Д. С., Афанасьев Н.Т., Калашникова Е.И. Математическое моделирование влияния плазменных и гравитационных неоднородностей на рефракцию космического излучения // Санкт-Петербург: Журнал технической физики. 2025. Т. 95, № 12. С. 2315–2318.
3. Lukyantsev D.S., Afanasiev N.T., Kalashnikova E.I., Tanaev A.B. Mathematical Modeling of Refraction Characteristics of Electromagnetic Radiation at Stochastic Gravitational Field // Mathematical Physics and Computer Simulation. 2024. V.27. Iss. 2. P.48-60.

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕДЛЕННЫХ НЕОБЫКНОВЕННЫХ ВОЛН И РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Н. С. Артеха[1,2], Д. Р. Шкляр[1]

[1]ИКИ РАН, г. Москва, Россия
[2]НИУ "ВШЭ", г. Москва, Россия, natalya.arteha@mail.ru

Резонансное взаимодействие волн и частиц является одним из фундаментальных процессов в космической плазме и в значительной степени определяет спектры наблюдаемых волн и динамику энергичных частиц в плазмосфере Земли. Оно играет важную роль в ускорении и питч-угловом рассеянии энергичных частиц, приводящем к их высыпанию в атмосферу. Наиболее благоприятные условия для резонансного взаимодействия имеют место, когда показатель преломления волны $N \gg 1$. Среди таких волн важную роль в динамике частиц плазмосферы Земли играют медленные необыкновенные (МН) волны. Интерес к этим вопросам стимулировали наблюдения волновых спектров и дифференциальных потоков энергичных частиц на спутниках Van Allen Probes. Ранее было показано (Shklyar, Artekha, 2024), что наибольший инкремент МН волн наблюдается вблизи верхнегибридной частоты, когда частота МН волн порядка плазменной и кратна циклотронной частоте ($f \sim f_{UH} \sim f_p \sim n f_c$), что было экспериментально подтверждено в работе (Shklyar, Titova, Artekha, 2025).

Линейный инкремент МН-волн в нерелятивистском случае имеет две особенности. Во-первых, он содержит $k_{||}$ в знаменателе. Это, конечно, не означает, что при $k_{||} = 0$ инкремент обращается в бесконечность, так как при этом резонансная скорость обращается в бесконечность, так что число резонансных частиц экспоненциально убывает. Тем не менее, случай $k_{||} = 0$ требует особого рассмотрения, так как в этом случае в уравнении для гирофазы необходимо учитывать члены, пропорциональные полю волны. Вторая особенность инкремента возникает, когда частота волны совпадает с гармоникой гирочастоты. В этом случае линейные резонансные условия дают нулевую продольную скорость частицы и, так же, как и в случае $k_{||} = 0$, в уравнении для гирофазы частицы нужно учитывать влияние поля волны. Оба указанных вырождения снимаются в релятивистском случае, так как при учете релятивистских эффектов резонансные условия содержат не только продольный импульс частицы, но и ее полную энергию.

В данном докладе представлено исследование генерации медленных необыкновенных волн на основе закона сохранения энергии в системе волна – резонансные частицы, где энергия волны включает электромагнитную энергию волнового поля и колебательную энергию нерезонансных частиц, а энергия резонансных частиц – их полную кинетическую энергию. Детально проанализированы резонансные условия, выведен критерий Чирикова для использования приближения изолированных резонансов и получено условие для возможности использования электростатической аналогии. Выведено выражение для нелинейного времени (мы рассматриваем случай $\gamma_{NL}\tau_{NL} \ll 1$). В результате изначально двумерная задача сведена к одномерной задаче О'Нила, исследованной им для ленгмюровских волн, и получено выражение для нелинейного инкремента МН волн с учётом релятивистских эффектов, справедливое для любого угла распространения.

1. D.R. Shklyar, N.S. Artekha, Generation of Quasi-Electrostatic Slow Extraordinary Waves by Kappa Distribution with a Loss Cone, Plasma Physics Reports, 2024, Vol. 50, No. 10, pp. 1243–1257.
2. Shklyar, D. R., Titova, E. E., & Artekha, N. S. (2025). Generation of UHR waves as inferred from wave and electron flux measurements by Van Allen Probes. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 130, e2025JA033815. https://doi.org/10.1029/2025JA033815

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРА ВЕРХНЕГИБРИДНЫХ ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Д. Р. Шкляр[1], Е. Е. Титова[2,1], Н. С. Артеха[1,3]

[1]ИКИ РАН, г. Москва, Россия, david@cosmos.ru
[2]Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия
[3]НИУ "ВШЭ", г. Москва, Россия

Настоящий доклад посвящен объяснению особенностей спектров верхнегибридных (ВГР) волн, наблюдаемых на спутниках в магнитосфере Земли. Ранее было показано теоретически [1], что интенсивность ВГР-волн, наблюдаемых на спутниках, должна существенно возрастать в областях, где частота ВГР f_{UH} близка к гармоникам электронной циклотронной частоты f_c, что было подтверждено наблюдениями на спутниках Van Allen Probes, представленными в докладе. Предлагаемое нами объяснение этих наблюдений основано на предположении, что ВГР-волны возбуждаются вследствие развития циклотронной неустойчивости на высоких циклотронных резонансах. Поскольку ВГР-волны имеют малую групповую скорость, эффекты распространения не должны играть существенной роли в эволюции их спектра, поэтому наблюдаемый в данной точке спектр должен быть тесно связан с инкрементом нарастания волн в этой же точке. Расчёты инкремента нарастания ВГР-волн вдоль траектории спутника выполнялись с использованием измеренных параметров холодной плазмы и функции распределения энергичных электронов, восстановленной по данным измерений их дифференциальных потоков. Вычисленный инкремент ВГР-волн вдоль траектории спутника хорошо согласуется с одновременными наблюдениями спектра [2].

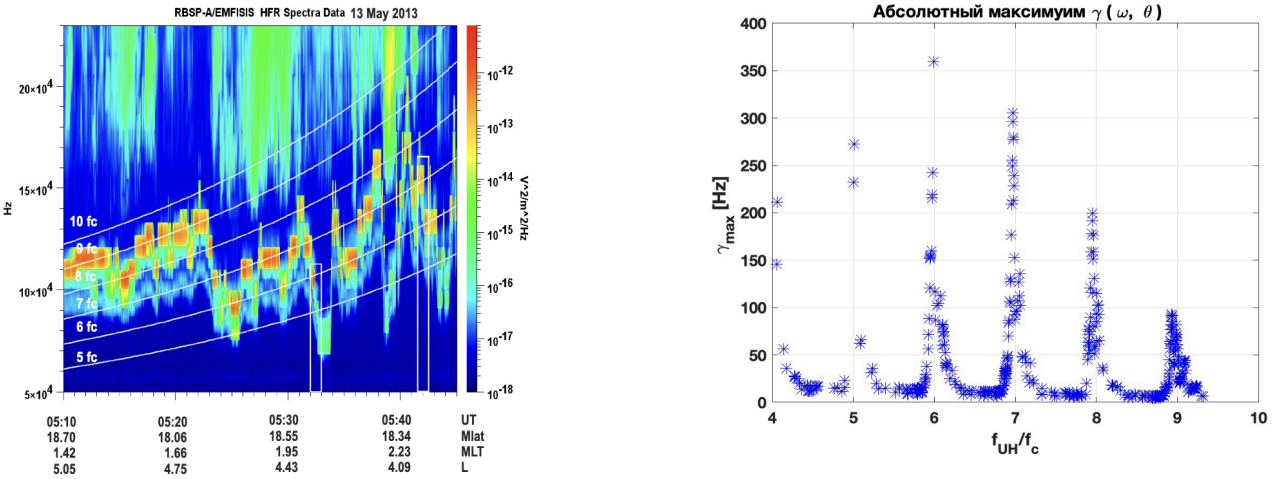


Рис. 1. Часть спектрограммы, отображающая временной интервал 05:10–05:45 UT (слева). Максимальный инкремент нарастания ВГР волн вдоль орбиты спутника, параметризованный величиной f_{UH} / f_c (справа).

1. D. R. Shklyar and N. S. Artekha (2024), Generation of Quasi-Electrostatic Slow Extraordinary Waves by Kappa Distribution with a Loss Cone. Plasma Physics Reports, Vol. 50, No. 10, pp. 1250–1264. DOI: 10.1134/S1063780X24601408.
2. D. R. Shklyar, E. E. Titova, N. S. Artekha (2025), Generation of UHR Waves as Inferred From Wave and Electron Flux Measurements by Van Allen Probes. Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 130, Issue 6, 2025JA033815. https://doi.org/10.1029/2025JA033815

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКЕ ИНТЕРБОЛ-2

Моисеенко И.Л., Могилевский М.М., Чугунин Д.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, irina.moiseenko@cosmos.ru

Авроральное километровое радиоизлучение (АКР) – одно из естественных, мощных радиоизлучений в диапазоне частот 30-700 кГц, генерируемое в приземной космической плазме и распространяющееся от Земли. С момента его открытия в 1965 году на спутнике Электрон многочисленные спутниковые наблюдения выявили основные свойства АКР, его зависимость от сезона и геомагнитной активности, поляризацию, строение и расположение источников, диаграмму направленности и тонкую структуру.

На основе измерений электромагнитного излучения в диапазонах частот от 4 кГц до 500 кГц, 1 МГц и 2 МГц, сделанных на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2 при помощи прибора ПОЛЬРАД с октября 1996 года по август 1998 года (700 дней), были проанализированы статистические характеристики АКР.

Полученные результаты обработки измерений АКР, в целом, подтвердили общепринятые представления о местоположении источников радиоизлучения и его зависимость от геомагнитной активности. Однако были выявлены три особенности распределения излучения:

1) регистрация АКР на дневных орбитах;
2) изменение частотных границ спектра АКР: вблизи полудня (12±1 MLT) верхняя и нижняя границы сближаются;
3) "затекание" АКР на дневную сторону выше при более спокойных геомагнитных условиях.

Предполагается, что полученные особенности радиоизлучения связаны с диаграммой направленности АКР, взаимным расположением орбиты спутника относительно источника и изменением конфигурации силовой линии в самом источнике в зависимости от геомагнитных условий.

Работа Могилевского М.М. и Чугунина Д.В. была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059).

ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕДЛЕННОЙ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ В ОБЫКНОВЕННУЮ ПРИ РАССЕЯНИИ НА ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

М. С. Замятин[1,2], **Д. Р. Шкляр**[1]

[1] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*
[2] *МФТИ, Московская обл., г. Долгопрудный, Россия, zamiatin.ms@phystech.edu*

Плоские монохроматические волны являются решениями уравнений, описывающих волновые процессы в однородной плазме в линейном приближении. При наличии в плазме двух волновых мод, отвечающих одному значению волнового вектора $\boldsymbol{k}$, но различным частотам, волны, относящиеся к разным модам, являются независимыми. Наличие в плазме двух волновых мод при одном и том же $\boldsymbol{k}$ предполагает возможность существования двух волн с одинаковой частотой, но различными волновыми векторами, принадлежащих различным модам. При наличии в плазме неоднородностей плоские волны уже не являются решениями основных уравнений. Если амплитуда флуктуаций много меньше средней плотности, решение основных уравнений можно искать в виде монохроматических квази-плоских волн с медленно изменяющимися в пространстве амплитудами. В этом случае решения, относящиеся к различным модам, перестают быть независимыми, и может происходить линейная трансформация волн, которую можно интерпретировать как рассеяние волны на неоднородностях с трансформацией части энергии падающей волны в другую моду. Такой процесс рассмотрен в настоящем докладе на примере рассеяния медленной необыкновенной волны в обыкновенную волну.

Мы описываем монохроматическое волновое поле с помощью комплексных потенциалов **A** и ϕ, с условием калибровки $A_z = 0$. Внешнее магнитное поле направлено вдоль оси *z*, все волны распространяются в плоскости (*x*, *z*), а параметры плазмы зависят только от *x*, мы можем записать выражения для компонент векторного потенциала в виде

$A_x = A_1(x)e^{ik_\parallel z - i\omega t}$; $A_y = A_2(x)e^{ik_\parallel z - i\omega t}$, где $A_1(x)$ и $A_2(x)$ удовлетворяют системе

$$\hat{L}_1 A_1 = aA_2, \quad \hat{L}_2 A_2 = bA_1, \quad \hat{L}_1 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + q_1^2, \quad \hat{L}_2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + q_2^2,$$

$$q_1^2 = \left(\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_3 - \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}k_\parallel^2\right), \quad q_2^2 = \left(\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_1 - \frac{\omega^2}{c^2}\frac{\varepsilon_2^2}{\varepsilon_1} - k_\parallel^2\right), \quad a = -i\frac{\omega^2}{c^2}\frac{\varepsilon_2\varepsilon_3}{\varepsilon_1}, \quad b = i\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}k_\parallel^2.$$

где ε_i – компоненты тензора диэлектрической проницаемости. Нетрудно видеть, что величины A_1 и A_2 удовлетворяют одному и тому же уравнению четвертого порядка

$\hat{L}_1\hat{L}_2 A_{1,2} = QA_{1,2}$, где $Q \equiv ab = \frac{\omega^2}{c^2}\frac{\varepsilon_2^2\varepsilon_3}{\varepsilon_1}k_\parallel^2$. Представляя величину Q в виде $Q(x) = \underline{Q} + \text{к}(x)$, $\text{к}(x) << \underline{Q}$, для A_1 получим уравнение

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_1^2\right)\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_2^2\right)A_1 = \text{к}(x)A_1, \qquad k_{1,2}^2 = \left(q_1^2 + q_2^2\right) \pm \sqrt{q_1^4 + q_1^2q_2^2 + q_2^2 + \underline{Q}}\,.$$

В отсутствие неоднородности ($\text{к}(x) = 0$) существуют две независимые моды, отвечающие волновым числам $\pm k_{1,2}$. При $\text{к}(x) \neq 0$, моды оказываются связанными, и имеет место трансформация волн, которая и обсуждается в докладе.

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА И ФАЗОВЫХ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ ГНСС СИГНАЛОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Никитенко А.С., Федоренко Ю.В.

Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

Изучение взаимосвязи между различными волновыми и плазменными явлениями в верхней атмосфере представляет значительный интерес для современной геофизики. В данной работе исследуется связь между наземными регистрациями всплесков аврорального ОНЧ-хисса и усилением фазовых сцинтилляций в сигналах систем спутниковой навигации.

Наблюдения аврорального хисса проводились в обсерватории Ловозеро (Кольский полуостров) в период с октября 2021 по декабрь 2023 год. Также, в пункте Апатиты (расположенном примерно в 80 км к юго-западу от Ловозеро) с помощью ГНСС-приёмника PolaRx5S регистрировались фазовые сцинтилляции спутниковых сигналов.

В результате анализа данных обнаружено 8 событий, демонстрирующих явную временную связь между возникновением хисса и увеличением индекса фазовых сцинтилляций. Определение азимутальных углов прихода и параметров поляризации хисса показало, что область его засветки у земной поверхности локализована вблизи точки пересечения прямой «Апатиты–спутник» с условной плоскостью на высоте 300 км. Оптические наблюдения с all-sky камеры в Ловозеро подтвердили наличие авроральных дуг именно в этих областях. Данное пространственное совпадение указывает на общую физическую природу наблюдаемых процессов.

Механизм прохождения аврорального хисса к наземному наблюдателю предполагает его рассеяние на мелкомасштабных (сотни метров) неоднородностях электронной концентрации в ионосфере. Неоднородности аналогичного пространственного масштаба ответственны и за возникновение фазовых сцинтилляций сигналов ГНСС. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что одновременная регистрация всплесков хисса и сцинтилляций может быть объяснена рассеянием обоих типов сигналов на одних и тех же мелкомасштабных ионосферных неоднородностях.

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

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ О ХОРАХ В ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОЛОСАХ

Нещеткин Г.М. [1,2], **Беспалов П.А.** [1,2], **Савина О.Н.** [1,2]

[1] *ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, gneshchetkin@hse.ru*
[2] *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

В работе приведены результаты количественной обработки данных высокого разрешения, накопленных при реализации миссии космического аппарата Van Allen Probe, с целью исследования свойств механизма возбуждения широкополосных ОНЧ хоров. Анализ выполнен для нескольких характерных примеров хоров, зарегистрированных в области локального минимума магнитного поля за плазмопаузой в средней магнитосфере. Спектральные формы выбранных широкополосных хоров расположены в двух частотных полосах: ниже и выше зазора вблизи половины минимальной электронной циклотронной частоты. В проведенном исследовании наряду со спектральными использованы оригинальные численные методы обработки данных высокого разрешения о волновых полях. Основная задача состояла в проверке теоретической модели количественного описании динамики системы, описывающей возбуждение широкополосных ОНЧ хоров. Для этого была вычислена размерность Хаусдорфа и найдены корни характеристического уравнения, отвечающие за линейную стадию возбуждения хоров. Разработанные методы были использованы при анализе многих (>20) примеров хоров. Во всех случаях размерность Хаусдорфа принимала дробные небольшие ($2<dim<10$) значения, что указывает на сложную динамику системы. Теоремы Такенса были применены для интерпретации полученных значений размерности. Путем обработки данных наблюдений были определены значения корней характеристического уравнения, отвечающего линейной стадии возбуждения в источнике хоров. Анализ выявил устойчивую структуру расположения корней характеристического уравнения, которая характеризуется наличием одного чисто мнимого корня и комплексно сопряженных корней. Совместное рассмотрение двух результатов — низкой дробной размерности системы и структуры корней характеристического уравнения обсуждаются в контексте верификации BPA (Beam Pulse Amplifier) механизма возбуждения широкополосных хоров.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 25-22-00237.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ИСКУССТВЕННЫХ УНЧ СИГНАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА FENIX-2024

Ермакова Е.Н.[1], Пилипенко В.А.[2], Федоров Е.Н.[2], Потапов А.С.[3], Рябов А.В.[1]

[1]*НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru*

[2]*Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия*

[3]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

В ходе активного эксперимента FENICS-2024 на Кольском полуострове с использованием линии электропередачи L403 в качестве горизонтальной излучающей антенны были зарегистрированы ультранизкочастотные сигналы в диапазоне 1-9 Гц на магнитных станциях, удаленных от передающей линии на расстояния от ~1600 км до ~ 2100км. Для теоретической интерпретации результатов эксперимента была использована численная модель УНЧ волн, распространяющихся в 3D неоднородном волноводе земля - ионосфера от горизонтального приземного тока. Эксперимент проводился в период с 29.07 по 08.08.2024. Были исследованы амплитудные и поляризационные спектры УНЧ сигналов. Обнаружено, что для высокоширотной станции Исток (IST) характер спадания амплитуды сигнала носил более монотонный характер, чем на среднеширотной станции Старая Пустынь (PUS), что связано с периодом полярного дня на станции IST в период проведения сеансов.

На станции PUS было обнаружено плато или возрастание амплитуды сигнала в диапазоне частот 3-6 Гц, что может быть связано с влиянием локального суб-ИАР над этой станцией. Существование этого резонатора подтверждено спектрами поляризационного параметра фонового шума.

Обнаружено значительное увеличение амплитуды сигнала в 1.5-1.7 раза в период первых часов сеанса 07-08.08 на станции PUS, что связано с более плотной ионосферой в период прохождения терминатора через этот приемный пункт.

Обнаружено значительное изменение соотношения между компонентами СЮ и ВЗ в период всех сеансов на высокоширотной станции IST, что, видимо, связано с изменением ориентации источника при излучении на разных частотах. Моделирование магнитных компонент при разных направлениях магнитного диполя показало, что именно высокоширотный пункт из-за его расположения на одной широте с источником, является наиболее чувствительным к изменению ориентации диполя.

Показано, что горизонтальная неоднородность ионосферы, связанная с разной освещенностью ионосферы вдоль трассы распространения УНЧ волн для среднеширотного пункта, привела к увеличению эллиптичности магнитного поля УНЧ сигналов и возрастанию абсолютной величины поляризационного параметра до значений 0.4-0.2, что на порядок превышает его значения для однородного волновода.

Надо также отметить, что ни модельные, ни экспериментальные спектры амплитуды УНЧ сигнала не выявили зависимость спадания амплитуды ~ $1/f^{0.5}$, характерную для однородной по вертикали верхней стенки волновода и для однородной земной коры под источником.

АТИПИЧНЫЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ИНФРАЗВУКОВЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ НА ИОНОСФЕРНЫХ ВЫСОТАХ

Савина О.Н. [1,2], **Беспалов П.А.** [1,2], **Шкарева П.Д.** [1], **Нещеткин Г.М.** [1,2]

[1] *ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, onsavina@mail.ru*
[2] *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

В работе проводятся результаты анализа данных наблюдений космического аппарата Van Allen Probe об атипичных квазипериодических ОНЧ электромагнитных излучениях внутри плазмосферы. Рассматриваемые излучения характеризуются периодами повторения спектральных форм от 30 с до 300 с, глубокой модуляцией интенсивности, большим и быстрым частотным дрейфом и не имеют четкой связи с геомагнитными пульсациями. Для интерпретации наблюдаемых событий используется обобщенная теория плазменного магнитосферного мазера, хорошо описывающая основные закономерности взаимодействия волн и частиц на циклотронном резонансе. Атипичные квазипериодические излучения по своим морфологическим свойствам похожи на QP 2 излучения, но в отличии от них не имеют четкой периодичности спектральных форм. Для объяснения свойств рассматриваемых излучений изучается влияние на работу плазменного магнитосферного мазера слабых внешних воздействий, обусловленных модуляцией добротности магнитосферного резонатора инфразвуковыми волнами на ионосферных высотах. Расчеты амплитуд инфразвуковых волн с горизонтальными масштабами порядка 100 км от естественных атмосферных источников проведены для реалистичных высотных профилей температуры и других параметров. Объяснены вероятные условия возбуждения атипичных квазипериодических ОНЧ излучений и отмечена их высокая чувствительность к вариациям коэффициента отражения электромагнитных волн от ионосферы сверху, получена оценка глубины модуляции коэффициента отражения. Изучение рассматриваемых излучений может быть средством диагностики крупномасштабных атмосферных процессов, происходящих при извержении вулканов и других катастрофических явлениях.

Работа выполнена при поддержке фонда развития теоретической физики и математики ”Базис”, проект № 23-1-1-67-1.

ПРИМЕРЫ АТИПИЧНЫХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ КНЧ/ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Шкарева П.Д. [1], **Савина О.Н.** [2], **Беспалов П.А.** [1,2]

[1] *ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, polina.shkareva@mail.ru*
[2] *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

В работе представлены результаты анализа атипичных квазипериодических КНЧ/ОНЧ электромагнитных излучений, зарегистрированных космическим аппаратом Van Allen Probe внутри плазмосферы в периоды, предшествующие и сопровождающие сильные землетрясения. Рассматриваемые излучения характеризуются периодами повторения спектральных форм от 90 с до 240 с и частотно-временной структурой, отличающейся от типичных квазипериодических излучений магнитосферного происхождения, и проявляются в виде нерегулярных спектральных всплесков. Анализ выполнен на основе обработки данных космического аппарата об электрических и магнитных полях, сопоставленных каталогом сейсмических событий. Показано, что несколько зарегистрированных атипичных квазипериодических излучений локализованы по времени и пространству относительно эпицентров землетрясений и не коррелирует обычным образом с геомагнитной обстановкой, что дает повод рассматривать их как потенциальное проявление сейсмической активности. Обсуждаются возможные механизмы формирования таких излучений, включая модуляцию ионосферных токов сейсмическими процессами, и периодическое изменение коэффициента отражения электромагнитных волн от ионосферы сверху, обусловленное крупномасштабными атмосферными инфразвуковыми волнами над областями с сильными землетрясениями. Полученные результаты расширяют представления о роли сейсмических факторов в формировании волновых процессов в околоземной плазме и могут быть полезны для дальнейших исследований электромагнитных предвестников землетрясений.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 25-22-00237.

ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ МАСШТАБЫ КОГЕРЕНТНОСТИ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ Pc1 ПО МНОГОТОЧЕЧНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ В МАГНИТОСФЕРЕ, ИОНОСФЕРЕ И НА ЗЕМЛЕ

Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г.

ИФЗ РАН, Москва, Россия, nyagova@ifz.ru

Модель прохождения альвеновского пучка конечной толщины [1] через квазиреальную ионосферу удовлетворительно описывает пространственное распределение поля волны в ионосфере и на Земле для многих наблюдаемых случаев. Многоточечные измерения на ионосферных спутниках и на Земле могут использоваться для определения параметров пучка на верхней границе ионосферы [2], если можно пренебречь горизонтальной неоднородностью и временными вариациями проводимости ионосферы. Для оценки границ применимости модели в настоящей работе проводится оценка пространственных и временных масштабов когерентности вариаций магнитного поля в диапазоне от долей герца до нескольких герц (Pc1 пульсации) по данным измерений в магнитосфере, верхней ионосфере и на Земле. Рассматриваются факторы, влияющие на кросс-спектральные параметры пульсаций, и возможность их использования для диагностики верхней ионосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН

1. Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D. // J. Geophys. Res.: Space Phys.— 2018.— Vol. 123.— P. 3965–3982. DOI: 10.1029/2018 JA025338.
2. Ягова Н.В., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., Мазур Н.Г. // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9, № 3. С. 128-137. DOI: 10.12737/szf-93202314

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ В ИОНОСФЕРЕ

Сурков В.В.[1], Пилипенко В.А.[1], Зинкин Д.В.[1], Рябова С.А.[1,2]

[1]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия
[2]Институт динамики геосфер, Москва, Россия

В докладе исследуется теоретическая модель воздействия ультрафиолетового излучения солнечных вспышек на состояние *F*-области ионосферы. Рассматривается плоский поток переменного ультрафиолетового (УФ) излучения, падающий на ионосферу. Взаимодействие этого излучения с ионосферой приводит к ионизации молекул воздуха и образованию свободных электронов. Косвенным подтверждением этого эффекта является изменение полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, которое наблюдалось во время солнечных вспышек [1].

В модели предполагается, что плотность потока УФ излучения равномерно распределена по энергиям фотонов в диапазоне 35−48 эВ. Для сечений фотопоглощения и фотоионизации используется линейная аппроксимация по энергиям фотонов. Концентрация молекул воздуха описывается экспоненциальными зависимостями от высоты. В этом приближении получено выражение для скорости образования электронов, K_e, в ионосфере под действием УФ излучения солнечной вспышки. Анализ этого выражения показывает, что величина K_e достигает максимума на высотах около 170 км. Для меньших высот она убывает из-за поглощения УФ фотонов вследствие роста плотности воздуха. Для бóльших высот K_e убывает из-за уменьшения числа взаимодействий фотонов с молекулами воздуха.
Изменение концентрации электронов, n_e, в ионосфере рассчитывалось с помощью уравнения, в котором скорость ионизации определялась параметрами солнечной вспышки, а эффективный коэффициент рекомбинации электронов определялся эмпирической зависимостью от высоты. Распределение n_e по высоте для каждого момента времени позволяет рассчитать зависимость изменений ПЭС в ионосфере от времени.

В качестве примера проведены расчёты эволюции ПЭС, основанные на данных спутниковых измерений УФ излучения во время солнечной вспышки класса X5.3. Результаты расчётов качественно согласуются с данными измерений ПЭС как по амплитуде, так и по форме сигналов.

Работа поддержана грантом РНФ 25-27-00539.

1. Yasyukevich Y. et al. // Space Weather. 2018 V. **16**. https://doi.org/10.1029/2018SW001932.

О ВЛИЯНИИ ЧАНДЛЕРСКОГО КОЛЕБАНИЯ В ДВИЖЕНИИ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ НА ЭЛЬ-НИНЬО – ЮЖНОЕ КОЛЕБАНИЕ

Серых И.В.

ИО РАН, г. Москва, Россия, iserykh@ocean.ru

Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) – наиболее известное квази-периодически повторяющееся явление в глобальной климатической системе [1]. Мы показываем, что основные периоды ритмов ЭНЮК подобны субгармоникам так называемого чандлерского колебания в движении полюсов Земли (период примерно 14 месяцев) [2,3]. Чандлеровское колебание возбуждает в атмосфере и океанах так называемый полюсный прилив, который распространяется с запада на восток противофазно в обоих полушариях. Исходя из этого факта и использования спутниковых данных об аномалиях уровня моря и температуры поверхности океана (ТПО), мы показываем, как океанический полюсный прилив в Тихом океане может явиться триггером событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья, если к нему присоединяются некоторые дополнительные факторы [4-7].

По достижении полюсным приливом западного побережья Северной Америки в умеренных широтах, этот прилив трансформируется в прибойную волну, бегущую, в основном, к югу. Если эта волна достигает широт Панамского перешейка одновременно с началом смещения Внутритропической Зоны Конвергенции от этих широт в сторону экватора, то их совокупное воздействие на океаническую поверхность приводит к смещению очень теплых вод, обычно наблюдающихся в этом районе, которое создает положительные аномалии ТПО, характерные для Эль-Ниньо.

Благодаря западно-восточному распространению полюсного прилива найден индекс, с помощью которого оказывается возможным предсказывать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью в 12 месяцев [8,9]. С помощью вейвлетов, выявлен диапазон временных масштабов, внутри которого имеет место наиболее тесная связь этого индекса-предиктора с индексом ONI, характеризующим ЭНЮК.

1. Serykh, I.V., Sonechkin D.M. El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability // Atmosphere. 2021. V. **12**. P. 1443.

2. Serykh I.V. El Niño–Southern Oscillation Prediction Based on the Global Atmospheric Oscillation in CMIP6 Models // Climate. 2025. V. **13**. 25.

3. Serykh I.V., Sonechkin D.M. interrelations between temperature variations in oceanic depths and the global atmospheric oscillation // Pure and Applied Geophysics. 2020. V. **177**. P. 5951-5967.

4. Serykh I.V., Sonechkin D.M. Global El Niño – Southern oscillation teleconnections in CMIP6 models // Atmosphere. 2024. V. **15**. P. 500.

5. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо - Южного колебания в моделях CMIP6 // Гидрометеорология и экология. 2023. № **73**. С. 607-631.

6. Серых И.В. О роли Эль-Ниньо - Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № **63**. С. 329-370.

7. Серых И.В., Сонечкин Д.М. Взаимосвязь Эль-Ниньо - Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов Глобальной атмосферной осцилляции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. **67**. С. 614-630.

8. Серых И.В. Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо - Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей CMIP6 // Гидрометеорология и экология. 2024. № **76**. С. 474-506.

9. Serykh I.V., Sonechkin D.M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. International Journal of Climatology. 2021. V. **41**. P. 3781-3792.

МНОГОФАКТОРНЫЙ РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ОБЛАЧНОСТИ ВО ВРЕМЯ МОЩНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Караханян А.А., Молодых С.И.

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

Современные технологии и накопившейся объем данных позволяют сегодня наряду с текущим мониторингом климата решать задачу по улучшению его прогнозирования. Для повышения уровня как оперативного прогноза, так и прогноза климатических изменений от нескольких десятилетий до сотни лет необходимо включать в численные модели параметризации малых воздействий на климатическую систему, одним из которых является влияние солнечной активности. Математическое описание механизма нелинейного солнечного воздействия на нижнюю атмосферу, разрабатываемого в ИСЗФ СО РАН, требует детального изучения физических процессов, протекающих от Солнца до Земли.

Согласно данному механизму, вариации солнечной активности через изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля приводят к изменениям глобальной электрической цепи вследствие чего происходит перестройка вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на кластерный состав водяного пара и, следовательно, меняется его поглощательная способность в ИК-диапазоне [1]. Наряду с этим, известно, что основным ионизатором атмосферы являются космические лучи (КЛ), которые с одной стороны увеличивают ее проводимость, а с другой – КЛ могут влиять на образование облачности в тропосфере. Целью данной работы является определение вклада КЛ в электромагнитное взаимодействие между компонентами системы магнитосфера-ионосфера-тропосфера во время гелиогеофизических возмущений.

Контраст электрического потенциала (ЭП) ионосферы, усредненный для широт выше 60º N, использовался в качестве гелиогеофизического параметра, связанного с вариациями параметров солнечного ветра. Контраст ЭП представляет собой разность аномалий ЭП, усредненных по областям одного знака. Расчет аномалий ЭП по улучшенной модели Веймера [2] выполнялся на основе часовых значений параметров межпланетной среды из базы данных OMNI, https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html. Часовые значения облачности из набора данных CERES_SYN1degEd4.1 Subsetting and Browsing в сетке 1.0°×1.0° [3] использовались для расчета высокоширотного контраста облачности. КЛ представлены данными нейтронного монитора ст. Норильск (69 N, 88 E), часовые значения которых исправлены на давление, http://cgm.iszf.irk.ru/.

На примере отдельных мощных геомагнитных бурь, во время которых наблюдается слабая линейная связь между контрастом ЭП и аномалиями КЛ, оценена степень зависимости отклика облачности от обоих факторов с помощью метода множественной линейной регрессии. Показано, что в построенной регрессионной модели коэффициент детерминации увеличивается, т. е. данный набор переменных позволяет увеличить долю объясненной дисперсии зависимой переменной. С помощью статистики, имеющей *F*-распределение Фишера оценена значимость коэффициента детерминации. Прирост обьясненной дисперсии за счет каждого фактора оценен с помощью частных *F*-критериев Фишера. Получено, что КЛ объясняют наибольшую долю дисперсии облачности, которая образуется ниже уровня 500 гПа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

1. Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. // Геом. и аэрономия 2020. Т. 60. С. 208.
2. Weimer D.R. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A05306.
3. Wielicki B.A., Barkstrom B.R., Harrison E.F., et al. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 853–868.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, НЕЛИНЕЙНОЕ ДИНАМО И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИИ И КЛИМАТА

Н.Т. Сафиуллин[2)], Н. Клиорин[1,3,4)], С.В. Поршнев[2)], И. Рогачевский[1)]

[1)] *BGU of the NEGEV, г. Беер-Шева, Израиль, nat@bgu.ac.il*
[2)] *УрФУ, г. Екатеринбург, Россия,*
[3)] *ИЗМИРАН, г. Троицк Москва, Россия*
[4)] *ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия*

Прогноз солнечной активности (чисел Вольфа) на различных временных интервалах: месяцы, годы, десятилетия и даже столетия находится в центре внимания гео-гелиофизики по крайней мере последние 100 лет. Эти прогнозы все еще крайне несовершенны. С целью улучшения прогноза мы построили серию моделей среднего магнитного поля Солнца, основанных на теории нелинейного динамо среднего поля. На то, что это в принципе возможно, указывают наши публикации за последнее десятилетие [1,2,3]. В работе [1] впервые на основе теории спирального динамо и неустойчивости, связанной с эффектом отрицательного магнитного давления, рассчитан с приемлемой точностью весь ряд Вольфа (1745 – 2016) (коэффициент корреляции между рассчитанным рядом и наблюдаемым порядка 70%). Солнечная активность, по-видимому, влияет на земной климат и погоду через рост ледяных гидрометеоров в высотных облаках атмосферы Земли, поскольку альбедо играет существенную роль в переносе излучения в этих облаках. В докладе обсуждаются возможные механизмы этого явления.

Сама модель представляет собой систему уравнений в частных производных одномерных в пространстве, - так называемая “no-z model”. Усовершенствование существующей одномерной модели солнечной активности позволило в работе [2] получить вполне реалистическую баттерфляй – диаграмму, воспроизводящую наблюдаемую баттерфляй – диаграмму солнечной активности, на отрезке 1950-2016 г. г. - с точностью лучше 80% описывающую наблюдения для пятен (в том числе полярную ветвь активности)

Поучительно, что, если от 1950 года посчитать солнечную активность «назад», мы воспроизводим минимум Маундера. Это позволяет надеяться, что модельное поведение солнечной активности на ближайшие 180 лет, может являться элементом прогноза не только солнечной активности, но и климата.

Работа поддержана грантом РНФ 21-72-20067

1. Kleeorin & all, 2016, MNRAS, 2016, v. 460, 3960-3967
2. Safiullin & all, 2018 J. Plasma Phys. v. 84, 735840306
3. Kleeorin & all, 2024, AApTr, v. 34, Issue 4, 371-388

ПРОБЛЕМА «СОЛНЦЕ-КЛИМАТ»: 1000-ЛЕТНЯЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СРЕДНЕГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Наговицын Ю.А., Федосеева С.Н.

ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия, nag-yury@yandex.ru

Для нахождения связи изменений климата Земли с вариациями солнечной активности необходимы длительные реконструкции.

В докладе сообщается о создании реконструкции среднегодовых изменений солнечной активности с 800 г. н.э. по настоящее время. Использованы данные по содержанию космогенных изотопов ^{14}C и ^{10}Be в природных архивах и численности низкоширотных полярных сияний из каталогов Сильвермана и Крживского. Использованы методы регрессионного анализа и подход вейвлет-преобразования. В полученной реконструкции встречаются 11-летние циклы большой амплитуды и циклы грандиозных минимумов.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ЛЕДНИКОВОГО ПЕРИОДА К ГОЛОЦЕНУ И ВАРИАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Кудрявцев И.В.[1], Дергачев В.А.[1], Наговицын Ю.А.[2]

[1]Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
[2]Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН

e-mail: igor.koudriavtsev@mail.ioffe.ru

Выявление причин изменения земного климата является одной из наиболее важных задач науки. Современные исследования показывают, что глобальные оледенения происходили на Земле периодически [1]. Между этими холодными периодами наступали теплые, последний из которых называется Голоцен. Максимум последнего глобального оледенения имел место приблизительно 19–27 тыс. лет назад, а теплый период Голоцен наступил около 11 700 лет назад и длится в настоящее время. Таким образом, переход от ледникового периода к Голоцену занимал несколько тысяч лет. Реконструкции приземной температуры в прошлом показывают, что рост температуры при переходе от ледникового периода к Голоцену не происходил монотонно. Так, измерения содержания изотопа ^{18}O в леднике Гренландии показывают холодный период 15-17 тысяч лет назад, после чего наступило потепление с максимумом около 14,5 тысячи лет назад [2]. После этого также происходили похолодания и потепления меньшей длительности. Последнее похолодание перед наступлением Голоцена было около 11,7-12,7 тыс. лет назад (Поздний Дриас). В докладе рассматривается вопрос: могут ли такие колебания климата (хотя бы частично) быть результатом вариаций активности Солнца? Приводятся аргументы о возможности такого влияния. В пользу этого говорит и совпадение по времени Малого Ледникового Периода и солнечных минимумов Вольфа, Шперера, Маундера и Дальтона. В работе используется авторская реконструкция вариаций солнечной активности на основе радиоуглеродных данных.

1. Bereiter, B., Eggleston, S., Schmitt, J. et al. // Geophys. Res. Lett., 2015. V. 42. P. 542–549.
2. Svensson A., Andersen K.K., Bigler M. et al. // Clim. Past. V. 4. №1. P. 47–57. 2008.

СОЛЯРНЫЕ ФАКТОРЫ ТЕНДЕНЦИЙ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ МЕСЯЧНЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Федоров В.М.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, fedorov.msu@mail.ru

Для расчетов облучения использовались данные высокоточных астрономических эфемерид DE-441. Исходными астрономическими данными в расчетах были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего координатного времени (Coordinate Time) и всемирного корректируемого времени (Universal Time). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей равными 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

$$I_{nm}(\varphi_1,\varphi_2)=\int_{t_1}^{t_2}\left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sigma(\varphi)\left(\int_{-\pi}^{\pi}\Lambda(t,\varphi,\alpha)\,d\alpha\right)d\varphi\right)dt,$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n-й фрагмент m-го тропического года (Дж); σ – площадной множитель (м^2), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал σ(φ)dαdφ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; $\Lambda(\varphi, t, \alpha)$ – солнечная радиация в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида (Вт/м^2), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года с учетом ее изменения. Изменение активности Солнца не учитывалось. Значение солнечной постоянной (среднее многолетнее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2.

На основе полученных данных для Северного полушария рассчитывались характеристики переноса радиационного тепла: инсоляционная контрастность (ИК) и инсоляционная сезонность (ИС). ИК обобщенно, по областям источника и стока радиационного тепла, отражает изменение меридионального градиента инсоляции (МГИ). МГИ в природной системе регулируется перенос энергии (тепла) и влаги из низких широт в высокие. Годовая ИК рассчитывается как разность годовой ИО в области источника радиационного тепла (0º–45º) и области его стока (45º–90º). Годовая ИК линейно связана с изменением угла наклона оси вращения. Климатическим следствием меридионального переноса радиационного тепла является сглаживание температурных различий по меридиану. ИС рассчитывается как разность летней и зимней интенсивности облучения в полушарии. ИС определяется динамикой долготы перигелия и ей регулируется теплообмен в системе океан–материк. Таким образом, ИК и ИС регулируют интенсивность работы «тепловой машины первого и второго рода» (Шулейкин, 1953).

Для периода 1900 – 2020 гг. выполнен корреляционный и регрессионный анализ ИК и ИС с месячными значениями приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в Северном полушарии. В качестве исходных ПТВ использовались данные университета Восточной Англии и метеобюро Хэдли. В результате были определены тесные положительные связи месячных ПТВ в Северном полушарии с ИК и отрицательные с ИС. Средний по всем месяцам коэффициент детерминации в уравнениях линейной и полиномиальной (полином второй степени) регрессии с ИК в качестве предиктора составил 0,838, с ИС в качестве предиктора – 0,828. Таким образом, увеличение ПТВ в Северном полушарии настоящее время определяется характеристиками переноса радиационного тепла ИК и ИС с преобладающим вкладом ИК, определяющим тенденцию повышения ПТВ.

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА ХЕЙЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ БИДЕКАДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КЛИМАТЕ ЗЕМЛИ

Веретененко С.В.[1], **Дмитриев П.Б.**[1], **Обридко В.Н.**[2]

[1]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, s.veretenenko@mail.ioffe.ru*

[2]*ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, г. Москва, Россия*

Бидекадные колебания наблюдаются в целом ряде атмосферных характеристик (распределение атмосферного давления, региональные температуры, осадки, повторяемость засух и ураганов и т.д.), что позволяет сделать предположение о возможной связи этих колебаний с магнитным циклом Хейла на Солнце. В настоящей работе проведено исследование проявлений цикла Хейла в различных геофизических характеристиках, которые могут рассматриваться в качестве связующих звеньев между процессами на Солнце и в атмосфере Земли. Обнаружено, что ~22-летние вариации, связанные с циклом Хейла, наблюдаются в интенсивности потока галактических космических лучей, приходящих в нижние слои атмосферы, а также в геоэффективных параметрах солнечного ветра (компонентах *Bz* и *By* межпланетного магнитного поля) и показателях геомагнитной активности (годовой повторяемости магнитных бурь, геомагнитных *aa*-индексах). Наибольшие различия между временным ходом исследуемых характеристик в четных и нечетных солнечных циклах имеют место, как правило, на фазе спада и в минимуме цикла.

Полученные результаты позволяют предположить, что исследуемые геофизические факторы могут способствовать формированию бидекадных колебаний в климате Земли. Возможный физический механизм формирования этих колебаний включает изменения радиационно-теплового баланса высокоширотной атмосферы при изменениях химического состава и облачности в связи с изменениями скорости ионизации, обусловленными вариациями прихода энергичных заряженных частиц (галактических космических лучей и авроральных электронов, высыпающихся в атмосферу в ходе геомагнитных возмущений).

АТМОСФЕРА ВЕНЕРЫ И ВОЗМОЖНАЯ ЕЁ БИОСФЕРА

Снытников В.Н.

ИК СО РАН, г. Новосибирск, Россия, snyt@catalysis.ru

Планируемая миссия «Венеры-Д» должна получить новые данные об атмосфере Венеры, включая высотные распределения воды, сероводорода и других малых компонент. Особый интерес представляют физико-химические данные по венерианским облакам и по суперкритической среде на поверхности планеты. Основная задача новой миссии состоит в том, чтобы ответить на вопрос, есть ли жизнь на Венере? Для ответа на этот вопрос требуются данные с видеорегистраторов высокого разрешения на поверхности и на аэростатах. На основе тех же данных могут быть сделаны выводы о путях эволюции венерианской атмосферы сравнительно с Землей. Полет к Венере намечен на 2030-е гг.

Геологическая эволюция Венеры шла своим путем в отличие от Земли после их формирования в протопланетном диске и потери первичной водородно- гелиевой атмосферы. Более массивная Земля со своей магнитосферой, получая меньший поток солнечной радиации и обтекаемая солнечным ветром, сохранила большой объем воды. Появление жидкой воды на поверхности Земли привело к растворению в ней углекислого газа и к его связыванию с выпадением карбонатов, которые сформировали осадочные породы. Бактериальная жизнь разлагала воду в фотосинтезе и создала кислородную компоненту земной азотной атмосферы. Менее массивная и не обладающая магнитосферой Венера получала значительно больший поток солнечной энергии. Она потеряла основное количество воды и сформировала атмосферу из CO_2 и азота с давлением на поверхности более 90 атм и температурой свыше 470 С. Тем не менее, по гипотезе Карла Сагана не исключено существование бактериальной жизни в венерианских облаках. Советские миссии «Венер» в телевизионных передачах с поверхности Венеры обнаружили объекты, наличие которых поставило вопросы о возможности существования венерианской жизни. Проведенный анализ имеющихся данных по составу пород на поверхности Венеры, составу ее атмосферы и данных по каталитическим химическим процессам позволил выдвинуть ряд гипотез по возможным основам гипотетической жизни на поверхности Венеры. Эти основы касаются роли азотных соединений, COS, кремнийорганических полимеров, неорганических полимеров с фотокаталитическими свойствами. Аналогично тому, что геохимический цикл синтеза сахаров [H2CO] из CO_2 и H_2O определяет возможность существования биоценозов на Земле, геохимический цикл синтеза [COS] из CO_2 и H_2S дает основание для гипотезы о венерианской жизни. Для успешного выполнения задач «Венеры-Д» с разработкой методик измерений ряда химических компонент необходимо проведение предварительных исследований этих соединений в суперкритических условиях, моделирующих условия на поверхности Венеры. В докладе также будут кратко рассмотрены основные характеристики планируемой миссии «Венера-Д».

АТМОСФЕРНЫЕ ПЕРЕНОСЫ В БИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ: КЛЮЧ К БИОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Рагульская М.В[1], **Снытников В.Н.**[2]

[1] *ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ra_mary@mail.ru*

[2] *Институт катализа СО РАН, г. Новосибирск, Россия, snyt@catalysis.ru*

Выдвинута гипотеза атмосферного круговорота и мутаций вирусов, связанного с циклами солнечной активности и космических лучей. Предложен механизм подъема и концентрации масс вирусов с аэропланктоном в атмосферу на высоты до 11-15 км, их мутация под воздействием космических лучей и коротковолнового излучения Солнца, и последующее преимущественной выпадение мутировавших вирусов с дождями на поверхность Земли [1-3] на расстояниях до 2.5 тыс. километров [4] от первоначального очага вирусной эпидемии. При этом в атмосферных слоях возникают локальные области с повышенной концентрацией вирусов, или устойчивые потоки. Такие атмосферные концентраторы вирусов могут служить местами ускоренного мутирования патогенных микроорганизмов в условиях практической незащищенности биообъектов от мутационного действия космических лучей и ультрафиолетового излучения (так, на высоте 5 км биоэффективность космических лучей возрастает на порядок, на высотах 11 км – на 2 порядка). Цикличность мутаций привязана к максимумам солнечных космических лучей и коротковолнового излучения Солнца в максимуме цикла солнечной активности, и к максимуму галактических космических лучей в минимуме цикла солнечной активности. Дальнейшее усиленное формирование оседания влаги на вирусной и бактериальной пыли при образовании облаков способствует последующему выпадению осадков, несущих мутировшие на высоте колонии вирусов и бактерий обратно в приповерхностную атмосферу, почву и в водоемы. Это обеспечивает атмосферный круговорот вирусов, и возникновение вирусных пандемий в любых экстремумах солнечной активности, а не только в максимумах.

Локализация и перемещение атмосферных концентрированных вирусных облаков зависят от аэрономических свойств атмосферы, и существенно изменяются при солнечных вспышках и грозовых процессах, а также в зависимости от цикла солнечной активности и сезонов года. Изучение динамики вирусной и бактериальной биосферы Земли под воздействием факторов космической погоды, солнечной активности, аэрономической динамики слоев атмосферы и геомагнитного поля представляет ценность при моделировании возможных биосфер экзопланет или динамики возможной атмосферной биосферы Венеры. Диапазон жизнедеятельности земных бактерий составляет от -8 до +130 градусов Цельсия (например, для Methanopyrus kandleri), у архей до +150 (например, Geogemma barosii), что совпадет с зонами высот атмосферы Венеры от 40 до 60 км. Сохранность земной биоты в виде спор и вирусов простирается от -196 до +170 градусов Цельсия. Устойчивость земной биосферы к давлению на порядок превышает давление атмосферы на поверхности Венеры. Альтернативная химия биоорганических структур Венеры также расширяет разнообразие приемлемых для жизни физико-химических условий. Наиболее перспективной для развития биосферы представляется атмосфера Венеры, обладающая широким диапазоном давлений и температур, и имеющая структурированную и устойчивую макро - циркуляцию.

1. Рагульская М.В. // ГА 2023, Т**. 63.** №7. С. 122. DOI: 10.1134/S0016793223070198
2. Рагульская М.В. // ISCPP – 2025. Москва. С. 62.
3. Рагульская М.В., Снытников В. Н. // 5-я Всероссийская конференция по Астробиологии 2025. Пущино. С. 42-43.
4. Андреева Н. С. и др. // Вестник НВГУ 2018. Т. **3.** С. 123.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТРАНЗИТНЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ ГЕЛИЙСОДЕРЖАЩИХ АТМОСФЕР ЭКЗОПЛАНЕТ

Руменских М.С.[1,2], С.С. Шарипов[1], М.П. Голубовский[1], И.Б. Мирошниченко[1], И.Ф. Шайхисламов[1]

[1] ИЛФ СО РАН, Новосибирск, Россия, marina_rumenskikh@mail.ru

[2] Институт Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения Радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

Процессы, происходящие в окрестности экзопланет, являются комплексными и сложными для интерпретации. На данный момент накоплено немалое количество наблюдательных данных о таких объектах, и их объем продолжает расти благодаря нерпрерывной работе космических и наземных телескопов. Количество работ, посвященных интерпретации наблюдательных данных, значительно уступает количеству работ, описывающих их получение. Следовательно, развитие численных моделей, описывающих комплексное взаимодействие в системах звезд с экзопланетами, кажется особенно актуальным в свете нарастающего объема эмпирических данных об атмосферах экзопланет.

Согласно современным представлениям о физике атмосфер горячих экзопланет, верхние их слои подвергаются экстремальному потоку ионизирующего излучения звезд-хозяев, за счет чего интенсивно нагреваются и претерпевают интенсивное истечение. Процессы испарения первичных водородно-гелиевых атмосфер наблюдались в поглощении транзитов линии Lyα для ряда экзопланет. Однако информация, полученная космическими телескопами из спектроскопии Lyα, ограничена из-за поглощения в межзвездной среде и геокоронального загрязнения. Таким образом, для изучения физических процессов в атмосферах экзопланет необходимы транзитные наблюдения в других линиях. Метастабильная линия гелия HeI(2^3S) на длине волны 10830 Å предлагает альтернативный способ исследования испаряющихся атмосфер экзопланет [1]. С момента первого наблюдения в 2018 году более чем для десятка экзопланет были сделаны положительные обнаружения наземными телескопами [2].

В настоящей работе проведена комплексная интерпретация транзитных поглощений в линии метастабильного HeI(2^3S) 10830 Å ряда горячих экзопланет с целью выявления параметров, существенно влияющих на наблюдательные проявления [3].

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-72-10080.

1. Salz, Michael, et al. "Detection of He I λ10830 Å absorption on HD 189733 b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy." *Astronomy & Astrophysics* 620 (2018): A97.
2. Palle, E., et al. "A He I upper atmosphere around the warm Neptune GJ 3470 b." *Astronomy & Astrophysics* 638 (2020): A61.
3. Shaikhislamov, I. F., et al. "Global 3D hydrodynamic modelling of absorption in Ly α and He 10830 A lines at transits of GJ3470b." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 500.1 (2021): 1404-1413.

ГОРЯЧАЯ ФРАКЦИЯ АТОМОВ КИСЛОРОДА В ПОЛЯРНОЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

[1]Шематович В. И.

[1] – Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия, shematov@inasan.ru

Горячая кислородная геокорона является неотъемлемым и динамичным компонентом в полярных областях верхней атмосферы Земли. Ее формирование обусловлено сложным сочетанием источников надтепловых атомов кислорода как за счет высыпания авроральных электронов, так и реакций экзотермической атмосферной химии, а эволюция управляется кинетическими процессами термализации и переноса надтепловых атомов O в условиях, далеких от локального термодинамического равновесия. Фотохимические источники доминируют в спокойных условиях, в то время как авроральные процессы диссоциации молекул, вызванные высыпанием магнитосферных электронов, становятся значительными и, возможно, доминантными во время высокой геомагнитной активности. В полярных регионах важны дополнительные процессы, связанные с авроральной активностью [1], а именно, индуцированная высыпанием магнитосферных электронов экзотермическая атмосферная химия. Действительно, потоки авроральных электронов вызывают диссоциацию и диссоциативную ионизацию молекулы O_2, а также инициируют множество экзотермических реакций, продуцирующих горячие атомы кислорода с энергиями до ~5 эВ [1,2]. Высыпание авроральных электронов в полярную верхнюю атмосферу сопровождается возбуждением, диссоциацией и ионизацией атмосферных компонент, и соответствующие процессы, а именно, диссоциация и диссоциативная ионизация молекул O_2 электронным ударом, рассматривались как источники горячих атомов кислорода, которые образуются в основном ^3P и возбужденных метастабильных ^1D и ^1S состояниях с избытком кинетической энергии порядка нескольких электрон-вольт[2].

В представленном исследовании впервые детально изучены процессы диссоциации молекулярного кислорода магнитосферными электронами и установлен важный вклад данных процессов в образование фракции горячих атомов кислорода в полярной верхней атмосфере Земли [2]. Предложенное расширение модели горячей кислородной геокороны необходимо учитывать при построении аэрономических моделей атмосфер планет земной группы (см., например, [3,4]), так как современные модели и наблюдения подтверждают важную роль горячего кислорода в энергетическом балансе термосферы, процессах атмосферного убегания, пополнении магнитосферы тяжелыми нейтралами и атмосферном торможении спутников для планет земной группы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-12-00364-П).

1. Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Gerard J.-C. // J. Geophysical Research. 2006. V. **111**. P. ID A10301.
2. Shematovich V.I. // Solar System Research. 2026. V. **60**:4.
3. Shematovich V.I., Marov M.Ya. // Physics Uspiekhy. 2018. V. **61**. P. 217- 246.
4. Johnson R.E., Combi M.R., Fox J.L., et al. // Space Science Review. 2008. V. **139**. P. 355–397.

ПРОЯВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В 2024 И 2025 ГОДАХ В ВАРИАЦИЯХ МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА

Миронова И.А., Доронин Г.Г., Миронов А.Д.

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

В 2024 и 2025 годах произошло несколько сильных солнечных эруптивных событий которые привели к ряду мощных геомагнитных возмущений, например, в мае и октябре 2024 года, в ноябре 2025 года. Экстремальная геомагнитная буря 10-11 мая 2024 года была классифицирована как геомагнитная буря класса G5, по классификации NOAA (Kp = 9), что сделало ее первой самой мощной бурей после 2003 года. 10-11 октября 2024 года и 12-13 ноября 2025 тоже были зарегистрированы бури класса G4. В докладе предполагается показать последние результаты по исследованию отклика высокоширотной ионосферы/атмосферы на высыпания энергичных частиц во время геомагнитных возмущений 2024 и 2025 годов связанных с эруптивными событиями.

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) с марта по октябрь 2024 года и за ноябрь 2025 года.

Работы связанные с изучением эффектов от энергичных частиц в ионосфере/атмосфере Земли за 2025 год выполнены в рамках государственного задания СПбГУ №116234986. Работы связанные с изучением эффектов от энергичных частиц в ионосфере/атмосфере Земли за 2024 год выполнены в рамках договора между СПбГУ и МГУ по гранту РНФ № 22-62-00048.

РОЛЬ МОЛЕКУЛЫ NO В ОХЛАЖДЕНИИ ПОЛЯРНОЙ ТЕРМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРИ ВЫСЫПАНИИ ЭЛЕКТРОНОВ

[1]Цуриков Г.Н., [2,1]Бисикало Д.В., [1]Шематович В. И., [1]Жилкин А. Г.

[1] – Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия, tsurikov@inasan.ru

[2] – Национальный Центр Физики и Математики, г. Саров, Россия

Высыпания электронов в полярную термосферу Земли во время геомагнитных бурь приводят к росту температуры за счет Джоулева нагрева и столкновений электронов с атмосферным газом [1]. Помимо нагрева, данные процессы стимулируют дополнительное образование молекул NO [2], которые эффективно охлаждают атмосферу за счет ИК излучения. В редких случаях наблюдается эффект «переохлаждения», когда температура термосферы после геомагнитной бури становится меньше исходной [3,4].

В работе приводится оценка параметров высыпающихся электронов, при которых температура земной термосферы не увеличивается, а падает за счет роста содержания NO. Для этого на примере геомагнитной бури 9 ноября 2004 года проведено кинетическое Монте-Карло моделирование высыпания электронов в атмосферу, химическое моделирование образования молекулы NO и дана оценка вклада указанных процессов в тепловой баланс и температуру термосферы. Расчет остальных источников нагрева и охлаждения был произведен с помощью модели KOMPOT в работе [5].

По результатам моделирования установлено [6], что наличие высокоэнергичной фракции в распределении высыпающихся электронов может значительно снизить температуру термосферы. Если средняя кинетическая энергия высыпающихся электронов, $E_m \geq 8$ кэВ (для максвелловского распределения электронов), а поток энергии электронов, $Q_0 > 1$ эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$, столкновительный и Джоулев нагревы атмосферы неэффективны по сравнению с другими источниками. В то же время, термосфера эффективно теряет энергию за счет ИК излучения NO, что может привести к ее переохлаждению на величину порядка 100 К и более. Таким образом, эффект переохлаждения может наблюдаться при достаточно типичных параметрах высыпающихся электронов во время геомагнитных бурь. Этот эффект необходимо учитывать при построении прогностических моделей отклика полярной термосферы Земли в области работы низкоорбитальных ИСЗ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-12-00364-П).

1. Wilson G. R., Weimer D. R., Wise J. O., Marcos F. A. // JGR. 2006. V. **111**. P. A10314.
2. Barth C. A., Mankoff K. D., Bailey S. M., Solomon S. C. // JGR. 2003. V. **108**. P. 1027.
3. Mlynczak M., Martin-Torres F. J., Russell J., et al. // GRL. 2003. V. **30**. P. 2100.
4. Knipp D. J., Pette D. V., Kilcommons L. M., et al. // Space Weather. 2017. V. **15**. P. 325.
5. Scherf, M., Krauss, S., Tsurikov, G., et al. // Ann. Geophys. 2026. In print. EGUsphere preprint: https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4119, 2025.
6. Бисикало Д.В., Шематович В.И., Жилкин А.Г. Цуриков Г.Н. // АЖ. 2026. В печати.

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПОЛЯРНЫЙ МЕЗОСФЕРНЫЙ ОЗОН

Куликов Ю.Ю.

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

Посвящается памяти В.Ю. Трахтенгерца

Обсуждаются результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы за Полярным кругом на Кольском полуострове в Апатитах (67N, 33E) в зимне-весенние сезоны, начиная с 2017 г. по 2025 г. Первые три сезона пришлись на минимум солнечной активности между 24 и 25 циклами. Остальные сезоны с 2021 г. по 2025 г. пришлись на максимум 25 солнечного цикла. В измерениях был использован мобильный микроволновый спектрометр с рабочей частотой 110.8 ГГц, который позволяет отслеживать вариации O_3 с 15-ти минутным временным разрешением на высотах средней атмосферы. Выполнены оценки вертикального профиля озона в интервале высот 22 − 60 км. Эти высотные профили были сопоставлены со спутниковыми данными MLS/Aura об озоне и температуре в средней атмосфере. Приводятся сезонные (осень – лето) изменения концентрации полярного мезосферного озона (60 км) и его содержания в средней атмосфере в течение семи лет. Обнаружено значительное и продолжительное влияние внезапных стратосферных потеплений на вертикальное распределение озона на высотах 22 – 60 км. При этом пределы изменчивости мезосферного озона над Апатитами сопоставимы или превышают модельные расчеты последних лет по оценке влияния солнечных протонных событий и высыпания авроральных электронов на вариации полярного озона. Рассмотрено воздействие планетарной геомагнитной бури в марте 2023 г. и протонных событий в феврале-марте 2024 г. на полярный мезосферный озон. Кроме того, приводятся данные наблюдений вариаций мезосферного озона (50 км) во время протонных событий 28 октября 2003 г. на станции Ny Alesund (79N, 12E), которые были выполнены с помощью немецкого микроволнового спектрометра (рабочая частота 142 ГГц).

В качестве итога семилетней работы, следует отметить:

1. Планетарная геомагнитная буря 23 – 24 марта 2023 года не оказала заметного влияния на мезосферный озон на высоте 60 км;
2. В сезон 2023 – 2024 гг. во время протонных событий 09.02. – 25.02.2024 и 23.03. – 01.04.2024 понижение мезосферного озона на высоте 60 км не превышало 10 %.

Автор настоящего сообщения выражает глубокую благодарность сотрудникам
Ю.В. Балабину, В.И. Демину, А.С. Кириллову, В.А. Шишаеву – Полярный геофизический институт, Апатиты
В.М. Демкину – Высшая школа экономики, Нижний Новгород
А.Ф. Андриянову, В.Г. Рыскину – Институт прикладной физики, Нижний Новгород
и Государственному заданию ИПФ РАН (проект FFUF-2024-0034).

ОСОБЕННОСТИ БИОЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННОГО И АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТА

Паршина С.С.[1,2], Афанасьева Т.Н.[1], Петрова П.Г.[3], Стрекаловская А.А.[3], Осколкова А.И.,[2] Самсонов С.Н.[4]

[1] ФГБОУ ВО Саратовский ГМУ им. В.И. Разумовского, Саратов, Россия, 1parshinasvetlana@mail.ru
[2] ФГБОУ ВО Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
[3] Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия
[4] Научный Совет РАН по астробиологии, Москва, Россия

Геомагнитные возмущения (ГМВ) являются ведущим космическим фактором, влияющим на жизнедеятельность человека. Анализ многолетних результатов многоширотных биофизических экспериментов «Гелиомед» и «Гелиомед-2» (2003-2025) позволил установить, что сердечно-сосудистая система здоровых добровольцев обладает чувствительностью к ГМВ (кардиочувствительностью) как в средних широтах (умеренный климат), так и в субавроральных и авроральных широтах (арктический климат). Глобальный характер воздействия ГМВ подчиняется, независимо от климатического пояса, модифицирующему влиянию солнечных циклов. В максимуме 11-летнего солнечного цикла (2014 г.) в арктическом климате кардиочувствительность (по данным двухмесячного ежедневного мониторинга симметрии зубца Т в фазовом портрете электрокардиограммы) выявлена у 38,6% здоровых добровольцев, в условиях умеренного климата – у 42% обследованных ($p>0,05$). В минимуме солнечного цикла (2019 г.) количество кардиочувствительных добровольцев резко снизилось в обеих климатических зонах (до 9% в условиях умеренного климата, а в условиях арктического климата кардиочувствительных к ГМВ здоровых добровольцев выявлено не было). Таким образом, глобальный характер воздействия ГМВ на сердечно-сосудистую систему здоровых лиц зависит, в первую очередь, от периода 11-летнего солнечного цикла, что проявляется в условиях как умеренного, так и арктического климата.

Вместе с тем, региональные климатические особенности вносят определенный вклад в биоэффективность ГМВ: обследованные кардиочувствительные добровольцы в указанных климатических зонах реагировали на различные ГМВ. Из всех ГМВ, зафиксированных за время мониторинга, только 43% были одинаково биоэффективны у здоровых добровольцев, проживающих в умеренном и арктическом климате, вызывая однотипный отклик сердечно-сосудистой системы непосредственно в день ГМВ. Биоэффективность остальных ГМВ была различна в зонах умеренного и арктического климата и характеризовалась, например, наличием ответного отклика миокарда добровольцев на ГМВ в зоне умеренного климата и отсутствием такового у здоровых добровольцев, проживающих в арктическом климате. Нами выделены различные типы ответных реакций миокарда на ГМВ и проанализированы их особенности в изученных климатических поясах.

Таким образом, глобальный характер влияния ГМВ на сердечно-сосудистую систему здоровых добровольцев в различных климатических зонах сопровождается и модифицируется местными климатическими особенностями, влияющими на биоэффективность ГМВ в умеренном и арктическом климате.

БИОТРОПНЫЕ ЭФФЕКТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ ЗЕМЛИ: СВЯЗЬ С ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Осколкова А.И.[1], **Полиданов М.А.**[2], **Паршина С.С.**[1], **Оленко Е.С.**[1], **Шкурина Д.С.**[1]

[1]*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия; kodochigovaai@yandex.ru*

[2]*ЧУОО ВО «Университет «Реавиз», г. Санкт-Петербург, Россия*

На протяжении последних десятилетий как отечественные, так и зарубежные исследователи проявляют повышенный интерес к биотропным эффектам космической погоды, однако данную проблему до конца изученной считать нельзя. Интересно было бы посмотреть, как эти эффекты реализуются в разных климатических зонах и связаны с психологической гелиогеомагнитной синхронизацией. Цель работы: определить психологические особенности личности участников проекта «Гелиомед-2» в различных климатических зонах с учетом выявленной у них психологической гелиогеомагнитной синхронизации. Основные результаты базируются на исследовании, выполненном с помощью тестов Ч.Спилбергера - Ю.Ханина, Э.Хайма и проективной психогеометрической методики. Структура и эволюция гелиогеофизических возмущений, возникающих в процессе исследования, идентифицировались на основе определения интегрального показателя kp-индекса, который используют в качестве меры планетарной геомагнитной активности: это условная количественная величина амплитуды среднеширотных геомагнитных возмущений, зарегистрированных в Северном полушарии. В исследовании принимали участие добровольцы проекта «Гелиомед-2», проживающие как в условиях умеренно-континентального климата (г. Саратов), так и арктического климата (пос. Тикси). Было установлено, что в данной работе преобладали участники проекта, не имеющие психологической гелиогеомагнитной синхронизации (которую определяли сопоставлением ежедневно определяемых показателей реактивной тревожности и kp-индекса), особенно ярко это было выражено в условиях арктического климата. Было показано, что группу повышенного риска развития психосоматической патологии, в условиях умеренно-континентального климата, составили лица, не имеющие психологической гелиогеомагнитной синхронизации, в связи с их более высоким уровнем тревожности, склонностью к самообвинению и подавлению эмоций, а также отступлению перед возникающими проблемами. Что же касается психологических особенностей добровольцев, проживающих в условиях арктического климата, то результаты были диаметрально противоположны: менее успешными в построении стресс-преодолевающего поведения и более тревожными оказались носители психологической гелиогеомагнитной синхронизации. Таким образом, климатические влияния необходимо учитывать при проведении многоширотного мониторинга для анализа биотропных эффектов космической погоды, так как их действие может оказаться решающим.

ЛОКАЛЬНОЕ И НЕСТАЦИОНАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗОНА В СТРАТОСФЕРЕ КАК ПРЕДВЕСТНИК ПОГОДНЫХ АНОМАЛИЙ

Костров А.В., Зиновьева Е.И.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kstr@ipfran.ru

Земля подвергается воздействию внешних факторов, поступающих из космического пространства. К ним относятся электромагнитное излучение Солнца в широком диапазоне частот, потоки межпланетной и межгалактической плазмы, космические лучи и космическая пыль [1].

В настоящей работе на основании наблюдательных данных рассматривается влияние космической пыли на физические процессы на Земле. К этим процессам относится создание глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦ), образование озона в стратосфере и аномальные погодные явления.

Анализ данных о состоянии атмосферы позволил установить, что на фоне постоянного потока отрицательно заряженной пыли, влияющей на ГЭЦ, наблюдаются нестационарные и неоднородные потоки, служащие «спусковым» механизмом погодных аномалий. Исследование ежегодных карт озона в атмосфере северного полушария позволили связать локальные нестационарные возмущения озона, увеличение или уменьшение плотности озона относительно среднего значения на высотах 25 км, с флуктуациями потоков пыли. Эти потоки, двигаясь к поверхности Земли со скоростью 2-3 км/сутки, за счет вязкого трения увлекают холодный или теплый воздух, что приводит к локальным погодным аномалиям. Достаточно высокая корреляция возмущений озона с аномальными температурами на поверхности, которые возникают через 10-12 суток в Евразии и 8-9 суток в США позволяют сделать вывод, что образование озона в атмосфере связано в основном с потоками отрицательно заряженной космической пыли, которая является катализатором для формирования молекул из атомов. В космической среде [2] молекула водорода образуется только в пылевых облаках, так как прямое соединение двух атомов водорода невозможно. Наличие катализатора существенно понижает энергию, необходимую для реакции между атомами и молекулами.

1. Костров А.В. // Успехи прикладной физики 2019. Т.7, №4. С. 327
2. Спитцер Л. Физические процессы в межзвездной среде. Москва. МИР. 1981

АНАЛИЗ GLE77 (11.11.25)

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

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, balabin@pgia.ru

В 2025 г. на спаде солнечной активности 25-го цикла произошло крупное событие в солнечных космических лучах. Такие события имеют международное обозначение Ground Level Enhancement (GLE). Во время сильной вспышки на Солнце произошла генерация солнечных космических лучей (СКЛ) с энергиями не менее единиц ГэВ, и потоки СКЛ достигли Земли, вызвав возрастание счета на наземных детекторах космических лучей. Событие зарегистрировано мировой сетью нейтронных мониторов (НМ). СКЛ отличаются значительной анизотропией потока, высокой плотностью потока частиц: поток СКЛ может на порядки превосходить поток галактических космических лучей. GLE77 – первое крупное событие в 25-м цикле. Предыдущее крупное GLE произошло в мае 2012 г, с тех пор регистрировались GLE только малой амплитуды 2-5 %. GLE77 произошло от вспышки в активной области 4274 с координатами N23W24. В оптическом диапазоне вспышка имела класс 3B, она сопровождалась рентгеновским излучением, максимум которого наблюдался в 10:04 UT, класс вспышки X5.1, и радиовсплеском II типа. Межпланетная обстановка на момент вспышки и в последующие часы была спокойной, магнитосфера также находилась в спокойном состоянии. Самое раннее возрастание (по минутным данным) началось в 10:12 UT на станциях Моусон и Ньюарк. В это же время 10:12 UT по минутным данным возрастание отметил НМ в Мехико, пороговая жесткость для которого составляет Rc = 7.5 ГВ. В следующий интервал 10:15-10:20 UT целый ряд станций показали резкий рост, доходивший до 40 %. Наибольшую среди всех НМ амплитуду возрастания показал Наин ~150 % и Моусон ~133 %. Возрастание амплитудой 5-20 % наблюдалось на среднеширотных станциях Иркутск, Москва, Новосибирск и др. На ряде НМ (Апатиты, Южный полюс, Оулу) наблюдалось более одного локального максимума.

Произведен анализ события GLE77 и выполнено решение обратной задачи. Получен ряд энергетических спектров СКЛ в последовательные моменты времени от начала события до 15 UT. GLE77 демонстрирует необычную динамику спектров. Энергетические спектры вначале имеют экспоненциальную форму и узкое питч-угловое распределение, затем постепенно переходят к степенной зависимости, а питч-угловое распределение уширяется, появляется обратный поток. Подобные изменения в спектре, по-видимому, связаны с особенностями распространение СКЛ в межпланетном пространстве. О наличии сложной петлевой структуры в межпланетном магнитном поле указывает следующее. За 4 дня до этого Земля попала в корональный выброс массы и наблюдался Форбуш-эффект, а к концу суток 11.11.25 к Земле подошел новый корональный выброс с ударной волной на фронте. Это означает, что на момент GLE77 этот фронт находился не слишком далеко от Земли и мог влиять на поток СКЛ.

Полученные спектры СКЛ могут использоваться для расчета ионизации атмосферы на различных высотах, вычисления полученной дозы и других прикладных задач.

ПОДСПУТНИКОВЫЕ АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СТРАТОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Балугин Н.В.[1], **Юшков В.А** [1], **Хайкин С.М.**[2]

[1] *ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», Долгопрудный, Россия*
[2] *LATMOS - Laboratoire Atmosphère Observations Spatiales, CNRS, France*
horst2007@yandex.ru

Спутниковые технологии в настоящее время являются наиболее распространенными для дистанционного зондирования Земли. Однако, для валидации спутниковых приборов необходимо наличие данных наземных или аэрологических подспутниковых измерений.

Обсуждаются результаты валидационного подспутникового зондирования стратосферного аэрозоля с применением аэрологических технологий и двух-волнового аэрозольного зонда обратного рассеяния (АЗОР) [1]. Цель экспериментальной работы - валидация атмосферного лидара (ATLID) [2] спутниковой системы EarthCARE с помощью (АЗОР). Работая в УФ диапазоне с длиной волны 355 нм, ATLID регистрирует атмосферные эхосигналы с вертикальным разрешением 200 м от поверхности земли до высоты 40 км. Методика эксперимента включала проведение аэрологических выпусков прибора АЗОР в даты и сроки максимально приближенные к пролету спутника над местом выпуска зонда. Было успешно проведено более 10 подспутниковых экспериментов в средних широтах северного полушария с участием АЗОР. Измерения зондом проводились на длинах волн 528 и 940 нм, полученные значения коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния пересчитывались для рабочей длины волны зондирования спутникового прибора (355 нм) с помощью коэффициента Ангстрёма, который определялся в каждом полете по результатам измерений АЗОР.

Приводятся и обсуждаются данные валидационных экспериментов, в результате которых получены одновременные измерения коэффициентов обратного рассеяния от частиц стратосферного аэрозоля (слой Юнге) на 3- длинах волн (355, 528 и 940 нм). Такой набор спектральных характеристик коэффициента обратного рассеяния для стратосферного аэрозоля позволил перейти к определению его микрофизических характеристик – численная концентрация, эффективный радиус, удельная площадь поверхности частиц и объем аэрозольных частиц.

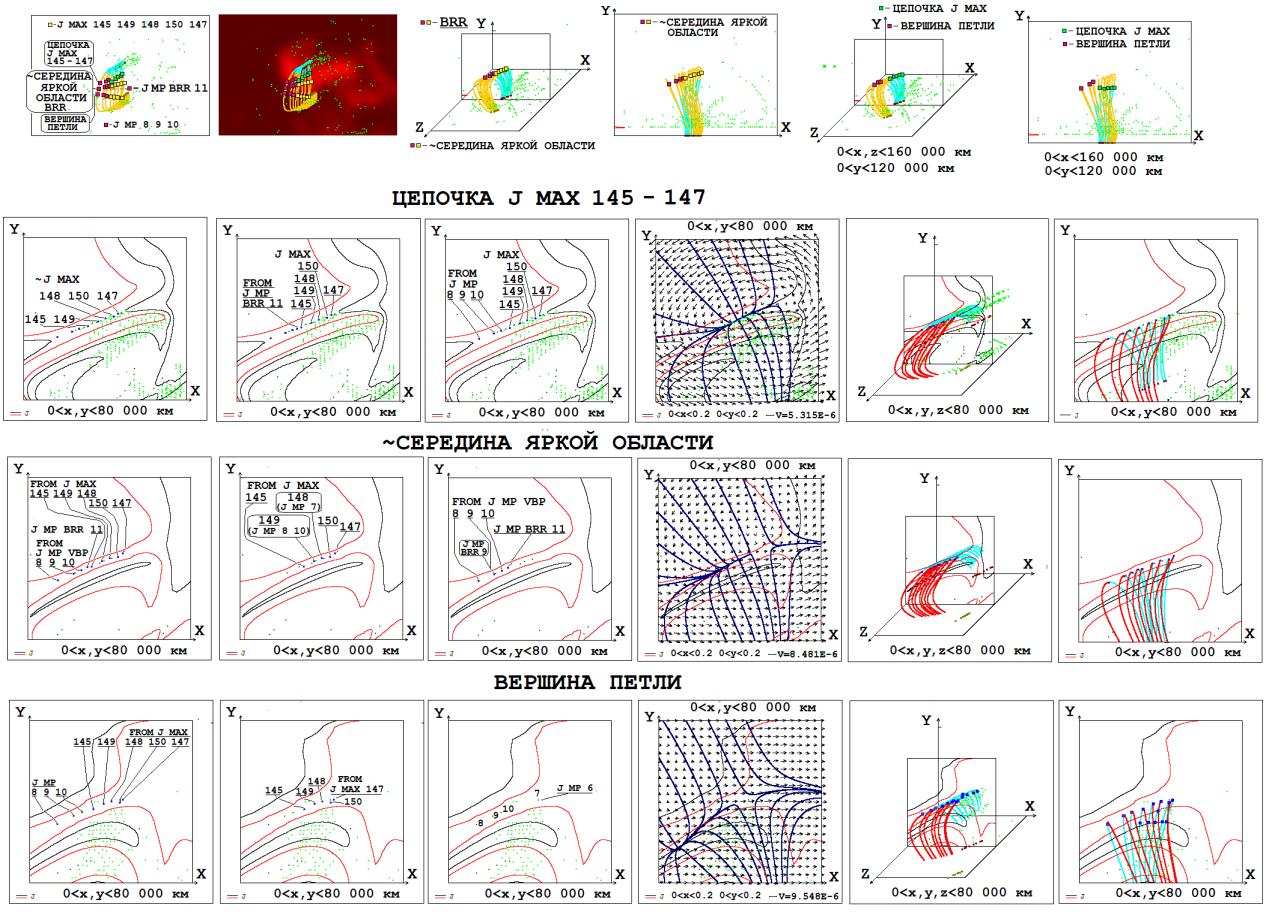
1. Балугин Н.В., Фомин Б.А., Юшков В.А.. Оптический зонд обратного рассеяния для баллонных аэрологических измерений // Изв. РАН, Физ. Атм. Океана. 2022, т 58 №3 с 365-372 DOI: 10.31857/S0002351522030026
2. S. Khaykin et al. Global transport of stratospheric aerosol produced by Ruang eruption from EarthCARE ATLID, limb-viewing satellites and ground-based lidar observations. Preprint egusphere-2025-4377. https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-4377, 2025

ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЛИНИИ ПОВЕРХНОСТИ АРКАДЫ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА, В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КОТОРОГО НАКАПЛИВАЕТСЯ ЭНЕРГИЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Подгорный А.И.[1], **Подгорный И.М.**[2]

[1]*ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru*
[2]*ИНАСАН, г. Москва, Россия*

Продолжен анализ предвспышечной конфигурации 26.05.2003 в 02:32:05 за три часа до вспышки бала M 1.9, которая произошла в активной области AO 10365 26.05.2003 в 05:50:03. Конфигурация получена путем МГД моделирования в короне над активной областью. Продолжение исследования этой сложной конфигурации обусловлено необходимостью достаточно точного установления свойств конфигураций магнитного поля вблизи точек на линиях магнитной аркады. Эти конфигурации могут обладать свойством накапливать магнитную энергию солнечной вспышки и вызывать вспышечную неустойчивость. Хорошо известно, что этим свойством обладает особая линия X-типа вследствие образования токового слоя в её окрестности. Однако в реальном поле солнечной короны, таком, как исследуется в настоящей работе, этот процесс трудно установить из-за наложения дополнительных конфигураций поля, что приводит к появлению дополнительных физических процессов. Поэтому до сих пор не удалось осуществить прогноз солнечных вспышек на основании понимания их физического механизма с использованием результатов МГД моделирования над активной областью. Настоящее исследование направлено на решение этой задачи. Для этой цели найдены все основные магнитные линии аркады, которые проходят через трехмерные максимумы плотности тока, образующие цепочку, или через плоские максимумы плотности тока в плоскостях, перпендикулярных основным магнитным линиям.



ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ CHARM-DE

Криволуцкий А.А., Банин М.В.

Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Россия, krivolutsky@mail.ru

Представлено описание и результаты, полученные с помощью новой версии численной глобальной фотохимической модели *CHARM-DE* (*CH*emical **A**tmospheric *R*esearh *M*odel with D and E Regions), в которой верхняя граница поднята до высоты 130 км (нижняя граница на поверхности Земли). Представлены результаты расчета глобальных распределений нейтральных и заряженных компонент, включая электронную концентрацию в невозмущенных условиях. Источником ионизации являлась солнечная Лайман-альфа радиация и потоки галактических космических лучей. Для описания пространственного переноса химически активной примеси в модели (использована схема Пратера) были использованы расчеты глобальных полей компонент ветра и полей температуры с помощью модели общей циркуляции *ARM* (*A*tmospheric *R*esearch *M*odel). Модель CHARM-DE является развитием предыдущей версии *CHARM-I***,** верхняя граница которой расположена на высоте 90 км.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНЫХ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОСЕЙСМИЧНОСТЬ БУДУЩЕГО ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Новиков В.А.[1,2], **Новикова М.В.**[3]

[1]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, novikov@ihed.ras.ru*
[2]*ИДГ РАН, г. Москва, Россия, novikov.va@idg.ras.ru*
[3]*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, mary_nov_06@mail.ru*

Ранее был установлен статистически значимый рост сейсмической активности Земли после сильных солнечных вспышек (СВ) класса X, особенно в зоне с радиусом 5000 км вокруг подсолнечной точки [1]. Предполагается, что землетрясения (ЗТ) могут инициироваться всплеском теллурических токов в разломах земной коры, индуцируемым сильными вариациями геомагнитного поля (ГМП), как следствие воздействия рентгеновского излучения СВ на ионосферу [2] по аналогии с инициированием ЗТ импульсами электрического тока, подаваемыми в земную кору от искусственного источника [3]. Было показано, что электромагнитное воздействие проявляется наиболее эффективно в афтершоковых зонах сильных ЗТ, где оно приводит как к росту количества афтершоков, так и возникновению сильных афтершоков с M≥6 с задержкой 6–8 суток после воздействия [1]. Такая задержка может быть обусловлена миграцией проводящих флюидов в разломные зон, снижающей их прочность, под воздействием вариаций ГМП, что подтверждается результатами анализа отклика сейсмичности флюидонасыщенных геотермальных полей Северной Калифорнии на сильные вариации ГМП $|dBx/dt| \geq 50$ нТл/мин [4].

В продолжение данной работы проведен статистический анализ отклика сейсмической активности очаговых зон пяти сильных ЗТ (Калифорния, США, M≥7,0), размер которых определялся в соответствии с работой [5], на воздействия 24 сильных вариаций ГМП $|dBx/dt| \geq 50$ нТл/мин (1991–2024 г.г.), который показал статистически значимый рост сейсмической активности на 2–10 сутки после сильных вариаций ГМП, наблюдаемый за 5–20 лет до ЗТ и возрастающий по мере приближения к нему. Таким образом, отклик сейсмичности на внешние электромагнитные триггерные воздействия может рассматриваться как индикатор напряженно-деформированного состояния земной коры, указывать на место возникновения будущего сильного ЗТ и использоваться в среднесрочном прогнозе сильных ЗТ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00205).

1. Sorokin V.M., Novikov V.A. Possible Interrelations of Space Weather and Seismic Activity: An Implication for Earthquake Forecast // Geosciences. 2024. 14(5):116. DOI:10.3390/geosciences14050116.
2. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Mushkarev G.Yu., Novikov V.A. Telluric Currents Generated by Solar Flare Radiation: Physical Model and Numerical Estimations // Atmosphere. 2023, V.14, 458. DOI:10.3390/atmos14030458.

3. Зейгарник В.А., Богомолов Л.И., Новиков В.А. Электромагнитное инициирование землетрясений: полевые наблюдения, лабораторные эксперименты и физические механизмы (Обзор) // Физика Земли. 2022. № 1. С. 35-66. DOI: 10.31857/S0002333722010100.
4. Novikov V.A., Lazareva E.A. Response of Seismicity of Northern California Geothermal Fields to Sharp Variations of the Geomagnetic Field // Dokl. Earth Sc. 2025. V.524, 15. DOI:10.1134/S1028334X25607308.
5. Завьялов А.Д., Зотов О.Д. Новый способ определения характерного размера очаговой зоны // Вулканология и сейсмология. 2021. №1. С.22-29. DOI: 10.31857/S0203030621010065.

НА СОЛНЦЕ ИЛИ НА ЗЕМЛЕ: ГДЕ НАХОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ НА ТЕКУЩЕЕ ПОТЕПЛЕНИЕ ЗЕМНОГО КЛИМАТА

Кадышевич Е.А., Островский В.Е.

ИФА им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия, kadyshevich@mail.ru

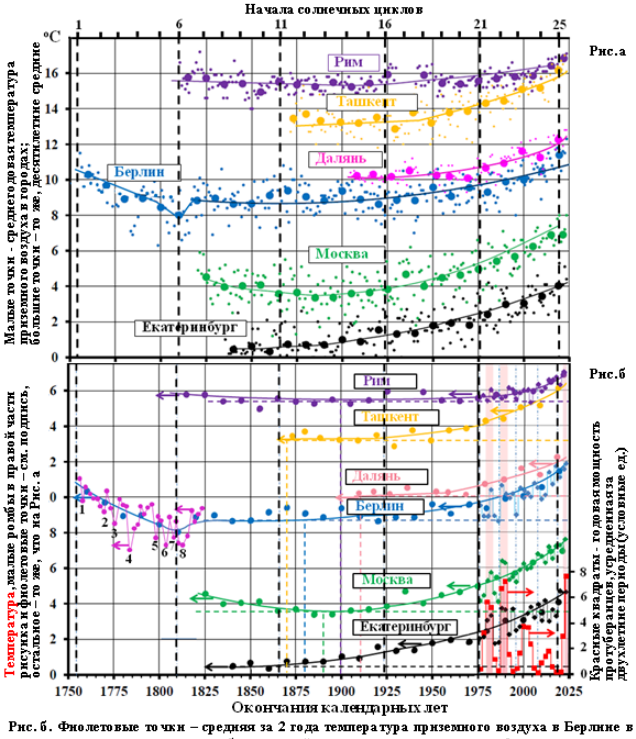


Рис.а

Рис.б

Рис. б. Фиолетовые точки – средняя за 2 года температура приземного воздуха в Берлине в период похолодания; малые ромбы в правой части рисунка - средняя за 2 года температура приземного воздуха в городах в период 1975-2025.
Цифры при фиолетовых точках - 1 – 1785, Везувий (Италия); 2 – 1770, Котопахи (Эквадор) и вулканы Аляски; 3 – 1774-1776, Удалянчи (сев.-вост. Китай); 4 – 1784, Лаки (Индонезия); 5 – 1798, общая вулканическая активность; 6 – 1804, остров Барреи (Индонезия, Бенгальский залив); 7 – 1808-1809, общая вулканическая активность; 8 - 1810-115, Тамбор (Индонезия).
Каждая точка 1–8 показывает среднюю за 2 календарных года температуру воздуха в Берлине по сайту: Летопись погоды. Средние годовые температуры воздуха в городах (по online данным и литературным источникам); http://www.pogodaiklimat.ru/history.php

В докладе будут изложены и обобщены результаты и мнения различных авторов о потеплении климата и результаты наших исследований источников и механизмов текущего потепления, начатые в 2007 году разработкой PFO-CFO Theory of Solar System Formation and Transformation, продолженные с 2017 года прямыми сопоставлениями результатов PFO-CFO Theory с реальными наблюдениями потепления, которые изложены в более чем 40 наших публикациях, доступных на страницах ResearchGate, и дополнены новыми нашими результатами, не представлявшимися ранее.

Мы исследовали влияние на потепление климата следующих факторов: (1) солнечной радиации, (2) солнечных протуберанцев, (3) подземной магмы, (4) вулканической активности Земли и (5) так называемых парниковых газов. Фактический материал для наших выводов об источниках и механизмах текущего потепления получен, в основном, из результатов изучения литературных данных об изменениях усредненной во времени температуры приземного воздуха в течение всего периода её измерений в евразийских городах Екатеринбург, Москва и Берлин, расположенных вблизи параллели 55oN, и Далянь, Ташкент и Рим, расположенных вблизи параллели 40oN, об изменениях протуберансной активности Солнца в течение периода её систематических измерений и об активности земных стратовулканов в период похолодания, наблюдавшегося в Берлине. Эти результаты приведены в графической форме и пояснены в подписи к рисунку. Среднегодовые температуры воздуха получены с большим разбросом; в дальнейшем установлено, что, в основном, разброс является результатом влияния на температуру воздуха протуберансной активности Солнца и активности вулканов. Для лучшего понимания результатов использованы также данные Росгидромета о приращении температуры почвы на территории России снизу вверх в период 1976–2022.

Потепление приземного воздуха инициировано, в основном, возрастанием суммарной протуберансной активности Солнца. Вначале потепление было медленным и перешло в экспоненциальный режим в течение последних семидесяти лет. Протуберанцы состоят из электронов и радиоактивных изотопов, летят с ускорением и частично рассеиваются, нагревая Пространство во время полета. Протуберанцы, попадающие на Землю и пролетающие вблизи нее, быстро нагревают приземный воздух, а пролетающие вдали от Земли нагревают Пространство, которое медленно нагревает атмосферу и приземный воздух.

Исследование выполнено в рамках гос. задания ИФА РАН №125020501413-6.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Белозерова Т.Ю., Данелян Б.Г.

ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный, Россия, tyanbbb@gmail.com

Космические данные о возгораниях, лесных пожарах, площади пострадавших территорий – важный аспект информации для принятия управленческих решений и экологического мониторинга. Активные воздействия (АВ) на атмосферу, такие как искусственное вызывание осадков, позволяют снизить риск лесных пожаров. Для повышения эффективности таких воздействий необходимо наиболее точное прогнозирование зон вероятных возгораний. Цель работы – разработка модели прогнозирования лесных пожаров, интегрируемой в программы по планированию АВ.

Риск возникновения лесных пожаров зависит в основном от состояния растительности, погодных условий, свойств поверхности [1]. В работе основное внимание уделено метеорологическим факторам.

Исходными данными являются: метеоданные, включающие спутниковые наблюдения, данные метеостанций, данные аэрозондов и данные климатических моделей (ECMWF) [2], [4].

Территория прогноза – Республика Саха (Якутия), пространственное разрешение сетки – 0,25° x 0,25°.

В основе модели – ансамблевый алгоритм «Случайный лес», реализованный на языке программирования Python. Методика включает три этапа:

1. Подготовка данных: сбор, очистка и объединение данных по пространственно-временным координатам.

2. Обучение модели: разделение на обучающую/тестовую выборки, обучение, валидация и оценка значимости признаков.

3. Оперативный прогноз: использование усреднённых данных за предыдущий месяц для прогноза на целевой месяц, визуализация результатов на карте.

Модель оценивалась на тестовой выборке (25% данных) с помощью метрики ROC-AUC. По результатам оценки значение метрики составило 0,88, что говорит о высоком прогностическом потенциале модели.

Разработанная методика позволяет прогнозировать зоны высокой пожарной опасности на месяц вперед с пространственной детализацией 0,25° x 0,25°. Её ключевые преимущества:

- определение приоритетных зон для искусственного увлажнения;
- доступность исходных данных, основанных на спутниковой информации;
- возможность сценарного моделирования эффективности АВ.

Интеграция модели в геоинформационные системы позволит оптимизировать процесс принятия решений по активным воздействиям на атмосферу.

1. Софронов М.А., Гольдаммер И.Г., Цветков П.А. Пожарная опасность в природных условиях. – Красноярск: Ин-т леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, 2005. – 322 с.

2. Hewson T. Use and Verification of ECMWF products in Member and Co-operating States // ECMWF, 2021. – 35 p.

3. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/ (дата обращения: 02.05.2025).

4. OSM Stats [электронный ресурс]// OpenStreetMaps, 2022. – URL: https://planet.openstreetmap.org/statistics/data_stats.html (дата обращения: 02.03.2025).

КВАЗИДВУХЛЕТНИЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ (КДО): АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В 2023-2024 ГОДАХ

Габис И.П.

Арктический и антарктический НИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, gabis@aari.ru

Квазидвухлетние осцилляции (КДО) зонального ветра экваториальной стратосферы оказывают глобальное влияние на динамику и состав атмосферы, что объясняет необходимость прогнозирования КДО для повышения точности прогнозов погоды и климата. На протяжении более чем 60 лет наблюдений считалось, что КДО вследствие регулярного поведения имеют высокую предсказуемость. Однако два сбоя КДО в 2015-2020 гг. и предположение о том, что в будущем они будут происходить чаще из-за изменения климата, поднимают вопрос о механизме сбоев и предсказуемости КДО.

КДО являются следствием поочередного спуска восточного и западного ветра от ~3 гПа до ~100 гПа вблизи экватора (±12°). Согласно анализу изменений высотной структуры ветра период цикла КДО определяется скоростью спуска восточного ветра. Восточный ветер начинает спускаться от уровня 10 гПа (~31 км) всегда вблизи июньского или декабрьского солнцестояния и достигает уровня 70 гПа (~18 км) через 1.5 или 2 года. При этом за период 1953-2022 гг. во всех случаях восточного спуска с началом вблизи декабрьского солнцестояния его длительность составляла 2 года. Однако предпоследний наблюдавшийся спуск восточного ветра с началом вблизи декабрьского солнцестояния 2022 года завершился в январе 2024 года, то есть длился всего один год вместо типичных двух лет. Связанные с КДО ветра изменения экваториального общего содержания озона (ОСО) демонстрируют явные признаки отклонений от стандартной эволюции, что подтверждает аномальный характер вариаций КДО в 2023-2024 гг. Результаты могут быть использованы для анализа причин сбоев и прогноза КДО.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ: СОБЫТИЕ 29 ЯНВАРЯ 2024 Г.

Маурчев Е.А.[1,2], **Диденко К.А.**[2]

[1]*ПГИ, г. Апатиты, Россия, maurchev@izmiran.ru*

[2]*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, didenko@izmiran.ru*

Программный комплекс RUSCOSMICS [1], реализованный на пакете для разработки программ GEANT4 [2], использовался для моделирования прохождения протонов космических лучей через атмосферу Земли. Такой подход позволяет гибко настраивать геометрию, источник первичных протонов, а также детектирующие объемы. Описание физики взаимодействия частиц с веществом определяется подключаемым набором. Он включает в себя стандартные электромагнитные процессы, каскадные процессы для разных диапазонов энергий, а также расчет прохождения нейтронов с энергиями ниже 20 МэВ. Модельный источник протонов задается как точечный на верхней границе атмосферы и имеет изотропное угловое распределение в нижнюю полусферу. Энергетические характеристики определяются в соответствии с дифференциальным спектром первичных частиц в зависимости от необходимых условий. Сбор информации о скорости ионизации производится через детекторы, которые установлены в диапазоне высот от 0 до 98 км с шагом в 1 км.

Для выбора данных, получения спектра протонов солнечных космических лучей (СКЛ), генерируемых во время солнечного протонного события (СПС), и дальнейшей оценки скорости ионизации использовался спутник GOES [3]. Было выбрано одно из событий протонного возрастания 25-го солнечного цикла 29 января 2024 г., для которого интегральный поток 10 МэВ превысил значение 10^2 pfu. Исследовались два момента времени, в которых был разный спектр (начало возрастания – 06:00 UTC и почти конец возрастания – 15:30 UTC). Для этих временных точек были восстановлены спектры из дифференциальных каналов GOES. Получено, что, как и для случая спектров, восстанавливаемых во время событий возрастания приземного фона, более «медленная» компонента описывается логнормальной функцией, а более «быстрая» - степенной.

Рассчитанные высотные профили ионизации для точки жесткости геомагнитного обрезания R = 0.17 ГВ, показали что, пик ионизации для протонов СКЛ лежит в диапазоне высот 50-55 км, в то время как пик на 10-15 км относится к ионизации частицами галактических космических лучей (ГКЛ). Также следует заметить, что для высот больше 55 км ионизация частицами СКЛ весьма существенная, и разница от ГКЛ составляет почти порядок. Так как расчет сделан для очень малой жесткости геомагнитного обрезания, можно сделать вывод, что протоны СКЛ практически не влияют на радиационную безопасность объектов в атмосфере (на высотах 10-15 км и в широтах ниже ~75°). Однако наряду с этим следует заметить, что увеличение скорости ионизации верхних слоев средней атмосферы на порядок может внести существенный вклад в динамику и химию атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 25-17-20038, https://rscf.ru/project/25-17-20038/.

1. Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Германенко А.В. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2019. Т. **83.** № **5**. С. 712-716.

2. Allison J., Amako K. // Nucl.Instrum. Methods Phys. Res. 2016. V. **835.** Sect. **A**. P. 186.

3. URL: https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРОИЗВОДНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ КОМПОНЕНТЫ Bx, ВЫШЕ КОТОРОГО НАБЛЮДАЕТСЯ ПРИРОСТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Лаптухов В.А.

ИЗМИРАН РАН, г.Москва г.Троицк, Россия laptuhov@mail.ru

В данной работе было рассмотрено влияние производной геомагнитной компоненты Bx на прирост числа землетрясений в локальных зонах Земли (Австралия) и по всей Земле.

Для каждой бури за весь промежуток времени их существования была вычислена абсолютная величина максимального значения производной геомагнитной компоненты Bx по времени (DBx/dt, нТл/мин). Прирост числа землетрясений с магнитудой от 4.5 баллов вычислялся в радиусе 5000 км от места измерения геомагнитного поля. Подсчет землетрясений по их колличеству проводился в течении 10 дней после бури и за 10 дней до ее возникновения. Магнитные бури выбирались в каталоге на сайте: https://www.izmiran.ru/magnetism/magobs/MagneticStormCatalog.html Минутные значения геомагнитного поля были взяты на сайте:https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2 Землетрясения выбирались на сайте: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search

На рисунке 1 построена зависимость прироста числа землетрясений от абсолютной величины максимального значения производной геомагнитной компоненты Bx по времени. Ось ординат на этом рисунке обозначена как N1-N2, где N1-число землетрясений в радиусе 5000 км от места измерения поля в течении 10 дней после бури, а N2-число землетрясений в радиусе 5000 км от места измерения поля за 10 дней до бури. Рисунок 1 отображает данную зависимость для Австралии. Координаты измерения поля:ASP, Alice Spring, Австралия 23°S,133°E. Рисунок 2 выполнен по аналогии с рисуноком 1 и отображает данную зависимость по всей Земле (глобально) . Из рисунков видно, что число землетрясений увеличивается после магнитных бурь. Таким образом, было определено пороговое значение производной DBx/dt выше которого наблюдается прирост землетрясений: для Австралии оно равно 47 нТл/мин, по всей Земле 52 нТл/мин.

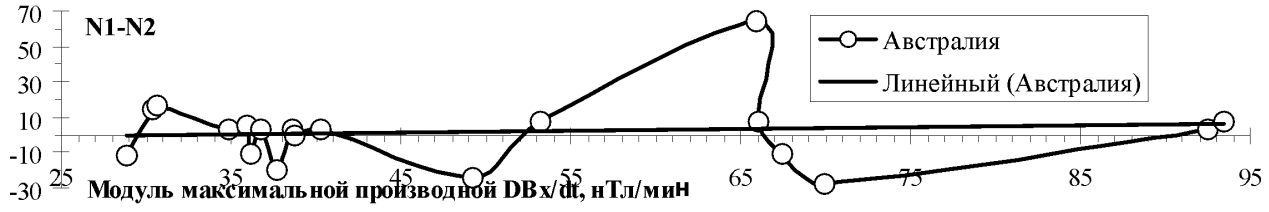


Рисунок1

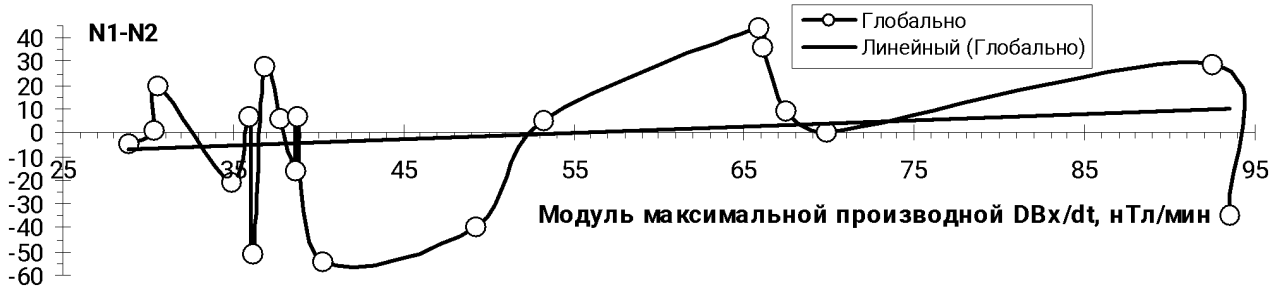


Рисунок 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Кириллов А.С., Куликов Ю.Н.

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия, kirillov@pgia.ru

Рассчитанные согласно квантово-химическим приближениям коэффициенты гашения синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ при неупругих столкновениях с молекулами O_2 и N_2 используются для определения колебательных населенностей электронно-возбужденного молекулярного кислорода на высотах высокоширотной ионосферы Земли. Представлены результаты расчётов относительных населенностей синглетного кислорода $O_2(b^1©_g^+,v)$, образованного в случае высыпания в атмосферу Земли авроральных электронов. Исследуются вклады различных процессов в образование синглетного кислорода $O_2(b^1©_g^+,v=0\text{-}2)$ и свечение Атмосферных полос 762, 771, 780 нм. Показано, что доминирующий вклад в образование синглетного кислорода $O_2(b^1©_g^+,v=0\text{-}2)$ и свечение Атмосферных полос 762, 771, 780 нм вносят неупругие столкновения молекул O_2 с авроральными электронами и с метастабильным атомарным кислородом $O(^1D)$.

МНОГОКОМПОНЕНТНОСТЬ ПРИЧИН КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЗЕМЛИ

Пестова И.А.

МТУСИ. г. Москва, Россия. data2020@mail.ru

Согласно теории циклического изменения климата сербского ученого Милутина Миланковича, мы живем в период межледниковья. Примерно через 8 тысяч лет должен начаться новый ледниковый период. Однако, вызывают тревогу участившиеся климатические аномалии: тайфуны, извержения вулканов, наводнения, жара. Растет средняя температура на планете, наблюдается таяние арктических льдов и ледников Земли. В среднем Арктика теплеет в 3-4 раза быстрее, чем остальные регионы. Существуют различные объяснения этим явлениям, зачастую имеющие антропогенную основу. Однако, при более глубоком рассмотрении, становится понятно, что основную роль в изменениях климатических процессов на Земле играет природа, космические процессы.

Изучение сложного движения Земли вокруг Солнца, используя последние достижения науки, позволяет связать его с изменениями климата и температуры Земли. В долгосрочной перспективе вращение Земли вокруг оси замедляется, благодаря влиянию Солнца и Луны. В масштабах миллиардов лет доминирует лунное торможение на текущее время порядка 2 миллисекунды на столетие. Ее гравитация вызывает приливы, которые работают как гигантский тормоз, постепенно отнимая у планеты вращательную энергию. Но по данным ученых с 2020 года планета Земля демонстрирует устойчивую тенденцию к ускорению, что противоречит многовековым данным наблюдений. Несмотря на замедляющие факторы, ускорение последних лет объясняют процессами внутри планеты и увеличением суммарного момента импульса за счет добавления тающей воды приполярных ледников суши в экваториальную часть. Предполагается обмен моментом импульса между жидким внешним ядром и мантией, а также влияние атмосферных ветров. Летом 2024 года был зафиксирован рекорд: 5 июля Земля завершила оборот на 1,66 миллисекунды быстрее стандартных 86400 секунд.

Значимым механизм влияющим на климат Земли, выявленным относительно недавно является прохождение глубинных газов предположительно из земного ядра в космос, в первую очередь водорода, можно рассматривать как выбросы из глубинных недр Земли восстановительных газов. При подъеме водородно-метанового потока в атмосферу наиболее значимым эффектом является разрушение озонового слоя над центрами дегазации, обеспечивающими аномальный нагрев локальных участков земной поверхности. Процесс глубинной дегазации неравномерен во времени и пространстве. Это отображено на карте центров озоновых аномалий, появившихся над Россией 1991-2000г. Центры аномалий контролируются линейными тектоническими структурами- центрами дегазации. Газогидратные месторождения включают гидрат метана, а также диоксид углерода.

1. Зотов Л.В. Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами. Диссертация доктор наук. ФГБОУ ВО МГУ. 2019, 328 стр.
2. В.Л. Сывороткин. Дегазационная концепция глобальных катастроф: основные положения, новые результаты. Вопросы географии. Современное землеведение / ред. акад. В.М. Котляков [и др.]. — 2019. С.36-70.
3. Пестова И.А. Альтернативные макроэкономические показатели. В сборнике Актуальные вопросы современной экономической науки. Сборник докладов XX-международной конференции. Ответственный редактор А.В. Горбенко. 2015. С. 41-46.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕР ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ТРАНЗИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В НЕСКОЛЬКИХ ЛИНИЯХ

Шайхисламов[1,2] И.Ф., Шарипов[1] С.С., Мирошниченко[1] И.Б., Руменских[1,2] М.С., Голубовский[1,2] М.П., Березуцкий[1] А.Г.

Институт Лазерной Физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ShaikhislamovIldar@yandex.ru
Институт Астрономии РАН, г. Москва, Россия

Горячие газовые планеты, вращающиеся по близким орбитам, образуют подкласс среди очень разнообразной популяции экзопланет. Они обладают уникальной особенностью – обширным истечением верхних слоев атмосферы. Наблюдательные свидетельства такого процесса были обнаружены для ряда горячих Юпитеров и теплых Нептунов путем измерения их транзитного поглощения в вакуумных ультрафиолетовых линиях таких элементов, как H, C, O, Mg, Si, Fe. Недавно богатая информация была получена в результате анализа транзитного поглощения экзопланет в линии 1083 нм в ИК-диапазоне метастабильного триплета гелия. Более того, первое обнаружение транзитного поглощения атомом кислорода на длине волны 777.4 нм в ИК-диапазоне у Kelt-9b обещает новые возможности.

Сравнение спектрально разрешенных измерений транзитов отдельных экзопланет и 3D-моделирования позволяет делать важные выводы об атмосферах экзопланет и параметрах звездного излучения. Количественная интерпретация наблюдательных данных требует специального численного моделирования, и соответствующие модели претерпели значительное развитие. В этом докладе мы представляем результаты моделирования с помощью 3D-аэрономической многожидкостной МГД-модели, которая включает в себя перенос излучения и кинетическое моделирование возбужденных уровней. Мы исследовали несколько горячих Юпитеров и теплых Нептунов, для которых были проведены транзитные наблюдения — HD209458b, HD189733b, Wasp107b, Wasp80b, GJ436b, GJ3470b, TOI421b&c, PiMenC. Например, моделирование HD189733b [1] показало, что существующая изменчивость измерений транзитных спектров может быть объяснена изменением условий космической погоды. Транзитные поглощения в линиях HI, OI, CII и HeI, измеренные для HD209458b, позволили нам оценить верхний предел возможного магнитного поля этой планеты [2]. Мы также смоделировали две двойные планетные системы, TOI421 и HD63433, для которых предсказана возможность взаимодействия истекающих атмосфер посредством возмущений звездного ветра [3].

Наблюдения транзита горячего Юпитера HATP32b выявили необычно большое поглощение ~5 % в линии водорода Hα и гелия 1083 нм. Обе эти линии характеризуют верхнюю атмосферу планет и требуют сложного кинетического моделирования возбужденных уровней. Подгонка измерений для обеих линий с помощью моделирования оказалась сложной, требующей экстремальных звездных потоков в Lyα [4]. В нашей статье [5] мы уже показали, что важен учет металличности для этой системы. В этой работе мы моделируем поглощения, используя более сложный подход, который позволяет более надежно определить параметры системы.

Исследование поддержано проектами РНФ 25-72-10080, 23-72-10060.

1. Rumenskikh M.S., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., et al., ApJ, 2022, 927(2), 238.
2. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., et al., MNRAS, 2021, 507(3), 3626.
3. Berezutsky A.G., Shaikhislamov I.F., Rumenskikh M.S., et al, MNRAS, 2022, 515(1), 706.
4. Yan D. et al., A&A, 2024, 686, A208.
5. Sharipov S.S., Shaikhislamov, et al., 2025, Astronomy Reports, 69(8), 708-721.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПОГЛОЩЕНИЙ ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЫ ТЕТА-ПИНЧА В ИК ЛИНИИ HE I (23S) 1083 НМ

Руменских М.С.[1,2], А.Г. Березуцкий[1], В.Г. Посух[1], С.С. Шарипов[1], М.П. Голубовский[1], А.А. Чибранов[1], А.Е. Иванов[1], М.В. Логинов[1], Е.Д. Савинцева[1], И.Ф. Шайхисламов[1]

[1] ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, marina_rumenskikh@mail.ru

[2] Институт Земного Магнетизма, Ионосферы И Распространения Радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

Комплекс физико-химических процессов, протекающих в верхних слоях планетных атмосфер, определяет глобальные эволюционные тренды. Для Земли это в первую очередь изменение климата, которое оказывают воздействие на многие аспекты человеческой жизни. Получение исчерпывающих данных по формированию, развитию и изменчивости атмосферы нашей планеты, несмотря на доступность измерений - задача невыполнимая. Однако за пределами Солнечной системы существует огромное количество экзопланет, находящихся на разных этапах эволюции. Они нередко обладают атмосферами, причем многие из атмосфер включают сложные химические соединения. То есть, имеется возможность анализировать эволюцию и особенности взаимодействия с излучением звезды атмосфер планет, подобных земной и получать информацию, недоступную иными способами.

На данный момент подтверждено существование 7347 экзопланет, причем разных типов. Сейчас внимание исследователей смещается к атмосферам экзопланет, определению их состава и параметров. Единственный информативный подход для этой задачи - транзитная спектроскопия, основанная на поглощении излучения звезды при транзите планеты. Получение количественной информации об атмосфере основано на определении параметров среды по её спектру поглощения. Для этого измеренные транзитные спектры сравниваются с результатами расчетов численными моделями. Однако численных моделей недостаточно, поскольку необходимо иметь проверенные данные о множестве физико-химических кинетических процессов в сложной газоплазменной среде, а также точные значения скоростей протекания химических реакций. Поэтому существует необходимость моделирования определенных аспектов планетных атмосфер в лабораторных условиях.

На стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН проведено лабораторное моделирование поглощения в гелиевой плазме тета-пинча. Параметры экспериментов соответствуют верхним слоям атмосфер экзопланет с первичной гелийсодержащей атмосферой – таких, по которым в данный момент получено наибольшее количество наблюдательных данных. Для наблюдения поглощений была задействована оптическая схема многопроходной ячейки Херриота, ранее не применявшейся в экспериментах по моделированию космической плазмы. Эта схема позволила увеличить длину оптического пути на два порядка, что согласно предварительным оценкам позволит измерить поглощение на уровне ~1%.

В докладе будут освещены особенности постановки лабораторного эксперимента, нацеленного на измерение скоростей протекания физико-химических реакций, и первые результаты наблюдений поглощений в гелиевой плазме тета-пинча в условиях разлета плазмы в магнитное поля, водородный и гелиевый газ и вакуум.

Работа выполнена при поддержке направления 10 НЦФМ.

ЗАЩИТНАЯ РОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАНЕТЫ В ОСЛАБЛЕНИИ ПОТОКА ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОНОВ

[1]Жилкин А. Г., [2,1]Бисикало Д.В., [1]Шематович В. И., [1]Цуриков Г.Н.

[1] – Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия, zhilkin@inasan.ru

[2] – Национальный Центр Физики и Математики, г. Саров, Россия

Взаимодействие плазмы солнечного ветра с магнитосферой планеты представляет собой сложный комплекс физических и химических процессов. Важным следствием такого взаимодействия является, в частности, высыпание энергетических частиц в атмосферу планеты. Эффективность воздействия этих частиц на тепловой и химический баланс атмосферы в существенной мере определяется собственным магнитным полем планеты. Одним из способов оценки такого влияния является анализ содержания молекулы оксида азота (NO) в зависимости от температуры. Данная молекула интересна тем, что она образуется в больших количествах в атмосфере N2-O2 и является потенциальным биомаркером [1]. Из наблюдений известно, что NO является хорошим индикатором высыпания электронов в полярную термосферу Земли [2]. Следовательно, эту молекулу удобно использовать в качестве показателя взаимодействия звездного ветра с магнитосферой планеты.

Мы сравнили среднюю концентрацию NO на планете с собственным магнитным полем и на аналогичной планете, не имеющей собственного магнитного поля. Концентрация NO на планете с собственным полем была найдена на основе измерений, проведенных спутником SNOE в термосфере Земли [3]. Содержание NO на планете без магнитного поля вычислялось на основе комбинации трехмерных МГД расчетов [4] и кинетического моделирования [5, 6]. По результатам этих исследований было определено, что средняя приземная концентрация NO на планете без магнитного поля может быть в 3 раза выше, чем на Земле, при том же потоке звездного ветра в условиях спокойного Солнца. Полученный результат демонстрирует роль магнитного поля Земли в качестве защитного механизма от воздействия солнечного ветра.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-12-00364-П).

1. Sproß L., Scherf M., Shematovich V.I., et al. // Astronomy Reports. 2021. V. **65**, № 4. P. 275.
2. Barth P., Stüeken E.E., Helling C., et al. // Astronomy & Astrophysics. 2024. V. **686**. P. A58.
3. Barth C.A., Mankoff K.D., Bailey S.M., Solomon S.C. // JGR. 2003. V. 108. P. 1027.
4. Zhilkin A.G., Shematovich V.I., Tsurikov, G.N., Bisikalo D.V. // Astronomy Reports. 2024. V. **68**, № 12. P. 1252.
5. Bisikalo D.V., Shematovich V.I., Hubert B. // Universe. 2022. V. **8**, № 8. P. 437.
6. Shematovich V.I., Bisikalo D.I., Tsurikov G.N., Zhilkin A.G. // Astronomy Reports. 2024. V. **68**. P. 843.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ НА ПЛАНЕТАХ ГИГАНТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Алексеев И.И., Невский Д.В., Лаврухин А.С.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, iialexeev@mail.ru

*П*олярные сияния являются одним из ярчайших проявлений взаимодействия магнитных полей планет и их атмосферы с набегающим потоком солнечного ветра. Полярные сияния на Земле исследуются с момента пионерских работ Карла Штёрмера в начале 20 века. Полярные сияния на планетах-гигантах были открыты при помощи пролётов КА Voyager и Pioneer, а затем более полно исследованы во время полетов многолетних искусственных спутников Galileo, Juno, Cassini и при помощи фотографий космических телескопов Hubble (УФ диапазон) и James Webb (ИК излучение).В настоящее время интерес к этим измерениям вновь возрос в связи с открытием авроральных свечений на Нептуне. Основываясь на простых аналитических моделях, мы показываем, как различные размеры магнитосфер определяют структуру глобальной морфологии полярных сияний намагниченных планет Солнечной системы.

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

1. Melin H. et al. Discovery of H3+ and infrared aurorae at Neptune with JWST // Nature Astronomy. 2025. V. 9. P. 66.
2. Alexeev I.I., Belenkaya E.S. Modeling of the Jovian Magnetosphere // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 809.
3. Cowley S.W.H., Bunce E.J. Corotation-driven magnetosphere-ionosphere coupling currents in Saturn's magnetosphere // Ann. Geophys. 2003. V. 21. P. 1691.
4. Nichols J.D. et al. Dynamic infrared aurora on Jupiter // Nat. Commun. 2025. V. 16. P. 1.
5. Lamy L. et al. Earth-based detection of Uranus' aurorae // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L20101.
6. Alexeev I.I. Solar Wind Control of the Magnetospheric and Auroral Dynamics // Space Sci. Rev. 2006. V. 122. P. 55.

ЛИТИЙ В ЭКЗОСФЕРЕ МЕРКУРИЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Бережной А.А., Феоктистова Е.А.

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

На основании анализа данных магнитометра КА MESSENGER в экзосфере Меркурия обнаружены ионно-циклотронные волны [1]. Эти волны вызваны присутствием молодых ионов лития Li^+, образующихся при фотоионизации атомов лития Li солнечными фотонами. За 4 года работы магнетометра КА MESSENGER на орбите Меркурия обнаружено 12 кратковременных событий длительностью около 500 с, во время которых регистрировались Li^+ ионно-циклотронные волны. Используя стационарную модель Чамберлена, было получено, что во время обнаруженных кратковременных Li событий поверхностная зенитная лучевая концентрация атомов лития достигала 10^7 $см^{-2}$ [1]. Было предложено, что основным источником кратковременного увеличения содержания Li и Li^+ в экзосфере Меркурия являются падения крупных метеороидов массой 28-120 кг [1].

Только 8 из 12 обнаруженных Li событий наблюдались во время регистрации корональных выбросов массы (КВМ) КА MESSENGER [2]. По данным каталога КВМ на Меркурии [2] проверена связь между временем обнаружения ионов лития в экзосфере Меркурия и уровнем солнечной активности. В частности, обнаружено увеличение содержания лития в экзосфере Меркурия во время взаимодействия КВМ с магнитосферой Меркурия 5 марта 2012 года. Кроме того, КВМ достиг Меркурия за 3 часа до обнаружения лития 1 мая 2013 года. Литий в экзосфере Меркурия также был обнаружен через 4 часа после прохождения КВМ 27 мая 2012 года. Отметим, что КВМ достигали Меркурия в среднем один раз в месяц [2]. Общая длительность времени взаимодействия КВМ с магнитосферой Меркурия составляет всего лишь 3 % от длительности проведенных наблюдений [2], в то время как связь между КВМ и увеличением содержания экзосферного лития возможна для 3 из 8 случаев (37 % событий). Таким образом, установлено, что солнечные вспышки, сопровождающиеся КВМ, являются одним из источников повышенного содержания лития в экзосфере Меркурия.

Обсуждаются параметры взаимодействия солнечного ветра с поверхностью Меркурия, необходимые для обнаружения Li^+ ионно-циклотронных волн. Приведены ограничения модели Чамберлена, использовавшиеся при расчете поверхностных зенитных лучевых концентраций атомов Li. Обсуждаются перспективы моделирования поведения атомов, ионов и молодых ионов лития в экзосфере Меркурия методом Монте Карло.

1. Schmid D., Lammer H., Berezhnoy A.A. et al. // Nature Communications 2025. V. **16.** Article 6205.

2. Winslow R.M., Lugaz N., Philpott L.C. et al. // J. Geophys. Res. Space Physics 2015. V. **120**. P. 6101.

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СОБСТВЕННОГО СВЕЧЕНИЯ НОЧНЫХ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СЕЗОННЫХ И ШИРОТНЫХ ВАРИАЦИЙ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА

Антоненко О.В., Кириллов А.С.

ПГИ, г Апатиты, Россия, antonenko@pgia.ru

В работе рассматриваются профили атомарного кислорода на Земле на средних широтах [1] и на экваторе для октября месяца, на Марсе в точке осеннего равноденствия на экваторе и на северной широте 67.5° [2], на Венере, ввиду отсутствия данных об О по сезонам, рассматриваются широтные профили атомарного кислорода (экватор, 60° северной широты) [3].

Наблюдается, что свечение полос Герцберга II на Венере усиливается ближе к северным широтам и становится менее интенсивным у экватора. Рассчитываются интенсивности свечения кислорода и приводятся сопоставления изменений рассчитанных значений интенсивностей свечения с изменениями пиковых значений атомарного кислорода в зависимости от широт и сезонов планет.

1. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. // 2006. М.: ГЕОС. 741 С.
2. Gagne M.-E., Melo S.M.L., Lefevre F., et al. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117
3. Jean-Claude Gérard, Adem Saglam, Giuseppe Piccioni, Pierre Drossart, Frank Montmessin, Jean-Loup Bertaux Icarus 2009. P. 264–272

ДЕМОНСТРАЦИЯ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МОДЕЛЯХ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ

Голубовский М.П., Шайхисламов И.Ф., Мирошниченко И.Б., Руменских М.С.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, maxym9121@gmail.com

В последнее время было получено множество качественных наблюдательных данных транзитных поглощений экзопланет. Для интерпретации наблюдений была разработана самосогласованная трёхмерная магнитогидродинамическая многожидкостная модель атмосферы экзопланет [1]. Ключевым элементом для наблюдений является водород. Следовательно, корректный расчёт его распределения является важным. Имеются предположения о необходимости учёта кислородосодержащих молекул, потому что они могут приводить к изменению структуры распределения атомов и молекул водорода. Таким образом изучение данного эффекта является актуальным.

В работе учитывались молекулы H_2, H_2O, OH, O_2, их ионы и H_3+. Среди атомов включены на данном этапе H и O с соответствующими ионами, в дальнейшем планируется добавление C и N. Кислород и водород были выбраны как первые с целью тестирования разработанного подхода. Учитывались реакции фотоионизации атомов и молекул, фотодиссоциация молекул и ряд бинарных реакций, всего включено 43 реакции. Сечения для расчёта скорости фотопроцессов молекул были взяты из базы данных Leiden database [2]. На текущем этапе рассматривается стационарная задача с постоянным значением температуры. При таком подходе связь между ячейками сохраняется только в виде зависимости скорости фотопроцессов, через их поглощение при распространении через среду.

В данной работе в качестве опорных параметров мы взяли параметры экзопланеты WASP-107 b, с равновесной температурой 750 K. Концентрация кислорода варьировалась с целью изучения данного эффекта.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-72-10060.

1. Shaikhislamov I. F. и др. 3D Aeronomy modelling of close-in exoplanets // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Т. 481, № 4. С. 5315–5323.
2. Heays A. N., Bosman A. D., Dishoeck E. F. van. Photodissociation and photoionisation of atoms and molecules of astrophysical interest // A&A. 2017. Т. 602. С. A105.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ СВЕРХГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА KELT-20 b

Шарипов С.С., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, stas.sharipov@mail.ru

KELT-20 b – один из немногих представителей экзопланет, обращающихся вокруг звезд А-класса, главная особенность подобных планет состоит в механизме нагрева атмосферы. В привычном сценарии тепловой баланс горячих экзопланет формируется преимущественно жестким XUV излучением ($\lambda < 91{,}2$ нм) родительской звезды, однако известно, что поток XUV излучения звезд А-класса крайне мал вследствие подавления внутренней конвекции. При этом планеты у таких звезд демонстрируют высокие значения равновесной температуры, что говорит об ином механизме нагрева верхней атмосферы. Недавние исследования самой горячей из известных экзопланет – KELT-9 b – показали [1], что нагрев атмосферы может быть связан с фотоионизацией возбужденных состояний атомов водорода под действием вакуумного ультрафиолетового излучения ($100 < \lambda < 300$ нм), которое преобладает у звезд А-класса. С другой стороны, некоторые авторы связывают нагрев с аномальной ролью ионов железа и магния [2]. На данный момент механизмы нагрева подобных атмосфер остаются слабоизученными и KELT-20 b перспективный кандидат для их выявления в силу наличия большого количества качественных наблюдательных данных.

Планета KELT-20 b имеет высокую равновесную температуру около 2200 К, массу 3,5 масс Юпитера и радиус 1,8 радиусов Юпитера. Она вращается вокруг звезды класса A2V на расстоянии 0,0542 а.е. Звезда имеет массу в 2 солнечных массы, радиус 1,5 радиуса Солнца и температуру около 9000 К. При помощи различных инструментов было обнаружено поглощение в линиях Hα-Hδ серии Бальмера, линиях дуплета натрия 588,9/589,6 нм, иона кальция 854,2 нм и иона железа 501,8 нм [3]. Подобные измерения позволяют с хорошей достоверностью оценить параметры верхней атмосферы экзопланеты.

Для моделирования мы использовали комбинацию многожидкостной 3D самосогласованной МГД модели и Монте-Карло модели переноса Лайман-альфа фотонов по атмосфере. Нами были проанализированы различные условия в атмосфере планеты: рассматривались широкие диапазоны содержания тяжелых элементов, а также параметры звездного излучения, такие как XUV, VUV поток и поток в линии Лайман-альфа 121,6 нм. В рассмотрение включались различные кинетические процессы. Помимо рассмотрения основного и возбужденного состояний атома водорода, мы включали кинетику более верхних уровней до $n = 5$, поскольку, как ожидается для сверхгорячих планет, они играют важную роль в заселении $2l$ уровня, что существенно для правильной интерпретации наблюдаемого поглощения в серии Бальмера. В результате работы было установлено, что металличность атмосферы значительно ниже солнечной: [Fe/H] = -3, а величины потоков излучения находятся в диапазоне: $F_{XUV} = 5 \div 10$ и $F_{VUV} = 3 \div 4 \times 10^7$ эрг/см^2/с на расстоянии 1 а.е.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 23-72-10060.

1. Shaikhislamov I. F. и др. Aeronomy of the upper atmosphere of KELT-9 b // Astron. Astrophys. 2025. Т. 696. С. A211.

2. Fossati L. и др. Non-local thermodynamic equilibrium effects determine the upper atmospheric temperature structure of the ultra-hot Jupiter KELT-9b // A&A. EDP Sciences, 2021. Т. 653. С. A52.

3. Casasayas-Barris N. и др. Atmospheric characterization of the ultra-hot Jupiter MASCARA-2b/KELT-20b: Detection of CaII, FeII, NaI, and the Balmer series of H (H α , H β , and H γ) with high-dispersion transit spectroscopy // A&A. 2019. Т. 628. С. A9.