XXX Всероссийская ежегодная конференция
по физике Солнца
"Солнечная и солнечно-земная физика – 2026"
(ССЗФ-2026)

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

28 сентября – 2 октября 2026

Москва, Троицк, ИЗМИРАН

ИЗМИРАН

СОЛНЕЧНАЯ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА
ИЗМИРАН-2026

Оглавление

Приглашенные доклады 8

Гелиосейсмологическое описание солнечной конвекции и течений глобального масштаба 9

Проблемные аспекты влияния солнечной активности на магнитосферу, ионосферу и атмосферу 11

Научные задачи проекта «АРКА» 13

Солнечная активность и климат Земли – современное состояние проблемы 14

Настоящие и будущие наземные сети телескопов для исследований Солнца и прогноза космической погоды 15

Солнечное динамо на фоне трендов современной науки 16

Особенности диссипации электрических токов в частично ионизованной атмосфере Солнца 17

Национальный гелиогеофизический комплекс Российской Академии Наук: текущее состояние реализации проекта 19

Секция 1. Цикл солнечной активности: наблюдательный и теоретический аспекты 20

Численное исследование магнитных кос 21

Долговременные наблюдения полярного магнитного поля Солнца на магнитографе СТОП 22

Формирование и циклические вариации структуры глобального магнитного поля Солнца 23

Изменения широтного распределения фотосферного магнитного поля в зависимости от величины напряженности 25

Интегральный закон Шпёрера и аппроксимация формы «бабочки» Маундера 27

Широтно-временная зависимость удельного потока регулярных и нерегулярных активных областей в 23-м и 24-м циклах 28

Описание формы 11-летнего солнечного цикла как задача автокодирования 30

Флуктуации спиральности и рост магнитного поля 32

Модель динамо изменчивости солнечных циклов и проблема прогноза амплитуды циклов 33

Ключевой инвариант цикличности Солнца и его нарушение. Цикличность восстановлена 34

Вариации фотосферного магнитного поля Солнца по данным обсерватории Кит Пик 36

Широтно-временная динамика наблюдательных признаков средней спиральности в активных областях Солнца по данным космического аппарата SDO HMI в 24-25 циклах солнечной активности 38

Эволюция интегральной токовой спиральности в активных областях 39

Проверка правил Вальдмайера в различных режимах работы солнечного динамо Паркера 40

Колебания плазменного слоя в основании конвективной зоны Солнца 41

Валидация и оценка согласованности исторического полушарного каталога индексов солнечных пятен UBAI 42

Использование солнечного излучения фотоэлектрического диапазона на комплексе ИЗМИРАН в научных и прикладных исследованиях и проектах 44

Генеральный 150-летний каталог групп солнечных пятен на основе Гринвичского, Кисловодского и Дебреценского каталогов 46

Граничные условия с короной в модели солнечного динамо среднего поля 47

К вопросу оправдываемости прогноза 25 цикла солнечной активности, полученного методом спектрального анализа 48

$\Lambda\Omega$-динамо механизм в солнечных транспортных моделях 50

Непараметрическое описание формы 11-летних циклов 51

«Год без лета», максимум цикла VI и минимум Дальтона 53

24 цикл солнечной активности 54

Секция 2. Активные солнечные образования, процессы и явления 56

Современные тенденции к изучению мелкомасштабных процессов на Солнце: новые наблюдения, модели и результаты 57

Предвспышечные флуктуации излучения активных областей у "confined" и "eruptive" вспышек 59

Пространственная связь микроволнового излучения и магнитных жгутов в максимальной фазе мощных солнечных вспышек 60

Каталог исчезающих волокон по данным патрульных спектральных наблюдений Солнца 61

Температурная характеристика КД северной полярной области Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах радиоизлучения Солнца по данным наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопе РАТАН-600 62

Статистический анализ мощных вспышек 24 солнечного цикла по наблюдениям RSTN и GOES 63

Вспышечное микроволновое излучение и солнечные протоны 65

Влияние теплопроводности на формирование длиннопериодических колебаний в солнечной короне 67

Топологический механизм возникновения синхронных микровспышек 68

Методы определения границы тень-полутень в солнечных пятнах 70

Распределение числа солнечных вспышек разной мощности по фазам 24 цикла солнечной активности 71

Отклик корональной магнитной петли на испарение хромосферной плазмы 72

Проявления быстрых волновых пакетов в солнечных радиовсплесках 73

К расчету спектра солнечного протуберанца 74

Наблюдательные параметры как критерий выделения двух популяций корональных ярких точек 76

Глобальные комплексы активности и мощные рентгеновские вспышки 78

Спектральный анализ жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным Konus-Wind и SolO/STIX, наблюдавшихся за лимбом для одного из инструментов 79

О структуре течений в подфотосферной зоне в окрестностях активной области NOAA 11158 ...80

Сегментация магнитограмм солнечных пятен на основе нечетких мер 82

Динамика излучения солнечного радиовсплеска 23 июня 2025 году. Плазменный механизм излучения 84

Косые ударные волны в бесстолкновительной плазме солнечного ветра 85

Влияние турбулентности на распространение ускоренных электронов в солнечной вспышке 16 февраля 2014 г. 87

Численное моделирование неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в солнечной атмосфере 88

Наблюдение и теоретический расчет потоков излучения ярких областей в протуберанцах в линиях кальция, гелия и водорода на разных расстояниях от лимба Солнца 90

Свойства турбулентности в окрестностях униполярных пятен разной скорости затухания 92

Пространственная периодизация энерговыделения в крупных солнечных вспышках 94

Формируются ли анти-хейловские активные области на Солнце отдельным механизмом генерации магнитного поля? 95

Волноводное распространение залимбового радиовсплеска в возмущенной солнечной короне 96

Анизотропия жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по наблюдениям экспериментов KONUS-WIND и SOLO/STIX 97

Формула коплощади для магнитограммы солнечного пятна 98

Проблема свечения яркой линии гелия в протуберанцах 99

Нерадиальность перемещения источника активной области Солнца 100

Веб-страница "Солнце на дату": агрегатор солнечных наблюдений, созданный с помощью генеративного ИИ 102

Роль корональной вспышечной плазмы в генерации суб-терагерцового излучения вспышки SOL2022-05-04T08:45 104

Изменения знака лучевой скорости в светлых мостах солнечных пятен группы AR 11944: сигнатуры вращающегося магнитного жгута 105

Времена всплытия на поверхность крупных и мелких групп солнечных пятен 107

Проблема определения положения солнечной вспышки по результатам МГД моделирования над активной областью 108

Исследование параметров плазмы в месте первичного энерговыделения в слабых солнечных вспышках по наблюдениям в микроволновом диапазоне 110

Структура и динамика синхронных микровспышек по наблюдениям на спутнике HINODE 111

Эффект Бирмана по наблюдениям оптического и ультрафиолетового излучения факельных образований на Солнце 113

Сравнение ручной и автоматической обработки наблюдений солнечных радиовсплесков на длине волны 4,9 см и их сопоставление с данными GOES 115

Изотермическая модель вспышечной магнитной трубки в верхней хромосфере Солнца 116

Активность в октябре 2024 и январе 2026: выбор сценария развития 25-го солнечного цикла 117

Поиск условий формирования узкополосных гирорезонансных особенностей в радиоизлучении активных областей на Солнце 119

Мгновенная скорость нарастания магнитного потока активных областей типа униполярное пятно плюс мультиполярная структура 120

Влияние теплопроводности на медленные магнитоакустические волны в солнечной короне 122

Корональные дыры по данным SOHO/EIT195 в период 1996 – 2026 123

Полярные и низкоширотные факелы, наблюдаемые в белом свете, в 23 – 25 циклах активности 124

Ускорение квазитепловых электронов фоновой плазмы вспышечной петли турбулентностью вистлеров 125

Влияние особенностей структуры магнитных жгутов на условия их равновесия в солнечной короне и эруптивную неустойчивость. Эрупция кольцевого волокна 127

Особенности динамики среднесуточных величин параметров вертикального электрического тока и суточных индексов вспышечной продуктивности активных областей 128

Эффекта Нойперта и временные задержки максимума излучения в мягком рентгене и Hα 130

Эрупции плазмы из корональных ярких точек: мини-волокна и мини-КВМ 131

Уникальные данные о сверхтонкой структуре радиоизлучения солнечных всплесков 133

Статистические свойства субсекундных импульсов в солнечных вспышках по данным BATSE и NORP 135

Эволюция магнитных жгутов в активной области на Солнце во время вспышки 136

Секция 3. Гелиосейсмология 138

Особенности возбуждения и динамики sloshing-колебаний, видимых в горячих корональных петлях 139

Быстрые МГД волны в асимметричном солнечном магнитном слое 140

Секция 4. Солнечный ветер и космическая погода 141

Методика мониторинга космической погоды в реальном времени с помощью системы наземных мюонных и нейтронных детекторов 142

Нейтронные сцинтилляционные детекторы как инструмент мониторинга вариаций космических лучей 143

Геоэффективный параметр электромагнитной добротности замагниченного потока солнечного ветра 145

Границы спокойных, слабо возмущенных и сильно возмущенных условий в солнечном ветре и ионосфере 146

Влияние солнечной активности на потоки ГКЛ в первой половине 2026 года по данным установок Экспериментального комплекса НЕВОД 148

Соотношение температур альфа частиц и протонов в солнечном ветре в предположении квазинейтральности плазмы 149

Сравнение наблюдаемых и теоретически рассчитанных амплитуд Форбуш-понижений для событий, связанных с приходом ударной волны 150

Параметризация локального межзвездного спектра ядер галактических космических лучей с использованием модели модуляции ЧЖУ 152

О детальной информации эксперимента регулярного баллонного мониторинга космических лучей 154

Трёхмерная гибридная модель приполярной лунной аномалии с реалистичной конфигурацией магнитного поля 155

Определение энергии атмосферного обрезания космических лучей в контексте мониторинга проявлений солнечной активности.....157

Динамика спектральных характеристик турбулентности солнечного ветра и галактических космических лучей во время мощного гелиогеофизического события 19 января 2026 года 159

SEP и MS 7-11 октября 2024 года. Аналогия с событиями 10-14 ноября 2025.....161

Моделирование распространения протонов и антипротонов в гелиосферном магнитном поле 163

Секция 5. Космический климат и климат Земли..... 164

Вариации состояния высокоширотной атмосферы северного полушария в связи с наиболее мощными солнечными протонными событиями 23-го солнечного цикла.....165

Что влияет на климат верхней атмосферы?.....166

Особенности сезонной перестройки средней атмосферы в эпохи различной солнечной активности 168

Вариации климата Земли и солнечной активности после максимума последнего оледенения на различных временных шкалах: возможная связь.....169

Отклик приземного атмосферного давления в Якутске и Бухте Тикси на приход прямых быстрых межпланетных ударных волн.....170

Атмосферная турбулентная термодиффузия как биологический и климатический фактор 172

Секция 6. Геоэффективные проявления солнечной активности..... 174

Влияние корональных дыр на геоэффективные события 25-го солнечного цикла 175

Экстремальные всплески геомагнитного AU-индекса как эффект солнечной активности.....177

Динамические эффекты в распределении космических лучей перед началом геомагнитных бурь в 2026 году 178

Влияние ультрафиолетового и рентгеновского излучений от солнечных вспышек на полное электронное содержание 180

Возможные причины появления Δ^{14}C-всплесков в атмосфере Земли 181

Статистический эффект 11-летних циклов солнечной активности в долговременных вариациях действующей высоты слоя E-спорадического ионосферы в средних широтах 183

Модель пенумбры протонов космических лучей в околоземном пространстве.....184

Динамика дифференциальных спектров протонов во время СПС и оценка скорости ионизации высокоширотной атмосферы Земли 186

Потенциальная опасность возникновения экстремальных геоиндуцированных токов при повторении экстремальных магнитных бурь 1859 и 1989 гг. 187

Восточные вспышки как источник солнечных протонов, штормовых частиц и форбуш-понижений 188

Особенности пространственной морфологии геомагнитного эффекта солнечной вспышки.....190

Анализ вклада параметров эруптивных процессов в прогноз профиля солнечного протонного события.....192

Влияние рентгеновского излучения солнечной вспышки X2.2 20 апреля 2022 г. на распространение СДВ.....193

Сильные магнитные бури и сейсмическая активность Земли: сравнительный анализ данных наблюдений....194
Анализ повышений скорости счёта в нейтронных мониторах....195
Влияние геомагнитной активности на дорожно-транспортную ситуацию в городе....197
Геомагнитная активность в эпизодических событиях и при длительных наблюдениях....198
Связь возрастаний высокоэнергичных электронов с разными типами межпланетных возмущений....199
Секция 7. Солнечно-звёздные аналогии, звёздные циклы активности 200
Характеристики пятен на поверхности красного карлика V639 HER....201
Об ультрафиолетовом излучении вспыхивающих М-карликов....203
Исследование периодов вращения звезд в скоплениях Плеяды, Гиады и Blanco 1 по данным TESS....205
Циклы активности звёзд с супервспышками из архива миссии Kepler....207
Спектральная активность запятненного гиганта типа FK Com HD 199178 в 2024-2025 гг.....209
Низкомодовые модели динамо Паркера....210
Определение периодов вращения по непериодическим кривым блеска солнцеподобных звёзд 211
Нециклическая звездная магнитная активность?....212
Почти критическое динамо звезд подобных Солнцу....213

Приглашенные доклады

Гелиосейсмологическое описание солнечной конвекции и течений глобального масштаба

Гетлинг А.В.[1], **Косовичев А.Г.**[2]

[1]*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

[2]*Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США*

Исследование глобальных и локальных течений в подфотосферной зоне Солнца – задача первостепенной значимости для понимания механизмов солнечной активности. Методы гелиосейсмологии, применяемые в последние десятилетия к изучению полей скорости, сыграли поистине революционную роль в гелиофизике, позволив «заглянуть» под солнечную поверхность и составить представление о структуре и динамике течений солнечной плазмы. Благодаря этому достигнут значительный прогресс в исследовании течений как глобального, так и локального масштаба [1].

Методы гелиосейсмологии времен и расстояний (time–distance helioseismology), основанные на измерении времен пробега акустических волн, позволили определить скорости в значительной части конвективной зоны по доплеровскому сигналу со всего диска Солнца. При этом локальная гелиосейсмология, в отличие от глобальной, позволяет получить более детальную картину, без заданной строгой симметрии относительно экватора.

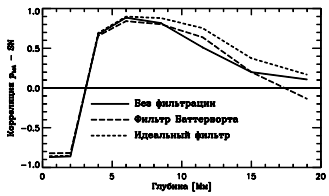


Рис. 1. Корреляция между полной спектральной мощностью конвекции и числом солнечных пятен.

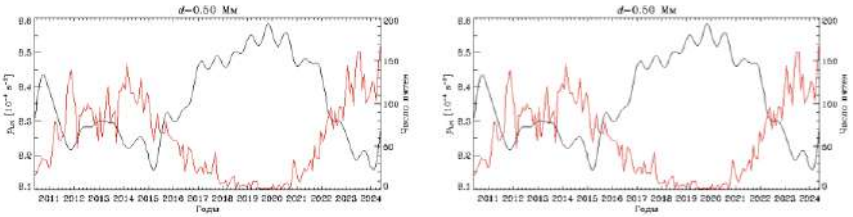


Рис. 2. Вариации полной спектральной мощности конвекции (черная кривая) и числа солнечных пятен (красная кривая) в 24-м и 25-м циклах активности.

В частности, удалось исследовать изменение пространственного спектра конвекции с глубиной и выявить связь спектральной мощности с уровнем солнечной активности [2, 3] (рис. 1, 2). Оказалось, что на глубинах < 3 Мм интегральная мощность антикоррелирует с числом солнечных пятен, тогда как глубже корреляция положительна. Найдены свидетельства существования гигантских конвективных структур, ранее известных по наблюдениям поверхности Солнца [4–6], – меридионально вытянутой, бананообразной формы с масштабом, измеряемым сотнями мегаметров [7, 3]. Масштаб супергрануляции стабилен, масштаб гигантских ячеек варьирует с числом пятен, увеличиваясь с усилением солнечной активности [8].

Исследование дифференциального вращения в период 2010–2024 гг. (почти полтора солнечного цикла) [7, 3] позволило получить картину крутильных колебаний Солнца в расширенном цикле активности на

различных глубинах (рис. 3). В годы низкой солнечной активности дифференциальное вращение наиболее симметрично относительно экватора.

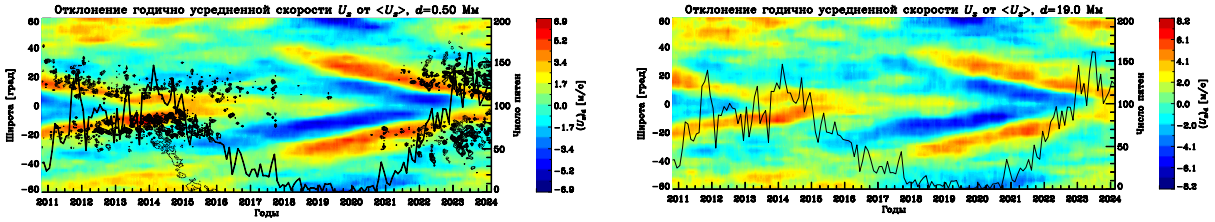


Рис. 3. Диаграммы «время – широта» для средней азимутальной скорости на глубинах 0.5 и 19 Мм, иллюстрирующие дифференциальное вращение и крутильные колебания Солнца. Черная кривая показывает изменение среднемесячного числа солнечных пятен. Черные контуры на левой диаграмме – среднемесячные значения вертикальной компоненты магнитного поля.

Меридиональная циркуляция – явление, неразрывно связанное с дифференциальным вращением, – обнаруживает черты расширенного солнечного цикла [7, 3]. В эпоху максимума активности на меридиональное течение накладывается его высшая гармоника — вторичное течение, в подповерхностных слоях направленное к экватору и сходящееся к широтам формирования активных областей (рис. 4). Как и дифференциальное вращение, картина меридионального течения ближе всего к симметричной в период минимума активности.

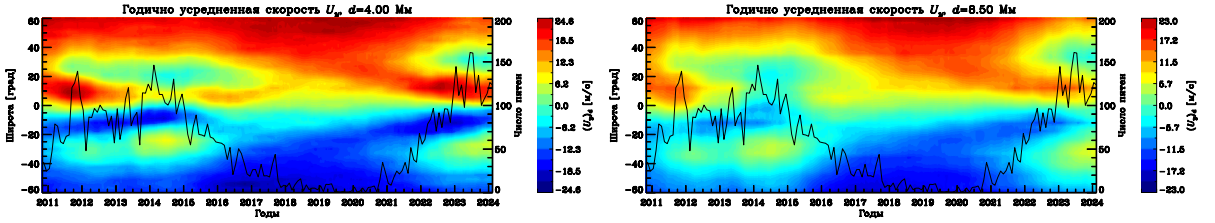


Рис. 4. Диаграммы «время – широта» для скорости меридионального течения на глубинах 4 и 8.5 Мм. Черная кривая показывает изменение среднемесячного числа солнечных пятен.

Литература

1. Kosovichev A.G. et al. Structure and Dynamics of the Sun's Interior Revealed by the Helioseismic and Magnetic Imager// Solar Phys. V. 300. I. 5. P. 70. 2025.
2. Getling A.V., Kosovichev A.G. Spatial scales and time variation of solar subsurface convection. // Astrophys. J. V. 937. I. 1. P. 41 (12pp). 2022.
3. Гетлинг А.В., Косовичев А.Г. Вариации глобальных и локальных течений в конвективной зоне Солнца в 24-м и 25-м циклах активности. // Астрон. ж. Т. 102. № 4. С. 341–354. 2025.
4. Beck J.G. et al. Long-lived giant cells detected at the surface of the Sun. Nature. V. 394. No. 6694. Pp. 653–655. 1998.
5. Hathaway D.H., Upton L., Colegrove O. Giant convection cells found on the Sun // Science. V. 342. Pp. 1217–1219. 2013.
6. Hathaway D.H., Upton L.A. Hydrodynamic properties of the Sun’s giant cellular flows. // Astrophys. J. V. 908. I. 2. P. 160 (11pp). 2021.
7. Getling A.V., Kosovichev A.G., Zhao J. Evolution of subsurface zonal and meridional flows in solar cycle 24 from helioseismological data // Astrophys. J. Letters. V. 908. I. 2. Id. L50. 2021.
8. Getling A.V., Kosovichev A.G. Activity-cycle variations of convection scales in subsurface layers of the Sun // Solar Physics. V. 300. I. 9. Id. 130. 2025.

Проблемные аспекты влияния солнечной активности на магнитосферу, ионосферу и атмосферу

Дмитриев А.В.
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия
dalexav@mail.ru

Исследования влияния солнечной активности на систему магнитосфера-ионосфера-атмосфера в течение многих десятилетий позволили сформулировать базовые представления в этой области. Однако бурное развитие наземной и космической инфраструктуры требует более точных знаний и моделей в физике солнечно-земных связей. Последние геофизические и космические эксперименты позволили обнаружить новые явления, которые требуют всесторонних исследований. В частности, подробное измерение спектра солнечных вспышек позволило обнаружить длительные (часы) возрастания в жестком ультрафиолете, которые следуют за импульсной фазой некоторых вспышек, но при этом они не видны в стандартном рентгеновском диапазоне. Интегральный эффект длительного возрастания существенно превышает импульсный эффект, что проявляется в увеличении ионизации ионосферы и дополнительном разогреве атмосферы в течение нескольких часов после вспышки. В свою очередь, разогрев и раздутие атмосферы на низких и средних широтах приводит к понижению потоков околоземной радиации и усиливает торможение низковысотных КА. Солнечные вспышки могут сопровождаться генерацией солнечных космических лучей (СКЛ), влияние которых на ионосферу и атмосферу определяется широтой обрезания. Во время магнитных бурь широта обрезания уменьшается, в результате чего на средних широтах сильно возмущаются нижняя ионосфера, а также верхняя и средняя атмосфера. Кроме того, СКЛ могут проникать вглубь возмущенной магнитосферы и т.о. пополнять радиационный пояс Земли (РПЗ). Эруптивные события на Солнце сопровождаются корональными выбросами масс (КВМ), которые являются причиной транзиентных магнитных бурь. Приход быстрых КВМ вызывает аномальную компрессию магнитосферы, что приводит к сильным неадиабатическим потерям частиц внешнего РПЗ. Резкие и сильные скачки динамического давления солнечного ветра от эруптивных филаментов и/или в области межпланетного шиса перед КВМ вызывают генерацию индуцированных электрических полей в магнитофере, которые приводят к аномальному транспорту энергичных частиц в РПЗ и плазмы в ионосфере. В частности, электроны из внутреннего РПЗ могут быстро перемещаться на низкие высоты и вызывать дополнительную ионизацию слоев E и F ионосферы на низких широтах. На фазе восстановления магнитных бурь часто наблюдаются длительные интервалы квазирадиальной ориентации межпланетного магнитного поля, что является причиной аномального расширения магнитосферы и способствует сильному увеличению потоков

электронов во внешнем РПЗ. Во время магнитных бурь экваториальная граница авроральных высыпаний может опускаться глубоко на средние широты, вызывая возмущения нижней ионосферы и генерацию геомагнитно-индуцированных токов в наиболее урбанизированных регионах России, что требует уточнения модели буревой динамики аврорального овала. Таким образом, для более точного определения влияния солнечной активности на систему магнитосфера-ионосфера-атмосфера требуются космический мониторинг солнечного вспышечного излучения от жесткого ультрафиолета до жесткого рентгена, условий в термосфере, ионосфре и околоземной космической радиации в диапазоне энергий от десятков эВ до сотен МэВ, а также расширение сети среднеширотных геофизических станций.

Научные задачи проекта «АРКА»

Кузнецов В.Д.[1], Рудницкий А.Г.[2], Абунин А.А.[1], Андреевский С.Е.[1], Белькович И.В.[2], Коротков М.Г.[3], Лихачев С.Ф.[2], Медведев А.В.[4], Олемской С.В.[4], Петрукович А.А.[5], Писанко Ю.В.[6], Родькин Д.Г.[2], Рязанцева М.О.[5], Тюльбашев С.А.[7], Филиппов М.В.[2], Шатохин А.Н.[2]

[1]ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия
[2]ФИАН, Москва, Россия
[3]НИЯУ МИФИ, Москва, Россия
[4]ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия
[5]ИКИ РАН, Москва, Россия
[6]ИПГ, Москва, Россия
[7]ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, Россия
kvd@izmiran.ru, arud@asc.rssi.ru

Дается описание космического проекта «АРКА», предназначенного для исследования солнечной атмосферы и источников космической погоды. Комплекс научной аппаратуры (КНА), в котором ключевыми приборами являются ЭУФ-телескопы высокого пространственного разрешения Т1 и Т2, направлен на решение актуальных задач солнечной физики: исследование тонкой структуры и динамики солнечной атмосферы; изучение механизмов нагрева солнечной короны; выявление предвестников и триггерных механизмов солнечных вспышек и корональных выбросов массы (КВМ); изучение характеристик квазистационарных структур и транзиентных явлений, включая активные области, корональные дыры, волокна, вспышки и КВМ, и их связи с космической погодой; исследование механизмов ускорения частиц в солнечных вспышках и их распространения в солнечной атмосфере и гелиосфере; изучение природы и механизмов терагерцового излучения, а также нетепловых плазменных процессов по данным спорадического радиоизлучения.

Рабочая орбита космического аппарата будет находиться в окрестности точки либрации L1 системы «Солнце-Земля», что позволит проводить длительные практически непрерывные наблюдения Солнца. В составе КНА предусмотрен отделяемый автономный измерительный модуль (ОАИМ) с приборным комплексом «СОВЕТ» для совместных локальных измерений межпланетного магнитного поля, плазмы солнечного ветра и потоков энергичных частиц. Получаемые данные будут использоваться для исследования межпланетных возмущений и развития методов краткосрочного прогноза космической погоды.

Проект входит в федеральный проект «Космическая наука» национального проекта «Развитие космической деятельности Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». Научная программа проекта и состав КНА формируются при участии ФИАН, ИКИ РАН, ИЗМИРАН и НИЯУ МИФИ при головной роли ФИАН.

Солнечная активность и климат Земли – современное состояние проблемы

Огурцов М.Г.[1]
[1]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*
maxim.ogurtsov@mail.ioffte.ru

Приведены имеющиеся на сегодняшний день свидетельства влияния различных параметров солнечной активности (СА) на климатические процессы на различных временных шкалах. Рассмотрены возможные физические механизмы солнечно-климатической связи, включая: (а) прямое воздействие вариаций полной солнечной радиации; (б) ион-индуцированную нуклеацию под воздействием модулируемых СА ионизирующих излучений; (в) различные «электрические» механизмы. Произведена оценка возможного вклада изменений полной солнечной радиации в глобальное потепление последних 120 лет. Показано, что в климате Земли присутствуют вариации с периодами близкими к периодам солнечных циклов, но при этом имеющие естественно-природный характер (собственные колебания климатической системы, вариации активности вулканов) и не связанные с СА. Такие периодичности могут существенно искажать солнечный сигнал и затруднять его выявление. Предложены направления дальнейших исследований.

Настоящие и будущие наземные сети телескопов для исследований Солнца и прогноза космической погоды

Певцов А.А.[1]
[1]*Национальная Солнечная Обсерватория, Боулдер, Колорадо, США*
apevtsov@nso.edu

Проект GONG — это глобальная сеть из 6 роботизированных телескопов, обеспечивающая непрерывные наблюдения продольного магнитного поля, доплеровских скоростей, и изображений Солнца в белом свете и линии H-альфа [1]. Данные GONG широко используются для исследований в области гелиосейсмологии, солнечной вспышечной активности, эволюции магнитных полей, моделирования солнечной короны и солнечного ветра, а также для прогноза космической погоды. Наблюдения ведутся с 1995 года, и инструментальная база требует обновления. В Октябре 2025 года национальный научный фонд США (NSF) финансировал разработку следующего поколения наземной сети для наблюдения Солнца (ngGONG). ngGONG заменит устаревший GONG и существенно расширит его возможности, включая векторные наблюдения магнитных полей и доплеровских скоростей в фотосфере и хромосфере, изображения Солнца в различных спектральных диапазонах, наблюдения Солнца как звезды. Некоторые станции будут оснащены коронографами. Аналогичная концепция глобальной сети солнечных инструментов, известная как SPRING (Solar Physics Research Integrated Network Group), была разработана в рамках проекта SOLARNET в Европейском Союзе [2]. В докладе будет представлен статус существующих и будущих наземных сетей для исследований Солнца и оперативного прогнозирования космической погоды, требования к таким наблюдениям и применение данных для моделирования событий, связанных с космической погодой.

Литература

1. Jain, K., Harvey, J.W., Hill, F., Komm, R.W., Leibacher, J.W., Petrie, G.J.D., Pevtsov, A.A. and Tripathy, S.C.: 2026, “Three Decades of Global Oscillation Network Group (GONG): From Helioseismology to Magnetic Field and Space Weather (Invited Review)“, Solar Phys., 301, article number 50, DOI: 10.1007/s11207-026-02639-9
2. Gosain, S., Roth, M., Hill, F., Pevtsov, A., Pillet, V.-M., Thompson, M.J.: 2018, “Design of a next generation synoptic solar observing network: solar physics research integrated network group (SPRING),” Proc. SPIE 10702, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII, 107024H (6 July 2018); doi: 10.1117/12.2306555

Солнечное динамо на фоне трендов современной науки

Соколов Д.Д.[1,2]
[1]*Измиран, Троицк, Россия*
[2]*МГУ, Москва, Россия*
Sokoloff.dd@gmail.com

Современная теория солнечного динамо прошла длинный путь развития от первоначальной догадки Лармора в начале XX века до современного стояния, которое включает глубоко развитые численные модели, воспроизводящие многие черты реальной солнечной активности. Тем не менее, исследования продолжаются и возникают новые вопросы, на которые с той или иной степенью полноты исследователи стараются ответить. Во многом это связано с тем, что современная наука по-другому ставит вопросы, чем наука столетней давности. В докладе рассказывается об этом изменении взглядов на предмет исследований по теории солнечного динамо.

Особенности диссипации электрических токов в частично ионизованной атмосфере Солнца

Степанов А.В.
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

Представлены результаты исследования особенностей диссипации электрических токов, генерируемых фотосферной конвекцией: необычно быстрый нагрев предвестников вспышек, вспышечное энерговыделение в хромосфере, природа вспышек в белом свете, нагрев светлых мостиков в пятнах. Проиллюстрирована важная роль проводимости Каулинга в этих процессах. Установлена роль проводимости Педерсена в формировании поверхностных токов во вспышечных петлях.

Показано, что нагрев фотосферы и нижней хромосферы до температур порядка 104 К, при которых происходит генерация вспышечного континуума (вспышек в белом свете) вызван диссипацией кольцевых электрических токов [1], возникающих в полутени солнечных пятен или в основаниях магнитных петель при импульсном возрастании скорости фотосферной конвекции. Получен критерий нагрева фотосферной плазмы до температур, необходимых для нарастания континуума: $B_z V_r \geq 10^8$Гс см/с [2] Для B_z=103 Гс, нагрев возможен при скорости фотосферной конвекции $V_r \geq 10^5$см/с, что превышает типичную скорость конвекции. Увеличение скорости конвекции может быть связано с ростом градиента магнитного поля вблизи нейтральной линии при сближении магнитных областей с противоположной полярностью, либо с неустойчивостью Рэлея-Тейлора в основании магнитных трубок.

Предложен механизм формирования переходного слоя между хромосферой и короной, основанный на диссипации электрических токов в частично ионизованной плазме. Скорость джоулевой диссипации имеет резкий максимум на высоте около 2000 км и шириной от десятков до нескольких сотен километров, а высота максимума зависит от величины электрического тока [2]. Наличие максимума энерговыделения означает резкий рост температуры от хромосферных значений до корональных и формирование относительно тонкого переходного слоя между хромосферными и корональными температурами. Оценку характерной толщины Δz переходного слоя получаем из уравнения теплопроводности с учётом радиационных потерь. Толщина переходного слоя зависит от величины электрического тока, определяющего скорость энерговыделения, и изменяется в широких пределах. Например, при токах $(3-5)\times 1010$A $\Delta z \approx 23-230$ км.

В сложной структуре солнечных пятен особое место занимают яркие мостики (light bridges – LBs), появление которых - признак надвигающегося распада пятна. Возможная причина появления LB – это не всплывание нового магнитного потока Предложена модель LB в виде токонесущей

магнитной трубки, формирующейся конвекцией в полутени солнечного пятна, которая обеспечивает электрический ток, необходимую для нагрева плазмы и формирования LB [2]. Потери на оптическое излучение определяют величину тока > 10^{11}A, необходимую для нагрева LB до температуры (5300-6800 K). Представлены параметры плазмы LB и объяснена наблюдаемая двойная структура излучения LB.

Предложено, что необычно быстрый (~ 10 с) нагрев предвестников вспышек в мягком рентгеновском излучении до 10-15 МК вызван резким возрастанием продольного электрического тока в магнитных петлях при развитии в хромосферных основаниях вспышечных петель неустойчивости Рэлея–Тейлора. Если величина импульсного тока превышает 1011-1012 А, то темп джоулева нагрева плазмы опережает темп ионизации. В плазме предвестника сохраняется относительно большое количество нейтралов, $n_a/n = 10^{-5}$, значительно превышающее количество нейтралов в квазистационарной короне. Это обеспечивает быстрый нагрев предвестника за счет увеличения скорости диссипации тока при сопротивлении Каулинга [3]. В фазе нагрева не было указаний на нагрев хромосферы ускоренными электронами, что противоречит «стандартной» модели вспышек.

Показано, что учёт испаряющейся хромосферной плазмы во вспышечных петлях, приводит к новому эффекту - уменьшению стабилизирующей роли продольного тока, перетекающего на поверхность петель. Вследствие этого петли «раскрываются», выбрасывая плазму и высокоэнергичные частицы в корону и межпланетную среду. Уменьшение продольного тока внутри петли вызвано генерацией радиального электрического поля, возникающего при взаимодействии потока испаряющейся плазмы с азимутальным магнитным полем. Проводимость Педерсена вызывает генерацию радиальных токов в петле, уменьшая продольный ток, перетекающий на поверхность петли. Это приводит к нарушению равновесия петли из-за уменьшения силы Ампера и к разрушению магнитной петельной структуры.

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

Литература

1. Sen H.K., White M.L. Solar Phys. 23, 146 (1972).
2. Stepanov A.V., Zaitsev V.V., Kupriyanova E.G. Geomagn. Aeron. 64, 1203 (2024).
3. Зайцев В.В., Степанов А.В. Письма в Астрон. журн. 51, 38 (2025).

Национальный гелиогеофизический комплекс Российской Академии Наук: текущее состояние реализации проекта

Ясюкевич Ю.В.
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
yasukevich@iszf.irk.ru

Сегодня, когда количество спутников на околоземной орбите перевалило за пятнадцать тысяч и активно обсуждаются проекты по переносу на орбиту вычислительных мощностей и производств, космическая погода становится не абстрактным понятием, а набором факторов риска для критической инфраструктуры человечества. Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук (НГК РАН) создается как инфраструктура нового поколения, которая связывает наблюдения источника возмущений на Солнце с измерениями отклика околоземной среды. В состав комплекса входят Крупный солнечный телескоп (КСТ-3), Сибирский радиогелиограф (СРГ), Оптические инструменты, Нагревный стенд (ИКАР-АИ), Центр управления, Система радаров, включающая НР-МСТ-радар и сеть когерентных коротковолновых радаров (СЕКИРА), Мезосферно-стратосферный лидар. Комплекс планируется одновременно и как фундаментальная лаборатория для проверки физических моделей, и как практическая платформа для сервисов космической погоды. В настоящее время в эксплуатацию введены Сибирский радиогелиограф и Оптические инструменты. По остальным инструментам получено положительное заключение Главгосэкспертизы и начато строительство Центра управления. В настоящем докладе представлен обзор основных научных установок комплекса, задач, стоящих перед ним, текущего хода строительства, а также отдельных результатов на уже запущенных установках.

Секция 1.
Цикл солнечной активности: наблюдательный и теоретический аспекты

Численное исследование магнитных кос

Ахметьев П.М.[1], Смирнов А.Ю.[1]
[1]*ИЗМИРАН, Москва, Россия*
pmakhmet@mail.ru

В докладе получены новые численные результаты по исследованию топологии магнитных кос в контексте уравнения среднего поля. Такое исследование допускают некоторые модельные задачи в рамках теории Солнечного цикла.

Главный результат связан с новым явлением, который называется потерей внутренней симметрии магнитной косы. Это связано с тем, что инвариант, описывающий запутанность магнитных линий в магнитной косе с предписанным циклическим порядком магнитных линий косы, имеет фрактальный (отрицательный) Фурье-показатель, больший -1 (это означает фрактальность инварианта на более мелком масштабе по сравнению с масштабом по коэффициентам зацепления магнитных линий, который приводит к значению показателя -1). Масштаб становится большим, а показатель становится меньшим -1 при «забывании» внутренней циклической симметрии магнитной косы. Это имеет значение для исследований по магнитной турбулентности, поскольку меньший показатель характеризует более оптимальное распределение магнитной энергии по спектру и объяснит впоследствии, как мы полагаем, в том числе, новый тип динамо, связанный с учетом аксиона.

Мы представим численный эксперимент, объясняющий потерю внутренней симметрии магнитной косы, теоретический аспект представлен в [1]. Используются вычислительные трюки, о которых мы расскажем: внутренняя симметрия магнитной косы описывается при помощи полинома Конвея от двух переменных, а численный эксперимент, который мы проводим, происходит на основе вычисления классического полинома Конвея от одной переменной.

Литература

1. Akhmet’ev P. Topological meaning of the slope of the Kolmogorov spectrum of magnetic turbulence: M5-invariant of magnetic lines and its combinatorial formula// Journal of Geometry and Physics. 2022. No. 178. Article 104583.

Долговременные наблюдения полярного магнитного поля Солнца на магнитографе СТОП

Березин И.А.[1,2], Златов А.Г.[1,2]
[1]*ГАС ГАО РАН, Кисловодск, Россия*
[2]*КалмГУ, Элиста, Россия*
iberalex@ya.ru

Полярное магнитное поле является одной из важнейших характеристик крупномасштабного магнитного поля Солнца. Его величина вблизи минимума активности связана с амплитудой последующего солнечного цикла, поэтому длительные однородные ряды наблюдений полярного поля важны для исследования солнечной цикличности. Наиболее продолжительный ряд таких измерений был получен в Wilcox Solar Observatory (WSO), где регулярные наблюдения проводились с середины 1970-х гг. до начала 2026 г. Их прекращение ставит задачу продолжения этого ряда по данным других магнитографов.

С 2014 г. на Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН выполняются регулярные полнодисковые спектрополяриметрические наблюдения на магнитографе СТОП в линиях Fe I 630.15 и 630.25 нм. В работе исследована возможность их использования для продолжения ряда WSO. Полученные значения полярного поля сопоставлены с измерениями WSO, SDO/HMI, GONG и HSOS/SMAT. Данные СТОП хорошо воспроизводят долговременную эволюцию полярного поля WSO: коэффициенты корреляции составляют около 0.95 для северного и 0.93 для южного полюса. Близкое согласие получено также с HMI и GONG, тогда как ряд HSOS/SMAT оказался существенно менее однородным. Обе линии СТОП воспроизводят сходную временную эволюцию поля, но различаются по его абсолютной величине, что указывает на необходимость взаимной калибровки магнитографических измерений.

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

Формирование и циклические вариации структуры глобального магнитного поля Солнца

Биленко И.А.
Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга, Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
bilenko@sai.msu.ru

Циклические изменения глобального магнитного поля (ГМП) Солнца характеризуются наблюдаемыми вариациями крупномасштабных фотосферных магнитных полей. Они проявляются в поведении низкочастотных составляющих сферического гармонического разложения фотосферных магнитных полей Солнца в потенциальном приближении, а также в процессе смены знака магнитных полей на полюсах в максимумах солнечной активности в каждом цикле.

В данном исследовании проанализирована эволюция структуры ГМП Солнца в 21–25 циклах. Структура ГМП Солнца изменяется в ходе циклов солнечной активности. Эти изменения определяют и состояние межпланетного магнитного поля. В минимумах циклов доминирует зональная структура ГМП, а с ростом солнечной активности возрастает роль секторной структуры, которая доминирует на поздних фазах роста, в максимумах и на фазах спада циклов. Рассмотрены общие закономерности и различия формирования и циклических вариаций структуры ГМП в 21–25 циклах.

В целом зональная структура ГМП на протяжении ее доминирования в минимумах циклов, остается квазистабильной. Наблюдаются только кратковременные ее возмущения. На фазах роста солнечной активности в 21–25 циклах происходит переход от зональной к секторной структуре ГМП. В период формирования секторной структуры ГМП наблюдаются резкие неоднократные переходы от четырехсекторной к двухсекторной структуре ГМП, сопровождающиеся изменениями соотношения вклада осесимметричных и симметричных/антисимметричных по отношению к экватору гармоник.

На поздних фазах роста, в максимумах и на фазах начала спада солнечной активности формируется двухсекторная структура ГМП. Показано, что, в отличие от зональной, секторная структура ГМП не является устойчивой, а претерпевает резкие изменения, отражающиеся в широтно-долготном распределении положительных и отрицательных крупномасштабных магнитных полей. В периоды доминирования двухсекторной структуры ГМП, в максимумах и в начале спада солнечной активности в каждом цикле происходят реорганизации структуры ГМП, которые сопровождаются изменением соотношения осесимметричных и симметричных/антисимметричных относительно экватора гармоник, смещением зон доминирования крупномасштабных магнитных полей

положительной и отрицательной полярности по широте и долготе, что приводит к перераспределению магнитных полей разной полярности в структурах ГМП на противоположные. Также в максимумах циклов наблюдается трансформация ряда структур в отдельные замкнутые конфигурации одной полярности, когда нейтральная линия магнитного поля, являющаяся основанием гелиосферного токового слоя, формирует сложную топологию в рамках существующей двухсекторной структуры ГМП.

Обратный переход к зональной структуре ГМП происходит на фазах спада солнечной активности. При этом формируются четырехсекторные, дрейфующие по долготе структуры ГМП с пониженными значениями магнитного поля, наиболее ярко выраженные на фазе спада 23-го цикла.

Структурированность ГМП наиболее четко проявляется на низких широтах в пределах 30º в северном и южном полушариях. С ростом широты и в северном, и в южном полушариях наблюдается увеличение размера структур. Выше 50º широты структуры не формируются. Структуры магнитных полей положительной и отрицательной полярности формируются асимметрично относительно экватора в северном и южном полушариях Солнца. Время жизни и напряженность магнитного поля в структурах зависят от размера структуры и отличаются в разных циклах.

Изучение всех этих структурных вариаций ГМП имеет большое значение, поскольку переход от зональной к секторной структуре ГМП и обратно к зональной в ходе циклов солнечной активности, а также реорганизации структур на фазах роста, максимума и спада каждого цикла характеризуются резкими изменениями как общего уровня, так и параметров всех явлений солнечной активности.

Согласно полученным результатам, разномасштабные структуры ГМП однозначно связаны с колебаниями определенных периодов. Интенсивность колебаний коррелирует с уровнем магнитной активности в данном цикле. Ряд выявленных колебаний находится в хорошем соответствии с расчетными значениями периодов волн Россби. Детально обсуждается связь формирования структур ГМП с генерацией волн Россби в зоне тахоклина.

Изменения широтного распределения фотосферного магнитного поля в зависимости от величины напряженности

Вернова Е.С. [1], Тясто М.И. [1], Баранов Д.Г. [2]
[1] *СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*
d.baranov@bk.ru

Все проявления солнечной активности обусловлены величиной магнитного поля Солнца, распределением магнитного поля по поверхности Солнца и его эволюцией во времени. В работе исследовались свойства фотосферного магнитного поля на основе синоптических карт обсерватории NSO Kitt Peak за период 1978–2016 гг. Рассматривались модули магнитного поля.

Рассмотрены три группы величин фотосферных магнитных полей (слабые B < 5 Гс, средние 5 Гс < B < 50 Гс и сильные B > 50 Гс) для различных широтных интервалов. Были выбраны следующие широтные интервалы: 0°–5°, 5°–20°, 20°–40°, 40°–60° и 60°–80°.

Для различных величин магнитного поля для каждого широтного интервала был рассчитан магнитных поток, а также определена долготная асимметрия магнитного поля [1] в течение четырех солнечных циклов. Применение метода долготной асимметрии позволяет провести векторное сложение магнитных полей и получить результирующий вектор для каждого оборота, который характеризуется величиной вектора и фазовым углом. В векторной сумме магнитных полей резко снижается вклад от стохастической, приблизительно симметричной по долготе, активности.

При этом абсолютная величина результирующего вектора является количественной мерой долготной асимметрии магнитных полей. В данной работе мы изучаем величину результирующего вектора.

Проведенные исследования показали общее поведение потока магнитных полей для зоны пятен (широты: 0°–5°, 5°–20°, 20°–40°). Однако существует резкое различие для полей разной напряженности. Средние и сильные магнитные поля изменяются с 11-летним солнечным циклом одинаковым образом, достигая наибольших значений в годы максимума цикла. Магнитные потоки в целом хорошо коррелируют, но имеют и некоторые различия временного хода. В то же время поток слабых магнитных полей (меньше 5 Гс) изменяется в противофазе с потоками сильных и средних полей для широт зоны пятен (широты: 0°–5°, 5°–20°, 20°–40°), достигая наибольших значений в годы минимума солнечного цикла.

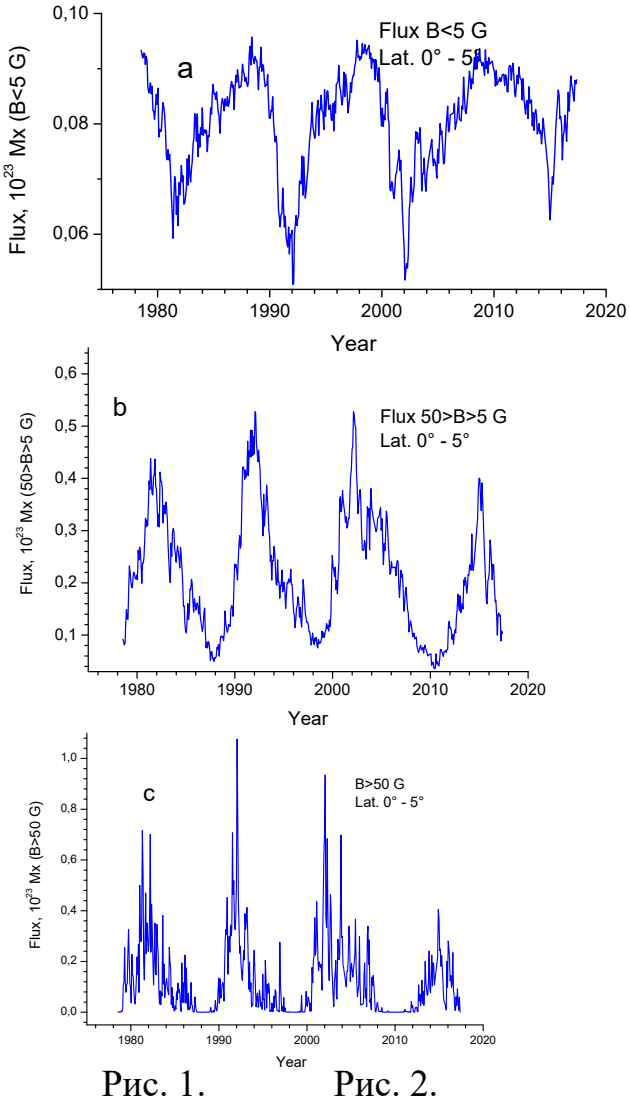


Рис. 1.

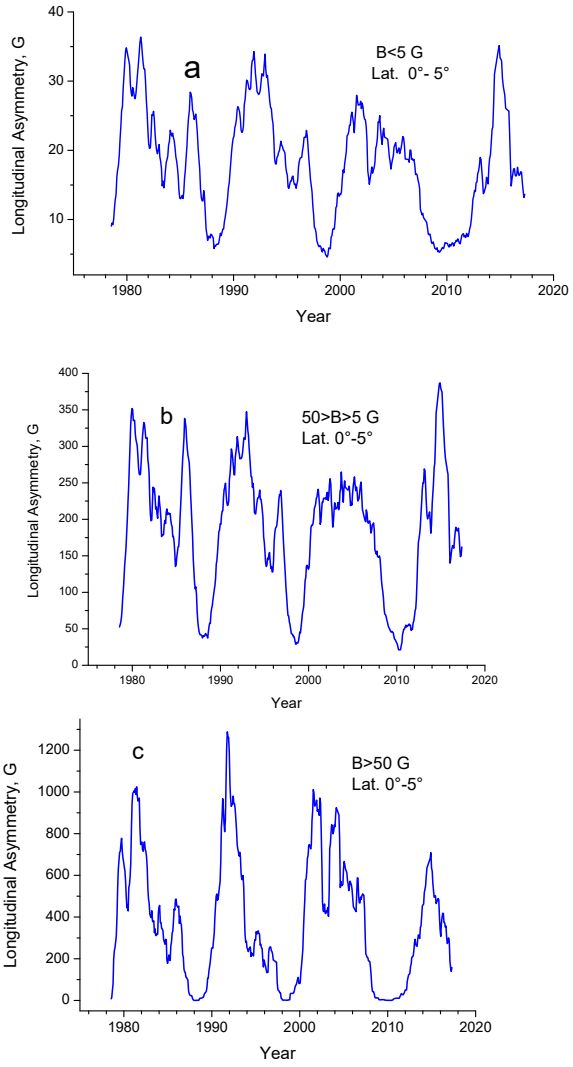


Рис. 2.

На рис. 1 приведен магнитный поток для широт 0°–5° для слабых (a), средних (b) и сильных (c) полей. Можно видеть хорошее согласие потоков средних и сильных полей с 11-летним солнечным циклом, в то время как слабые поля развиваются в противофазе с солнечным циклом. На рис. 2 показан временной ход величины долготной асимметрии для слабых (a), средних (b) и сильных (c) магнитных полей. Для долготной асимметрии все величины магнитных полей показывают связь с 11-летним циклом.

Для высоких широт (40°–60°) в целом сохраняется структура широт зоны пятен. В долготной асимметрии изменение с солнечным циклом видно лучше, чем в потоке. Для самых высоких широт (60°–80°) картина более сложная, особенно для сильных полей, где неожиданно наибольшие величины и потока, и долготной асимметрии видны в наиболее низком 24 цикле.

Литература

1. Vernova E.S., Tyasto M.I., Baranov D.G. Photospheric Magnetic Field of the Sun: Two Patterns of the Longitudinal Distribution // Sol. Phys. V. 245. 177. 2007.

Интегральный закон Шпёрера и аппроксимация формы «бабочки» Маундера

Волобуев Д.М.[1]
[1]*ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия*
dmitry.volobuev@mail.ru

Закон Шпёрера описывает экваториальную миграцию солнечной активности, которая традиционно моделируется как экспоненциальное убывание широты зоны генерации пятен со временем. Однако этот эмпирический подход не способен описать пороговую динамику в интервале одновременного существования солнечных циклов. Проанализировав пространственно-временное распределение числа групп солнечных пятен из расширенного каталога (1826–2015 гг.), мы выделили 36 отдельных «крыльев» диаграммы бабочки для вывода новой аналитической формулы. Мы демонстрируем, что широтный дрейф ядра зоны генерации пятен (SGZ) определяется кумулятивным всплывшим магнитным потоком текущего цикла в полушарии. Классическая экспоненциальная модель не может описать нелинейности на границах цикла, более точно дрейф аппроксимируется неполной Бета-функцией (Beta-CDF) с параметром формы $a \approx 0.25$. Такое значение подразумевает дробную сингулярность в эффективной силе, управляющей отрывом магнитных трубок ($F \sim \Phi^{-1.75}$). Дробный показатель степени может служить диагностическим маркером фазового перехода депиннинга (отрыва от «якоря») — пороговой магнитной плавучести, протекающей в условиях сильно экранированной турбулентной плазмы. Кроме того, мы устанавливаем, что широтный профиль SGZ подчиняется скошенному нормальному распределению ($\alpha > 0$), что отражает крутую экваториальную границу в присутствии некоторых пятен на экваторе, и размытый, диффузионный полюсный хвост. Объединяя интегральный Beta-CDF дрейф и скошенно-нормальный профиль, мы конструируем полностью аналитическую 2D-модель крыла бабочки, которая может служить новым статистическим инструментом для исследования динамики глубинного магнитного «якоря» и эффектов депиннинга в плазме тахоклина Солнца.

Широтно-временная зависимость удельного потока регулярных и нерегулярных активных областей в 23-м и 24-м циклах

Жукова А.В., Абраменко В.И.
Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт.Научный, Крым, Россия
anastasiya.v.zhukova@gmail.com

Широтно-временное распределение активных областей (АО) и их существенных характеристик является наблюдательной основой для построения моделей солнечного динамо (см., например, обзор [1]). Широтно-временные диаграммы, представляющие такое распределение графически, широко известны как бабочки Маундера [2]. Недавно было обнаружено, что разделение АО на подмножества регулярных (подчиняющихся эмпирическим закономерностям, установленным для групп солнечных пятен) и нерегулярных (нарушающих эти закономерности) групп в соответствии с магнито-морфологической классификацией (ММК) КрАО [3, 4] показывает для АО разных типов значительную разницу в циклических вариациях суммарного магнитного потока [5], удельного (среднего за оборот) магнитного потока [6], а также сильную северо-южную асимметрию [7].

Для изучения широтно-временного распределения суммарного и удельного потока регулярных и нерегулярных АО использованы данные о 3047 АО из каталога КрАО (https://sun.crao.ru/databases/catalog-mmc-ars) в период с мая 1996 года по декабрь 2021 года (23-й и 24-й циклы). Следуя подходу, описанному в работе [8], мы разделили площадь широтно-временной диаграммы на бины – интервалы, равные по времени (1 год) и по широте (7°). Анализ суммарного и удельного магнитного потока показал следующее.

Суммарный поток всей совокупности АО (общий поток) показывает наибольшие значения в бинах в центре диаграммы бабочек, что соответствует максимуму цикла и широтному интервалу преимущественного пятнообразования (10°–20°). В более сильном в 23-м цикле значения суммарного потока выше. Регулярные АО повторяют общую тенденцию, но демонстрируют меньшие значения суммарного потока. Усиление общего потока в центре диаграммы происходит преимущественно за счет нерегулярных АО. Поток этих групп достигает более высоких значений; диапазон его изменений шире. Одиночные пятна показывают наиболее слабый суммарный поток и равномерное распределение по площади диаграммы, резких перепадов между краями и центром диаграммы не наблюдается.

Удельный поток показывает иную картину широтно-временного распределения. Для всей совокупности АО диапазон изменений удельного потока неширок и составляет $(0–28)\cdot10^{21}$ Мкс. Выраженного усиления общего удельного потока в центре диаграммы (соответствующего появлению более крупных групп) не наблюдается. Удельный поток регулярных АО

изменяется приблизительно в тех же пределах и также демонстрирует достаточно равномерное заполнение площади диаграммы, что может свидетельствовать о стабильной и равномерной работе глобального динамо. Обращают на себя внимание единичные бины с сильным потоком по краям диаграммы. Для нерегулярных АО диапазон изменений удельного потока шире; от бина к бину поток изменяется резко, скачкообразно, бины с сильным потоком сконцентрированы ближе к центру диаграммы. Наиболее высокий удельный поток демонстрируют самые сложные нерегулярные группы. Резкие изменения потока нерегулярных групп могут свидетельствовать о неоднородности среды и о вмешательстве турбулентной составляющей динамо в процесс формирования таких АО. Удельный поток одиночных пятен показывает наиболее низкие значения. Как и для регулярных групп, бины с наиболее сильным потоком расположены по краям диаграммы, значения потока в центре – существенно ниже.

Данные тенденции позволяют сделать предположения об общей структуре турбулентности в конвективной зоне. Наиболее высокая перемежаемость среды имеет место, по-видимому, в зоне активного пятнообразования в максимуме цикла (центр диаграммы). Более однородная среда с низкой турбулентностью (края диаграммы) способствует длительному устойчивому развитию регулярных АО. На завершающем этапе их эволюции, после распада хвостовой части, в лидирующей части могут оставаться стабильные одиночные пятна.

Работа выполнена по гранту РНФ (проект 25-12-00026).

Литература

1. Charbonneau P., Sokoloff D. // Space Science Rev. 2023. V. 219. article id.35.
2. Maunder E.W. // MNRAS. 1904. V. 64. 746–761.
3. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomag. Aeron. 2018. V. 58. 1159.
4. Abramenko V.I. // MNRAS, 2021, V. 507, 3698.
5. Abramenko V.I., Suleymanova R.A., Zhukova A.V. // MNRAS, 2023, V. 518, 4746.
6. Zhukova A.V., Abramenko V.I. // Solar Phys., 2026, V. 301, id. 15
7. Zhukova A.V. // MNRAS, 2024, V. 532, 2032.
8. Zhang H. et al. // MNRAS, 2010, V. 402, L30.

Описание формы 11-летнего солнечного цикла как задача автокодирования

Иванов В.Г.[1]
[1] *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*
vgivanov@mail.ru

Частная, но важная задача, возникающая при исследовании цикличности солнечной активности — описание формы 11-летних циклов параметрическими семействами кривых (см., например, [1]). Такое описание позволяет уменьшить шумовую составляющую индекса и яснее увидеть связи между различными характеристиками цикла. Один из недостатков такого подхода связан с тем, что мы *a priori* выбираем класс кривых, а *затем* ищем параметры, при которых кривые этого класса наилучшим образом описывают форму наблюдаемых циклов. Однако существуют искусственные нейронные сети (ИНС) специальной архитектуры («автокодировщики», АК) (см., например, [2, 3]), которые могут решать такую задачу, не используя априорных предположений о форме циклов. АК может, в частности, состоять из полносвязных слоёв нейронов, при этом количество нейронов N во входном и выходном слоях одинаково, а один из внутренних состоит из Q нейронов, где $Q \ll N$ (рис. 1). АК обучается на примерах так, чтобы воспроизводить входные N-векторы на выходе. После этого левая часть обученного АК («кодировщик») преобразует N-вектора в Q-мерный вектор латентного пространства (снижение размерности сигнала), а правая («декодировщик») — воспроизводит по Q-вектору исходный сигнал.

Применяя этот подход к 11-летним циклам, мы используем в качестве обучающей выборку из векторов с $N = 14$, представляющие собой среднегодовые значения чисел Вольфа 2.0 [4] в циклах XVIII-XXI веков с –4 по 24 (если цикл короче 14 лет, вектор дополняется нулями справа). В качестве АК мы выбирали ИНС с пятью полносвязными скрытыми слоями и размерностью латентного пространства $Q = 2$. Обучение ИНС прекращалось, если функция потерь (MSE) на последних трёх валидационных циклах (22–24) начинала возрастать. Проводилось 100 сеансов обучения со случайными начальными весами, и выбиралась ИНС с минимальным значением MSE на валидационной подвыборке.

Соответствующие набору циклов латентные векторы p_1 и p_2 для полученной ИНС изображены на рис. 2. Вводя комплексный вектор $z = p_1 + i\,p_2$ и векторы A — амплитуды набора циклов и T_i — длины фаз их роста, получаем корреляции $r(A,|z|) = 0.95$, $r(T_i,\arg(z)) = -0.86$. Таким образом, связь с корреляцией $r(|z|,\arg(z)) = -0.66$ соответствует известному правилу Вальдмайера [5] с $r(A, T_i) = -0.78$ (красная кривая на рис. 2). Определённый смысл имеют и отдельно взятые векторы p_1 и p_2. На рис. 3 изображены формы циклов 1, 9, 13, 16 и 20 с $p_1 \approx 235$ (зелёная полоса на рис. 2) и циклов – 2, 6, 12, 13, 14 и 24 с $p_2 \approx 210$ (синяя полоса на рис. 2). Можно видеть, что

форма этих циклов качественно различается: в циклах первой группы кривые активности ведут себя схожим образом в начале фазы роста, а во второй — на фазе спада.

Таким образом, метод автокодирования пригоден для описания формы 11-летних циклов, а полученные латентные параметры имеют понятную интерпретацию. В докладе будут обсуждаться и некоторые другие возможные применения такого подхода.

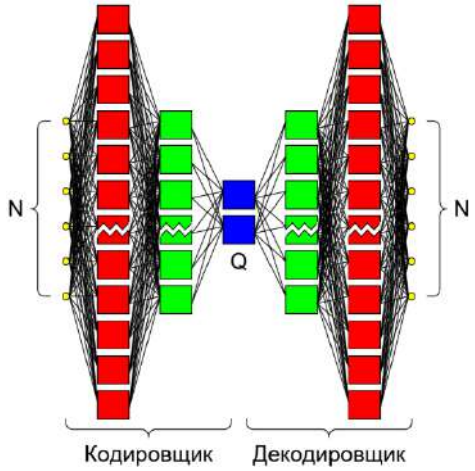


Рис. 1

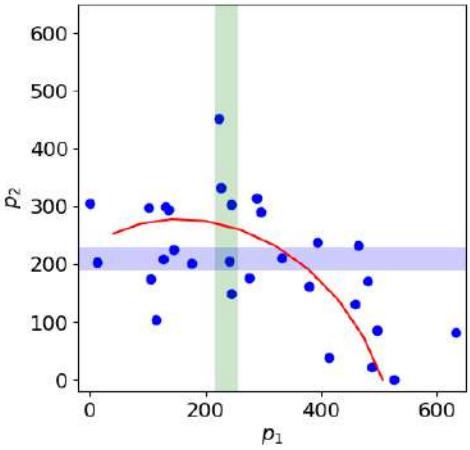


Рис. 2

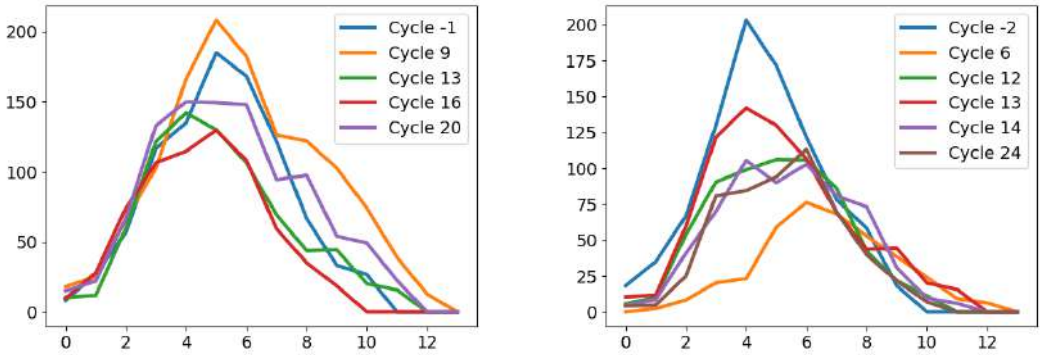


Рис. 3

Литература

1. Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин, Статистика пятнообразовательной деятельности., М.: Наука, 1986.
2. Y. Bengio Learning Deep Architectures for AI // Foundations and Trends in Machine Learning. 2009.
3. G. E. Hinton and R. R. Salakhutdinov. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks // Science, 2006, V. 313, Iss. 5786, P. 504–507.
4. F. Clette, L. Svalgaard, J. M. Vaquero, and E. W. Cliver. Revisiting the sunspot number: A 400-year perspective on the solar cycle // Space. Sci. Rev., 2014, V. 186, P. 35–103.
5. M. Waldmeier, Neue Eigenschaften der Sonnenfleckenkurve // Astron. Mitt. Eidgenössischen Sternwarte Zürich, 1935, V. 14, P. 105–136.

Флуктуации спиральности и рост магнитного поля

Илларионов Е.А.[1,2], Юшков Е.В.[1], Соколов Д.Д.[1,3]
[1]МГУ, Москва, Россия
[2]ИМСС, Пермь, Россия
[3]ИЗМИРАН, Москва, Россия
egor.illarionov.@math.msu.ru

Перемежаемость известна как необычное поведение случайных процессов, когда средние значения, энергия и другие статистические характеристики переносимых величин демонстрируют явный рост, в то время как каждая отдельная реализация со временем убывает. В работе рассматривается модель динамо среднего поля в однородной и изотропной турбулентной среде с флуктуирующей гидродинамической спиральностью и изучается поведения усредненных гармоник магнитного поля при фиксированных волновых числах. Явное вычисление показателя Ляпунова и скоростей роста первого и второго моментов магнитного поля на основе метода матричных экспонент показывает экспоненциальный рост статистических моментов, при том что само магнитное поле почти наверное затухает. Таким образом приходим к выводу, что в турбулентной среде с нулевой средней спиральностью растущая магнитная энергия возникает в силу редких реализаций со взрывными скоростями роста.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ-21-72-20067-П (Илларионов Е.А.).

Модель динамо изменчивости солнечных циклов и проблема прогноза амплитуды циклов

Кичатинов Л.Л.
Институт солнечно-земной физики СО РАН

Численная модель динамо изменчивости солнечных циклов согласуется с наблюдаемым распределением продолжительностей циклов, пространственно-временным распределением и амплитудой крупномасштабных магнитных полей. Модель также показывает события грандиозных минимумов и максимумов активности. Заложенной в модели причиной изменчивости являются флуктуации альфа-эффекта. Флуктуации случайны и непредсказуемы. С точки зрения предлагаемой модели, проблема прогноза солнечных циклов возникла из-за присутствия в механизме динамо непредсказуемых факторов. Тем не менее, расчеты большого (~10000) числа магнитных циклов показывают высокую корреляцию между амплитудой циклов и дипольным моментом полоидального поля в предшествующих им минимумах. Однако это именно корреляционная, а не функциональная зависимость, и некоторые из расчетных циклов существенно от нее отклоняются.

Подобное отклонение присутствует между наблюдаемой амплитудой 25-го солнечного цикла (в числах пятен) и предсказанием на основе упомянутой выше корреляции. Традиционное сглаживание за 13 месяцев оставляет нерегулярные изменения и множественность максимумов в числах пятен. Сглаживание гауссовым фильтром несколько уменьшает расхождение между прогнозом и наблюдаемой амплитудой текущего солнечного цикла. Показано, что подобное расхождение для площадей пятен имеет гораздо меньшую величину.

Ключевой инвариант цикличности Солнца и его нарушение. Цикличность восстановлена

Козлов В.И.[1], Козлов В.В.[2]
[1]*ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия,* cosmoprognoz42@mail.ru
[2]*Арктический Центр Космической Погоды, г. Москва, Россия*

По результатам более чем полувековых исследований космических лучей (КЛ) с высоким (5-мин.) разрешением [1], установлено, что солнечная активность в окрестности максимума солнечного цикла определяется солитонным цугом осцилляций инверсии общего магнитного поля Солнца, где базовым тактом «солнечных часов» - 11-летней цикличности выступают осцилляции с периодом T≈1,73 года [2]. Инвариант: произведение амплитуды цикла на квадрат его длительности есть величина постоянная, A*T^2=const – является маркером стабильного солитонного режима [3], с коэффициентом детерминации, на уровне значимости ≥90%.

Нарушение ключевого инварианта (11-летней цикличности), вызывает СБОИ системы, рис. 1. Локальные сбои (внутри-цикловое расщепление волнового пакета при сохранении 22-летнего «цикла Хейла») и ГЛОБАЛЬНЫЕ сбои (вековые минимумы Дальтона – циклы 5-7 и Глайсберга – 9, 12-14, с нарушением цикла Хейла) – деградация солитонной структуры, с … возможным переходом в режим хаотического аттрактора (минимум Маундера - цикл 4, см. рис. 1). Переходные циклы 8, 11, 18-19 и 21-22, являются индикаторами начала, своего рода, фазового перехода: «порядок-хаос», который завершается регистрацией сбоев цикличности Солнца (циклы 5-7, 9, 12-14, 20 и 24).

Начало СБОЯ солнечной активности, по сути - эффект «критической опалесценции» или «точка-бифуркации», проявляется в энтропии Шеннона-Вейбулла функции риска распределения Вейбулла - Гнеденко. Предложен Кросс-предиктор K фазового перехода «порядок-хаос», который завершается сбоем цикличности Солнца. Явно выраженная регулярность (низкая энтропия) и краткость «фазы роста» солнечного цикла являются характерным признаком Кросс–предиктора (рис. 2). Кросс-предиктор 8 и 11 циклов являются предвестниками ГЛОБАЛЬНОГО сбоя – «минимума Глайсберга». Кросс-предиктор 18-19 циклов – предвестники локального сбоя эпохи «Космической эры» - цикл 20. Предвестники современной эпохи – циклы 21-22. Текущий процесс фазового перехода (локальный сбой 11-летней цикличности - циклы 24-25) завершен, цикличность – восстановлена (см. рис. 1-2)!

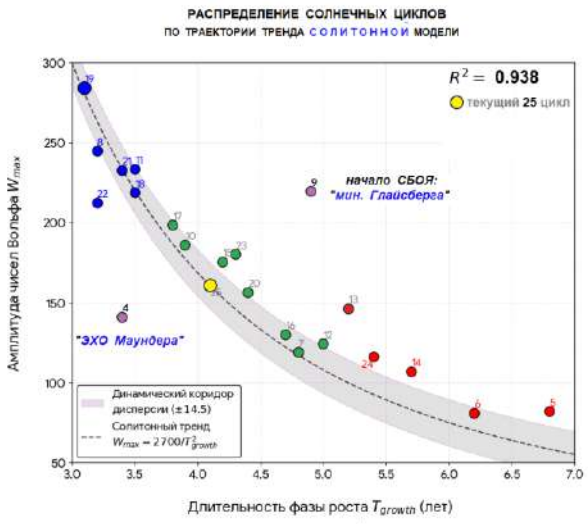


Рис. 1. Траектория эволюции чисел Вольфа на базе солитонной модели [3]: произведение амплитуды цикла на квадрат его длительности есть величина постоянная (A*T^2=const) по данным анализа среднегодовых пиковых значений: чисел Вольфа с 4-25 циклы. Происходит расслоение циклов на два полярных кластера: циклы-предвестники – «быстрые» и короткие (синего цвета) и «сбойные» циклы (красного цвета). Нелинейный волновой тренд солитонной модели (обратных квадратов) описывает эмпирический ряд с исключительно высоким коэффициентом детерминации (0,938) - уровнем значимости ≥90%, что указывает на сугубо детерминированную – солитонную природу цикличности Солнца. Цикл 25 «вернулся» точно к исходной – солитонной модели!

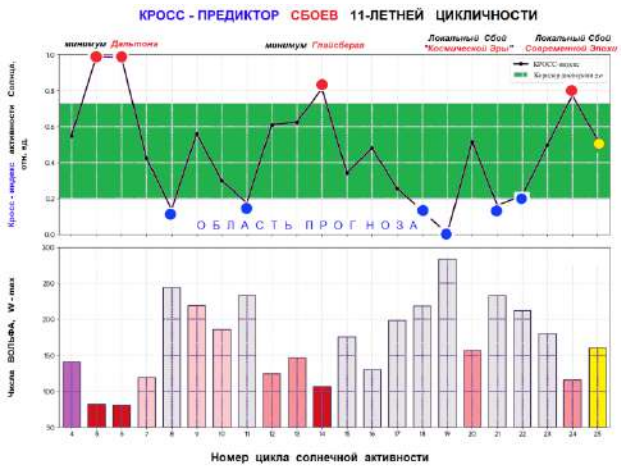


Рис. 2. Кросс-предиктор К «точки бифуркации» фазового перехода «порядок-хаос», который завершается сбоем цикличности Солнца. Кросс-предикторы 8 и 11 циклов являются предвестниками ГЛОБАЛЬНОГО сбоя – «минимума Глайсберга». Кросс-предиктор 18-19 циклов – предвестники локального сбоя эпохи «Космической эры» - цикл 20. Предвестники современной эпохи – циклы 21-22. Текущий процесс фазового перехода в цикле 24 завершен, цикличность – восстановлена!

Литература

1. Kozlov V.V., Kozlov V.I., Kozlov D.V., Yakovlev D.V. Nature of Arrhythmia in the Cyclicity Activity of Sun. Global Journal of Science Frontier Research: A Physics and Space Science. Volume 25, Issue 1, Version 1.0, Year 2025.

2. Козлов В.И., Козлов В.В. Природа цикличности и аритмии солнца. В космических лучах. Монография. Якутск: изд-во ФГБУН ИМЗ СО РАН. ИКФИА СО РАН. 225 стр. 2026.

3. Козлов В.И., Марков В.В. «Вейвлет-образ тонкой структуры 11-летнего цикла на основе изучения флуктуаций космических лучей в циклах 20-23» // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 1. С. 47-55.

https://www.forshock.ru/pred.php

Вариации фотосферного магнитного поля Солнца по данным обсерватории Кит Пик

Костюченко И.Г.[1], Вернова Е.С.[2], Баранов Д.Г.[3]
[1]*НИФХИ им.Л.Я.Карпова, г. Москва, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский Филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*
irkost46@gmail.com

Локальные неоднородности с повышенным значением магнитного поля на поверхности солнечной фотосферы могут являться наиболее вероятным источником активных образований. В зоне пятнообразования в этих областях, по-видимому, чаще появляются наиболее крупные группы солнечных пятен. Поэтому анализ динамики таких неоднородностей важен для понимания механизмов формирования солнечных пятен.

Однородные ряды непрерывных измерений фотосферного магнитного поля велись с 1976 года в обсерваториях Маунт Вилсон в Стенфорде, где они продолжаются и в настоящее время, и Кит Пик, где они прекратились в 2016 году. Результаты наблюдений представляются в виде синоптических карт фотосферного магнитного поля. Ранее на основе анализа синоптических карт обсерватории Маунт Вилсон нами было показано [1], что суммарное за оборот магнитное поле в зоне пятнообразования демонстрирует как вариации, связанные с 11-летним циклом солнечной активности, так и более короткопериодические, в том числе квази-двухлетние. Эти вариации хорошо совпадают по времени с вариациями площади солнечных пятен, но не всегда соответствуют им по амплитуде. Возможной причиной такого несоответствия могут быть неточности в использованных данных при измерении значений магнитного поля выше 20 Гаусс, связанные с эффектом насыщения.

В данной работе для анализа вариаций фотосферного магнитного поля мы используем синоптические карты обсерватории Кит Пик. Эти данные обладают большей точностью измерения магнитного поля высокой напряжённости и существенно лучшим пространственным разрешением (размер каждого пикселя 1 градус по широте и 1 градус по долготе, в то время как в данных обсерватории Маунт Вилсон размер пикселя 5x5 градусов). Суммарные за оборот значения фотосферного магнитного поля с различными пороговыми границами сопоставляются с суммарной за этот оборот площадью групп солнечных пятен, как всех, так и превышающих по площади границу 500мдп, а также с моментами появления наиболее крупных групп пятен. Проводится сравнение измерений магнитного поля, проведённые в двух указанных обсерваториях, в разных диапазонах значений.

Полученные результаты позволяют лучше понять связь между квази-двухлетними вариациями значений фотосферного магнитного поля и

аналогичными вариациями площади солнечных пятен, а также уточнить условия, при которых на поверхности фотосферы возможно появление больших групп солнечных пятен.

Литература

1. Костюченко И.Г., Вернова Е.С. Квази-двухлетние вариации в фотосферном магнитном поле Солнца. // Сборник тезисов конференции «Физика плазмы в солнечной системе-2026»

Широтно-временная динамика наблюдательных признаков средней спиральности в активных областях Солнца по данным космического аппарата SDO HMI в 24-25 циклах солнечной активности

Кузанян К.М.[1,2], Плотников А.В.[3]
[1]ИЗМИРАН, Москва, Россия
[2]ИМСС УрО РАН, Пермь
[3]КрАО, Научный, Респеблика Крым
kuzanyan@izmiran.ru

Магнитная спиральность представляет собой важнейшую характеристику работы механизма динамо. Пользуясь предоставляемыми по ключевым словам в обработке данных космического аппарата SDO HMI расчетными характеристиками выделенных активных областей (HARP) за 15 лет (2011-2026) по магнитному потоку, средней спиральности и другим характеристикам, мы восстанавливаем общую структуру широтно-временная динамики наблюдательных признаков средней спиральности в активных областях Солнца в 24-25 циклах солнечной активности. Это дополняет и продолжает ранее изучаемые ряды данных по спиральности и их структуры в форме диаграмм-бабочек в 22-23 циклах [1].

Проведенное сравнение с более ранними наземными наблюдениями показывает хорошую статистически обоснованную закономерность выполнения так называемого правила знака спиральности по полушариям в фазе максимума пятенной активности и его частичное нарушение и даже инверсию на фазах роста и спада активности. Это позволяет в дальнейшем развивать модели самосогласованного нелинейного динамо, опирающегося на более длительные ряды наблюдений.

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

Литература

1. Zhang, Hongqi ; Sakurai, T. Pevtsov, A.; Gao, Yu ; Xu, Haiqing ; Sokoloff, D. D. ; Kuzanyan, K. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 402, Issue 1, pp. L30-L33 (2010)

Эволюция интегральной токовой спиральности в активных областях

Куценко А.С.
Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия
alex.s.kutsenko@gmail.com

Сильные магнитные поля на Солнце, формирующие активные области в атмосфере, обычно находятся не в потенциальном состоянии, а скорее в виде скрученных магнитных жгутов, непотенциальность которых связана с текущими в них электрическими токами. Многочисленные наблюдения показывают, что доминирующее направление закрутки магнитных силовых линий в жгутах зависит от полушария, в котором наблюдается структура. Знак токовой спиральности, усредненной по всей площади активной области, может быть индикатором скрученности магнитного жгута в том или ином направлении.

В докладе представлены результаты анализа знака интегральной токовой спиральности в биполярных активных областях, которые всплывают на видимой стороне Солнца. Исследуются как изменения знака спиральности во времени, так и выполнение правила полушарий для знака спиральности для активных областей различного возраста и различного максимального магнитного потока. Рассмотрено более ста биполярных активных областей с максимальным магнитным потоком от $0.3\ 10^{22}$ Мкс до $5.2\ 10^{22}$ Мкс. Для сравнения проведены расчеты токовой спиральности для нескольких десятков униполярных магнитных структур.

Результаты показали, что в значительном количестве случаев биполярные структуры изменяют знак токовой спиральности в момент своего максимального развития, т.е. после окончания всплытия и на ранних этапах диссипации. Анализ карт токовой спиральности позволил сделать предположение, что это может быть связано с возникновением на этапах всплытия внутри активной области небольших магнитных структур со значительными электрическими токами, которые вносят существенный вклад в дисбаланс токовой спиральности. По мере дальнейшего развития активной области эти небольшие структуры исчезают, сливаясь в более крупные или аннигилируя, что и может приводить к смене знака спиральности.

Также обнаружено, что наиболее старые из рассмотренных активных областей – униполярные – в большинстве своем показывают знак токовой спиральности, который согласуется с правилом полушарий. В то же время, небольшие магнитные диполи с магнитным потоком не более 10^{22} Мкс не выполняют правило полушарий независимо от того, на какой стадии своей эволюции они находятся.

Проверка правил Вальдмайера в различных режимах работы солнечного динамо Паркера

Макарова И.В.[1], Юшков Е.В.[1,2], Соколов Д.Д.[1,3], Обридко В.Н.[3]
[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
[2]ИКИ РАН, Москва, Россия
[3]ИЗМИРАН, Троицк, Россия
iras27072005@gmail.com

Правила Вальдмайера были впервые сформулированы астрономом Максом Вальдмайером в 1935 году. Анализируя исторические данные о солнечных пятнах, он установил, что между длительностью фазы роста солнечного цикла и его амплитудой существует обратная корреляция: чем мощнее цикл, тем короче его фаза роста.

В настоящем докладе для проверки соотношений Вальдмайера используется модель сферического динамо для полоидальной и тороидальной компонент магнитного поля, выведенная Паркером в 1955 году [1]. Стабилизация звездного цикла реализуется за счет альфа-квенчинга. Вариации коэффициента радиальной диффузии μ^2 позволяют рассмотреть различные режимы работы магнитного динамо в зависимости от величины динамо-числа D. Нами рассмотрены три режима: докритический, критический и сверхкритический. В докритическом режиме генерация магнитного поля затухает, циклы не формируются. В критическом режиме магнитное поле существует на пороге генерации, циклы становятся нестабильными. В сверхкритическом режиме наблюдается устойчивая генерация с формированием чётких циклов.

Для каждого из трёх режимов в модели проводится анализ числа солнечных пятен, которое определяется через широтный максимум тороидального магнитного поля [2]. Сравнение зависимостей, полученных для разных режимов, показывает, что во всех трёх режимах не выполняется только одно из правил Вальдмайера - связь между амплитудой цикла и его периодом. Остальные корреляции, в частности между скоростью роста, временем роста и амплитудой, сохраняются независимо от режима.

Полученные результаты позволяют интерпретировать эпоху минимума Маундера как период, в котором солнечное динамо находилось в режиме, близком к докритическому. Нарушение правила "амплитуда–период" в этом режиме согласуется с низкой активностью и нерегулярной структурой циклов в этот период. Таким образом, модель демонстрирует, что выполнение различных правил Вальдмайера служит важным индикатором режима работы динамо, а нарушение одного из правил может указывать на изменение физических механизмов генерации в периоды глобальных минимумов.

Литература

1. E. N. Parker, Astrophys. J. 122, 293 (1955).
2. V. V. Pipin, D. D. Sokoloff, and I. G. Usoskin, Astron. Astrophys. (2021), arXiv:1112.6218v2

Колебания плазменного слоя в основании конвективной зоны Солнца

Мерзляков В.Л.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
mvl@izmiran.ru

Изучается ситуация с магнитной переменностью Солнца. Полагают, что происходит колебательный переход магнитной энергии между тороидальной и полоидальной компонентами магнитного поля. Между тем, важные наблюдательные данные не поддерживают такую модель.

Автор предлагает свой сценарий периодических изменений магнитного поля. Основополагающим фактором такого сценария являются реликтовые токи в радиативной зоне Солнца. Если выше этой зоны происходят колебания плазмы, то там возникают переменные токи. Эти токи в рассматриваемой ситуации являются источником полоидальной компоненты магнитного поля Солнца. Тороидальная компонента возникает вследствие действия дифференциального вращения на полоидальную компоненту в подфотосферных областях.

Рассмотрим процесс возникновения указанных токов. Эти токи возбуждаются электрическим полем при движении плазмы в магнитном поле реликтовых токов. Величина этого электрического поля $E=V_r B_\perp/c$, где V_r – радиальная скорость плазы, $B_\perp$ – компонента магнитного реликтового поля в перпендикулярном направлении. Скорость $V_r=A*(2\pi/T)*\sin((2\pi/T)t)$, колебания происходят с периодом $T\approx22$ года.

Плотность возбуждаемых токов считаем $j=\sigma E$, где проводимость соответствует условиям в основании конвективной зоны $\sigma=10^{16}$ СГС. Полагаем, что колеблющаяся плазма имеет эффективную толщину h и ограничена по широте. Токи в таком слое проявляются в полярной зоне как магнитный диполь. Автор [конференции ИКИ, ИЗМИРАН, 2025] оценил величину такого диполя $M_j=0.65R_s^3$ (радиусов Солнца) для минимума 1986 года и широтную протяженность токовой системы в 122^o. Имея указанные величины параметров, и с учетом дипольного момента реликтовых токов $\approx0.1R_s^3$, получаем оценку произведения амплитуды колебания и эффективной толщины слоя плазмы $<Ah>\sim10^4$ км^2. Наиболее вероятным представляется протяженность колеблющегося слоя плазмы $h\sim10^3$ км. В таком случае амплитуда колебания плазменного слоя $A\sim10$ км.

В предложенной модели можно объяснить, в частности, вариация мощности и протяженности солнечного цикла флуктуациями колебания плазменного слоя.

.

Валидация и оценка согласованности исторического полушарного каталога индексов солнечных пятен UBAI

Миненко Е.П.
Астрономический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан
minenkoekaterina@mail.ru, mkatya@astrin.uz

Долговременные исторические наблюдения солнечной активности имеют важное значение для исследования механизмов определяющих развитие солнечного цикла. Анализ рядов, охватывающих большое число последовательных циклов, позволяет исследовать изменения амплитуды и продолжительности циклов, особенности фаз роста и спада активности, фазовые сдвиги и возможные долгопериодические вариации. Дополнительно позволяют исследовать различия в эволюции северного и южного полушарий и их связь с процессами солнечного динамо [1-2]. Оцифровка архивных материалов уже продемонстрировала возможность восстановления многолетних рядов солнечной активности и их использования для изучения долговременной изменчивости [3-4]. При этом применение исторических данных требует обязательной проверки их качества и согласованности с независимыми каталогами.

В настоящей работе представлены результаты валидации исторических наблюдений архива солнечных данных Астрономического института имени Мирзо Улугбека Академии наук Республик Узбекистан (UBAI) за 1944–1998 гг., включающих месячные значения числа солнечных пятен, групп пятен и их площадей отдельно для северного и южного полушарий. Составленный каталог помещен в открытый доступ на ресурсе Harvard Dataverse [5]. На первом этапе, анализ полушарных данных проведен путем сравнения их суммарных значений с каталогом основных индексов солнечной активности [6], представленным в работе Карачик и др. (2025) [7]. Сравнение выполнено для 653 месяцев в интервале с января 1944 по июнь 1998 гг. Для числа Вольфа, числа групп солнечных пятен и площадей получено высокое согласие рядов (0.999, 0.996, 0.992 соответственно). Коэффициенты корреляции Спирмена также близки к единице, что подтверждает устойчивую монотонную связь между сравниваемыми рядами. Статистическая значимость корреляций оценивалась с помощью критерия Стьюдента и для всех трёх индексов оказалась высокой. Коэффициенты регрессии, близкие к единице (1.0007, 0.9979 и 0.9896 соответственно), и небольшие систематические смещения подтверждают отсутствие существенной разницы между суммой полушарных значений и данными полного диска. При этом в отдельных месяцах выявлены расхождения между суммой полушарных значений и значениями каталога полного диска, что потребовало дополнительной проверки исходных наблюдений и процедуры восстановления данных по ежедневным наблюдениям. Анализ этих

расхождений показал, что они носят локальный характер и не оказывают существенного влияния на общий уровень согласованности рядов.

Дополнительное сравнение полушарных рядов UBAI с независимыми референсными данными также продемонстрировало хорошее соответствие временной эволюции солнечной активности. Для числа Вольфа использовался комбинированный ряд Uccle–WDC-SILSO: данные наблюдений станции Uccle за 1950–1991 гг. и данные WDC-SILSO (World Data Center – Sunspot Index and Long-term Solar Observations) Королевской обсерватории Бельгии [8]. Для числа групп солнечных пятен и их площадей использовались данные Royal Greenwich Observatory (RGO) [9]. Для числа Вольфа коэффициенты корреляции Пирсона составили 0.914 и 0.922 для северного и южного полушарий соответственно, при этом коэффициенты Спирмена достигали 0.941 и 0.949. Сопоставление рядов числа групп и площади пятен показывает аналогичное согласие временных вариаций. Выявленные расхождения имеют преимущественно локальный и зависимый от цикла характер, не нарушая общей согласованности рядов. Таким образом, результаты двух независимых этапов проверки подтверждают достоверность каталога полушарных данных UBAI и его пригодность для исследования долговременной эволюции солнечных циклов, вариаций их характеристик, фазовых различий и северо–южной асимметрии солнечной активности.

Литература

1. Li, K. J., Schmieder, B., Li, Q. S. The long-term behavior of the north-south asymmetry of sunspot activity. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2009, 114, A04101.
2. Veronig, A. M., Jain, S., Podladchikova, T., Pötzi, W., Clette, F. Hemispheric sunspot numbers 1874–2020. Astronomy & Astrophysics, 2021, 652, A56.
3. Mandal, S., Hegde, M., Samanta, T., Hazra, G., Banerjee, D., Ravindra, B. Kodaikanal digitized white-light data archive (1921–2011): Analysis of various solar cycle features. Astronomy & Astrophysics, 2017, 601, A106.
4. Ravindra, B., Chowdhury, P., Javaraiah, J. Solar-Cycle Characteristics in Kodaikanal Sunspot Area: North–South Asymmetry, Phase Distribution and Gnevyshev Gap. Solar Physics, 2021, 296, 2.
5. https://doi.org/10.7910/DVN/LXU0EE
6. https://doi.org/10.7910/DVN/6XPXC1
7. Karachik N. V., Minenko E. P., Ehgamberdiev Sh. A. Historical Solar Observations Archive at the Ulugh Beg Astronomical Institute (Tashkent): Catalogue of Monthly Averaged Sunspot Activity Indices (1932–2000). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2025, V. 541. Iss. 1. P. 93–100.
8. https://www.sidc.be/silso/datafiles
9. https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml

Использование солнечного излучения фотоэлектрического диапазона на комплексе ИЗМИРАН в научных и прикладных исследованиях и проектах

Никифоров В.Е.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова, г. Москва, г. Троицк, РФ
nika@izmiran.ru

Практическое использование солнечной энергии для электроснабжения потребителей совпало с началом космической эры и первоначально было обусловлено необходимостью обеспечения электропитания бортовой аппаратуры космических аппаратов. В настоящее время солнечная энергия нашла широкое применение и развитие не только в космосе, но и в наземных автономных энергоустановках и стационарной энергетике. Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую обеспечивается фотоэлектрическими преобразователями (ФЭП) в диапазоне длин волн от 300 до 1100 нм в зависимости от типа солнечных элементов. По прогнозам, достигнутый в настоящее время КПД преобразования 30 % не является предельным, в том числе для фотоэлектрических модулей, предназначенных для наземной эксплуатации.

В ИЗМИРАН фотоэлектрические преобразователи и солнечные батареи использовались в качестве генераторов электроэнергии в ряде научных и прикладных исследованиях и проектах космического и наземного назначений.

Разработана универсальная, удобная для практических применений, математическая модель расчета вольт-амперных характеристик и энергетических параметров фотоэлектрических преобразователей различных типов всего по трем измерениям их основных электрических переменных. Данная модель положена в основу работы аналого-цифро-физического измерительно-вычислительного комплекса ИЗМИРАН, предназначенного для измерений, регистрации и хранения данных изменений энергетических параметров инсоляции в наземных условиях.

Полученные результаты измерений использовались в космических и наземных проектах ИЗМИРАН, в частности, при создании электромагниточистых секционированных солнечных батарей, используемых в качестве генератора электроэнергии в системе электроснабжения среднесуточной мощности до 100 Вт малых космических аппаратов типа «КОМПАС», в ряде наземных автономных систем электропитания, в том числе в «Передвижном комплексе регистрации низкочастотных электромагнитных волн».

Для универсальных потребителей разработаны системы автономного/бесперебойного электроснабжения с выходами на постоянном и переменном токе промышленной частоты мощностью 440Вт(ВА)-micro,

1800Вт(ВА)-mini, 3000Вт(ВА)-midi, что позволяет питать, в том числе, гелиогеофизическую аппаратуру различного назначения с использованием в качестве генератора электроэнергии модули солнечных батарей, либо однофазную сеть переменного тока.

Особенностью электроснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей является непостоянство освещения солнечных модулей во времени, обусловленное как ежесуточным затенением, так и атмосферными явлениями. Во время экспозиции заряжают аккумуляторы и питают нагрузку, а на теневом участке накопленной электроэнергией питают потребителей. Задачей разработчиков систем питания является обеспечить оптимальное и надежное согласование генераторов, накопителей и потребителей посредством аппаратуры регулирования и контроля (АРК) и сохранить энергобаланс в системе. Правильный выбор структуры СЭС и составных частей и элементов систем является особенно важным.

Во многих случаях для работы потребителей от солнечных батарей необходим нестандартный индивидуальный подход, что позволяет существенно повысить технические и эксплуатационные характеристики изделий, например, в полевых или экстремальных условиях. Подобный подход использовался при создании автономных водоподъемных установок как с использованием аккумуляторных батарей, так и без использования аккумуляторной батареи путем разработки специального импульсного преобразователя, согласующего электрические характеристики солнечного модуля и вибрационного насоса.

Комбинируя традиционный и индивидуальный подходы к использованию генерируемой мощности солнечных батарей для электроснабжения автономных и стационарных энергопотребителей различного назначения, обеспечивается эффективное преобразование солнечной энергии в различных областях практического применения.

Генеральный 150-летний каталог групп солнечных пятен на основе Гринвичского, Кисловодского и Дебреценского каталогов

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

На основе трёх общепризнанных наблюдательных каталогов создан длительный однородный 150-летний каталог групп солнечных пятен в системе Гринвичской обсерватории (RGO) с 1874 по 2025 год. Были использованы данные RGO за 1874-1976 гг. и Кисловодской горной астрономической станции (KMAS) за 1976-2025 гг. Имеющиеся в ряду KMAS лакуны были заполнены в автоматическом и экспертном режиме с помощью данных каталога Дебрецена (DPD) за 1976-2018 гг. Кроме того, усовершенствован ряд Кисловодской горной астрономической станции – минимизированы ошибки наблюдателей и оцифровки данных, имеющиеся лакуны заполнены с использованием данных RGO (за 1954-1976 гг.) и DPD (за 1977-2018 гг.). Создан и апробирован алгоритм поиска соответствия групп между данными разных обсерваторий, а также алгоритм автоматического заполнения лакун, основанный на расчёте ежедневных переходных коэффициентов для суммарных площадей групп, учитывающий смену наблюдателей, эволюцию инструментов и условия наблюдений. Показано, что для повышения надёжности переходного коэффициента необходима фильтрация групп на расстоянии $r < 0.92$ от центра солнечного диска. Выявлены принципиальные ограничения автоматического сопоставления данных из-за различий в идентификации структуры активных областей на разных обсерваториях, что потребовало введения экспертного режима для заполнения сложных лакун. Проанализированы длительные изменения физических характеристик двух популяций групп солнечных пятен.

Литература

1. Nagovitsyn Yu.A, Pevtsov A.A., On the Presence of Two Populations of Sunspots, Astrophys. J., V. 833, I. 1, id. 94. 2016.
2. Nagovitsyn Yu.A, Pevtsov A.A., Bi-lognormal Distribution of Sunspot Group Areas, Astrophys. J., V. 906, I. 1, id. 27. 2021.

Граничные условия с короной в модели солнечного динамо среднего поля

Пипин В.В.
[1]*Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия*
pip@iszf.irk.ru

Исследуется, как тип граничного условия с короной влияет на осесимметричный цикл динамо и на устойчивость неосесимметричных (m≠0) возмущений в нелинейной неосесимметричной αΩ-модели динамо среднего поля в сферической оболочке. Сопоставлены три типа короны: (1) потенциальное поле, (2) поле, удовлетворяющее уравнению $\Delta B+k^2B=0$ с фиксированным k, и (3) магнито-вязкая (диффузионная) корона, описываемая уравнением индукции, с характерной диффузией η_{cor} и ветром.

Для гармонического граничного условия период динамо и амплитуда тороидального поля на поверхности систематически зависят от отношения η_{cor}/η_{cz}, где η_{cz} диффузия на внешней границе конвективной зоны. Для магнитовязкой короны эта зависимость исчезает, что мотивирует поиск физического механизма данного различия. Состояние короны диагностируется через несколько независимых, энергетически взвешенных величин: полушарную магнитную (токовую) спиральность Hc, параметр закрученности $\alpha=Hc/2E$ и локальную долю бессиловой структуры поля $f_{free}=(J\cdot B)^2/J^2B^2$. При умеренном $\eta_{cor}/\eta_{cz}\sim10$, два типа короны существенно различаются по периоду динамо и по степени силовой организации поля (f_{free} для магнито-вязкой короны на два порядка меньше). При увеличении η_{cor}/η_{cz}, однако, внутренняя структура двух корон эволюционирует в противоположных направлениях: гармоническая корона приближается к истинно силовому состоянию (f_{free} выходит на насыщение около ~0.5), тогда как магнитовязкая корона становится всё менее силовой (f_{free} падает ещё почти на два порядка) — при этом период динамо и амплитуда тороидального поля на поверхности (~1 Гс) в обоих случаях сходятся к одним и тем же значениям. Это интерпретируется как свидетельство того, что при больших η_{cor}/η_{cz} корона магнитно отсоединяется от динамо-области. Учет ветра приводит к усилению этого эффекта, а также влияет на амплитуду тороидального поля на поверхности.

Данная диагностическая схема распространена на неосесимметричные возмущения поля. Показано, что тип короны влияет на характерные времена затухания неосесимметричных мод [1,2].

Литература

1. Moss D, 1999, MNRAS, 306, 300
2. Pipin V.V., Kosovichev A.G., 2015, ApJ, 813, 134

К вопросу оправдываемости прогноза 25 цикла солнечной активности, полученного методом спектрального анализа

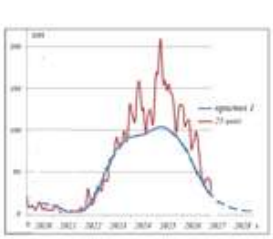
Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Телегин В.А.
ИЗМИРАН, Москва, г. Троицк, Россия,
rozhdestvenskayawera@yandex.ru

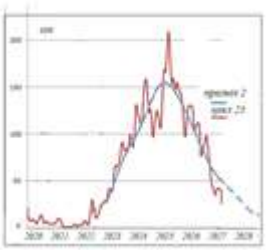
На Симпозиуме «Прогноз-2023» взыскательным судьям был предложен прогноз, начинающего тогда 25-го цикла солнечной активности (СА). Начало цикла затянулось практически на год, что вызвало неподдельный интерес специалистов и любознательных. Авторы тоже приняли в этом участие и предложили свой вариант формы, длительности и среднего максимального значения чисел Вольфа, полученных методом спектрального анализа, используя представление сложного стохастического процесса в виде суммы отдельных составляющих, выделяя их из ряда данных СА (чисел Вольфа) [1]. Авторами разработана оригинальная методика прогноза с использованием рядов Фурье, цифровой фильтрации с помощью фильтров Чебышева и представлением сложного ограниченного процесса как модулированного и последующей демодуляцией [2]. Прогнозирование опиралось на методы экстраполяции и формулу Тейлора, рассматривая её как алгоритм экстраполяции. Условия разложения функции в ряд Тейлора - это условия прогнозируемости процесса: «процесс прогнозируем, если он непрерывен и имеет непрерывные производные *n*-го порядка». Для получения ограниченной по спектру функции разработан цифровой фильтр с частотной характеристикой «исправленного непрерывного осреднения» (ИНО), представляющий собой последовательное применение двух фильтров: арифметического непрерывного осреднения и идеального фильтра низких частот. Фильтры Чебышева формируют совместно с введением выделяющей функции, модулированный сигнал с ограниченным спектром. Экспериментальные данные представлены в виде произведения бесконечного процесса на дискретную во времени единичную прямоугольную (выделяющую) функцию. Эта функция определяет длительность выбранного отрезка измеренного физического процесса.

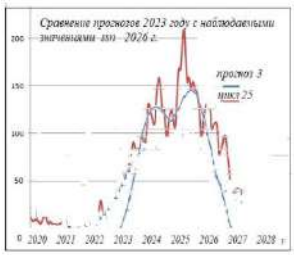
Все методы экстраполяции были получены для бесконечных рядов данных**,** в то время как, данные наблюдения за состоянием прогнозируемого объекта представляют собой конечную выборку дискретных отсчетов и поэтому относятся к классу финитных функций во времени. При этом конечные отсчеты данных наблюдения следует рассматривать как точки разрывов, которые изменяют спектр процесса. При аппроксимации функций с разрывами возникает явление Гиббса, которое искажает результат прогнозирования, приводит к мимикрии частот, и препятствует осуществлению прогноза или качественной экстраполяции конечной выборки данных наблюдений.

В настоящее время 25 цикл СА уже прошел свое максимальное значение и пребывает на нисходящей ветви. Представляет интерес сравнить спрогнозированные данные СА, с наблюдавшимися, за прошедший период. Прогноз СА проводился методом экстраполяции для каждой отдельной составляющей. Интервал прогноза определяется соответствующей составляющей или частотой. Долгосрочный прогноз на полный солнечный цикл проводился по низкочастотной составляющей с более, чем одиннадцатилетнем периодом. Первый опыт прогноза 25-го цикла СА по низкочастотной составляющей был предпринят по данным чисел Вольфа до 2021 года. Полученный прогностический цикл сравнивался с известными наблюдаемыми значениями до июля 2026 года [3]. Исследования показали, что прогноз существенным образом зависит от параметров фильтров. Получено три варианта прогноза 25-го цикла СА при различных коэффициентах фильтров, и они разнятся по форме. В одном случае наблюдается два ярко выраженных максимума в 2024 и 2025 годах, что подтверждается данными наблюдений. Во втором случае имеет место одновершинный максимум, который хорошо согласуется со среднем по величине наблюдаемым значением. Третий вариант прогноза хорошо согласуется с медленно развивающимся началом 25-го цикла и, вероятно, наблюдаемый цикл будет иметь ту же длительность. Интегральные значения для всех трех вариантов находятся в хорошем согласии, т.е. энергетические характеристики совпадают.

Таким образом, предлагаемый метод экстраполяции и спектрального анализа данных, сложных геофизических процессов может занять достойное место при решении многих практических задач.







Литература

1. Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Телегин В.А. Применение цифровой фильтрации при прогнозировании солнечной активности / симпозиум «Физические основы прогнозирования гелиогеофизических процессов и событий» («ПРОГНОЗ-2023»), ИЗМИРАН, Москва, Троицк, С. 30

2.. Рождественский Д.Б., Телегин В.А. Метод прогнозирования дискретных ионосферных наблюдений “Physics of auroral phenomena”. Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, 2015

3. http://sidc.be/silso.

ΛΩ-динамо механизм в солнечных транспортных моделях

Златов А.Г.[1]
[1] *Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия*
tlatov@mail.ru

В настоящее время в αω-динамо моделях в качестве основного механизма преобразования тороидального магнитного поля в полоидальное рассматривается альфа-эффект, основанный на воздействии сил Кориолиса на поднимающиеся магнитные петли. В данной работе в основе предполагаемого сценария рассматривается взаимодействие асимметричных магнитных трубок солнечных биполей с меридиональным потоком. Ряд наблюдательных фактов, таких как время жизни, скорости вращения и меридионального перемещения, наклон магнитного поля и другие, свидетельствуют о различных углах наклона магнитных трубок биполей для солнечных пятен ведущей и хвостовой полярностей по отношению к вертикали. Ведущая (западная) часть силовой трубки более вертикальна по сравнению с хвостовой (восточной) частью. Различие наклонов ведущих и хвостовых частей магнитных биполей, в сочетании с меридиональными потоками, формирует разные по величине силы в меридиональном направлении. Это обеспечивает разворот силовой трубки и преобразование тороидального магнитного поля в полоидальное.

Для формирования асимметричного наклона магнитных трубок необходимы радиальный градиент скорости вращения и меридиональный поток. Для Солнца можно рассматривать два сценария. В первом сценарии Ω-трубки поднимаются со дна конвективной зоны к поверхности. Поверхность вращается с большей скоростью. Под действием радиального градиента угловой скорости происходит опережение верхней части петли и формирование асимметрии силовой трубки. По форме такая трубка напоминает рукописную букву “л” в кириллице (Л). Меридиональный поток в верхней части конвективной зоны, направленный к полюсам, разворачивает трубку и обеспечивает более быстрый перенос хвостовых частей к полюсам. Второй сценарий - это ν-трубки в лептоклине. В самом верхнем слое конвективной зоны существует отрицательный градиент скорости вращения по радиусу. В этом случае гипотетические U-трубки будут трансформироваться в асимметричные ν-трубки. А меридиональный поток к полюсам обеспечит смещение хвостовых частей к полюсам.

Приводятся результаты моделирования эволюции силовых трубок и модели генерации циклов активности.

Непараметрическое описание формы 11-летних циклов

Наговицын Ю.А. [1], Федосеева С.Н. [2], Осипова А.А. [3]
[1]*Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия*
[2]*Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*
daveroom@mail.ru

Эмпирическое описание формы цикла солнечной активности является одной из фундаментальных проблем физики Солнца. Ранее, в работах разных авторов предлагались методы описания солнечного цикла с использованием нескольких параметров (от одного до шести). Мы предложим метод нахождения форм циклов, не основанный на подборе параметров каких-либо аппроксимационных формул.

В работе использован для описания солнечной активности ряд *AN*, полученный в результате избавления дополненного ряда суммарной площади пятен с 1610 года [1] от феномена провала Гневышева в близмаксимальные годы, так, что ряд *AN* содержит времена наступления максимумов циклов и их среднегодовые значения [2]. Образуем знакопеременный 22-летний ряд *AZ* [3] из ряда *AN* (рис. 1).

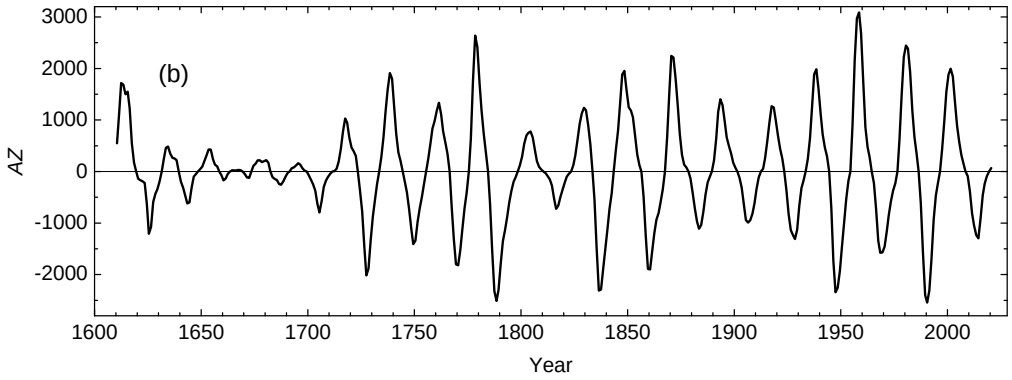


Рис. 1. Знакопеременный среднегодовой ряд *AZ*

Проведя глобальный кубический сплайн, интерполируя, через точки $AZ_{E-1}, AZ_E, AZ_{E+1}, AZ_{E+2}$, где E – год экстремума ряда *AZ*, получаем ряд, описывающий 92% дисперсии. Таким образом, близэкстремальные точки являются определяющими для структуры всего ряда (использовалась 161 точка из 415 всего ряда — это 39% информации).

Выразим близэкстремальные значения через значения экстремума. Возьмем модуль нового ряда и удалим из него точки минимумов. Снова производим сплайн-интерполяцию и получаем коэффициент корреляции 0.945 с исходным *AN* (рис.2). Как результат, по 10% информации (максимумы 11-летних циклов) можно восстановить 89% дисперсии всего ряда. Это и является основным результатом нашей работы.

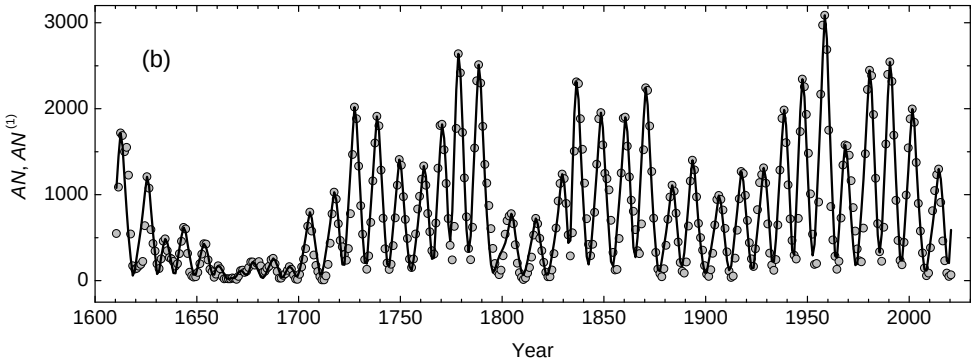


Рис.2. Среднегодовой ряд *AN* (серые кружки) и восстановленный $AN^{(1)}$ (сплошная линия).

Предлагаемый подход одинаково хорошо описывает и высокие, и низкие уровни солнечной активности и может быть использован для реконструкции солнечной активности в прошлом, в том числе во время глобальных минимумов и максимумов

Литература

1. Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Osipova, MNRAS. 505, 1206 (2021).
2. Осипова А.А., Наговицын Ю.А., Федосеева С.Н., Письма в Астрон. журн. 51, 549 (2025) [A.A. Osipova, Yu.A. Nagovitsyn, S.N. Fedoseeva, Astron. Lett. 51, 579 (2025)].
3. C.N. Anderson, Bell System Technical Journal 18, 292 (1939).

«Год без лета», максимум цикла VI и минимум Дальтона

Шибаев И.Г.[1], Шибаев А.И.[2]
[1]*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*
[2]*МГУ им.М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*
ishib@izmiran.ru

Извержения вулкана Тамбора в 1815 г. вызвало серьезные изменения погоды. Лето 1816 года было настолько экстремальным, что в Европе и Северной Америке этот период часто называют «годом без лета». В Центральной и Западной Европе лето выдалось особенно холодным, дождливым и сопровождалось повышенной облачностью. В донесении Министерства внутренних дел Франции отмечались - «обильные дожди, шедшие на протяжении нескольких месяцев, и последовавший за ними разлив рек».

В американских газетных публикациях 1816 г. особо отмечали царившую в воздухе дымку. Вашингтонская газета «Daily National Intelligencer» писала: «Вся атмосфера наполнена густой дымкой, неудобства от которой усугубляются облаками невесомой пыли, висящей в воздухе».

Вольф, при продлении ряда с 1788 по 1825 гг., в основном опирался на записи Оноре Флогерга (Вивье) и максимум цикла VI пришелся на июнь 1816 г. Для выделения максимума требуется определенное количество более достоверных данных, но в сложившихся условиях трудно говорить о регулярных и качественных наблюдениях солнечных пятен. Имеем либо заниженные показания, либо итог коррекции с опорой на сомнительные прокси в центре минимума Дальтона.

В работе параметры циклов минимума Дальтона оцениваются по характеристикам достоверных циклов.

24 цикл солнечной активности

Якунина Г. В.
ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия
yakunina45@yandex.ru

Анализ солнечной активности в 24-м цикле показал, что активность вспышек в цикле 24 была значительно ниже, чем в 21-23 циклах. Были проанализированы крупные (рентгеновский класс > M1) и очень крупные (рентгеновский класс >X1) вспышки (по наблюдениям GOES 15 и данным из каталога вспышечных событий) в 24-м цикле солнечной активности (http://www.wdcb.ru/stp/data/Solar_Flare_Events/Fl_XXIV.pdf), [1-4].

Большинство крупных вспышек (рентгеновский класс >X2.7) произошло в фазе подъема и в максимуме 24-ого цикла, в отличие от крупных вспышек в 21- 23 циклах , где наибольшее количество вспышек наблюдалось в фазе спада. Количество крупных солнечных пятен в 24-м цикле уменьшилось, но количество мелких увеличилось. Это изменение можно объяснить постепенным снижением средней интенсивности поля солнечных пятен в соответствии с данными наблюдений.

Среднемесячное количество вспышек M1 – X7 (более 700 вспышек) в 24-м цикле не совпадает с максимумами количества пятен, за исключением 2014 г. Наибольшее количество вспышек в 24-м цикле произошло в максимуме 2014 г., в фазе спада после первого максимума и в фазе спада после второго максимума [2].

В 24-м цикле ярко выражена асимметрия вспышечной активности [1]. На фазе подъема число крупных вспышек примерно одинаково в N- и S-полушариях, в 2011–2012 гг. наблюдается преобладание вспышек в N-полушарии, что соответствует N-асимметрии числа пятен, с 2013 по 2016 гг. преобладают вспышки в S-полушарии. В 2016 г. вновь больше вспышек в N-полушарии. А в 2017 г. все крупные вспышки класса > M5 произошли в S-полушарии, например вспышки X9.3 и X8.2 в сентябре 2017 г.

В 24-м цикле было примерно в 2 раза меньше вспышек, сопровождающихся потоками протонов. За период с 2010–2017 гг. выделено 65 СПС с энергией протонов E > 10 МэВ и 26 СПС с E > 100 МэВ. Распределения числа событий в зависимости от времени задержки между моментом начала вспышки и моментом начала событий характеризуются ярко выраженным максимумом, соответствующим задержке 2 часа для протонов с энергиями > 10 МэВ и > 100 МэВ.

Общая частота корональных выбросов массы (КВМ) увеличилась в 24-м цикле по сравнению с 23-м циклом, хотя частота быстрых и широких КВМ снизилась. Связь между шириной и скоростью также отличается в 24-м цикле: КВМ при одинаковой скорости были шире. Во время максимальной фазы 24-го цикла было зафиксировано 68% КВМ, а в нисходящей фазе их было всего 10%. Высокоскоростных КВМ (скорость > 1000 км/с) было

значительно больше во время максимальной фазы цикла (129), а в нисходящей фазе их было меньше всего (20). КВМ в N- полушарии наблюдалось на 8% больше, чем в S, [6, 7].

Наблюдалось заметное сокращение числа интенсивных (Dst ≤ −100 нТл) геомагнитных бурь и событий с высокоэнергетическими (≥ 500 МэВ) солнечными энергичными частицами (СЭП). Количество гало-КВМ в 24-м цикле существенно не уменьшилось, а по отношению к числу солнечных пятен их наблюдалось больше [7]. Можно было бы ожидать усиления геомагнитной активности в 24-м цикле из-за большего количества гало-КВМ, но этого не произошло. 24-й солнечный цикл характеризовался низкой активностью вспышек, а основной вклад в геоэффективные события вносили корональные выбросы массы [3, 5]. Каталог КВМ LASCO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Считается, что слабый солнечный 24-й цикл был обусловлен слабым полярным магнитным полем в предшествующем солнечном минимуме. 24-й цикл оказался в два раза слабее 23-го цикла. Геомагнитная активность в 24-м цикле из-за большего количества гало-КВМ не увеличилпсь. Напряженность гелиосферного магнитного поля значительно снизилась в 24-м цикле, что привело к аномальному расширению КВМ и ослаблению магнитного поля в них. Ослабление гелиосферного магнитного поля, вероятно, также является причиной более слабых бурь.

Литература

1. Bruevich E.A., Yakunina G.V. Flare Activity of the Sun and Variations in its UV Emission During Cycle 24// Astrophysics. V. 60, Issue 3. pp. 387-400. 2017.
2. Bruevich E.A., Kazachevskaya T.V., Yakunina G.V. Large flares (M1–X7) in the solar activity cycle 24 // Geomagnetism and Aeronomy, V. **57**, 8 1077–1085. 2017.
3. Bruevich E., Yakunina G. 24th Cycle of Solar Activity: Geoefficiency of Flares // Geomagnetism and Aeronomy. V. 60, pp. 876–880. 2020.
4. Bruevich E., Kazachevskaya T., Yakunina G. Solar-Flux Variation in Helium Lines According to SDO/EVE Data in the 24th Cycle and the Forecast for Different Levels of Solar Activity // Geomagnetism and Aeronomy. V. 60. pp. 966-973.2020.
5. Bhatt B., Chandra H. Relationship Between Rising Phase of Solar Cycle 23rd and 24th With Respect to Geoeffectiveness // Adv. Sci. Engng Med. V. 12. pp. 70–74. 2020.
6. Dagnew f. et al. Intercycle and Intracycle Variation of Halo CME Rate Obtained from SOHO/LASCO ObservationsThe ApJ. 903:118 (10pp), 2020.
7. Gopalswamy N. et al. Implications of the abundance of halo coronal mass ejections for the strength of solar cycle 25 // Proceedings of the International Astronomical Union. V. 20, Issue S388, pp. 261–266, 2026.

Секция 2.
Активные солнечные образования, процессы и явления

Современные тенденции к изучению мелкомасштабных процессов на Солнце: новые наблюдения, модели и результаты

Абраменко В. И.
ФГБУН Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия
vabramenko@gmail.com

Во все времена астрономы стремились изучить свой объект с максимально возможным разрешением. И на каждом этапе новый инструмент давал беспрецедентное улучшение качества снимка и множество новых деталей. В наблюдениях Солнца общий арсенал наблюдательных данных 50–70 годов представлял собой: в фотосфере - пятна, флоккулы, волокна, фибрилы, протуберанцы, белые вспышки и магнитные поля; в хромосфере – вспышки в линии H-альфа, радиоизлучение в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Исследуемые масштабы явлений: от десятков мегаметров (пятно) до 1000 км (размер гранул, толщина волокон). Предел разрешения был ограничен дрожанием атмосферы 2” = 1.5 Мм.

При этом фотосфера и хромосфера изучались отдельно. Например, вспышки рассматривались как хромосферное явление, поэтому при изучении вспышек рассматривали чисто хромосферные физические условия, параметры, процессы.

Те, кто изучал видимые на поверхности Солнца явления (пятна, флоккулы, грануляция), использовали наблюдения фотосферы в спектральных линиях. Наблюдаемая в те годы упорная невозмутимость фотосферы при вспышках (за исключением белых вспышек) способствовала раздельному изучению фотосферы и хромосферы. Дополнительным аргументом для раздельного изучения было понимание сильной стратификации с высотой.

Наблюдательные возможности накладывали отпечаток на круг физических задач. Изучались в основном свойства движений волокон по диску, связь волокон со вспышками, вспышечные выбросы на лимбе, спектры во вспышках, эмпирические связи магнитных полей в активных областях со вспышками. При этом каждый новый инструмент ставил новые вопросы с привлечением всё более мелких масштабов. В области теоретических разработок прогресс шел тоже в сторону осмысления роли мелкомасшабных явлений. Постепенно с работами, например, Колмогорова, Мандельброта, Могилевского, Шредера, Федера и других, более современных авторов, астрофизическое сообщество стало осознавать принцип самоподобия и мульти-фрактальности, когда статистические законы на крупных (доступных наблюдениям) масштабах можно продолжить в сторону более мелких (уже недоступных) масштабов. Другой очень важный бонус этой основной идеи о мульти-фрактальном устройстве материи заключался в том, что существует связь между масштабами (нелинейность),

то есть энергия на одних масштабах может передаваться на другие, и вверх и вниз по спектру масштабов. Этот принцип может существенно расширить наши поиски механизмов передачи энергии на Солнце.

Цель доклада – сопоставить прежний и современный подходы к интерпретации солнечных наблюдений. Сделать это предполагается с использованием информации о международной конференции “The 7-th GST Workshop”, Antalya, Turkey, 3–6 February, 2026, в работе которой автору пришлось очно участвовать. Присутствовали около 130 человек, в основном ученые, связанные с наблюдениями, обработкой и интерпретацией данных, конструированием инструментов для наблюдений Солнца. Конференция была задумана как обсуждение результатов новых наблюдений наземного солнечного телескопа GST (Goode Solar Telescope of the Big Bear Solar Observatory, NJIT, USA) – внеосевой рефрактор диаметром 1.6 м в Калифорнии. Но представленные доклады были не только по данным GST. Наиболее интересные презентации будут обсуждаться в данном докладе. В целом, имеет место переход к пониманию роли small scales. Можно сказать, что The 7th GST Worksop целиком посвящен лавине small-scales-наблюдений в самых разных диапазонах. Особо подчеркивается роль перехода от фотосферы к хромосфере. В целом, идет упор на осмысление новых наблюдательных данных по фотосферно-хромосферной связи. Множество новых данных в основном сводится к двум направлениям: взгляд вглубь на мелкие масштабы; освоение новых каналов информации: новые возможности спектрополяриметрических наблюдений в спектральных линиях в хромосфере и переходном слое с выходом на 4D (x,y,z,t) магнитные структуры. Отсюда следует переосмысление основных парадигм, в том числе и механизмов вспышек.

Предвспышечные флуктуации излучения активных областей у "confined" и "eruptive" вспышек

Абрамов-Максимов В.Е.[1], Бакунина И.А.[2]
ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия
НИУ ВШЭ, Нижний Новгород, Россия
beam@gaoran.ru

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

В данной работе предварительный анализ 14 событий показал, что сильнее предвспышечные КПФ проявляются у эруптивных вспышек.

Пространственная связь микроволнового излучения и магнитных жгутов в максимальной фазе мощных солнечных вспышек

Бакунина И.А.[1], Мельников В.Ф.[2], Кузнецов С.А.[2], Шаин А.В.[2], Абрамов-Максимов В.Е.[2]
[1]НИУ ВШЭ, Нижний Новгород, Россия
[2]ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия
rinbak@mail.ru

Исследованы 27 вспышек рентгеновского класса M и X предыдущего солнечного цикла по данным радиогелиографа в Нобеяме и текущего солнечного цикла по данным СРГ на основе 3D-экстраполяции магнитного поля в корону активной области (АО) (метод «NLFFF extrapolation») [1,2] совместно с анализом пространственного распределения восстановленной плотности электрических токов. Во всех вспышках наблюдаются магнитные жгуты, которые существуют как до, так и после вспышки. Установлено, что положение наиболее мощных магнитных жгутов, характеризующихся самыми сильными в активной области (АО) электрическими токами, совпадает с положением максимума радиояркости во время вспышки. Установлено, что ориентация магнитных жгутов в общей пространственной структуре магнитного поля АО важна для диагностики возникновения СМЕ [3]. В событиях без СМЕ магнитные жгуты наблюдались преимущественно в закрытых магнитных конфигурациях и ориентированы квази-перпендикулярно вышележащим магнитным силовым линиям. В большинстве событий с СМЕ вспышки наблюдались как в открытых, так и в закрытых магнитных конфигурациях, но с квази-параллельным расположением жгутов относительно вышележащего магнитного поля, что создает благоприятные условия для подъема плазмы в верхние слои короны [4]. Более чем в половине исследованных вспышек не наблюдалось эрупций и выбросов корональной массы (СМЕ). Поэтому можно сделать вывод, что триггером вспышки является не выброс плазмы с последующим пересоединением (“стандартная модель вспышки”), а другой процесс, вероятно, связанный с диссипацией энергии электрического тока, накопленной в самом магнитном жгуте.

Литература

1. Anfinogentov S. GXBox_prep. // GitHub. – URL https://github.com/Sergey-Anfinogentov/GXBox_prep
2. Stupishin A. Magnetic Field Library // GitHub. –URL https://github.com/Alexey-Stupishin/Magnetic-Field_Library
3. И.А. Бакунина, В.Ф. Мельников, А.В. Шаин, С.А. Кузнецов, В.Е. Абрамов-Максимов Взаимное расположение магнитных жгутов и источников микроволнового излучения в эруптивных вспышках// Геомагнетизм и Аэрономия, 2025, том 65, № 9, с. 1363–1373
4. Solov’ev A.A. Force Free Magnetic Flux Rope with a High Current Density on the Axis // Astronomy Reports. Vol. 68. No. 6. Pp. 601–609. 2024.

Каталог исчезающих волокон по данным патрульных спектральных наблюдений Солнца

Березин И.А.[1,2]
[1]*ГАС ГАО РАН, Кисловодск, Россия*
[2]*КалмГУ, Элиста, Россия*
iberalex@ya.ru

Исчезновение солнечного волокна является одним из характерных наблюдательных проявлений эруптивных процессов в солнечной атмосфере и нередко сопровождает формирование коронального выброса массы. При этом значительная часть долговременных рядов наблюдений волокон представлена фильтрограммами или изображениями в отдельных участках спектральной линии, тогда как спектральные наблюдения позволяют дополнительно исследовать лучевые скорости и изменение профилей хромосферных линий непосредственно в ходе эрупции.

На Кисловодской горной астрономической станции ГАО РАН накоплен многолетний архив патрульных спектрогелиографических наблюдений полного диска Солнца в хромосферных линиях Hα и Ca II K. На основе этого архива проводится систематический поиск исчезающих волокон и формируется каталог эруптивных событий. Для зарегистрированных волокон определяются время события, положение на солнечном диске и основные характеристики структуры; сохраняется связь с исходными спектральными наблюдениями, позволяющая восстанавливать спектральные профили в различных участках волокна.

Для проверки эруптивного характера событий и установления их связи с корональными выбросами массы наблюдения сопоставляются с данными космических инструментов. Формируемая выборка предназначена для статистического исследования эволюции исчезающих волокон и анализа изменений спектральных профилей, сопровождающих развитие эрупции. В дальнейшем это позволит исследовать различия между событиями, сопровождающимися КВМ, и неудавшимися эрупциями.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 26-72-00054)

Температурная характеристика КД северной полярной области Солнца в сантиметровом и дециметровом диапазонах радиоизлучения Солнца по данным наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. на радиотелескопе РАТАН-600

Голубчина О.А.
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия
golubchina_olga@mail.ru

В работе представлен результат исследования изменения температурной характеристики корональной дыры (КД) северной полярной области Солнца по данным наблюдения солнечного затмения 29.03.2006 г. в сантиметровом и дециметровом радиоизлучении (1.03 - 30.7) см. Всего за одно прохождение Солнца и Луны через диаграмму направленности антенны (2.5-5) мин при наблюдении специальным методом наблюдения («Эстафета») на радиотелескопе РАТАН-600 получено процентное уменьшение яркостной температуры КД и яркостная температура КД в процентах относительно открытого участка короны на 7 длинах волн. Показано, что КД отчётливо видна на волнах дециметрового излучения (13.0 -30.7) см и практически не видна на коротких волнах сантиметрового излучения (2.7-1.38) см.

Статистический анализ мощных вспышек 24 солнечного цикла по наблюдениям RSTN и GOES

Гопасюк О.С., Вольвач А.Е., Якубовская И.В.
Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН, Научный, Россия
olg@craocrimea.ru

Наблюдения солнечных вспышек в рентгеновском и микроволновом диапазонах часто показывают, что форма восходящей части кривой блеска в мягком рентгеновском (SXR) диапазоне очень похожа на временной интеграл кривой блеска в микроволновом (MW) или жестком рентгеновском (HXR) диапазонах. Это привело к идее о причинно-следственной связи между нетепловым (MW и HXR) и тепловым (SXR) излучениями вспышки [1, 2]. Эта связь стала известна как эффект Нойперта, который можно представить в виде:

$$F_{\mathrm{P,SXR}} \approx k \cdot \Gamma_{\mathrm{MW,HXR}},$$

где $F_{\mathrm{P,SXR}}$ – максимальный SXR поток; $\Gamma_{\mathrm{MW,HXR}}$ – флюенс MW (HXR) излучения, т.е. поток MW (HXR) излучения, интегрированный по продолжительности импульсной фазы вспышки; k – зависит от нескольких факторов, например, геометрии магнитного поля и, следовательно, может варьироваться от вспышки к вспышке. При исследовании эффекта Нойперта в отдельных событиях обычно сравнивают временные профили MW или HXR излучения с производной по времени SXR излучения (например, [2, 3]). При таком сравнении анализируются пиковые времена обеих кривых, независимо от того, сохраняются ли относительные размеры пиков от одного временного профиля к другому.

Мы провели статистическое исследование причинно-следственной связи между MW и SXR излучениями в мощных солнечных вспышках 24 солнечного цикла, основанное на кросс-корреляционном анализе между потоком SXR излучения и MW флюенсом во время импульсной фазы.

Нами были проанализированы данные за период с 2011 по 2017 гг., полученные GOES в диапазоне 1-8 Å и RSTN на частотах 4995 МГц, 8800 МГц и 15400 МГц во время 31 вспышки класса GOES M5.0 и выше, происходивших в интервале 40° от ЦМ. По сравнению с максимальным потоком MW излучения MW флюенс демонстрирует лучшую линейную зависимость от максимального потока SXR. Это предполагает, что энергия вспышки, высвобождаемая во время импульсной фазы, в основном исходит от нетепловых электронов. Все вспышки на частотах 4995 МГц, 8800 МГц, 15400 МГц показали Коэффициенты корреляции между MW флюенсом и SXR потоком выше 0.9, что может указывать на тесную взаимосвязь между MW флюенсом и потоком SXR. В подавляющем большинстве (>84%) вспышек коэффициенты корреляции превышают 0.95. Полученные статистические результаты согласуются со стандартной моделью вспышки CSHKP [4, 5, 6, 7]. Коэффициенты корреляции менее 0.95, как правило, показывают вспышки

класса M с меньшим соотношением между разностью времен максимумов SXR и MW и продолжительностью импульсной фазы SXR. Наши наблюдательные факты позволяют предположить, что все выбранные мощные вспышки могли следовать эффекту Нойперта.

Литература

1. Neupert W.M. Comparison of solar X-ray line emission with microwave emission during flares // *Astrophys. J. Lett.* 1968. Vol. 153. L. 59.
2. Dennis B.R., Zarro D.M. The Neupert effect: what can it tell up about the impulsive and gradual phases of solar flares // *Solar Phys.* 1993. Vol. 146. P. 177.
3. Veronig A. The Neupert effect // *Hvar Obs. Bull.* 2003. *Vol.* 27. P. 47.
4. Carmichael H. A Process for Flares, in Proc. AAS-NASA Symp., The Physics of Solar Flares, ed. W.N. Hess (Washington, DC: NASA, STID). 1964. P. 451.
5. Sturrock P.A. Model of the High-Energy Phase of Solar Flares // Nature. 1966. Vol. 211. P. 695.
6. Hirayama T. Theoretical Model of Flares and Prominences. I: Evaporating Flare Model // Sol. Phys. 1974. Vol. 34. P. 323.
7. Kopp R.A., Pneuman G.W. Magnetic reconnection in the corona and the loop prominence phenomenon // Sol. Phys. 1976. Vol. 50. P. 85.

Вспышечное микроволновое излучение и солнечные протоны

Григорьева И.Ю.[1], Струминский А.Б.[2], Ожередов В.А.[2], Садовский А.М.[2]
[1]ГАО РАН,Санкт-Петербург, Россия
[2]ИКИ РАН, Москва, Россия
irina.2014.irina@mail.ru

Данные непосредственной регистрации вспышечного HXR излучения в диапазоне от единиц до сотен кэВ детекторами, следящими за Солнцем RHESSI (2002-2023), STIX (с 2021 года) и ASO-S(HXR) (с 2023 года), позволяют определять спектр ускоренных на Солнце электронов. А если нет таких данных? Дополнительную информацию к HXR излучению > 100 кэВ о процессах ускорения на Солнце можно получить, регистрируя нетепловое микроволновое излучение на наиболее высоких частотах и на плазменных частотах сети RSTN (15.4 ГГц — 245 МГц), радиовсплески IV типа [1-4].

Известно, что начало солнечного протонного возрастания с источником (вспышка-КВМ) на восточной части диска имеет большую временную задержку от начала вспышечного жесткого рентгеновского (HXR) излучения по сравнению с протонными возрастаниями от «западного» и «центрального» источников. Такая задержка связана с процессом азимутального распространения протонов от источника в короне и солнечном ветре, которые еще не поняты окончательно [5].

Однако, это может быть благом при анализе длительного солнечного первичного HXR излучения (по данным высокочувствительных детекторов ACS SPI и ART-XC, регистрирующих первичное и вторичное излучение) «восточных» протонных вспышек, которое в случае «западных» и «центральных» вспышек часто оказывается скрыто под фоном вторичного («протонного») HXR излучения [6]. Поэтому на примере «восточных» протонных возрастаний предполагается понять может ли совместный анализ вспышечного HXR излучения, зарегистрированного ACS SPI (>60 кэВ) и ART-XC в 3х каналах (20-40 кэВ, 40-60 кэВ и 60-120 кэВ) и нетеплового радиоизлучения (RSTN) дать дополнительную информацию о работе ускорителя.

Рассмотрены 4 «восточных» случая при различной солнечной активности: 14 февраля 2014 радио-ноль в 00:41 UT (плато в максимуме 24 цикла), 31 декабря 2023 — в 21:42 UT (рост 25 цикла) и два в максимуме 25 цикла (14 сентября 2024 радио-ноль в 15:17 UT (см. рис.1) и 28 марта 2025 — в 15:05 UT). Полученная информация сравнивается с наблюдениями протонного детектора EPHIN/SOHO (4.8-7.3 МэВ и 25-53 МэВ) тех же событий и временным профилем температуры (Te) и меры эмиссии (EM) в мягком рентгеновском диапазоне (SXR, GOES).

Исследованы микроволновые профили вспышечного излучения для рассмотренных восточных событий по данным патрульных наземных станций сети RSTN. На основе зарегистрированного нетеплового

радиоизлучения сделана оценка длительности фазы ускорения солнечных протонов, согласующаяся с информацией в SXR, HXR излучении и оптике.

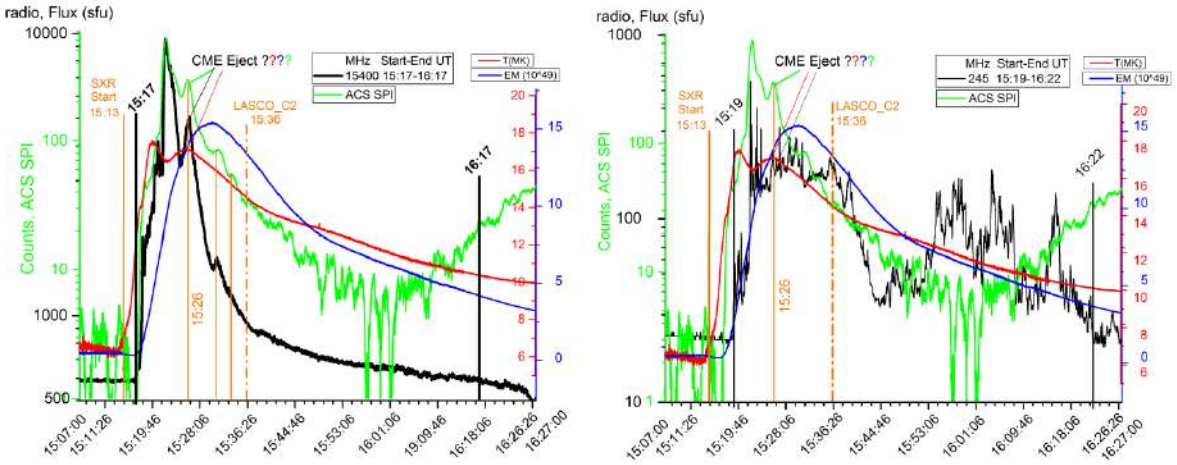


Рис. 1. Сравнение временных профилей события 14 сен. 2024 (зеленый: HXR > 60 кэВ (уср. 1 мин., ACS SPI); красный Te (SXR) и синий EM (SXR), 2 сек. GOES), относительно начала всплеска нетеплового радиоизлучения (черный: (слева) магнитно-тормозное излучение на 15.4 ГГц и (справа) плазменное излучение на 245 МГц, 1 сек. RSTN). Вертикальные бары — время в UT: оранжевые (начало в SXR, некоторые локальные максимумы и 1-ая регистрация КВМ (LASCO_C2)), черные (начало и конец регистрации всплеска на указанных частотах RSTN).

Литература

1. Черток И.М. Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // ГиА. 2018. Т. 58. № 4. С. 471—478.
2. Klein K.-L. Radio Astronomical Tools for the Study of Solar Energetic Particles I. Correlations and Diagnostics of Impulsive Acceleration and Particle Propagation, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2021. V. 7. Art. 580436.
3. Klein K.-L. Radio Astronomical Tools for the Study of Solar Energetic Particles II. Time-Extended Acceleration at Subrelativistic and Relativistic Energies, Frontiers in Astronomy and Space Sciences. 2021. V. 7. Art. 580445.
4. А. Б. Струминский, А. М. Садовский, И. Ю. Григорьева, Критерии для предсказания протонных событий по солнечным наблюдениям в реальном времени // ГиА. 2024. Т. 64, № 2, С. 163–174.
5. И. Ю. Григорьева, А. Б. Струминский, Ю. И. Логачев, А. М. Садовский, Корональное распространение солнечных протонов во время и после их стохастического ускорения // Кос. Исс.. 2023. Т. 61, №3. С. 230-241.

Влияние теплопроводности на формирование длиннопериодических колебаний в солнечной короне

Дертеев С.Б.[1], Михаляев Б.Б.[1], Манкаева Г.А.[1]
[1]*КалмГУ, Элиста, Россия*
derteevsergei@email.ru

Благодаря наблюдению волн сжатия появилась возможность изучать как саму корону, так и слои, которые располагаются ниже. Волны сжатия или распространяющиеся возмущения, наблюдаемые в солнечной атмосфере по вариациям интенсивности КУФ-излучения, имеют скорости сопоставимые со скоростью звука и периоды от нескольких минут до десятков минут. Самый распространенный метод наблюдения – это построение временного ряда интенсивности в некоторой точке активной области. Вейвлет-анализ таких сигналов показывает наличие нескольких максимумов, называемых периодами, часто наблюдаются два периода. В спектрах имеются периоды 3-5 минут, которые можно объяснить проникающими в корону фотосферными и хромосферными колебаниями. Имеются также периоды более 20 минут, происхождение которых остается неясным. Волна с определенным периодом предполагает наличие в локальном вейвлет-спектре определенного максимума протяженностью всего времени наблюдения, однако реальные вейвлеты дают последовательность отдельных максимумов с различными по величине периодами.

Для объяснения появления в спектрах двух максимумов можно моделировать поведение узколокализованного импульса, который со временем распадается на два. Волны с короткими и длинными периодами различаются как по степени дисперсии, так и по скорости затухания [1-3]. В линейном приближении показано, как может происходить разделение. Нужно обратить внимание на минимум групповой скорости, который служит «некоторой границей» разделения акустических волн по свойствам – дисперсии и затухания.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки № 075-03-2026-375.

Литература

1. Mikhalyaev B.B., et al. Solar Phys. 2023. V. 298. 102.
2. Derteev S.B., et al. Solar Phys. 2024. V. 240. P. 141.
3. Mikhalyaev B. and Derteev S. Astrophys. J. 2026 (in press).

Топологический механизм возникновения синхронных микровспышек

Думин Ю.В.[1,2], Сомов Б.В.[1], Свирская Л.М.[3,4], Савиных Е.С.[5]
[1]*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*
[3]*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*
[4]*Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, Россия*
[5]*Московский государственный строительный университет, Москва, Россия*
dumin@yahoo.com

Одним из интересных явлений, наблюдаемых в солнечной хромосфере (например, по изображениям в линии Ca II, регистрируемым на спутнике Hinode [1, 2]), являются синхронные микровспышки с характерными размерами 10"–20" и временем развития 1–3 мин (Рис. 1). В отличие от хорошо известных двухленточных вспышек они имеют существенно меньшие пространственные и временные масштабы, а также характерные морфологические особенности, а именно: (а) хорошо очерченную дугообразную форму, (б) малую толщину дуг по сравнению с их длиной и (в) значительное расстояние между дугами, сопоставимое или даже в 2–3 раза превышающее их собственные размеры.

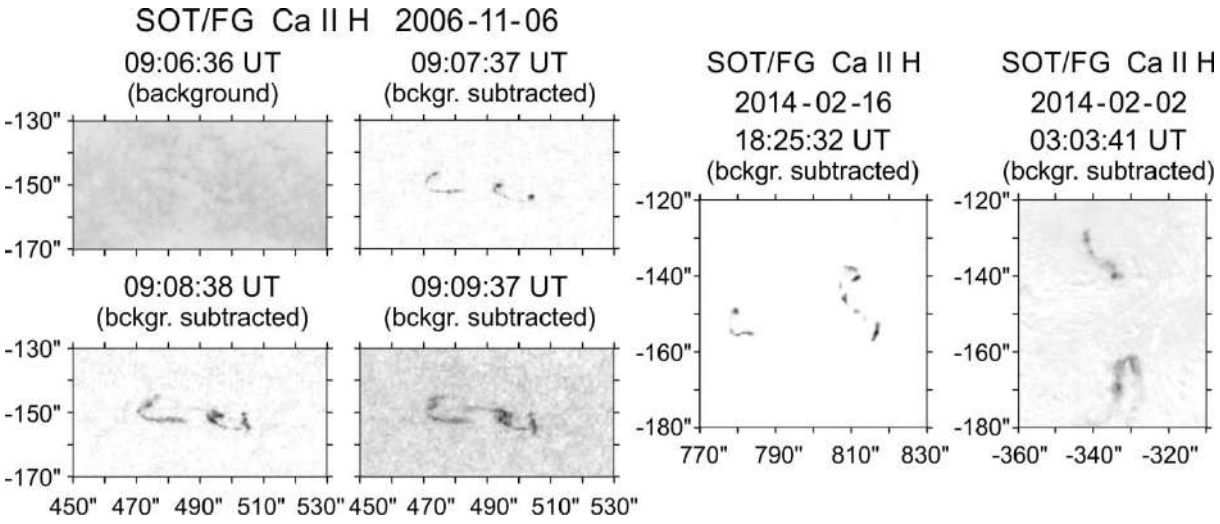


Рис. 1: Хромосферные микровспышки в линии Ca II (негативные изображения).

Цель настоящего сообщения – показать, что одна из интерпретаций этого явления может быть основана на так называемых “топологических” (или, точнее, “нелокальных”) моделях магнитного пересоединения. В классических моделях возникновение нулевой точки магнитного поля, ответственной за инициирование процесса пересоединения, обеспечивается локальными системами электрических токов вблизи места пересоединения. В отличие от этого, в топологических (нелокальных) моделях нулевая точка

создаётся благодаря специфической суперпозиции воздействий от удалённых источников (солнечных пятен) [3]. В наших предшествующих исследованиях [4] топологический механизм был применён для объяснения вспышек с единственной эмиссионной дугой, формируемой 4 источниками магнитного поля. В данной работе развита методика расчёта магнитных конфигураций с 6 источниками, которые могут привести к абсолютно синхронному формированию двух эмиссионных дуг (нулевых линий магнитного поля).

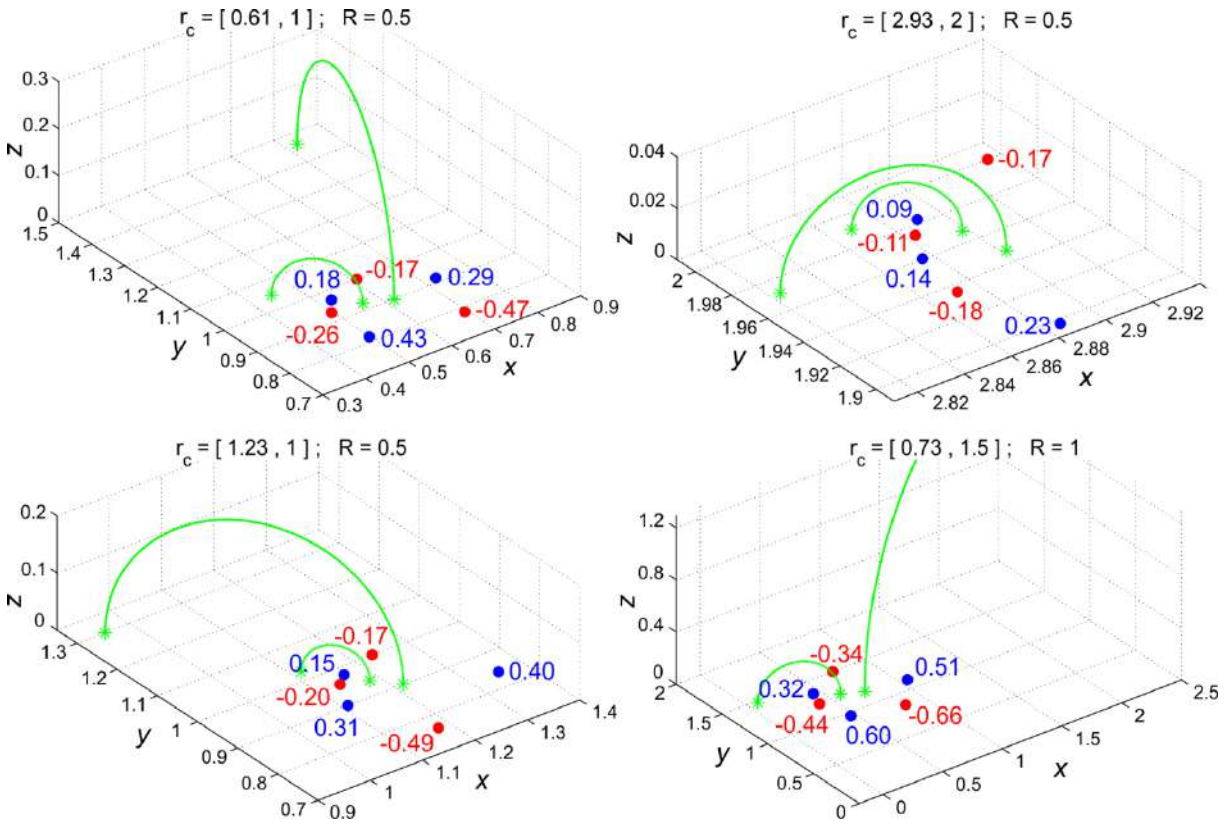


Рис. 2: Примеры взаимного расположения нулевых линий и источников, реализуемые в топологической модели магнитного пересоединения.

Как видно из примеров на Рис. 2, эти эмиссионные дуги могут иметь весьма разнообразные размеры и взаимное расположение друг относительно друга. Это создаёт интересные перспективы для дальнейшего поиска соответствующих конфигураций в наблюдательных данных.

Литература

1. Tsuneta S., et al. Solar Phys., v.249, p.167 (2008).
2. Hinode QL Movie Archive. https://hinode.nao.ac.jp/en/for-researchers/qlmovies/top.html
3. Gorbachev V.S., Kel'ner S.R., Somov B.V., Shvarts A.S. Sov. Ast., v.32, p.308 (1988).
4. Dumin Yu.V., Somov B.V. MNRAS, v.528, p.L15 (2024).

Методы определения границы тень-полутень в солнечных пятнах

Живанович И.[1], Рыбак А. Л.[2]
[1]*Астрономическая обсерватория, Белград, Сербия*
[2]*Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*
izivanovic@aob.rs
solarfish@alexeyryback.ru

Определение границы между тенью и полутенью является важной задачей физики солнечных пятен, необходимой для разделения областей с различными магнитогидродинамическими режимами. Точность локализации данной границы критически влияет на оценку физических параметров пятна и диссипацию магнитного поля на периферии. С развитием наблюдательных данных высокого разрешения, таких как SDO/HMI и Hinode/SP, задача автоматизации выделения границ становится особенно актуальной из-за появления возможности инструментально разрешать сложную пространственную морфологию магнитного поля, а также мелкомасштабные структуры.

В настоящей работе проводится сравнение нескольких различных подходов к автоматизированной сегментации солнечных пятен на основе анализа магнитограмм и изображений интенсивности. Рассматривается несколько основных методов: градиентный подход, основанный на поиске локальных экстремумов пространственных изменений характеристик магнитного поля и интенсивности в континууме [1], метод Отсу, основанный на поиске оптимального порогового разделения уровней интенсивности и магнитного поля [2], метод многоуровневой пороговой фильтрации (мульти Отсу) [3], а также алгоритм резкого обрыва напряженности магнитного поля вдоль радиальных лучей, построенных на пятноцентричной матрице. В последнем случае исходный фрагмент магнитограммы подвергается сплайн-интерполяции с целью многократного увеличения количества точек, из которых складывается анализируемое пятно. Данная процедура позволяет провести через полученные точки радиальные лучи с азимутальной плотностью, достаточной для формирования детальной (сверхчёткой) картины солнечного пятна. Как будет показано в работе, резкое изменение поля на радиальных лучах является надёжным маркером границы исследуемого пятна.

Литература

1. Zhivanovich I., Solov'ev A. A., Efremov V. I., & Miller N. O. 2020, Geomagnetism and Aeronomy, 60, 86
2. Otsu, N. 1979, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., 9, 62
3. Liao, P.-S., Chen, T.-S., & Chung, P.-C. 2001, J. Inf. Sci. Eng., 17, 713

Распределение числа солнечных вспышек разной мощности по фазам 24 цикла солнечной активности

Загайнова Ю.С.[1], Файнштейн В.Г.[2], Обридко В.Н.[1]
[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Российская Федерация
[2] Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Российская Федерация
**e-mail: yuliazag@izmiran.ru, yuliazagainova@mail.ru*

В работе по данным NOAA NCEI [1] изучено распределение солнечных вспышек разной мощности в различных фазах 24 цикла солнечной активности. С учетом поставленной задачи затронуты вопросы выделения основных временных интервалов хода развития любого цикла солнечной активности. При этом терминологические словосочетания «фаза минимума» и «фаза максимума» цикла широко используются в литературе. Хотя, необходимо отметить, что на данный момент отсутствует физическое обоснование моментов начала и конца фазы максимума цикла солнечной активности. Также нет физического обоснования, как для отдельного цикла солнечной активности выделять временные отрезки фаз минимума (1) от начала цикла до наступления фазы максимума (фаза минимума ветви роста чисел Вольфа) и (2) после максимума цикла до конца цикла солнечной активности (фаза минимума ветви спада). В своей работе мы опираемся на определения фаз цикла солнечной активности, предложенные в работе [2], а также приводим свои соображения на этот счет. В работе обсуждаются различия распределения слабых солнечных вспышек (Класса A, B и C), средних и мощных вспышек (Класса M и X) по фазам 24 цикла солнечной активности. Показано, что вспышки Класса A, B и C, в среднем, возникают независимо от фазы цикла, а регистрация средних вспышек Класса M и X зависит от мощности солнечного цикла.

Литература

1. NOAA NCEI - National Centers for Environmental Information https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/
2. Ишков В.Н., Итоги и уроки 24 цикла – первого цикла второй эпохи пониженной солнечной активности // Астр. ж. 2022, № 2, с. 1–16, DOI: 10.31857/S0004629922020050.

Отклик корональной магнитной петли на испарение хромосферной плазмы

Зайцев В.В. [1], Степанов А.В. [2,3], Симонова Т.В.[1]
[1]*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*
[2]*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург*
[3]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург*
simonovat@ipfran.ru

Проблема разрушения корональных магнитных петель на Солнце является важной с практической точки зрения, так как при этом в корону и межпланетную среду могут инжектироваться горячая плазма и быстрые частицы, ускоренные в результате вспышечных процессов. Существуют различные механизмы дестабилизации солнечных магнитных петель, которые, как правило, основаны на МГД-неустойчивостях. С другой стороны, известно, что для удержания токонесущих магнитных петель силой Ампера в равновесном состоянии электрический ток в петлях должен превышать некоторое критическое значение (критерий Беннета). Мы обращаем внимание на следующее обстоятельство: учёт испаряющейся хромосферной плазмы во вспышечных петлях, а также в корональных ярких точках, имеющих петельную структуру, приводит к новому эффекту - уменьшению стабилизирующей роли продольного тока, перетекающего на поверхность петель. Вследствие этого петли могут «раскрываться», что приводит к выбросам плазмы и высокоэнергичных частиц в корону. Уменьшение продольного тока внутри петли происходит вследствие генерации радиального электрического поля, возникающего при взаимодействии потока испаряющейся плазмы с азимутальным магнитным полем, генерируемым продольным током. При этом проводимость Педерсена приводит к генерации радиальных токов внутри петли. В результате продольный ток уменьшается, перетекая на поверхность петли, что может приводить к нарушению условия равновесия петли вследствие уменьшения силы Ампера и к разрушению петельной магнитной структуры. Обращается внимание на необходимость учёта соударений ионов с нейтральными частицами в проводимости Педерсена при корональных температурах. При этом в плазме корональных петель проводимость Педерсена с учётом соударений ионов с нейтралами оказывается на три порядка больше по сравнению с соответствующей величиной без учёта нейтралов. Таким образом, учёт испаряющейся хромосферной плазмы при энерговыделении в солнечных вспышечных петлях, а также в корональных ярких точках, приводит к новому эффекту - уменьшению стабилизирующего роли продольного тока и возможной инжекции горячей плазмы и высокоэнергичных частиц в корону.

Работа поддержана грантом РНФ 22-12-00308-П (В.В. Зайцев, А.В. Степанов), и фондом «БАЗИС», проект 24-1-1-97-1, (Т.В. Симонова)

Проявления быстрых волновых пакетов в солнечных радиовсплесках

Зюзина У.С.[1], Дмитриев В.А.[1,2], Иванов Е.Ф.[3], Самофалова Б.А.[2], Куприянова Е. Г.[1,2]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[3]*Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия*
zyuzinaylyana@gmail.com, elenku@bk.ru

Для диагностики вспышечных процессов в атмосфере Солнца необходима информация о параметрах корональных структур, в частности, о градиентах распределения плотности поперёк магнитного поля корональных неоднородностей, об объёме области энерговыделения, о временных масштабах процесса энерговыделения. Существенным потенциалом для диагностики этих параметров обладают цуги быстрых магнитозвуковых волн (быстрые волновые пакеты, БВП, QFP), распространяющиеся в короне Солнца со скоростями порядка скорости Альфвена. Согласно [1], БВП могут являться дисперсионным откликом неоднородной корональной плазмы на импульсное энерговыделение. В ряде случаев импульсное энерговыделение является также триггером глобальных корональных волн. Есть указания на то, что БВП сопутствуют глобальным волнам в 32% случаев в крайнем ультрафиолетовом диапазоне [2] и в 26% случаев в радиодиапазоне [3]. В докладе представлены предварительные результаты детектирования быстрых волновых пакетов в динамических радиоспектрах за 2024-2026 годы. Использованы данные радиоспектрополяриметров YAMAGAWA и HiRAS (Япония), SOLARSPEL (ур. Бадары, Россия), а также сети e-CALLISTO. Получено, что кандидаты в БВП наблюдаются в группах радиовсплесков III типа, в радиовсплесках II и IV типов, а также в дрейфующих пульсирующих структурах (DPS). Оценены характерные скорости частотного дрейфа для DPS и серий радиовсплесков III типа. Обсуждаются полученные результаты.

Литература

1. Nakariakov et al. 2024 Rev. Mod. Plasma Phys. 8, 19. DOI: 10.1007/s41614-024-00160-9.
2. Liu W., Ofman L., Broder B., Karlický M., Downs C. “Quasi-periodic fast-mode magnetosonic wave trains within coronal waveguides associated with flares and CMEs”, 2016, In Solar Wind 14 vol. 1720. American Institute of Physics Conference Series p. 040010. AIP. DOI: 10.1063/1.4943821
3. V. A. Dmitriev, E. G. Kupriyanova, A. V. Mikhalchuk “Detector for fast wave trains in the solar radio emission”, 2026, Phil. Trans. R. Soc. A, DOI: 10.1098/rsta.2025.0056

К расчету спектра солнечного протуберанца

Калинин А.А.[1], Калинина Н.Д.[2]
[1]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*
[2]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия*
alexander.kalinin@urfu.ru

Недавние наблюдения солнечных протуберанцев и вспышек на телескопах с высоким разрешением (DKIST, IRIS и др.) выявили их жгутовую структуру, как бы сплетенную из тонких волоконец размерами около 30 км [1]. Эти волоконца логично моделировать цилиндрическими структурами по методике работы [2], в дальнейшем GL. В ней петельный протуберанец моделируется бесконечным цилиндром, ось которого наклонена под углом α к нормали к поверхности Солнца. Параметры модели: T - температура, P - давление, V - микротурбулентная скорость, e - толщина, h - высота над поверхностью Солнца. Возможно изменение температуры в зависимости от радиуса цилиндра. Решение уравнений переноса (УПИ) и стационарности (УС) для населенностей и полей излучения достигается методом ускоренных Λ-итераций. Для атома водорода учтено 5 уровней и континуум, для атома гелия: 29 уровней He I, 4 уровня He II и 1 уровень He III (континуум). Реализующая такую методику программа называется C2D2E и может быть получена у авторов GL по запросу.

В работе [4] приведены расчеты по этой программе для ряда значений P и T (см. рис. 2а в ней). К сожалению, программа дает решение не при любых параметрах. Область устойчивости составляет примерно $0.01 < P < 1$ дин/см^2 и $4000 < T < 20\,000$ K. При росте температуры и малых давлениях решение перестает сходиться, а при $T \geq 10^5$ сходимость нарушается при любых давлениях.

В работе [3] обсуждается проблема со сходимостью при расчете крайне неравновесных атмосфер O-звезд с большим содержанием гелия. Как видим, симптомы те же, что и в нашей ситуации – наличие гелия и высокие температуры. Там же в [3] приводится рецепт улучшения ситуации, очень простой в реализации, сводящийся к плавному переходу от равновесного ЛТР к неравновесному решению за счет изменения столкновительных коэффициентов: в начале итераций они задаются большими, и поэтому задача становится близка к ЛТР, а затем постепенно уменьшаются, и решение малыми шагами приближается к реальному – неравновесному (collisional-radiative switching, CRS). Метод CRS к настоящему времени внедрен в большинство программ расчета поля излучения и населенностей уровней в звездных атмосферах и солнечной плазме, но в C2D2E в имеющейся у нас реализации отсутствует.

Мы внедрили CRS в программу C2D2E, и теперь для изотермических - изобарических моделей при $P > 0.01$ сходимость улучшилась. Но для изменяющихся давления и температуры в теле протуберанца требуется

тщательная настройка сетки деления по радиусу практически всегда. Вместе с тем надо учитывать, что в модели GM пока нет уравнений, описывающих равновесие модельного цилиндра, которое могло бы определять зависимость температуры, давления и других параметров от радиуса, и пока расчеты носят больше модельный характер.

В данном сообщении приводятся также данные по моделированию профиля линии Hα в протуберанцах по методу [5], для модели, описанной в [6,7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0012)

Литература

1. Tamburri Cole A., Kazachenko Maria D., Gaizzi Gianna et. al Unveiling Unprecedented Fine Structure in Coronal Flare Loops with the DKIST // The Astrophysical Journal Letters, Volume 990, Issue 1, id.L3, 2025, 9 pp.
2. Gouttebroze P., Labrosse N. Radiative transfer in cylindrical threads with incident radiation. VI. A hydrogen plus helium system // Astronomy and Astrophysics, Volume 503, Issue 3, 2009, pp.663-671 (GL).
3. Hummer D.G., Voels S.A. Collisional-radiative switching: a powerful technique for converging non-LTE calculations // Astronomy and Astrophysics, Volume 192, 1988, pp.279-280.
4. Калинин А.А. Моделирование спектров солнечных протуберанцев // Труды XXII Всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика – 2018», ГАО РАН, СПб, 8 - 12 октября 2018, с. 195-198.
5. Heinzel P., Gunar S., Anzer U. Fast approximate radiative transfer method for visualizing the fine structure of prominences in the hydrogen Hα line // Astronomy and Astrophysics, volume 579, 2015, A16.
6. Solov'ev A.A. The Structure of Solar Filaments. Prominences in the Corona Free from External Magnetic Field // Astronomy Reports, Vol. 54, 2010, No. 1, pp. 86–95.
7. Калинин А.А., Калинина Н.Д. Расчет спектра простой магнитогидростатической модели протуберанца // Труды XXVIII Всероссийской ежегодной конференции с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика – 2024», ГАО РАН, СПб, 7 – 11 октября 2024, с. 149 - 152.

Наблюдательные параметры как критерий выделения двух популяций корональных ярких точек

Карачик Н.В.[1], Миненко Е.П.[1]
[1]*Астрономический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан*
ninakarachik@mail.ru

Корональные яркие точки (КЯТ) являются одними из наиболее распространённых мелкомасштабных проявлений солнечной активности в короне и связаны с небольшими магнитными биполями. В предыдущих исследованиях [1, 2] было показано, что КЯТ не образуют однородную популяцию, а подразделяются на две статистически различные группы, демонстрирующие противоположную связь с солнечным циклом и существенно различающиеся широтным распределением. Однако предложенная классификация была получена на основе данных одного инструмента (SOHO/EIT) с использованием только максимальной интенсивности в качестве параметра разделения.

Цель настоящей работы заключалась в оценке того, насколько выделение двух популяций КЯТ зависит от выбора наблюдательного параметра и какие параметры обеспечивают их устойчивое разделение.

Для анализа использованы наблюдения SOHO/EIT (195 Å), SDO/AIA (193 и 211 Å) и Hinode/XRT, охватывающие широкий диапазон пространственных разрешений, температурных откликов и инструментальных характеристик. Для всех данных применялся единый алгоритм автоматического выделения КЯТ, что позволило минимизировать влияние методологических различий.

Для каждой КЯТ определялись шесть наблюдательных параметров: максимальная, средняя и суммарная интенсивности, интенсивность локального фона, площадь и контраст относительно окружающего фона. Для каждого параметра весь массив КЯТ разбивался на узкие интервалы значений, после чего вычислялось среднемесячное число КЯТ в каждом интервале и определялись коэффициенты корреляции между их временными вариациями и международным числом солнечных пятен.

Полученные результаты показали, что далеко не все наблюдательные характеристики одинаково пригодны для разделения КЯТ на две популяции. Независимо для всех четырёх инструментов максимальная интенсивность, средняя интенсивность и интенсивность локального фона воспроизводят практически идентичную картину, включающую ветвь объектов, коррелирующих с солнечным циклом, ветвь антикоррелирующих объектов и узкую переходную область между ними. Совершенно иная картина наблюдается при использовании площади КЯТ, суммарной интенсивности и контраста относительно фона. При использовании этих параметров разделение между двумя популяциями существенно размывается или практически исчезает. Следовательно, параметры, характеризующие

интегральные свойства или геометрические размеры структуры, не сохраняют статистических признаков существования двух популяций.

Особый интерес представляет тот факт, что наиболее устойчивое разделение обеспечивают параметры, характеризующие локальные характеристики интенсивности КЯТ и окружающей их короны. Этот результат свидетельствует о том, что различия между двумя популяциями определяются не столько полной энергией излучения или размерами структуры, сколько локальными условиями формирования коронального излучения.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что возможность разделять КЯТ на две статистически различные популяции определяется выбором наблюдательного параметра. Наиболее информативными оказываются локальные фотометрические характеристики, тогда как интегральные параметры значительно менее пригодны для разделения популяций. Полученные результаты накладывают новые наблюдательные ограничения на физическую интерпретацию природы корональных ярких точек и могут служить основой для дальнейших исследований механизмов их формирования и эволюции.

Литература

1. Sattarov I., Pevtsov A. A., Karachik N. V., Sherdanov C. T., Tillaboev A. M. Two populations of coronal bright points // Solar Physics. 2010. Vol. 262. P. 321–334.
2. Karachik N. V. Two types of coronal bright points as indicators of global and local dynamo processes // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2025. Vol. 543, No. 4. P. 3975–3980.

Глобальные комплексы активности и мощные рентгеновские вспышки

Кацова М.М.[1], Обридко В.Н.[2], Соколов Д.Д.[3, 2]
[1]*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия*
[3]*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
mkatsova@mail.ru

В предыдущей работе нами было показано, что мощные рентгеновские вспышки избегают фазы роста 11-летнего цикла и происходят в основном на фазе спада [1]. В настоящем докладе этот результат подтвержден и дано его объяснение. Показано, что мощные вспышки связаны с глобальными комплексами активности. Под этим термином мы понимаем объединённый общим крупномасштабным магнитным полем комплекс, включающий как две или более активные области, так и относительно близко расположенную корональную дыру. Это понятие объединяет поля разных масштабов и механизмов генерации – крупномасштабное глобальное магнитное поле дипольного типа и локальные поля, описываемые обычно тороидальной составляющей. В качестве типичного примера рассмотрена структура магнитного поля в области, приведшей к возникновению мощной вспышки 29 октября 2003 года (Хеллоуинская вспышка). Изучено распределение глобальных комплексов, управляемых экваториальной дипольной составляющей, и подтверждено смещения максимума в сторону фазы спада. Показано, что распределение областей открытых магнитных полей также смещено в сторону фазы спада и их диаграмма примыкает к диаграмме бабочек Маундера. Положение зарегистрированных мощных вспышек, список которых дан в предыдущей работе [1], на диаграмме широта-время совпадает с диаграммой открытых магнитных полей. Причина этого совпадения состоит в самом механизме генерации. Мощная вспышка – это в целом довольно сложное явление, включающее быстрое высвобождение энергии и контролирующее начало вспышки возбуждение электронов, возбуждение ионов и увеличение их концентрации, транспорт электронов и ионов, а также нагрев, вызванный вспышкой. Показано, что совокупность этих явлений описывается механизмом обменного пересоединения, которое требует относительной близости области первичного энерговыделения к области открытого магнитного поля.

Литература

1. Obridko V.N., Katsova M.M., Sokoloff D.D., 2026 – Solar Phys., in press

Спектральный анализ жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным Konus-Wind и SolO/STIX, наблюдавшихся за лимбом для одного из инструментов

Киселёв В.И.[1,2] Лысенко А.Л.[2]
[1]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[2]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*
valentin_kiselev@iszf.irk.ru

Наблюдение слабых корональных источников жёсткого рентгеновского излучения без вклада ярких хромосферных оснований петель возможно в залимбовых вспышках, где плотные нижние слои атмосферы экранированы диском Солнца. В работе исследованы спектральные характеристики жёсткого рентгеновского излучения в трёх солнечных вспышках, наблюдавшихся одним из инструментов, Konus-Wind или SolO/STIX, на видимой стороне Солнца, а вторым – за лимбом, где было зарегистрировано только корональное излучение. Для каждой вспышки проведен анализ временной эволюции спектральных параметров излучения из областей короны и оснований петель. Обнаружено, что спектральные индексы излучения корональных источников и оснований петель меняются синхронно, при этом в короне наблюдается более мягкое излучение. Не выявлено медленного спада жёсткого рентгеновского излучения корональных источников, который мог бы прямо указывать на захват электронов в магнитной ловушке. В то же время, в рассмотренных событиях различия между спектральными индексами электронов, излучающих в основаниях петель и в короне, можно объяснить кратковременным захватом ускоренных электронов в короне в магнитную ловушку в режиме непрерывной инжекции.

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

О структуре течений в подфотосферной зоне в окрестностях активной области NOAA 11158

Коновалихин А.М.[1], Гетлинг А.В. [1]
[1]*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
konovalikhin.a21@physics.msu.ru; A.Getling@mail.ru

В рамках общей проблемы изучения структурной организации и динамики течений в конвективной зоне Солнца проанализированы поля скорости вещества, полученные методами гелиосейсмологии времён и расстояний, на глубинах от 0,5 Мм до 19 Мм в разные моменты развития активной области NOAA 11158 (с 09.02.2011 до 18.02.2011). Данные дополнены полями скорости движения вещества в фотосфере, полученными методами локального корреляционного трассирования (ЛКТ) и доплеровских измерений. Сделана попытка реконструировать трёхмерную структуру течений на основе таких данных и попутно составить представление о надежности измерений скорости.

Гелиосейсмологическое определение вертикальных скоростей V_z сопряжено с очень большими ошибками в силу эффекта перекрёстных помех. Были обнаружены существенные противоречия между картиной течений, построенной по гелиосейсмологическим скоростям в приповерхностных слоях, и структурой потоков в фотосфере, которые регистрируются гораздо более явными методами (ЛКТ и доплерограммы). В частности, наблюдалась инвертированная структура течений в супергранулах: в приповерхностных слоях опускание вещества в центре, а по краям — поднятие. Также имелись признаки нарушения сохранения баланса вещества в области под солнечными пятнами. А именно —подавляющее преобладание нисходящих потоков в приповерхностных слоях (до ~6 Мм), не согласующееся с картиной течений в области пятен в фотосфере (см. рис. 1а). Сделан вывод, что при выполнении гелиосейсмологической инверсии под влиянием эффекта перекрёстных помех в этой области направление вертикального течения было определено неверно. В связи с этим на основе уравнения непрерывности в приближении неупругости по дивергенции горизонтальных скоростей $\mathrm{div}\mathbf{V}_{xy}$ был проведён расчёт вертикальной компоненты скорости течения вещества V_z. Такой подход позволил устранить все обозначенные неопределённости в структуре вертикальных потоков (см. рис. 1б и рис. 1в).

На основе V_z, рассчитанных через уравнение непрерывности, в поле вертикальных скоростей на глубинах до 6 Мм под солнечными пятнами обнаружены кольцеобразные структуры: из колец вещество растекается наружу и внутрь, а внутри колец наблюдается опускание (см. рис. 1б и рис. 1в). Эти структуры, вероятно, имеют конвективную природу и аналогичны ранее описанным в литературе [1].

Представлены результаты анализа корреляций вертикальных скоростей и дивергенции горизонтальных скоростей. Согласно динамике изменений коэффициента корреляции, выделены три этапа эволюции структуры течений вещества в этой области: спокойное состояние, формирование потоков, стабилизировавшиеся быстрые течения. Наблюдается различное поведение коэффициента корреляции на разных глубинах в периоды спокойного и активного состояния данной области. Глубинный ход коэффициента корреляции в спокойный период демонстрирует минимум на уровне ~8.5 Мм, что может указывать на расположение нижней границы слоя супергрануляции на глубинах такого порядка и смену масштабов упорядоченности течений от супергрануляционных к гигантским. В активный период этот минимум исчезает, что связывается с возрастанием скоростей и упорядоченности потоков в глубоких слоях.

Полученные результаты демонстрируют, что обсуждаемый подход позволяет не только совершенствовать способы интерпретации гелиосейсмологических данных, но и выявлять тонкие структурные особенности конвективных течений, связанные с эволюцией активной области.

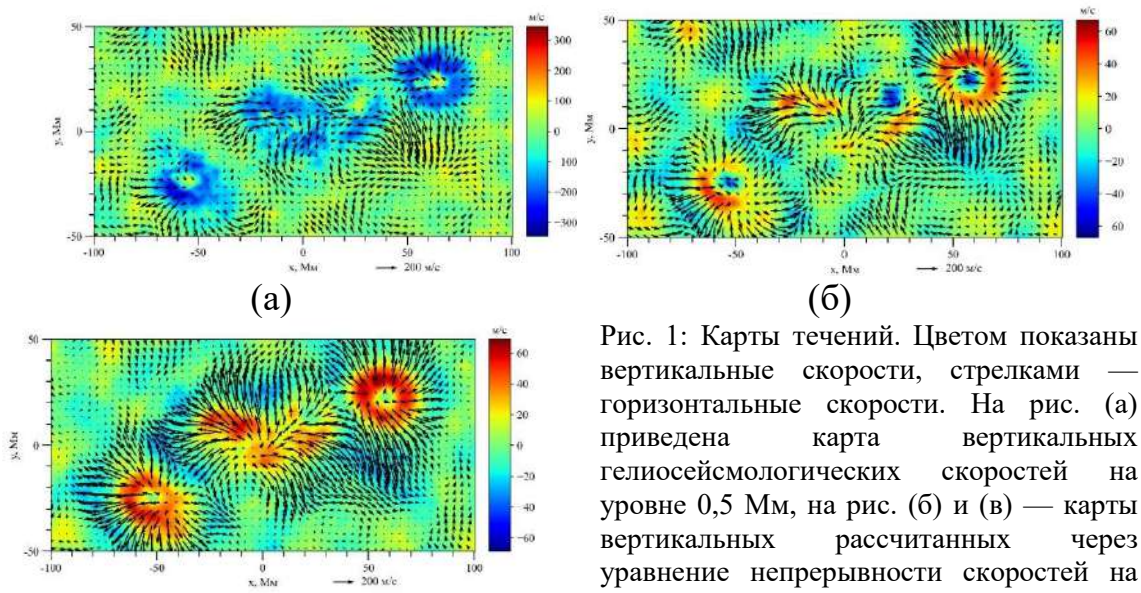


Рис. 1: Карты течений. Цветом показаны вертикальные скорости, стрелками — горизонтальные скорости. На рис. (а) приведена карта вертикальных гелиосейсмологических скоростей на уровне 0,5 Мм, на рис. (б) и (в) — карты вертикальных рассчитанных через уравнение непрерывности скоростей на уровнях 4 и 6 Мм соответственно. Карты относятся к моменту времени 15.02.2011 20:00. Отрицательные значения соответствуют движению от наблюдателя, то есть нисходящим потокам.

Литература

1. Zhao J., Kosovichev A. G., Sekii T. High-Resolution Helioseismic Imaging of Subsurface Structures and Flows of a Solar Active Region Observed by Hinode. *The Astrophysical Journal.* 2010, vol. 708, no. 1, pp. 304–313. DOI: 10.1088/0004- 637X/708/1/304. arXiv: 0911.1161.

Сегментация магнитограмм солнечных пятен на основе нечетких мер

Королькова О.А.[1], Макаренко И.Н.[2], Макаренко Н.Г.[1]
[1]*ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK*
korolkova@gaoran.ru

Современные магнитограммы Солнца, получаемые, например, космическими обсерваториями SDO и Hinode, представляют собой цифровые изображения высокого пространственного разрешения. Важной задачей анализа данных является выделение на полнодисковых снимках активных областей и солнечных пятен с последующей корректной оценкой их площадей и магнитных потоков. Магнитные поля Солнца обладают свойствами перемежаемости и обобщенной масштабной инвариантности. Это проявляется, в частности, в статистике отсчетов магнитограмм, характеризующейся тяжелыми хвостами и высоким значением 4-го момента (куртозисом). Оценки среднего и дисперсии, основанные на статистике Пирсона, в таком случае теряют устойчивость, поэтому эмпирические зависимости между площадью пятна в фотосфере и его магнитным полем не удается напрямую обобщить на современные распределенные данные. Следовательно, возникает вопрос: как сопоставить наблюдаемое дискретное изображение с его аналитической характеристикой — интегралом индукции поля по площади? Область интегрирования в этом случае задается фрагментом магнитограммы, соответствующим носителю магнитного поля (в измерении продольной компоненты Blos). Однако он, как правило, не представляет собой однородную компактную область с регулярной границей, имеющей конечный периметр. Поэтому традиционные методы сегментации изображений, основанные на использовании градиентных порогов и вариационных принципов [1], могут оказаться чрезмерно упрощенными.

В настоящей работе мы используем сегментацию магнитограмм, основанную на аппарате нечетких мер и интеграла Шоке [2, 3]. Солнечное пятно выделяется как нечеткая (fuzzy) область, в которой одновременно наблюдается значительная величина индукции магнитного поля B_{los} и локальная когерентность его значений. Под когерентностью понимается близость значений поля в соседних пикселях выбранного окна. Обе характеристики задаются нечеткими функциями принадлежности со значениями в интервале [0, 1]. Физически значимым признаком искомой области является относительный, а не абсолютный разброс значений в выбранном окне: в локально однородной структуре флуктуации магнитного поля малы по сравнению с его величиной, тогда как на фоне их относительный вклад значительно выше. Перед сегментацией магнитное поле сглаживается нелинейным фильтром на основе интеграла Шоке, что

подавляет одиночный шум, но сохраняет резкие границы пятна, поскольку веса определяются локальным сходством.

В качестве нечеткой меры когерентности используется одна из известных емкостей Шоке — нормированная мера разброса значений поля в пикселях выбранного окна относительно их медианы. Фактически эта мера характеризует степень соответствия значения поля в данном пикселе значениям в его окружении. Дискретный интеграл Шоке вычисляет взвешенную суммарную разность значений вариационного ряда индукции B_{los} в окне. Поэтому единичный резкий скачок, характеризующийся низкой степенью сходства с окружением, получает малый вес и вносит незначительный вклад в итоговую сумму. После сканирования всей магнитограммы выделяется компактная область когерентных пикселей с большими значениями индукции и резкой границей. Для нескольких одиночных солнечных пятен получены численные оценки их площадей. Для сравнения используется площадь, ограниченная изолинией 550 Гс на оригинальной магнитограмме. Такой порог основан на эвристике, полученной при сопоставлении площади тени пятна в континууме с его магнитограммой [4].

Таким образом, использование нечетких мер дает возможность не только определять эффективную площадь магнитных конфигураций, но и количественно описывать их внутреннюю структуру по уровню когерентности. Это может оказаться полезным при исследованиях взаимосвязи между геометрическими и магнитными характеристиками солнечных пятен.

Литература

1. Mumford D., Shah J. Optimal approximations by piecewise smooth functions and associated variational problems // Communications on Pure and Applied Mathematics. – 1989. – Vol. 42, No. 5. – P. 577–685.
2. Mesiar R. Fuzzy measures and integrals // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – Vol. 156, No. 3. – P. 365–370.
3. Beliakov G., James S., Wu J. Discrete fuzzy measures. – Berlin: Springer International Publishing. – 2020.
4. Obridko V., Sokoloff D., Katsova M. Relating photometric and magnetic properties of structures at solar surface // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2023. – Vol. 252. – Art. 106152.

Динамика излучения солнечного радиовсплеска 23 июня 2025 году. Плазменный механизм излучения

Кудрявцев И.В.[1], Овчинникова Н.Е.[2], Кальтман Т. И.[2]
[1]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С-Петербург, Россия*
[2]*СпБ филиал САО РАН, С-Петербург, Россия*
Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru

Высокое временное и спектральное разрешение дециметрового комплекса РАТАН-600 позволяет исследовать слабые короткоживущие радиовсплески, сопровождающие локальные процессы энерговыделения в солнечной короне. В работе исследуется тонкая временно-частотная структура солнечного радиовсплеска 23 июня 2025 года в диапазоне 1.05–1.70 ГГц. Продолжительность события составляет 25 с, временное разрешение наблюдений — 8.4 мс. В течение события обнаружена нерегулярная последовательность более 100 широкополосных импульсов, при этом значительная часть импульсов остаётся неразрешённой по времени. Устойчивого направленного частотного дрейфа тонкой структуры не обнаружено.

Полученные характеристики допускают интерпретацию в рамках нелинейного режима плазменной неустойчивости в магнитной ловушке, при котором электронное распределение с конусом потерь приводит к возбуждению плазменных волн, а чередование их роста, насыщения и последующего восстановления неустойчивости приводит к субсекундным импульсам радиоизлучения [1].

По мере развития событие проявляется спектр излучения, характерных для суперпозиции излучений 2-х двух областей с плазмой различной концентрацией [2], при этом радиоизлучение образуется при слиянии ленгмюровских волн в области двойной плазменной частоты.

Полученные результаты демонстрируют уникальные возможности РАТАН-600 для регистрации тонкой спектральной и временной структуры слабых солнечных всплесков и диагностики плазменной турбулентности, нагрева корональной плазмы и ускорения частиц в маломасштабных эпизодах энерговыделения.

Литература

1. Zaitsev V.V., Stepanov A., Solar Physics, 1983, V. 88, p.297
2. Kudryavtsev I.V., Kaltman T.I., Geomagnetism and Aeronomy, 2021, V 61, p. 1172

Косые ударные волны в бесстолкновительной плазме солнечного ветра

Кузнецов В.Д.[1], Осин А.И.[1]
[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия
osin@izmiran.ru

В рамках МГД ЧГЛ (Чу-Голдбергер-Лоу) [1] приближения рассмотрены косые ударные волны применительно к бесстолкновительной плазме солнечного ветра. Показано, что в отсутствие тепловых потоков аналитическое решение системы граничных условий [2] может быть представлено в виде линии уровня $F(M_{||},\{B_y\})=0$ функции двух переменных - безразмерной скорости набегающего потока $M_{||}$ и скачка тангенциальной компоненты магнитного поля $\{B_y\}$. Решение позволяет представить в графическом виде значения параметров плазмы за фронтом ударной волны для различных заданных параметров плазмы перед фронтом, выделить области эволюционности и устойчивости. Решения для малых и больших углов распространения косых ударных волн асимптотически переходят в параллельную и перпендикулярную ударные волны. Полученные решения могут применяться для интерпретации наблюдаемых ударных волн в солнечном ветре и оценки плазменных параметров.

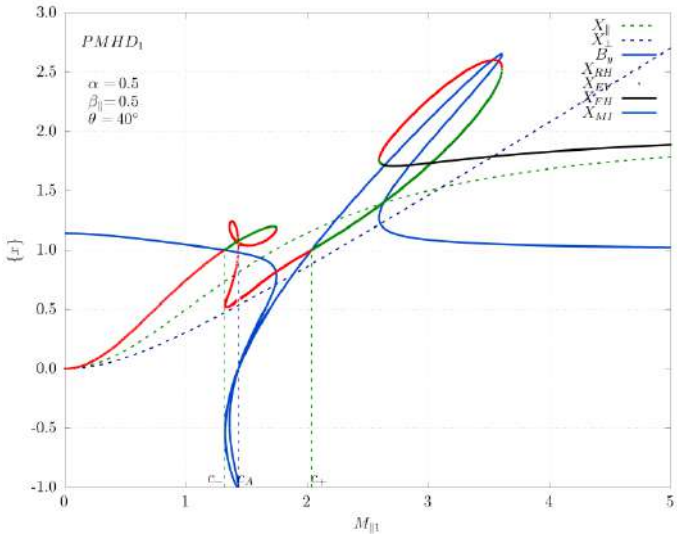


Рис. 1. Решение для наклонных ударных волн. Эволюционные решения отмечены зеленым цветом. Черным цветом отмечен участок “шланговой” неустойчивости. Решения для параллельной и перпендикулярной ударных волн обозначены пунктиром.

Множество решений системы уравнений Рэнкина-Гюгонио для наклонной ударной волны представляет собой кривую на плоскости $(M_{||},\{B_y\})$. Все параметры плазмы за фронтом ударной волны, в т.ч. скачок плотности X=ρ_2/ρ_1, определяются этой зависимостью. Каждой точке на кривой соответствуют свои условия, определяющие величины скоростей

малых возмущений за фронтом ударной волны и, следовательно, условия эволю-ционности и устойчивости этого решения. Кривая решения имеет ряд общих характерных свойств, которые можно определить аналитически. В частности, для ударных волн бесконечно малой амплитуды, когда $\{B_y\} = 1$, определяющее уравнение сводится к

$$(M_{||}^2 - c_+^2)(M_{||}^2 - c_-^2) = 0$$

то есть кривая решения пересекает прямую $\{B_y\} = 1$ ровно в двух точках, соответствующих скоростям быстрых и медленных линейных магнитозвуковых волн c_+ и c_-, а также $\{B_y\} = 0$ когда $M_{||} = c_A$. В пределе, для очень больших значений $M_{||}$ справедлива асимптотика $\{B_y\} \to 1$, при этом $X \to 2$, однако эта величина не определяет максимальное сжатие в косых ударных волнах в отличие от параллельной ударной волны. Условие эволюционности выделяет сегменты, соответствующие быстрым и медленным ударным волнам. В то же время, состояние плазмы за фронтом эволюционных ударных волн может оказаться неустойчивым (“шланговая" и “зеркальная" неустойчивости). В предельных случаях квази-продольных ($\theta \to 0$) и квази-перпендикулярных ($\theta \to \pi/2$) ударных волн решения для косых ударных волн стремятся к аналитическим решениям в этих специальных случаях.

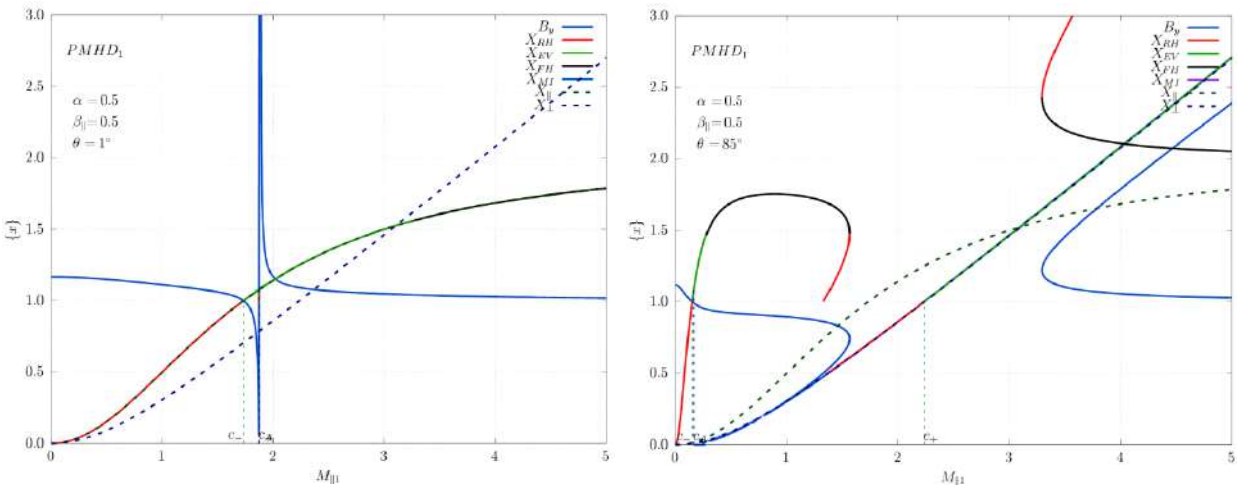


Рис.2. Решения для квази-продольной и квази-перпендикулярной ударных волн. Области “шланговой" неустойчивости отмечены черным цветом. Аналитические решения для параллельной и перпендикулярной ударных волн отмечены пунктиром.

Литература

1. G. F. Chew, M. L. Goldberger, F. E. Low, The Boltzmann equation and the one-fluid hydromagnetic equations in the absence of particle collisions, Proc. R. Soc. Lond. A236 (1956) 112 -118.
2. V. D. Kuznetsov, A. I. Osin, Integral equations and Rankine-Hugoniot relations for collisionless anisotropic plasma with heat fluxes, Physics of Plasmas 33 (2026) 022303. doi:https://doi.org/10.1063/5.0310804.

Влияние турбулентности на распространение ускоренных электронов в солнечной вспышке 16 февраля 2014 г.

Кузнецов А.А.[1], Флейшман Г.Д.[2], Ступин А.Н.[1], Нита Дж.М.[2]
[1]*Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Иркутск, Россия*
[2]*Технологический Институт Нью-Джерси, Ньюарк, США*
a_kuzn@iszf.irk.ru

Распространение ускоренных электронов играет принципиальную роль в динамике солнечных вспышек. Количественное исследование этого явления требует решения уравнения Фоккера-Планка для реалистичной (основанной на наблюдениях) конфигурации магнитного поля и плазмы. Нами было разработано расширение для системы моделирования GX Simulator, которое включает: а) экспорт параметров вспышечной магнитной петли из GX Simulator; б) численный код для моделирования распространения электронов в указанной магнитной петле с учётом рассеяния из-за кулоновских столкновений и на турбулентности; в) импорт полученных функций распределения электронов обратно в GX Simulator для вычисления микроволнового излучения.

Разработанные численные инструменты были использованы для исследования распространения электронов в солнечной вспышке 16 февраля 2014 г. Обнаружено, что в отсутствие турбулентности должен иметь место долговременный захват электронов в магнитной ловушке, что противоречит микроволновым наблюдениям. Наилучшее согласие с наблюдениями достигается для моделей, обеспечивающих за счёт рассеяния на магнитной турбулентности режим «умеренной» диффузии, когда длина свободного пробега электронов с энергией около 1 МэВ сравнима с длиной вспышечной петли. В этом случае электроны достаточно быстро покидают вспышечную петлю, и оказываются практически равномерно распределены вдоль петли. Необходимый уровень турбулентности представляется вполне достижимым.

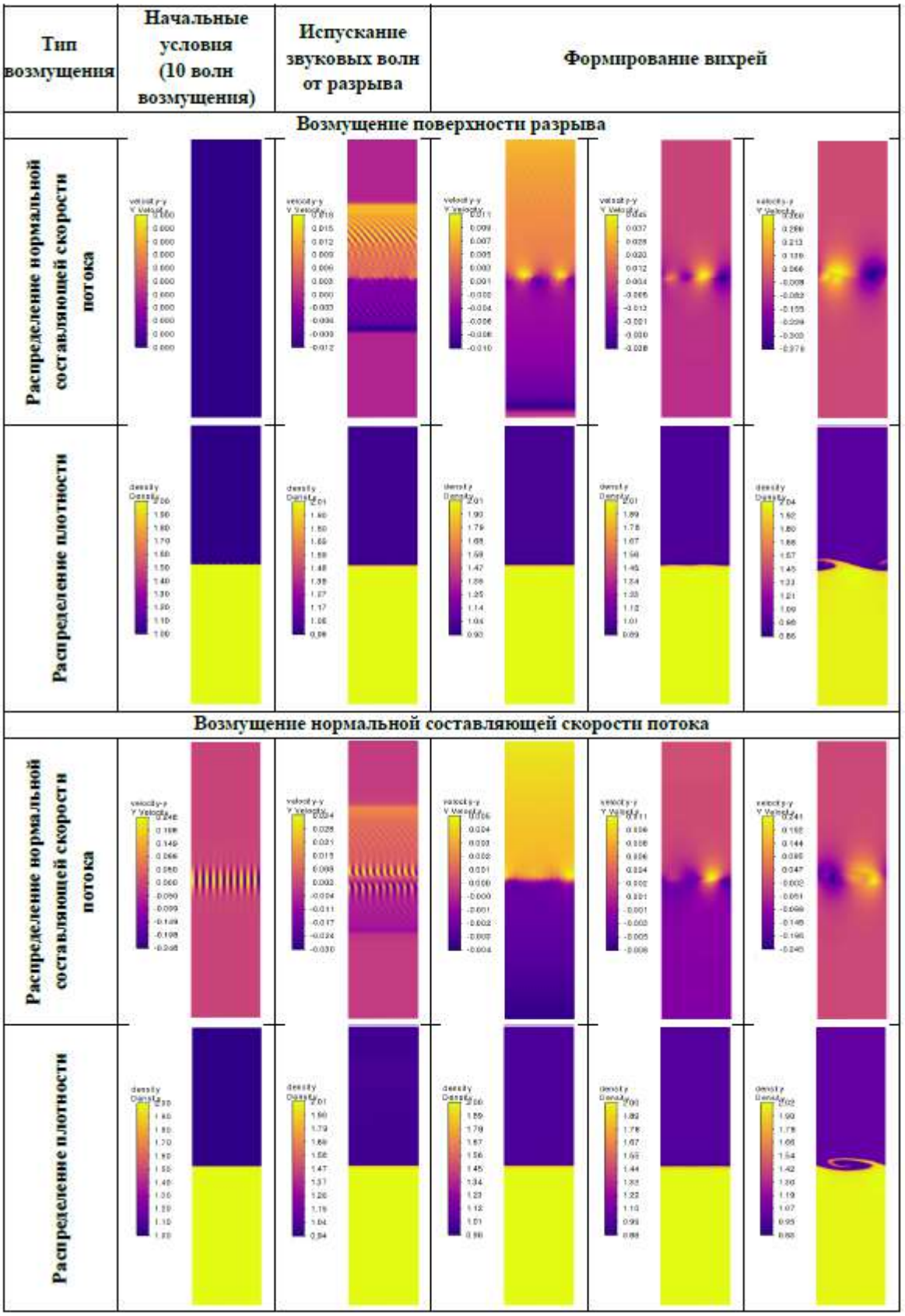
Численное моделирование неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в солнечной атмосфере

Кузьмичев А.В., Остряков В.М.
СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
andre.kuzmichev8@yandex.ru

Сдвиговые потоки повсеместно встречаются в астрофизических задачах и часто приводят к неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (КГ). Данное явление регулярно наблюдается в процессах корональных выбросов массы (КВМ). В этой связи неустойчивость КГ широко изучалась в 2D МГД постановке. Первоначальная теория разработана в предположении о несжимаемом, невязком поведении потоков с синусоидальным возмущением границы раздела и описывает развитие неустойчивости КГ только на самых ранних стадиях моделирования, когда сохраняется синусоидальная форма поверхности раздела. Для описания наблюдаемых процессов в солнечной короне необходимо учитывать разнообразные дополнительные факторы, такие как сжимаемость, вязкость сред, наличие турбулентности потоков, а также нелинейную стадию развития неустойчивости. С этой целью применяется численное МГД моделирование.

В настоящей работе рассматривается ряд аспектов моделирования данной задачи с помощью численных кодов Fluent и Pluto. Обсуждаются критерии количественной оценки неустойчивости КГ и приводится их сопоставительный анализ для случаев возмущения поверхности разрыва и нормальной составляющей скорости потока. Приводятся оценки влияния магнитного поля и турбулентности потоков на развитие неустойчивости. Для этого была выполнена серия 3D МГД численных расчетов с различными значениями напряженности магнитного поля и интенсивности изотропной турбулентности. Из полученных результатов следует, что и магнитное поле, и турбулентность оказывают стабилизирующий эффект на развитие неустойчивости. Магнитное поле препятствует росту возмущений за счет эффекта магнитного натяжения силовых линий вдоль границы раздела сред, степень же стабилизации существенно зависит от ориентации магнитного поля относительно скорости потока. Турбулентность подавляет крупномасштабные моды неустойчивости вследствие усиления турбулентной вязкости.

Представлен механизм трансформации разрыва потоков, сопровождающийся испусканием звуковых волн от разрыва, формированием вихрей с их последующим слиянием. На рисунках ниже приведены диаграммы распределения нормальной составляющей скорости потока и плотности в расчетной области, иллюстрирующие данное явление.


Тип возмущения
Начальные условия (10 волн возмущения)
Испускание звуковых волн от разрыва
Формирование вихрей
Возмущение поверхности разрыва
Распределение нормальной составляющей скорости потока
Распределение плотности
Возмущение нормальной составляющей скорости потока
Распределение нормальной составляющей скорости потока
Распределение плотности

Наблюдение и теоретический расчет потоков излучения ярких областей в протуберанцах в линиях кальция, гелия и водорода на разных расстояниях от лимба Солнца

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

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

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

kupry@sai.msu.ru

Солнечные протуберанцы представляют собой плотное и холодное облако частично ионизированной плазмы по сравнению с окружающей горячей короной и поддерживаемое магнитным полем. Особая среда протуберанцев включает в себя сложные физические процессы, которые затрудняют их понимание. Термодинамические свойства протуберанцев удается установить по излучению в спектральных линиях, особенно если газ в этих линиях испытывает самопоглощение. Авторы предлагают анализ ярких областей в протуберанцах 2008-08-27, которые мы наблюдали на горизонтальной установке для исследования Солнца (HSFA-2) обсерватории Ondřejov. Исследуемые два объекта (рис. 1) находились на восточном и на западном лимбе Солнца. Наблюдения проводились в интервале 07:05 - 07:46 UT. После учета кадров темного и плоского поля, были получены наблюдаемые значения потоков в линиях водорода, гелия и кальция. В работе приведены результаты наблюдений и теоретический расчет параметров плазмы в пяти спектральных линиях. При обработке мы выбирали области протуберанцев с повышенным потоком. Целью нашей работы является теоретический расчет параметров плазмы (концентрация N, температура T, турбулентная скорость v) для наблюдаемых потоков в линиях H CaII, Hε, Hα, Hβ, D3.

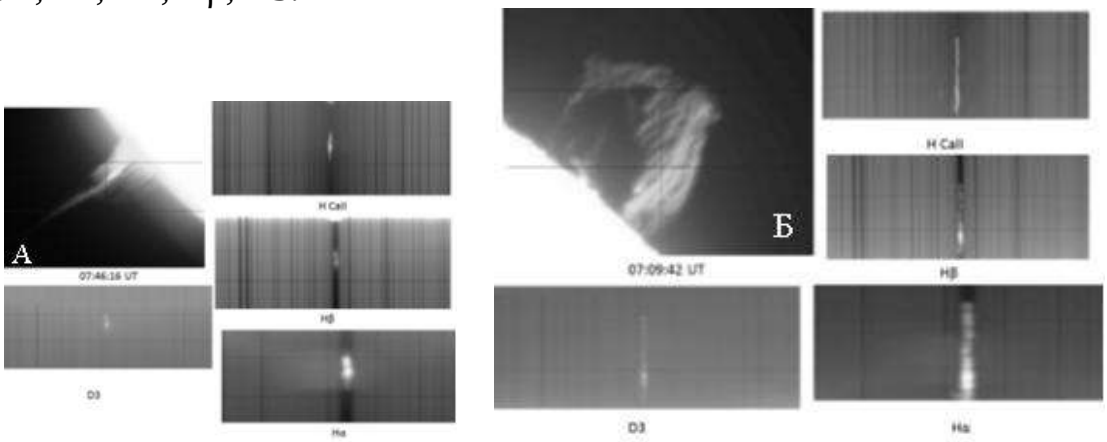


Рис. 1. Изображение исследуемой области на щели спектрографа в линии Hα и спектры в линиях H CaII, Hβ, D3, Hα для двух протуберанцев (на восточном А и на западном Б) лимбе Солнца

Наблюдаемые потоки удается воспроизвести в приближении стационарного теплового нагрева только для четырех наблюдавшихся линий (см. Купряков и др., 2024), для объяснения всей совокупности из пяти линий требуется предположение о дополнительном источнике нагрева. Результаты наблюдений и вычислений представлены в таблицах 1, 2. Удалось подобрать такие параметры модели, которые удовлетворительно воспроизводят наблюдаемые потоки в линиях.

Таблица 1

Time	07:06:49	07:46:16	07:46:28
Hα	1.05e+6	3.91e+5	5.41e+5
Hβ	1.55e+5	5.50e+4	8.13e+4
Hε	8.91e+3	2.68e+3	4.75e+3
H CaII	1.47e+5	1.33e+5	1.34e+5
D3 He	1.06e+5	6.99e+4	8.33e+4
W-limb		E-limb	

Таблица 2

Time	07:06:49	07:46:16	07:46:28
N, cm^{-3}	3.90e10	2.15e10	3.05e10
L, km	2000	2000	2000
T_e, K	6000	4500	4500
v, km/s	3.0	2.0	2.0
W-limb		E-limb	

Литература:

1. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Малютин В.А. и др.// Астрон. журн. 101, № 11. 1003 (2024).

Свойства турбулентности в окрестностях униполярных пятен разной скорости затухания

Куценко О.К., Абраменко В.И., Плотников А.А.
ФГБУН КрАО РАН, Научный, Россия
olga.k.kutsenko@yandex.ru

Цель данной работы состояла в том, чтобы выяснить, как связана турбулентность в окружающей солнечное пятно фотосфере со скоростью затухания этого пятна. Для работы были выбраны десять затухающих активных областей, у которых осталось крупное пятно ведущей полярности и остатки хвостовой полярности в виде очень мелких пор и супергрануляционной сетки. Активные области были выбраны таким образом, что пять из них имели низкую скорость затухания, а другие пять – более высокую (табл. 1).

Для вычисления скорости затухания активных областей вычислялся полный беззнаковый магнитный поток по области, охватываемой изоуровнем 600 Гс в течение трех суток. Скорость затухания магнитного потока была рассчитана как наклон линейной аппроксимации изменения полного беззнакового магнитного потока за этот период. Интенсивность турбулентности в окружающей среде оценивалась с помощью метода спетров мощности магнитного поля [1]. Самой удобной характеристикой спектра мощности является показатель спектра мощности α, который определяется как наклон спектра мощности, построенного в двойной логарифмической шкале, в пределах инерционного интервала. Обычно в спокойном Солнце наблюдается пологий спектр мощности с показателем спектра около 1. В активных областях, где турбулентность значительно выше, показатель спектра бывает от 5/3 и более.

В данной работе вначале были проанализированы спектры мощности пятна – исследовались магнитограммы униполярного пятна: его тени, полутени и ближайшего окружения. Соответсвующий спектральный параметр α_2 представлен в таблице 1. Во всех активных областях спектр пятна не демонстрировал единого турбулентного режима. В спектре наблюдался максимум на масштабах примерно соответствующих диаметру пятна с полутенью и крутой спуск вплоть до 8 Мм. Для масштабов менее 8 Мм вплоть до нижней границы инерционного интервала (2.7 Мм) начинается другой турбулентный режим с параметром α_2 приблизительно 1.52 (в среднем по всем пятнам).

Далее в работе исследовались участки магнитограмм, которые находились вблизи униполярного пятна, но его не включали. В результате были получены спектры мощности окрестностей пятна. Для вычисления спектрального индекса α_1, соответствующий этим спектрам, использовался инерционный интервал 2.7-10 Мм. Эти спектры не демонстрировали пика энергии на масштабах около гарницы интервала 10 Мм. Индекс α_1 для

разных активных областей находился в пределах от 1 до 1.35, что немного выше, чем обычно наблюдается в спектрах спокойного Солнца.

Таблица 1. Параметры исследуемых активных областей.

Активная область	Время начала наблюдений	Скорость затухания, $\times 10^{18}$ Мкс/ч	α_1	α_2
NOAA 12934	2022.01.25T00:00	0.81±0.38	1.06±0.04	1.58±0.06
NOAA 11836	2013.09.01T12:00	-3.38±0.37	1.29±0.04	1.62±0.05
NOAA 12195	2014.10.27T12:00	-3.83±0.32	1.32±0.05	1.49±0.09
NOAA 11695	2013.03.06T12:00	-3.94±0.61	1.35±0.02	1.52±0.04
NOAA 11912	2013.12.07T00:00	-4.14±0.28	1.05±0.03	1.45±0.06
NOAA 11423	2012.02.28T11:36	-6.91±0.46	1.14±0.04	1.47±0.03
NOAA11642	2013.01.05T00:00	-7.01±0.38	0.98±0.03	1.58±0.08
NOAA12090	2014.06.16T00:00	-7.49±0.61	1.09±0.06	1.44±0.09
NOAA 12236	2014.12.17T00:00	-9.91±0.51	1.08±0.04	1.43±0.04
NOAA 11140	2011.01.05T00:00	-11.0±0.61	1.25±0.05	1.57±0.04

Во всех 10 исследуемых активных областях спектры окрестностей пятна располагались ниже, чем спектры пятен, показывая, что основная энергия сконцентрирована возле пятна, а не на его периферии. Во всех случаях наклон спектра пятна был круче, чем спектра окрестностей, что показывает более высокую турбулетнность в окружении пятна по сравнению с его периферией. Общим свойством для спектров пятна и его окрестностей является то, что мы не нашли корреляции между спектральными параметрами и скоростью затухания пятен. А также нет разницы между формой и наклоном средних спектров для медленно- и быстрозатухающих пятен. Скорость затухания магнитного потока внутри тени пятна, похоже, не связана с турбулентным состоянием магнитного поля вне пятна. Можно сделать вывод: скорость затухания потока в тени солнечного пятна, по-видимому, определяется внутренними условиями, происходящими по всей длине магнитной трубки, образующей тень пятна.

Литература

1. Abramenko V.I. Relationship between magnetic power spectrum and flare productivity in solar active regions // Astrophys. J. V. 629. P. 1141-1149. 2005.

Пространственная периодизация энерговыделения в крупных солнечных вспышках

Леденцов Л.С.
ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия
ИКИ РАН, г. Москва, Россия
leonid.ledentsov@gmail.com

На основе наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне, проведенных космическим аппаратом TRACE, изучается стабильность пространственной периодизации областей первичного высвобождения энергии в солнечных вспышках [1-2]. Фурье-анализ разностных изображений показывает наличие стабильных гармоник в пространственном распределении областей высвобождения энергии отдельных солнечных вспышек. Их характерные пространственные периоды находятся в диапазоне от 3 до 18 Мм. Согласно современным представлениям, такая периодизация может быть результатом распада предвспышечного токового слоя, накапливающего энергию солнечной вспышки в корональных магнитных полях, вследствие какой-либо неустойчивости, например, тепловой природы [3-5]. Некоторые вспышки, напротив, не демонстрируют подобной стабильности.

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

Литература

1. Леденцов Л.С. // ПАЖ 2025. Т. 51. С. 42.
2. Леденцов Л.С. // ПАЖ 2023. Т. 49. С. 819.
3. Ledentsov L.S. // Sol. Phys. 2021. V. 296. N. 74.
4. Ledentsov L.S. // Sol. Phys. 2021. V. 296. N. 93.
5. Ledentsov L.S. // Sol. Phys. 2021. V. 296. N. 117.

Формируются ли анти-хейловские активные области на Солнце отдельным механизмом генерации магнитного поля?

Литвишко Д.В., Куценко А.С., Абраменко В.И.
ФГБУН «КрАО РАН», Научный, Россия
24dasha01@gmail.com

Для большинства солнечных активных областей (АО) характерно соблюдение закона Хейла, согласно которому знаки магнитной полярности лидирующей и хвостовой компонент биполярных структур зависят от полушария и номера цикла. Однако несколько процентов активных областей обладают обратной полярностью (анти-Хейловские АО), что нарушает данное правило. В настоящем докладе будет представлен сравнительный анализ анти-Хейловских и остальных АО по ряду параметров: циклической вариации суммарной площади, широтно-временному распределению, изменению тилт-угла и знаку токовой спиральности. Поскольку перечисленные характеристики связаны с процессами генерации и всплытия магнитных жгутов, их сопоставление позволяет судить о механизмах формирования этих АО. Проведенный анализ не обнаружил статистически значимых различий между анти-Хейловскими и остальными АО, что не даёт подтверждение гипотезе о наличии отдельного механизма генерации анти-Хейловских АО.

Волноводное распространение залимбового радиовсплеска в возмущенной солнечной короне

Лукьянцев Д.С., Афанасьев Н.Т., Калашникова Е.И., Артола А.О.
Иркутский Государственный Университет (ИГУ), Иркутск, Россия
cmeofs1997@mail.ru

Хорошо известно [1], что рефракционные эффекты околосолнечной плазмы важно учитывать для правильного понимания данных наблюдений радиоизлучения солнечных источников. Наиболее явно это воздействие проявляется при распространении низкочастотных радиовсплесков. В работе [2] был выполнен приближенный анализ рефракции декаметровых всплесков корональных источников, находящихся за лимбом Солнца. С помощью кусочно-линейной аппроксимации траектории луча была показана возможность наблюдений залимбовых всплесков в условиях корональнного выброса массы (КВМ) из активных областей вблизи солнечного лимба.

В настоящей работе на основе расширенной системы лучевых дифференциальных уравнений в форме Лагранжа-Эйлера проведено математическое моделирование траекторных характеристик и пространственного ослабления радиоизлучения от залимбового источника. В качестве модели коронального возмущения использована двухкомпонентная структура, описывающая фронт КВМ и следующую за ним полость пониженной электронной концентрации. В рамках принятой модели выполнены расчеты рефракционных характеристик декаметровых и метровых радиовсплесков залимбовых источников в возмущенной солнечной короне. Определены условия сильной регулярной рефракции, порождающей волноводный механизм распространения и позволяющей обеспечить регистрацию радиоизлучения на наземных установках от источника в залимбовой области. Показано, что эффект волноводного распространения может приводить к формированию областей существенного роста фактора фокусировки в окрестности наблюдателя. Количество таких областей зависит от периодов осцилляций траекторий луча в окрестности плазменного возмущения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (тема госзадания FZZE-2026-0006).

Литература

1. Плазменная гелиогеофизика. Т.1/ Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 672 С.
2. Станиславский А. А. Роль эффектов распространения радиоволн в солнечной короне для интерпретации залимбовых всплесков // Радиоастрономия и астрофизика. 2016. Т. 21, № 1. С. 3–13.

Анизотропия жёсткого рентгеновского излучения солнечных вспышек по наблюдениям экспериментов KONUS-WIND и SOLO/STIX

Лысенко А.Л.[1], Киселёв В.И.[1,2]
[1]ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия
[2]ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия
alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru

Анизотропия рентгеновского излучения солнечных вспышек в диапазоне ~20–100 кэВ обусловлена в первую очередь т.н. фотосферным альбедо. Этот эффект связан с комптоновским рассеянием фотонов, движущихся от наблюдателя в более плотные слои атмосферы Солнца, таким образом, наблюдаемый спектр является суперпозицией тормозного излучения ускоренных электронов и фотонов, рассеянных в сторону наблюдателя. Эффект альбедо более выражен для вспышек, наблюдаемых вблизи центра диска Солнца, и ослабевает по направлению к лимбу. Вклад в спектр от эффекта альбедо обусловлен, в частности, угловым распределением излучающих электронов, таким образом, анизотропия жёсткого рентгеновского излучения является ключом к пониманию анизотропии ускоренных электронов. Мы отобрали солнечные вспышки, которые наблюдались на диске Солнца инструментами Konus-Wind и SolO/STIX, когда угол Земля-Солнце-Solar Orbiter превышал 30^0, и провели для них анализ спектров вблизи максимума нетеплового излучения. На основании различий спектров, наблюдаемых двумя инструментами, мы исследовали анизотропию жёсткого рентгеновского излучения в зависимости от энергии и угла наблюдения.

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

Формула коплощади для магнитограммы солнечного пятна

Макаренко Н.Г.[1], Рыбинцев А.Д.[1], Королькова О.А.[1] , Макаренко И.Н.[2]
[1]*ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия,*
[2] *Newcastle University, UK*
ng-makar@mail.ru

Магнитограмма пятна, в общем случае, является многосвязной нечеткой областью распределения B_{los}, граница которой в обычном смысле, отсутствует[1]. Системы изолиний требует вычисление градиента для 2D функции, с резкими перепадами яркости на границах пикселей. Но в этой ситуации, классический градиент просто не существует. Формально, интеграл по площади от $\left|\nabla B_{los}\right|$ называют полной вариацией поля. Она измеряет «шероховатость» магнитного рельефа. Если интеграл ограничен, то говорят, о BV (*bounded variation*) функции, для которой допускается конечное число ограниченных разрывов. Для такой функции градиент заменяется на обобщенную производную *меры Радона*. Последняя, в отличии размеров, т.е. меры Лебега, описывает распределение некоторой «массы» по поверхности. Для нас массой является скалярное поле B_{los}. Согласно принципу *Бонавентурой Кавальери*, (1635 г.) объем тела можно представить как систему (*регулу*) *неделимых* - площадей параллельных сечений. Аналогично, площадь является *регулой* неделимых линий. Нелинейный аналог этого принципа известен как *формула коплощади*, из геометрической теории меры [2]. Она утверждает, что полная вариация *BV* функции поля, допускает «расслоение» площади ее рельефа на сумму длин периметров ее множества выбросов $\{B_{los} \geq t\}$ выше уровня. Заметим, что такие периметры почти всегда *спрямляемы*, т.е. имеют конечную длину. Ее легко вычислить используя формулу Крофтона [3] из интегральной геометрии. Эвристически, множество случайных прямых на плоскости пересекает замкнутую кривую по меньшей мере в двух точках. Тогда мера пересечений дает нам удвоенную длину периметра.

В докладе предлагается использовать описанный формализм, для вычисления «площади» пятна по магнитограмме. Мы приводим численные оценки, полученные для выборки SDO/HMI изображений одиночных пятен.

Литература

1. Obridko, V. et al. Relating photometric and magnetic properties of structures at solar surface // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 252 (2023): 106152.
2. Morgan F., Bredt J. F. Geometric measure theory. – Cambridge : Academic press, 2016.
3. Сантало Л. А. Введение в интегральную геометрию. – 1956.

Проблема свечения яркой линии гелия в протуберанцах

Малютин В.А.[1], Бычков К.В.[1], Белова О.М.[2], Купряков Ю.А.[1], Горшков А.Б.[1]
[1]ГАИШ МГУ, Москва, Россия
[2]Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
malyutinv@list.ru

В спектрах излучения протуберанцев 27-08-2008 обнаружен аномально большой поток в линии D3 атома гелия; она всего в 10 раз слабее линии Hα водорода. Такое отношение потоков не удается объяснить в рамках модели нагретого теплового газа ни при каком наборе температур. Рассмотрена модель дополнительного возбуждения водорода и гелия горячими «прострельными» электронами из хвоста максвелловского распределения, проникающими в протуберанец из короны. При этом состояние ионизации, концентрация и температура газа протуберанца оцениваются из приближения стационарного теплового нагрева. Наблюдаемое отношение абсолютных потоков в линиях D3 и Hα можно объяснить, если предположить возбужденное состояние короны – с температурой до $6 \cdot 10^6$ К.

Нерадиальность перемещения источника активной области Солнца

Мерзляков В.Л., Старкова Л.И.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
mvl@izmiran.ru

Авторы установили, что источник активной области (АО) Солнца является компактной токовой структурой [1]. В связи с этим возникает вопрос о динамики её перемещения. В частности, какова степень отклонения траектории движения от радиального направления. Для решения этого вопроса проведем исследование долгоживущей АО NOAA 10923, которая наблюдалась три оборота с декабря 2006 года по январь 2007 года в южной полусфере. Изучаемая АО имела три основные зоны локально усиленного магнитного поля. Изменение положения этих зон, как полагаем, отражает долготно-широтное перемещение источника АО.

Рассмотрим особенности широтного перемещения источника по трем упомянутым зонам усиленного магнитного поля. На рис.1 – рис.3 показаны широтные положения середины пары изучаемых зон разной полярности. Рисунки идут последовательно по периодам наблюдения. Кривые линии соединяют значения широт, а прямые линии есть аппроксимации временной тенденции изменения широты. Временной отсчет в часах относительно начального момента наблюдения в каждом обороте, широты выражены в градусах с учетом южного расположения АО.

На рис.1 происходит подъем источника к фотосфере, а рис.3 отражает ситуацию с его опусканием к первоначальному уровню. Рис.2 показывает период достижения источником максимального уровня подъема с последующим опускаем вглубь фотосферы. На это указывает смена знака аппроксимационных прямых линий.

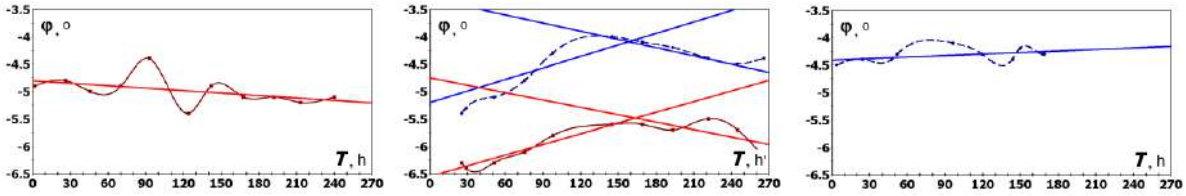


Рис.1 Рис.2 Рис.3

Наблюдаемая тенденция широтного изменения (рис.1 – рис.3) дают меридиональную скорость источника. И эта скорость V_o есть сумма проекции скорости перемещения источника по своей траектории V_s и меридионального потока V_m подфотосферного вещества:

$$V_o = V_s * \sin\beta + V_m \quad (1)$$

В формуле (1) β есть искомый угол отклонения траектории источника от радиального направления. В рассматриваемой ситуации можно оценить этот угол на двух уровнях рис.1 и рис.2.

Полагаем, что источник АО перемещается конвективными ячейками плазмы и его направление движения и скорость зависят только от уровня, на котором он находится. В таком случае отличие между рис.1 и рис.3 в направлении движения источника, такая же ситуация как и при смена знака на рис.2. Тогда, из формулы (1) находим потоковую скорость V_m как полусумму наблюдаемых V_o. Зная V_m, из формулы (1) определяем и проекции собственной скорости источника V_s*sinβ. На основе предложенной методики получаем потоковые скорости V_m=-1 м/с на начальном уровне (рис.1, рис.3) и V_m=+3.3 м/с на наивысшем уровне источника АО (рис.2), знак минус означает движение к южному полюсу. Соответствующие проекции скоростей V_s*sinβ = -4.1 м/с и +19.5 м/с. Радиальная скорость конвективных ячеек на стыках (внешних частях) оценивается 30 м/с на уровне 0.95 R_s [2]. Источник АО перемещается с уровня 0.90 R_s до 0.98 R_s [1]. Полагая, что скорость плазмы связана с плотностью, получаем оценки скоростей на упомянутых уровнях 25 м/с и 35 м/с. Скорость перемещения источника АО V_s, как мы предположили, равна скорости конвективного движения. В этом случае из выше приведенных оценок V_s*sinβ находим наклон траектории источника к радиальному направлению. Для начального уровня движения (рис.1, рис.3) угол отклонения β=9^o в сторону потоковой меридиональной скорости плазмы. Найденная величина угла является верхней оценкой, поскольку источник на рис.1 находится выше уровня 0.90 R_s. Заметим, что отличие от истинного не может быть большим, исходя из диапазона радиальных скоростей конвекции. На верхнем уровне траектории (рис.2) угол β=33^o с отклонением к экватору как потоковая меридиональная скорость плазмы. Получили, что траектория перемещения источника АО отклонена от радиального направления не более ≈30^o. Отклонения происходит в сторону меридионального движения плазмы и величина отклонения зависит от этой потоковой скорости. На последний факт указывает соотношение искомых углов и величин потоковой скорости. Углы β = 9^o и 33^o, а скорости соответственно V_m=1 м/с и 3.3 м/с. На основе приведенных значениях получается, что зависимость угла отклонения траектории источника АО от меридиональной скорости вещества близка к линейной.

Литература

1. Merzlyakov V.L., Starkova L.I. Evolution of the source of the active region of the Sun // Geomagnetism and Aeronomy. V. 61. P. 1178–1182. 2021.
2. Miesch M. S., Brun A. S ., Toomre J. Solar Differential Rotation Influenced by Latitudinal Entropy Variations in the Tachocline // Astrophys. J. V. 641. P. 618−625. 2006.

Веб-страница "Солнце на дату": агрегатор солнечных наблюдений, созданный с помощью генеративного ИИ

Можаровский С. Г.[1]
[1] *УАФО ИПА РАН, Санкт-Петербург, Россия*
mozharovskys@mail.ru

Актуальность. При исследованиях Солнца с помощью спектрополяриметра Hinode необходимо оперативно оценивать конфигурацию солнечных пятен в белом свете на всём видимом диске, поскольку измерения спектрополяриметра относятся участку видимой фотосферы размером 300 × 160 и менее угловых минут. Существующие источники данных (например, коллекция наблюдений Уссурийской обсерватории на сайте ИПА РАН, https://iaaras.ru/observations/uafo/) не всегда обеспечивают быстрый выбор даты. Цель работы — создание единой веб-страницы, которая даёт единообразный доступ к солнечным данным из различных источников по заданной дате.

Решение. Разработана страница «Солнце на дату», размещённая по адресу https://uafo.ru. Интерфейс включает:

- выпадающие списки выбора года и коллекции;
- календарную сетку из 365/366 дат года, разбитую на 12 строк по месяцам (одновременный вывод на экран);
- список внешних сайтов (Ext Site) для перехода к сводным ресурсам о состоянии Солнца;
- дополнительный список OBS (инструмент) — для коллекций с несколькими инструментами на борту (например, SDO);
- параметр SIZE — для выбора варианта изображения (размер, наличие координатной сетки и т. п.).

На текущий момент к системе подключены несколько коллекций. Из российских источников — ежедневные снимки Солнца в белом свете Уссурийской обсерватории (УАФО ИПА РАН) и магнитограммы телескопа STOP Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (ГАО РАН). Среди зарубежных — данные миссии SOHO (MDI continuum), а также миссии SDO, для которой предусмотрены выбор инструмента (HMI — магнитограммы и континуум, AIA — снимки в нескольких спектральных линиях) и параметра SIZE.

Для коллекций с большим числом файлов (SDO — более 11 000 файлов на день) реализована система кэш-файлов, в которых заранее сохраняются перечни дат и времён наблюдений, что исключает их повторное извлечение при каждом запросе пользователя. Конкретные URL коллекций и шаблоны имён файлов описываются в ini-файлах; зарегистрированные пользователи могут добавлять собственные коллекции, если их структура соответствует одному из уже реализованных алгоритмов обработки. В условиях

ограниченной доступности зарубежных ресурсов кэш-файлы формируются на локальном узле с VPN-доступом и затем загружаются на российский сервер.

Список внешних сайтов (Ext Site) включает порталы, настраиваемые на заданную дату (observethesun.com, solarmonitor.org, Helioviewer.org, страницы типа solar.physics.montana.edu/HINODE/XRT/SCIA/daily_pages/ для обзоров Hinode/XRT), а также ресурсы с помесячной выборкой (например, архив SOT: sot.lmsal.com/data/sot/level1d/). Выбор одного из сайтов ведёт к его открытию на соседней вкладке браузера. Подобная интеграция позволяет пользователю одновременно видеть данные конкретной коллекции и сравнивать их со сводной информацией из других источников, что особенно полезно при анализе эволюции активных областей.

Опыт разработки с генеративным ИИ. Страница создана без написания кода вручную: генерация выполнялась последовательно системами DeepSeek, Qwen и Anthropic Opus. Выявлена ключевая проблема: при итеративной доработке каждая новая версия кода добавляется в контекст модели без удаления предыдущей, что ведёт к потере связности и дублированию функций. Эффективная стратегия — фиксация всех деталей и выявленных трудностей в едином техническом задании и запуск новой сессии «с чистого листа». Характерный пример: ни одна из перечисленных моделей не смогла с первого раза корректно обработать даты с ведущим нулём (01–09) и без него (10–31) без явного указания в ТЗ. Описанная методология актуальна для моделей ИИ, доступных в 2026 г.

Перспективы. При росте аудитории возможно выделение отдельного доменного имени и специализированного хостинга. Планируется расширение числа коллекций и алгоритмов обработки, а также привлечение исследователей к самостоятельному добавлению данных через механизм регистрации.

Ключевые слова: наблюдения Солнца, спектрополяриметр Hinode, SDO, интернет-агрегатор солнечных данных, кэширование данных, генеративный ИИ в разработке ПО.

Роль корональной вспышечной плазмы в генерации суб-терагерцового излучения вспышки SOL2022-05-04T08:45

Моторина Г.Г.[1,2], Цап Ю.Т.[3], Смирнова В.В.[3,4], Моргачев А.С.[1], Кузнецов А.А.[5]

[1]*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*
[2]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*
[3]*КрАО РАН, п. Научный, Россия*
[4]*ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, Россия*
[5]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*
g.motorina@yandex.ru

Рассматривается природа суб-терагерцового (суб-ТГц) радиоизлучения, зарегистрированного радиотелескопом РТ-7.5 (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на частоте 93 ГГц во время солнечной вспышки SOL2022-05-04T08:45 (M5.7). По спутниковым данным инструментов SDO/AIA и GOES проводится сопоставление динамики суб-ТГц, рентгеновского и крайнего ультрафиолетового (КУФ) излучения, в том числе временных вариаций температуры и меры эмиссии корональной плазмы. Наблюдаемая корреляция суб-ТГц компоненты на пост-импульсной фазе вспышки с несколькими каналами КУФ излучения, где формируется умеренно горячая плазма (~1 МК), свидетельствует в пользу реализации в суб-ТГц источнике теплового оптически тонкого механизма (free-free emission). Исходя из рассчитанной по данным SDO/AIA дифференциальной меры эмиссии (DEM) и дифференциальной метрики плотности (DDM) построены карты радиоизлучения вспышки на суб-ТГц частотах [1]. В предположении различных сценариев обсуждаются следствия полученных результатов.

Литература

1. G.D. Fleishman, A.A. Kuznetsov, E. Landi Gyroresonance and Free–Free Radio Emissions from Multithermal Multicomponent Plasma // ApJ. V. 914. Id. 52. 2021.

Изменения знака лучевой скорости в светлых мостах солнечных пятен группы AR 11944: сигнатуры вращающегося магнитного жгута

Можаровский С. Г.[1], Назаренко А. К.[2]
[1] *УАФО ИПА РАН, Санкт-Петербург, Россия, , mozharovskys@mail.ru*
[2] *ИНТПМ ДВФУ, Владивосток, Россия, anastasyanazarenko03042005@gmail.com*

По данным спектрополяриметра Hinode SOT/SP исследована эволюция светлых мостов (Light Bridges, LB) в активной области NOAA 11944. Во временной серии кадров ~60 h зафиксировано периодическое изменение морфологии мостов − смена знака кривизны и радикальная перестройка полей лучевых скоростей. Для изучения высотной стратификации и тонкой структуры применена методика прямого анализа интегральных параметров Стокса, построены карты логарифма интенсивности непрерывного спектра $\lg(I_{CONT}/I_{B=0})$, лучевых скоростей $v_{\rm LOS}$ (измеренных на половине высоты профилей линий Fe I 6301.5 Å и 6302.5 Å), разности лучевых скоростей $\Delta v_{\rm LOS} = v_{6302} - v_{6301}$, эквивалентной ширины линии 6302 Å (W_{6302}), а также продольного ($B_{\rm LOS}$) и поперечного ($B_{\rm trans}$) магнитных полей, измеренных методом моментов, и азимута магнитного поля.

Кроме изменения топологии установлено, что в мостах AR 11944 наблюдается нетипичная миграция скоростных возмущений. Во-первых, участок большой разности лучевых скоростей $\Delta v_{\rm LOS} = v_{6302} - v_{6301}$ зарождается в полутени в области Penumbra Supersonic Downflows, затем в течение часов увеличивается, полностью смещается на тело светлого моста, проходит через него и диссипирует («тонет») в центральной части моста.

В другом случае волокно становится заметным в полутени как всплывающая структура, далее область всплытия переходит на мост, и через несколько часов превращается в область опускания вещества.

Наконец, наиболее интересен кадр временной серии 20140108_1530 UT. В поле скоростей прослеживается петлеобразная структура: светлая дуга (опускание, около +2 км/с) слева от оси петли плавно переходит в тёмную (подъём, около –0.9 км/с) справа от оси, образуя единую петлю с разворотом около 150°. Петля прослеживается в двух последовательных кадрах; она когерентна во всех картах: горячий канал в интенсивности, контрастное волокно на карте эквивалентной ширины W_{6302}, усиленное $B_{\rm trans}$, минимальные $B_{\rm LOS}$ на фоне тени, когерентная полоса азимута, следующая изгибу. Такая многопараметрическая когерентность вместе с постоянством знака циркуляции вдоль дуги указывает на единый объект, а не суперпозицию двух независимых структур. Мы интерпретируем петлю как вершину крупного магнитного жгута (flux rope), прижатую к фотосфере. Основания жгута лежат вне поля зрения: мост и его продолжение в полутени образуют единую «верёвку». Согласно [1], а также, [2] AR 11944 связана крупномасштабными жгутами с соседними активными областями. То есть

данный мост является примером магнитного вторжения. При этом вторгающийся магнитный жгут светлого моста имеет более слабое поле, чем поле тени. Плавный изгиб около 150° энергетически допустим: жгут зажат с боков газовым давлением и полем тени (около 3 кГс), а магнитное натяжение поддерживает тугую форму. Биполярные допплеровские полосы вдоль жгута при сопоставимых массовых потоках — сигнатура винтового движения: вращения вокруг длинной оси или течения вдоль скрученных силовых линий; при радиусе жгута 300–500 км и скоростях около 1 км/с характерный период составляет 30–50 мин.

В литературе случаи заметной смены знака лучевой скорости в мостах или волокнах полутени описаны крайне редко и обычно привязаны к специфическим конфигурациям. Так авторы [3] отмечают большие допплеровские скорости в биполярном мосту, связывая их с проекцией эвершедовских скоростей на луч зрения. В [4] зафиксированы значительные фотосферные допплеровские сдвиги в активной области 12673, где мост делился на фрагменты с разным знаком скорости.

В работе детально описана эволюция светлого моста, включающая периодическое «виляние» (смену знака кривизны), перенос участка сильного нисходящего потока из полутени через тело моста с последующей диссипацией, а также наблюдательные сигнатуры вращающегося магнитного жгута с противоположными знаками лучевой скорости. Выявлена корреляция между всплывающими потоками и упрощением профилей спектральных линий (снижение магнитной интенсификации), которая указывает на сложную трехмерную динамику плазмы в окрестностях светлых мостов.

Ключевые слова: солнечные пятна, светлые мосты, Hinode SOT/SP, параметры Стокса, лучевые скорости, эквивалентная ширина, магнитный жгут, flux rope, твист, поток Эвершеда, магнитная интенсификация, метод моментов.

Литература:

1. Duan, A. et al. (2021). The Astrophysical Journal 906: 45.
2. Загайнова Ю.С и др. (2025) Геомагнетизм и аэрономия 65№4: 430
3. Qiao, F. et al. (2026). The Astrophysical Journal 1000: 205.
4. Liu, J. et al. (2023). The Astrophysical Journal 955: 40.

Времена всплытия на поверхность крупных и мелких групп солнечных пятен

Наговицын Ю.А. [1], Осипова А.А. [2]
[1]*Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия*
[2]*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*
osisasha@mail.ru

На основе Гринвичского каталога рассмотрены три подхода к оценке средней продолжительности фазы роста площади групп солнечных пятен — арифметическое среднее, медиана и среднее геометрическое — от момента появления группы до достижения максимальной площади.

Показано, что для групп с максимальными площадями от 50 до 300 м.д.п. и более всплытие магнитного потока в популяции SSG (мелкие короткоживущие группы) происходит значимо быстрее, чем в популяции LLG (крупные долгоживущие группы) [1,2].

Полученный результат подтверждает наши предыдущие выводы о том, что популяция LLG формируется в тахоклине, а формирование популяции SSG связано с более мелкой областью высокого градиента скорости вращения — лептоклином.

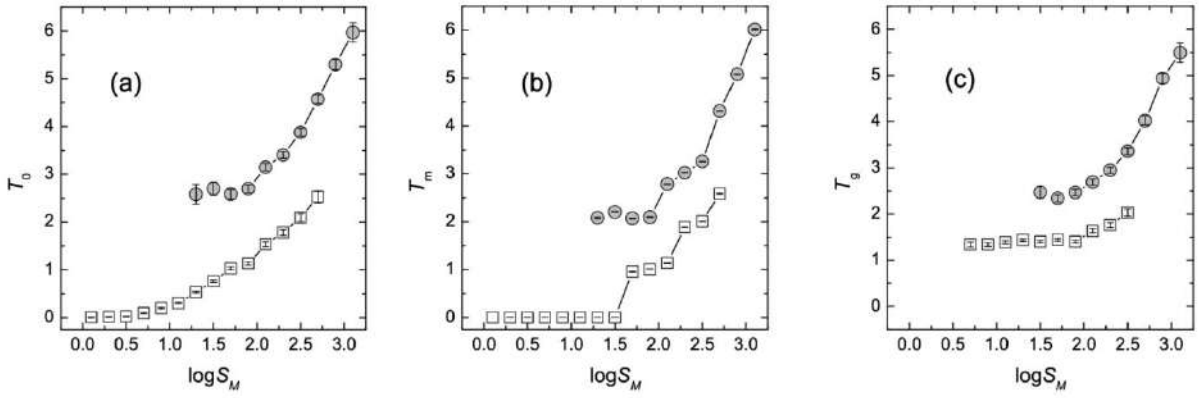


Рис. 1. Средние времена достижения максимума группы для SSG популяции (светлые квадраты) и LLG популяции (серые кружки): (a) среднее арифметическое T_0; (b) медиана T_m; (c) среднее геометрическое время T_g. $T_i = 0$ для групп, живущих меньше одного дня (наблюденных один раз).

Литература

1. Nagovitsyn Yu.A, Pevtsov A.A., On the Presence of Two Populations of Sunspots, Astrophys. J., V. 833, I. 1, id. 94. 2016.
2. Nagovitsyn Yu.A, Pevtsov A.A., Bi-lognormal Distribution of Sunspot Group Areas, Astrophys. J., V. 906, I. 1, id. 27. 2021.

Проблема определения положения солнечной вспышки по результатам МГД моделирования над активной областью

Подгорный А.И.[1], Подгорный И.М.[2]
[1]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*
[2]*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*
podgorny@lebedev.ru

Продолжена работа по исследованию конфигурации магнитного поля в месте, где происходит солнечная вспышка в корне, и разработка методики определения положения вспышки по результатам МГД моделирования. В настоящее время в принципе известен механизм, который может объяснить меленное накопление энергии в магнитном поле появляющегося тока в устойчивой конфигурации, а затем переход конфигурации в неустойчивое состояние, что необходимо для появления вспышки в солнечной короне. Таким механизмом является освобождение энергии в магнитном поле тока, имеющего форму тонкого слоя, который образуется в окрестности особой линии магнитного поля Х-типа. Токовый слой образуется в результате накопления возмущений, которое может осуществиться благодаря появлению в такой конфигурации магнитных сил соответствующих направлений. В результате квазистационарной эволюции токовый слой переходит в неустойчивое состояние. Так что, казалось бы, можно решить задачу определения места вспышки по магнитному полю, найдя конфигурации Х-типа с особыми линиями. В действительности, возникают трудности из-за сложности конфигурации магнитного поля в короне, которое может быть сильно запутанным, на конфигурацию магнитного поля Х-типа может быть наложено расходящееся магнитное поле, препятствующее образованию токового слоя.

Разработанная в настоящее время система поиска положений вспышек основана на предположении, что абсолютная величина максимума плотности тока достигается в середине токового слоя. В реальной ситуации плотность тока не обязательно достигает максимума в середине токового слоя. Основная идея объяснения того, в каком месте происходит солнечная вспышка, и как путём анализа конфигурации поля можно найти её положение в общем случае, проиллюстрирована на Рисунке 1. Плотность тока достигает максимального значения в точке, отмеченной зелёным квадратом. Магнитная линия, проходящая через этот максимум плотности тока, имеет форму петли. Из Рисунка 1 видно, что выбранный максимум плотности тока располагается вдали от центра яркой области вспышечного излучения. Такое положение выбранного максимума объясняется тем, что приведенная плоская конфигурация поля в окрестности выбранного максимума плохо способствует появлению вспышки из-за преобладания расходящегося магнитного поля над полем Х-типа. Поле Х-типа будет преобладать над расходящимся полем в окрестности точки в вершине петли,

обозначенной синим квадратом, и в окрестности точки петли в середине яркой области вспышечного излучения, обозначенной желтым цветом. В этих точках конфигурация поля способствует появлению вспышки, а плотность тока, хотя и не достигает максимальной величины, не сильно отличается от плотности тока в максимуме. Таким образом, значительная часть петли, проходящей через максимум плотности тока, в точках которой конфигурация поля способствует появлению вспышки располагается в яркой области вспышечного излучения. Такое расположение значительной части петли дает возможность осуществить найти положение вспышки в местах, где максимум плотности тока может не достигаться. Кроме того, поиску положения вспышки может способствовать результат анализа конфигурации, согласно которому, в месте вспышки должна возникнуть поверхность аркады магнитных линий с повышенной плотностью тока достаточно большого размера (~50 Мм), т. е. протяженный токовый слой.

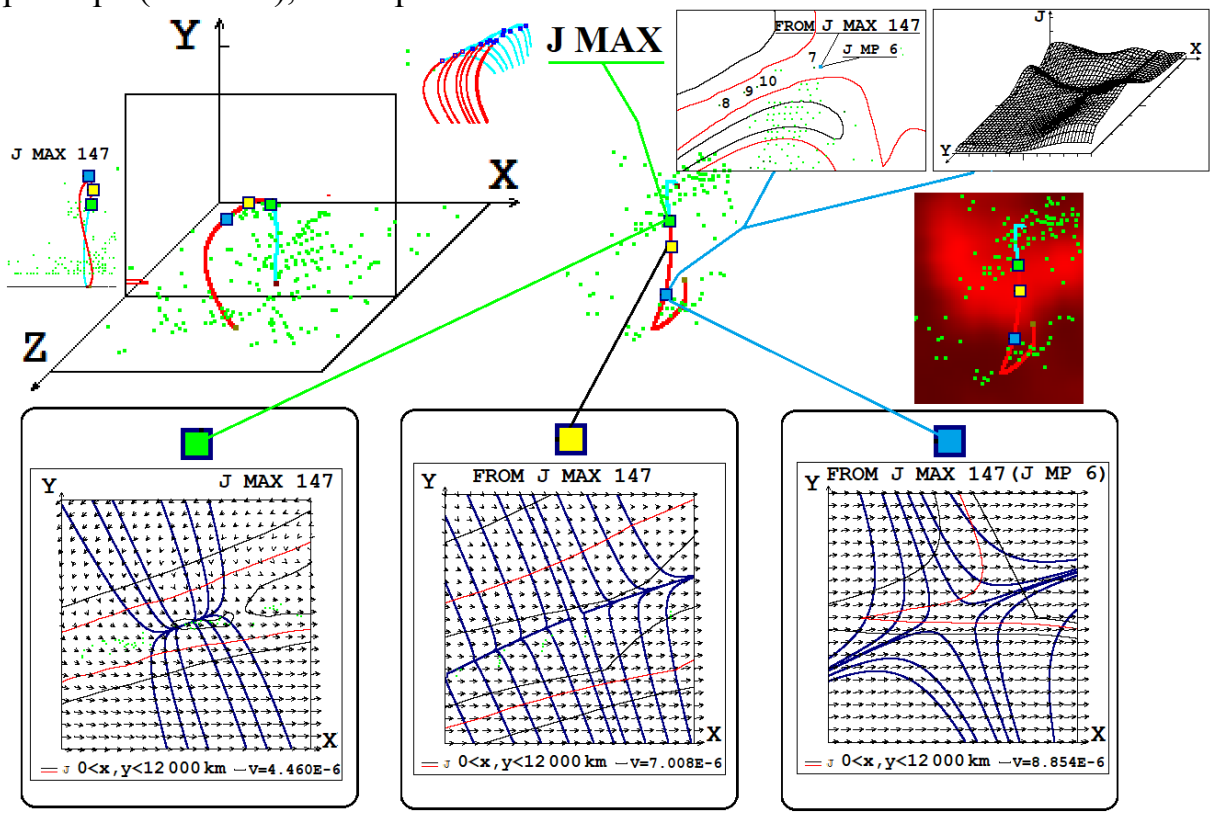


Рис. 1. Конфигурации магнитного поля в окрестностях точек магнитной линии, проходящей через максимум плотности тока.

Расширенная версия настоящей аннотации располагается по адресу https://sites.lebedev.ru/ru/podgorny/file/7181 .

Исследование параметров плазмы в месте первичного энерговыделения в слабых солнечных вспышках по наблюдениям в микроволновом диапазоне

Рожкова Д. В.[1], Кашапова Л. К.[1], Алтынцев А. Т.[1]
[1]*ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия*
dariarozhkova@mail.iszf.irk.ru

При рассмотрении процессов в слабых солнечных вспышках, долгое время предполагалось, что в них доминируют тепловые процессы. Со временем появилось много фактов, указывающих на присутствие ускоренных электронов в событиях такого класса, и возник вопрос о параметрах плазмы, обеспечивающих эффективное ускорение. В работе [1] авторы, используя наблюдения вспышечных источников в жестком рентгеновском диапазоне, связали процессы ускорения и высыпания электронов с сильными магнитными полями, напряженность которых, по данным магнитограмм, достигает на фотосфере 1800 Гс. Связь положения источников жесткого рентгеновского излучения с сильными магнитными полями является необычной для вспышек. Кроме того, первичное энерговыделение электронов происходит не на уровне фотосферы, а выше в солнечной атмосфере. Поэтому возникает необходимость независимой оценки локальной напряженности магнитного поля во вспышечном источнике.

Спектральный анализ микроволнового излучения солнечных вспышек признан одним из эффективных инструментов для диагностики физических параметров вспышечной плазмы в короне Солнца. Это связано с тем, что микроволновое излучение солнечных вспышек формируется преимущественно гиросинхротронным механизмом, который чувствителен к потокам ускоренных частиц. Фиттирование наблюдаемых спектров теоретическими позволяет получать оценки таких параметров плазмы, как напряжённость магнитного поля и размер источника излучения. Для фиттирования микроволновых спектров в случае мощных солнечных вспышек в основном используют теоретические спектры, полученные в предположении степенного распределения электронов по энергиям и скоростям, поскольку именно ускоренные электроны вносят основной вклад в формирование микроволнового излучения в таких событиях. Однако в слабых вспышках вклад тепловой плазмы в гиросинхротронное излучение может быть существенным, поэтому в данной работе мы использовали комбинацию теплового и ускоренного описания распределения электронов по энергиям. Сравнение полученных модельных спектров с наблюдаемыми данными позволило оценить параметры плазмы, размер источника излучения и напряженность магнитного поля. На основе полученных результатов обсуждаются особенности топологии магнитного поля, а также параметры плазмы в слабых солнечных вспышках.

Литература

1. A. F. Battaglia, S. Krucker, A. M. Veronig, M. Z. Stiefelet et al. A&A. **691**, A172 (2024)

Структура и динамика синхронных микровспышек по наблюдениям на спутнике HINODE

Савиных Е.С.[1], Думин Ю.В.[2,3]
[1]*Московский государственный строительный университет, Москва, Россия*
[2]*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*
z-0000001@hotmail.com, dumin@yahoo.com

Настоящая работа посвящена анализу архивных данных [1] солнечного оптического телескопа, установленного на спутнике Hinode [2]; причём акцент сделан на картинах эмиссии в линии однократно ионизованного кальция Ca II. Достоинством этой спектральной линии является то, что она позволяет одновременно последить как микровспышечные явления, сопровождающиеся умеренным нагревом плазмы (в 2-3 раза по сравнению с фоном), так и источники магнитного поля (солнечные пятна), их вызывающие.

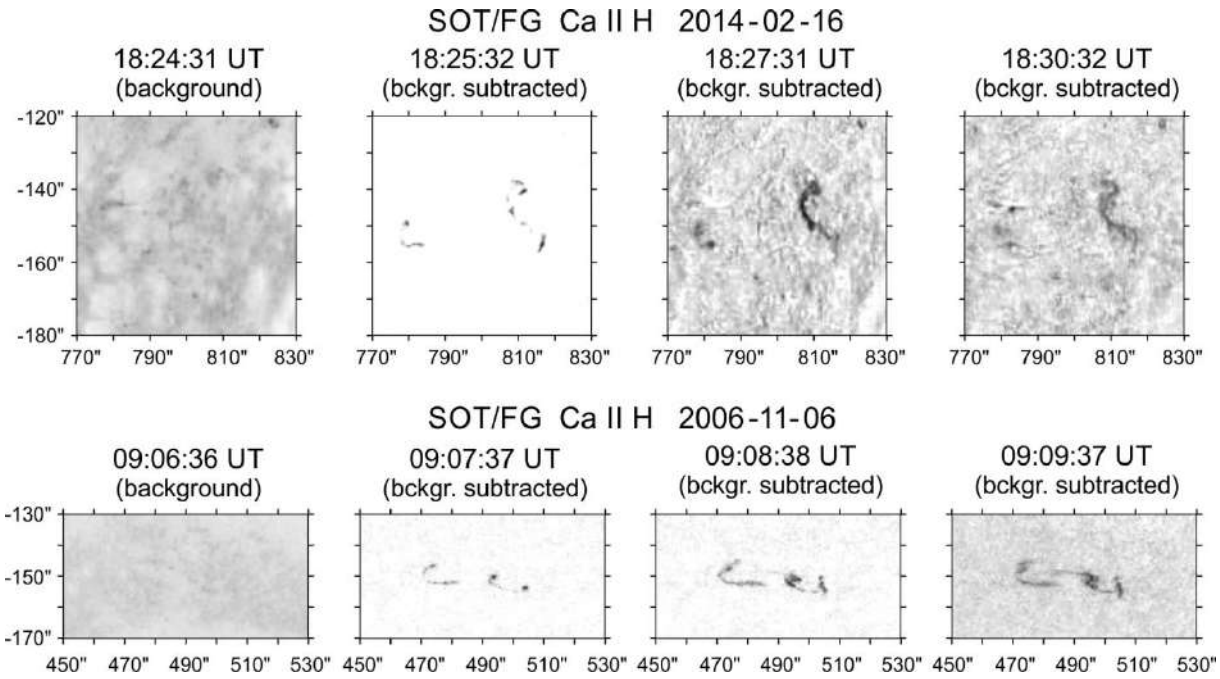


Рис. 1: Примеры развития со временем микровспышек в хромосферой линии Ca II (негативные изображения).

Среди большого количества микровспышек, наблюдающихся на соответствующих фильтрограммах, оказывается возможным выделить случаи, когда микровспышки возникают синхронными парами (с точностью по времени до 1 мин.; см. Рис. 1). Такие случаи, по-видимому, не связаны с хорошо известным “двухленточным” механизмом, когда тепловая энергия, выделяющаяся в вершине достаточно протяжённой аркады магнитных петель, распространяется далее вниз вдоль силовых линий магнитного поля и

вызывает свечение в их основаниях. Обсуждаемые нами явления имеют существенно меньшие пространственные и временные масштабы, чем типичные двухленточные вспышки (10"–20" и 2–5 мин, соответственно). Кроме того, области их эмиссии характеризуются хорошо очерченной дугообразной формой, причем они расположены друг от друга на расстояниях, сопоставимых или даже в 2–3 раза превышающих размер дуги. Это существенно отличается от морфологии двухленточных вспышек, в которых эмиссионные области имеют значительно более размытую и неправильную форму, причем расстояние между вспышечными лентами в несколько раз меньше их длины.

В связи с этим мы полагаем, что обсуждаемые события имеют существенно иной физический механизм. Одним из перспективных кандидатов мог бы быть “топологический” механизм магнитного пересоединения [3], в котором нулевые точки и нулевые линии магнитного поля формируются не локальными системами электрических токов, а за счёт специфической суперпозиции воздействий от удалённых источников (солнечных пятен). Как и следует ожидать в рамках этой модели, синхронные микровспышки действительно наблюдаются в областях сложной, перемежающейся полярности нескольких солнечных пятен. Такие области обычно реализуются в период максимума солнечной активности (верхний ряд данных на Рис. 1), однако иногда они имеют место и вблизи минимума активности (нижний ряд на том же рисунке).

Как видно на Рис. 1, временная эволюция синхронных микровспышек может происходить различным образом. В некоторых случаях эмиссионные полосы затухают со временем, сохраняя свою достаточно хорошо очерченную дугообразную форму (верхний ряд данных); в других же случаях происходит их трансформация в более размытые и нерегулярные геометрические структуры. С физической точки зрения, вторая ситуация, по-видимому, подразумевает, что микровспышка была инициирована по “топологическому” (нелокальному) механизму, однако затем в ней начала развиваться локальная система электрических токов.

Литература

1. Hinode QL Movie Archive. https://hinode.nao.ac.jp/en/for-researchers/qlmovies/top.html
2. Tsuneta S., et al. Solar Phys., v.249, p.167 (2008).
3. Dumin Yu.V., Somov B.V. MNRAS, v.528, p.L15 (2024).
4. Dumin Yu.V., Vereshchagin F.V. Moscow Univ. Phys. Bull., v.80, p.S478 (2025).

Эффект Бирмана по наблюдениям оптического и ультрафиолетового излучения факельных образований на Солнце

Смирнова В.В.[1], Цап Ю.Т.[1], Стрекалова П.В.[2], Живанович И.[3]
[1]Крымская астрофизическая обсерватория, пгт.Научный, Россия
[2]Пулковская астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, Россия
[3]Белградская астрономическая обсерватория, Белград, Сербия
vvsvid.smirnova@yandex.ru

Мелкомасштабные магнитные структуры, являются индикаторами областей концентрации магнитного потока и зачастую проявляются в фотосфере на лимбе и в хромосфере, как области повышенной яркости [1-6]. Такие структуры обычно наблюдаются в межгранульных промежутках, или на границе (между ячейками) супергранул. Предполагается, что они формируются за счет всплытия магнитных трубок с напряжённостью поля порядка килогаусса и эвакуации магнитного потока в условиях баланса давлений. Их связывают с дном или горячими стенками трубок в зависимости от их расположения на диске Солнца [7, 8].

С развитием спутниковых наблюдений стало возможно исследовать все более сложные мелкомасштабные элементы фотосферы/хромосферы Солнца, физические параметры которых не всегда соответствовали изученным структурам (яркие магнитные точки, факелы, факельные поля и их элементы). В первую очередь, это касается уединенных магнитных структур, не принадлежащих активным областям, с размерами 1,5 – 4 Мм, магнитным полем 400-1000 Гс и временем жизни десятки часов, которые обычно называют с факельными образованиями (ФО) [9]. Такие структуры видны в хромосфере и даже в короне как области повышенной яркости [10]. Они не формируют поры или пятна, медленно диссипируя в конце жизни.

Статистическая зависимость максимальной яркости этих структур от магнитного поля в фотосфере была получена в работе [9] для 30 ФО с использованием инструмента Helioseismic and Magnetic Imager космического аппарата Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO). Зависимость демонстрировала уменьшение яркости ФО с ростом магнитного поля, начиная со значений 350-400 Гс. При полях меньше 350 Гс зависимость не обнаруживалась. Однако авторы не уделили внимание тонкой структуре, распределению интенсивности и магнитного поля внутри ФО и использовали данные одного инструмента. В ультрафиолетовых каналах детальное исследование ФО также не проводилось.

В 1941 году Бирман [11] предположил, что температура (яркость) в тени солнечных пятен уменьшается с ростом магнитного поля до определенного значения, после которого наступает эффект насыщения, когда зависимость яркость-магнитное поле выходит на плато. Этот эффект был обнаружен в наблюдениях, анализ которых показал нелинейный характер

зависимости яркости от магнитного поля [12-14]. Однако эффект Бирмана для мелкомасштабных структур до сих пор детально не был исследован.

Нами были получены зависимости яркости оптического континуума и ультрафиолетового излучения от магнитного поля, в соответствующих пикселях, внутри исследуемых ФО, с применением масок на магнитограмме. По данным HMI/SDO для между яркостью континуума и магнитным полем, обнаружена корреляция с коэффициентом r = 0.8, в то время как по данным SOT/Hinode, с пространственным разрешением 0.3”, зависимость не была выявлена (r = −0.1). Однако, после ухудшения пространственного разрешения методом сглаживания до 1”, коэффициент корреляции увеличился до r = 0.8. Это может свидетельствовать об обнаружении минимального характерного масштаба конвективных движений в области солнечной фотосферы. В результате исследования зависимостей яркости ультрафиолетового излучения от магнитного поля для каналов 131, 171, 211, 304, 335, 1600 и 1700 Å, была выявлена наиболее высокая корреляция для каналов 1600 и 1700 А (r=0.72 и r=0.74 соответственно), а также, 304 А (r=0.32). Для других каналов наблюдался обратный эффект, когда с ростом магнитного поля яркость увеличивалась, что свидетельствует о нагреве плазмы альвеновскими волнами и возможной важной роли амбиполярной диффузии [15-16].

Литература

1. Zwaan C. On the appearance of magnetic flux in the solar photosphere // Sol. Phys. V.60. pp. 213-240. 1978.
2. Solanki S.K. Small-scale solar magnetic fields: An overview // Space. Sci. Rev. V.63. pp. 1-188. 1993.
3. Berger, T. E., & Title, A. M. On the relation of G-band bright points to the photospheric magnetic field // ApJ. V.553. P. 449. 2001.
4. de Wijn A.G., Stenflo J.O., Solanki S.K. et al. Small-Scale Solar Magnetic Fields // Space. Sci. Rev. V.144. pp. 275-315. 2009.
5. Chen Y., Przybylski D., Peter H., Tian H., Auchère F., Berghmans D. A model for campfires observed with Solar Orbiter // A&A. V.656. L7. 2021.
6. Weihr E., Bovelet B., Hirzberger J. Brightness and size of small-scale solar magnetic flux concentrations // A&A. V.422. L63-L66. 2004.
7. Spruit H.C. Pressure equilibrium and energy balance of small photospheric fluxtubes // Sol. Phys. V.50. pp. 269-295. 1976.
8. Parker, E. N. Hydraulic concentration of magnetic fields in the solar photosphere // ApJ. V.221. P. 368. 1978.
9. Strekalova P.V., Solov'ev A.A., Smirnova V.V., Nagovitsyn Yu.A. Magnetic Structure of Facular Formation in the Solar Atmosphere // Ge&Ae. V.62, Iss.8. pp. 1016-1020. 2022.
10. Biermann L. Der gegenwärtige Stand der Theorie konvektiver Sonnenmodelle // Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft. V.76. P.194. 1941.
11. Tiwari S. K., van Noort M., Solanki S. K., & Lagg A. Depth-dependent global properties of a sunspot observed by Hinode using the Solar Optical Telescope/Spectropolarimeter // A&A. V.583. A119. 2015.
12. Li Q., Zhang L., Yan X., et al. Dependence of the continuum intensities on the magnetic fields at different evolution phases of sunspots // ApJ. V.936. P. 37. 2022.
13. Schad, T. A. On the collective magnetic field strength and vector structure of dark umbral cores measured by the Hinode spectropolarimeter // Sol. Phys. V.289. pp. 1477-1498. 2014.
14. Solanki, S. K. Sunspots: an overview // A&A Rev. V.11. pp. 153-286. 2003.
15. Singh K., Shibata K., Nishizuka N., Isobe H. Chromospheric Anemone Jets and Magnetic Reconnection in Partially Ionized Solar Atmosphere // Physics of Plasmas. V.18. Iss.11. Art. Number 111210. 2011.
16. Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Kupriyanova E.G. On the Role of the Neutral Plasma Component in the Electric Current Dissipation and the Formation of a Transition Region in the Solar Atmosphere // Geomagn. Aeron. V.63. P. 947-952. 2023.

Сравнение ручной и автоматической обработки наблюдений солнечных радиовсплесков на длине волны 4,9 см и их сопоставление с данными GOES

Сорокин К.А.[1], Тлатов А.Г.[2], Шрамко А.Д.[2]
[1] *МГУ имени М.В. Ломоносова Отдел физики Солнца (Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга), Москва, Россия*
[2]*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия*
sorokin.ka24@physics.msu.ru

Совместный анализ радио- и рентгеновского излучения солнечных вспышек позволяет исследовать связь между ускорением электронов и нагревом плазмы, однако методы выделения радиовсплесков могут влиять на статистические выводы. В работе использовались результаты наземных наблюдений солнечного радиоизлучения на длине волны 4,9 см, соответствующей частоте 6150 МГц. Для автоматической обработки использовался алгоритм, основанный на процедуре медианной фильтрации с 3 плавающими окнами: 6 секунд, 15 секунд, 150 минут. Проведено сравнение ручной (операторской) и автоматической обработки радионаблюдений Солнца за 2024–2026 гг. События сопоставлялись с рентгеновскими вспышками GOES по близости максимумов с окном 15 минут и, дополнительно, по согласованности длительностей с максимальной разницей в 15 минут.

Оба метода показывают, что мощные радиоответы чаще достигают максимума до рентгеновского пика (как минимум, в 2 раза чаще) или вблизи него, а с ростом X-ray flare index расширяется диапазон возможных значений радиопотока (были использованы 20% и 90% квантили). Для вспышек с большей мощностью среднее время задержки между максимумами в рентгене и в радио составляет ~2,5 минут. Автоматическая обработка обнаруживает больше слабых событий (примерно на 14,6%). Практическим результатом работы является программный комплекс, позволяющий автоматически обрабатывать массивы радионаблюдений, сопоставлять найденные всплески с каталогами GOES, формировать отфильтрованные выборки, рассчитывать статистические характеристики и строить необходимые зависимости, однако для точной физической интерпретации необходимы данные разных типов.

Литература

1. Fletcher L., Dennis B. R., Hudson H. S. et al. // Space Sci. Rev. 159, 19–106 (2011).
2. Tlatov A. G., Bogod V. M., Pons O. et al. // Geomagnetism and Astronomy 60, 1087–1092 (2020).

Изотермическая модель вспышечной магнитной трубки в верхней хромосфере Солнца

Строгонова Т.Б.[1], Леденцов Л.С.[2]
[1]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*
[2]*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
strogonova.06@mail.ru

Нановспышки – события с энерговыделением порядка 10^{-9} – 10^{-6} от энергии обычной вспышки – рассматриваются наряду с магнитогидродинамическими волнами в качестве вероятного источника нагрева солнечной короны [1]. Для их моделирования необходимы упрощенные вычислительно эффективные модели. В данной работе описана пространственно изотермическая модель хромосферной трубки, включающая две области с разной температурой: начальной температурой хромосферы и температурой разогретой вспышечной плазмы. В основе модели лежит уравнение теплового баланса, учитывающее оптически тонкое излучение, изменение высоты хромосферы и теплообмен между ее частями за счет аномального теплового потока. Нами анализируется реакция модельной хромосферы на нагрев, аналогичный сетке моделей F-CHROMA [2], основанных на одномерном радиационном магнитогидродинамическом коде RADYN [3]. При небольшом потоке энергии нагрева, порядка 3×10^7 эрг/см^2 , модель демонстрирует хорошее соответствие одномерному коду и может быть использована для моделирования нановспышек.

Авторы выражают благодарность разработчикам кода RADYN и сетки моделей F-CHROMA.

Литература

1. Parker E.N. Magnetic Neutral Sheets in Evolving Fields. II. Formation of the Solar Corona // Astrophys. J. 1983. Vol. 264, pp. 642–647
2. Carlsson M., Fletcher L., Allred J. et al. The F-CHROMA grid of 1D RADYN flare models // Astron. Astrophys. 2023. Vol. 673. Art. 150
3. Allred J.C., Kowalski A.F., Carlsson M. A Unified Computational Model for Solar and Stellar Flares // Astrophys. J. 2015. Vol. 809, iss. 1. Art. 104

Активность в октябре 2024 и январе 2026: выбор сценария развития 25-го солнечного цикла

Струминский А.Б.[1], Григорьева И.Ю.[2], Ожередов В.А.[1]
[1]*ИКИ РАН, Москва, Россия*
[2]*ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, Россия*
astrum@cosmos.ru

В работе [1] была описана асимметрия поведения числа солнечных пятен (SSN), модуляции ГКЛ (темпа счета НМ Москва) в четных и нечетных циклах, контролируемая величиной полярного магнитного поля Bpol. Нечетные циклы большее время находятся в состояни динамического равновесия (наработки Bpol новой полярности следующего цикла) и меньшее время — в состоянии максимального по модулю Bpol, чем четные. Была высказана гипотеза о наличии точек бифуркации Bpol в нечетных циклах (через ~5.5 лет и ~7.5 лет после нуля) после которых, текущий 25-й цикл может пойти по сценарию как к сильного Bpol (привести сильному 26-му циклу, как 22-ой), так и к слабого Bpol (привести слабому 26-му, как 24-ый цикл). На основе этой гипотезы был сделан качественный прогноз возможных границ изменения Bpol в 25-ом цикле, потоков ГКЛ на фазе спада 25 цикла и в минимуме 25–26 циклов. Развитие цикла с ноября 2024 по август 2026 не противоречит сделанному в [1] прогнозу, доступные на текущий момент данные Bpol и модуляции ГКЛ приведены на рис. 1.

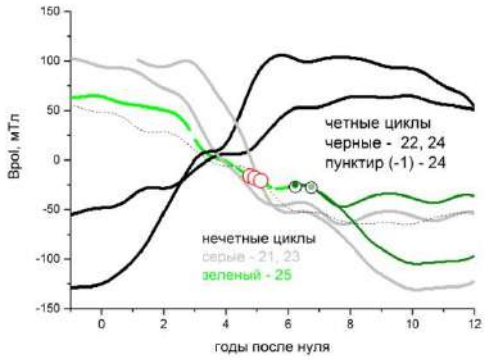


Рис. 1а Полярное поле (WSO)

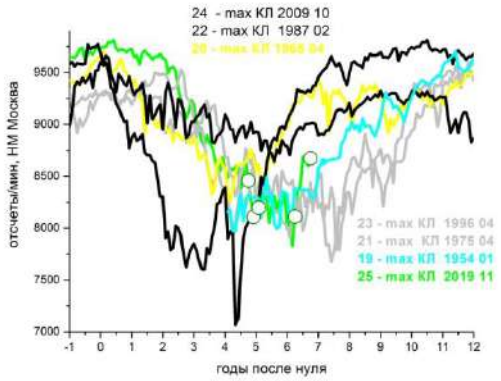


Рис. 1б Темп счета НМ Москва

В работе [2] было показано, что мощные геоэффективные события в ходе солнечных циклов группируются ближе к началу четных и ближе к концу нечетных, и такое распределение не является случайным. В [2] сделан прогноз: в конце активной фазы 25 цикла в начале 2026 года можно ожидать всплеск вспышечной активности. Это, скорее всего и произошло, учитывая яркие события ноября 2025 и января 2026. На рис. 1 кружками обозначены (справа налево): текущий момент (август 2026), январь 2026 и последние 3 кружка — август, октябрь и декабрь 2024.

По всей видимости, первая точка бифуркации была пройдена в октябре 2024, когда вспышки и КВМ 7-9 октября 2024 привели к выносу

отрицательного магнитного потока в гелиосферу (рис. 2а). Это затормозило строительство поля нового цикла и наступила фаза «динамического равновесия». Напротив, активность в январе 2026 (рис. 2б), привела к выносу положительного магнитного потока в гелиосферу, создала отрицательный магнитный поток на Солнце и ускорила «затухание» 25-го цикла. То, что цикл перешел в новую фазу своего развитя отлично показывает модуляция ГКЛ (рис. 1б). Увы, но данные WSO доступны только по ноябрь 2025 года. Темно-зеленые кривые Bpol — это смещенные вверх данные WSO 21 и 23 циклов (рис. 1а).

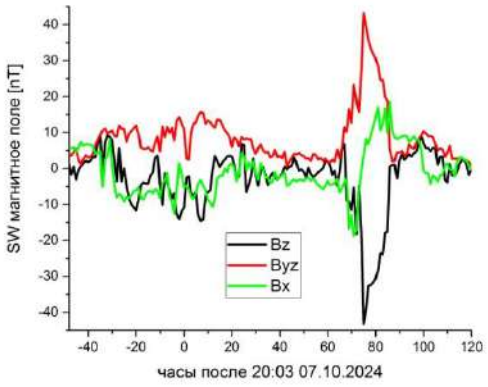


Рис. 2а. Компоненты магнитного поля солнечного ветра в октябре 2024.

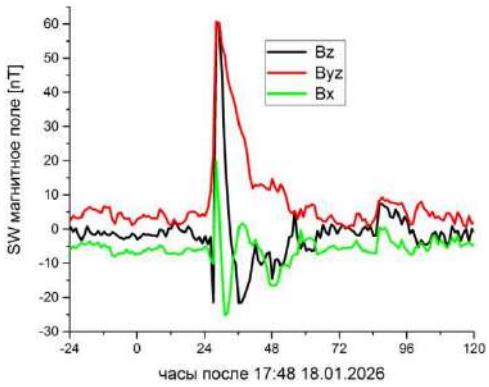


Рис. 2б. Компоненты магнитного поля солнечного ветра в январе 2026.

В настоящий момент 25-ый цикл по глубине модуляции ГКЛ вышел на уровень 19-го цикла (рис. 1б). Поэтому можно предположить, что 25-ый цикл повторит путь, пройденный 19-ом циклом. В этом случае начало 26-го цикла должно быть аналогичным началу 20-го цикла. Согласно [3] число SSN в максимуме последующего цикла коррелирует с числом SSN в момент выключения текущего цикла. Это позволяет получить предварительную оценку прогноза максимума предстоящего 26-го цикла как слабого или умеренного — с интенсивностью, не превышающей уровень 25-го цикла или сопоставимой с ним до его завершения, которое ожидается через 2.5–3.5 года [3].

Литература

1. А.Б. Струминский, А.В. Белов, Р.Т. Гущина, В.Г. Янке, И.Ю. Григорьева // Геомаинетизм.и Аэрономия (2025) т. 65, № 3, с. 324–334.
2. M. J. Owens,·M. Lockwood, ·L. A. Barnard et al. // Solar Physics (2021) 296:82
3. S. C. Chapman // The Astrophysical Journal, 1003:159 (11pp), 2026 June 1

Поиск условий формирования узкополосных гирорезонансных особенностей в радиоизлучении активных областей на Солнце

Ступишин А.Г., Кальтман Т.И., Овчинникова Н.Е.
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия
agstup@yandex.ru

Рассмотрена возможность формирования узкополосных гирорезонансных особенностей радиоизлучения при локальном энерговыделении в солнечных активных областях. Магнитное пересоединение может сопровождаться локальным нагревом плазмы и микровспышечной активностью. Если нагретая область охватывает ограниченный диапазон значений магнитного поля, связанный с ней дополнительный гирорезонансный компонент может быть сосредоточен в сравнительно узком диапазоне частот. Регистрация таких особенностей открывает возможность диагностировать магнитное поле непосредственно в области локального энерговыделения, оценивать характерные размеры нагретых структур и исследовать условия преобразования магнитной энергии в тепловую. Это особенно существенно для исследования микровспышек и других маломасштабных событий, возможный вклад которых в нагрев солнечной короны остаётся одним из важных вопросов физики Солнца. Возможность обнаружения таких особенностей определяется как характеристиками инструмента (прежде всего чувствительностью, пространственным и спектральным разрешением), так и применением методов обработки данных на основе многомерного факторного анализа для выделения слабых компонентов с характерными спектральными и пространственно-временными свойствами.

Для исследования этого эффекта построена трёхмерная квадрупольная модель магнитного поля активной области и рассмотрены локально нагретые магнитные трубки в области взаимодействия различных систем петель. Для выбранных конфигураций рассчитано радиоизлучение с учётом нескольких низких гармоник электронной гирочастоты, получены спектры интенсивности и круговой поляризации и двумерные радиокарты. Варьируются магнитная конфигурация и параметры нагретой области, оценивается влияние пространственного разрешения инструмента на обнаружение локального гирорезонансного компонента.

Мгновенная скорость нарастания магнитного потока активных областей типа униполярное пятно плюс мультиполярная структура

Сулейманова Р.А., Абраменко В.И., Куценко А.С.
ФГБУН Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия
bictr97@gmail.com

В работе [1] была выделена особая конфигурация мультиполярных активных областей, когда вокруг униполярного стабильного пятна всплывает мультиполярная структура сравнимого потока. В данной работе продолжается исследование этих АО, в частности, рассмотрена мгновенная скорость нарастания магнитного потока, которая вычислялась как производная по времени (черная сплошная кривая, правая ось на Рис. 1). Полный беззнаковый магнитный поток был получен с использованием данных инструмента SDO/HMI (серия hmi.sharp_cea_720s…magnetogram; серая пунктирная линия, левая ось на Рис. 1). Сглаженный поток представлен красной сплошной линией на Рис. 1.

В каждом случае реализуется нарастание потока с ускорением и с замедлением. Нарастание потока с ускорением – явление довольно редкое. Чаще всего поток в биполярной области прибывает с постоянной, либо уменьшающейся скоростью (см. примеры в работе [2]).

По всей видимости, в нашем случае (униполяр плюс мультиполярная структура) может работать некий механизм под фотосферой, который приводит к возрастанию магнитного потока всей структуры, заставляя ее поток прибывать с ускорением. Мы предполагаем, что этот механизм может быть связан с турбулентностью конвективной зоны.

Для АО 12673 и 13654 видно, что увеличение скорости нарастания происходит до некоторого пикового значения, после которого происходит постепенное замедление. В профилях нарастания магнитного потока АО 13664 и 13713 видно несколько пиков, происходит волнообразное увеличение скорости нарастания, что, как мы предполагаем, связано с последовательными всплытиями нескольких биполей.

Можно предположить, что исходное стабильное униполярное пятно, которое, по всей видимости, имеет глубокие корни залегания, может создавать условия для более легкого и быстрого подъема магнитного потока, а турбулентность конвективной зоны играет роль своеобразного ускорителя для всплывающего потока.

Литература

1. Абраменко В.И., Сулейманова Р.А., 2025. Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 65. №7. С. 985–991.
2. Тихонова О.И., Абраменко В.И., Куценко А.С., Юрчишин В.Б., 2016. Известия Крымской астрофизической обсерватории. Т. 112. №2. С. 98–106.

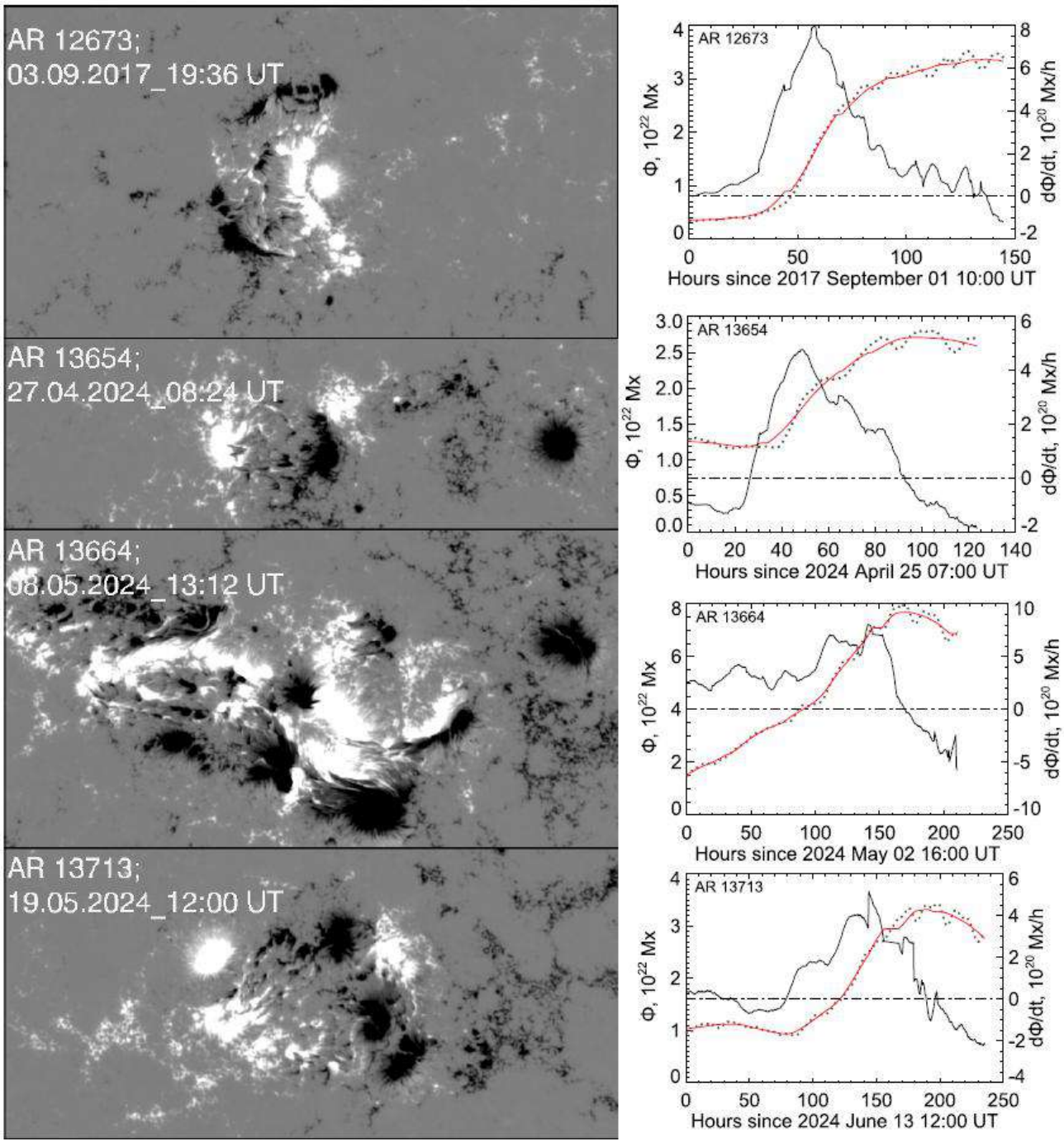


Рис. 1. Изображения рассмотренных активных областей в момент максимальной мгновенной скорости нарастания магнитного потока (слева) и полученные для них временные изменения магнитных потоков и мгновенных скоростей нарастания магнитных потоков (справа). Серая пунктирная кривая – полный беззнаковый магнитный поток (левая ось), красная кривая – ее сглаженные значения, черная сплошная – мгновенная скорость нарастания магнитного потока (правая ось). Горизонтальная пунктирно-штриховая линия – нулевой уровень для правой оси.

Влияние теплопроводности на медленные магнитоакустические волны в солнечной короне

Сумьянов А.В., Михаляев Б.Б.
Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова, Элиста, Россия
arslantmt2020@mail.ru

Одним из наиболее распространенных явлений в солнечной короне это волны сжатия, наблюдаемые в крайнем ультрафиолете. Обычно они описываются в гидродинамическом приближении [1, 2], хотя часто отмечается необходимость учета влияния магнитного поля. Тщательное описание неадиабатических эффектов позволило ранее получить новые результаты, уточняющие поведение волн сжатия [3, 4]. Выяснилось, что теплопроводность приводит к разделению акустических волн по их свойствам дисперсии и затухания. Теплопроводность является причиной появления минимума в распределении групповой скорости, занимающего центральное место в таком разделении. Кроме того, минимум групповой скорости может приводить к генерации квазипериодических быстрых магнитозвуковых осцилляций в магнитных трубках. В настоящей работе предпринята попытка рассмотреть с таких позиций поведение медленных магнтоакустических волн в корональных магнитных трубках. В частности показано, что теплопроводность приводит к появлению локального максимума в распределении групповой скорости медленных волн.

Литература

1. Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Zavershinskii D.I. Astron. Astrophys. 2019. 626. A133.
2. Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.N., *et al*. Phys. Plasmas. 2019. 26. 082113.
3. Mikhalyaev B.B., Derteev S.B., Shividov N.K., *et al*. Solar Phys. 2023. V. 298. 102.
4. Derteev S.B., Sapraliev M.E., Shividov N.K., *et al*. Solar Phys. 2024. 240. 141.

Корональные дыры по данным SOHO/EIT195 в период 1996 – 2026

Златов А.Г. [1,2], Златова К.А.[1,2], Березин И.А.[1,2]
[1]*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия*
[2] *КалмГУ, Элиста, Россия*
tlatov@mail.ru

Непрерывный мониторинг и анализ эволюции корональных дыр (КД) играют первостепенную роль в исследовании долговременных изменений открытого магнитного поля Солнца и прогнозировании космической погоды. В настоящей работе представлен непрерывный гомогенизированный 30-летний ряд площадей и координат КД за период 1996–2026 гг., построенный по данным наблюдений SOHO/EIT195Å. Выделение границ КД выполнялось по алгоритму KMAS (Кисловодская Горная астрономическая станция). Анализ выявил зональную асимметрию: общая площадь КД флуктуирует в пределах 1.5–6.5% от площади полусферы, достигая минимумов в максимумах солнечных циклов 23, 24 и 25. Полярные КД достигают максимальной площади в минимумах активности, тогда как среднеширотные КД ведут себя инверсно, демонстрируя пики на фазах спада.

Исследование траекторий центроидов КД ставит под сомнение концепцию непрерывного меридионального дрейфа от полюса до полюса [1]. Показано, что широтная эволюция КД носит дискретный, ячеистый характер и регулируется волновым процессом. Кроме того, приэкваториальные КД формируют устойчивые пространственные структуры, локализованные в узких долготных коридорах вблизи 60°, 180° и 300°.

Физическая значимость построенного ряда верифицирована путем сопоставления индекса КД со скоростью солнечного ветра по данным спутника ACE. Установлено, что сужение зоны анализа КД до низкоширотного экваториального пояса ($\theta<22^o$) и учет долготной протяженности КД максимизируют коэффициент линейной корреляции со скоростью плазмы до значений (r = 0.79) при 90-дневном скользящем окне сглаживания, что обосновывает надежность полученной эмпирической зависимости для долгосрочного климатического моделирования гелиосферы.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта Минобрнауки 075-03-2026-420/4.

Литература

1. Tlatov A., Tavastsherna K., Vasil’eva V., 2014, Sol. Phys., 289, 1349.

Полярные и низкоширотные факелы, наблюдаемые в белом свете, в 23 – 25 циклах активности

Тлатов А.Г. [1,2], Березин И.А.[1,2], Тлатова К.А.[1,2]
[1]*Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия*
[2] *КалмГУ, Элиста, Россия*
tlatov@mail.ru

По данным наблюдений космических обсерваторий MDI (1996-2011) и SOHO (2010-2026) выделены полярные и низкоширотные факелы на ежедневных изображениях в “белом” свете. Изучение факелов критически важно для прецизионного моделирования полного солнечного излучения (TSI), так как их суммарный энергетический вклад компенсирует и превосходит дефицит светимости, создаваемый солнечными пятнами. Границы факелов были совмещены с наблюдениями магнитных полей на максимально близкий момент наблюдений. Выполнен анализ распределений по времени, широте и других свойств полярных и низкоширотных факелов. Мы подтверждаем прогностическую роль полярных факелов как ведущего прокси-индекса солнечной активности.

Показана физическая бимодальность низкоширотных факельных популяций. В королевских широтах ($\pm 30^o$) популяция факелов разделяется на два изолированных класса: субгранулярные факельные узлы и изолированные точки (площадей ~ 17.8 мдп) и протяженные активные поля, окружающие группы пятен (площадь ~102.4 мдп). В полярных областях ($\theta > 50^o$) распределение становится унимодальным с преобладанием компактных мелкомасштабных структур (~ 15.3 мдп).

Различные популяции демонстрируют разные профили вариации контраста от центра к краю (CLV) в зависимости от гелиоцентрического угла $\mu = \cos\theta$. Для факелов большой площади (S > 10 мдп) и высокого контраста подтвержден характер зависимости от гелиоцентрического угла μ, выражающийся в монотонном падении яркости к центру диска (μ ~1) и плавном росте к лимбу с достижением экстремума в интервале μ~ 0.3- 0.45. Для малых элементов обнаружена инверсная зависимость контраста. Для факелов малой площади (S < 10 мдп) и высокоширотных факелов зависимость контраста от μ демонстрирует U-образный параболический ход.

Мы установили вариации контраста факелов в зависимости от фазы цикла солнечных пятен. Полученные результаты были сопоставлены с “Hillock Model”.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта Минобрнауки 075-03-2026-420/4.

Ускорение квазитепловых электронов фоновой плазмы вспышечной петли 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 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 и инжектирует их во вспыщечную петлю. 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 фоновой плазмы кроны, 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 очень 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.

Влияние особенностей структуры магнитных жгутов на условия их равновесия в солнечной короне и эруптивную неустойчивость. Эрупция кольцевого волокна

Филиппов Б.П.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия
bfilip@izmiran.ru

Эрупции протуберанцев/волокон и образование корональных выбросов вещества на Солнце вероятнее всего связаны с неустойчивостями магнитного поля в короне. Магнитные жгуты, которые, как широко признается, представляют внутреннюю магнитную структуру протуберанцев и корональных выбросов, удерживают более плотную чем окружение плазму и формируют ряд характерных особенностей, обнаруживаемых в наблюдательных данных. Как показывает анализ наблюдений и расчетов магнитного поля в короне, эрупции магнитных жгутов происходят вследствие развития так называемой тороидальной неустойчивости (torus instability), хотя форма эруптирующих жгутов порой далека от тороидальной. Название, очевидно, пришло из физики лабораторной плазмы, где геометрия лабораторных установок для удержания плазмы при изучении проблемы управляемого термоядерного синтеза часто имеет тороидальную симметрию. Хотя в солнечной атмосфере образования подобной формы иногда встречаются, там наблюдаются структуры различной формы и размеров. Условия равновесия и устойчивости жгута в короне зависят как от свойств окружающего жгут коронального магнитного поля, так и от геометрических характеристик и «привязанности» жгута к фотосфере. Структуру коронального магнитного поля применительно к проблеме тороидальной (или, может быть, учитывая разнообразие форм жгутов, уместнее назвать просто эруптивной) неустойчивости принято характеризовать индексом убывания поля с высотой (decay index). Существуют пороговые значения этого индекса для развития неустойчивости, которые зависят от свойств жгутов. Будут приведены результаты расчетов критического значения индекса убывания жгутов, имеющих различную геометрическую форму оси и различную степень связанности с фотосферой. Эти результаты сопоставляются с данными наблюдений начальной фазы эрупции протуберанцев и волокон.

Особенности динамики среднесуточных величин параметров вертикального электрического тока и суточных индексов вспышечной продуктивности активных областей

Фурсяк Ю.А.
Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Республика Крым, Россия
yuriy_fursyak@mail.ru

Задачей исследования является анализ взаимосвязи между среднесуточными величинами параметров вертикального электрического тока и суточными индексами вспышечной продуктивности активных областей (АО).

Для расчета величин параметров электрического тока использованы данные инструмента Helioseismic and Magnetic Imager, установленного на борту Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO [1]) о пространственном распределении на уровне фотосферы Солнца компонент вектора магнитного поля. Величина вертикального электрического тока в АО рассчитывалась с использованием интегрального метода [2].

В работе использована небольшая выборка из 9 АО 24-го цикла солнечной активности: 3 области с низкой вспышечной продуктивностью, 3 – со средней и 3 – с высокой. Мониторинг каждой области осуществлялся в пределах 30–35 гелиографических градусов относительно центрального солнечного меридиана, что соответствует временному интервалу в 3-5 суток.

Анализируемыми параметрами вертикального электрического тока являются: средняя беззнаковая плотность вертикального электрического тока ($<|j_z|>$), суммарный вертикальный электрический ток в АО ($I_{z\ tot}$), а также нескомпенсированный вертикальный электрический ток ($I_{z\ net}$), который вычислялся двумя способами – как результирующий ток по всей АО, и как разность результирующих вертикальных токов в положительной и отрицательной магнитных полярностях АО. Параметром, характеризующем вспышечную продуктивность АО, в работе является вспышечный индекс [3], рассчитываемый отдельно за каждые сутки со сдвигом на один день относительно рассчитываемых параметров вертикального электрического тока, поскольку, как было показано, например, в [4], нарастание параметров вертикального электрического тока опережает рост уровня вспышечной продуктивности АО на 18-20 часов.

В докладе представлены наиболее интересные из полученных результатов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН «КрАО РАН».

Литература

1. Schou J. et al. Design and ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. V. 275. I. 1-2. P. 229-259. 2012.

2. Fursyak Yu.A. Vertical electric currents in active regions: calculation methods and relation to the flare index // Geomagn. Aeron. V. 58. I. 8. P. 1129-1135. 2018.
3. Abramenko V.I. Relationship between magnetic power spectrum and flare productivity in solar active region // ApJ. V. 629. I. 1. P. 1141-1149. 2005.
4. Фурсяк Ю.А. Особенности динамики полного электрического тока и его компонент в активных областях с разным уровнем вспышечной продуктивности // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 65. №8. С. 1206-1220. 2025.

Эффекта Нойперта и временные задержки максимума излучения в мягком рентгене и Hα

Цап Ю.Т., Ахтемов З.С.
КрАО РАН
yur_crao@mail.ru

В представленной работе, исходя из данных наблюдений в линии Hα (обсерватории San Vito; Holloman AFB, NM; Learmonth) и мягком рентгеновском иизлучении SXR (GOES) нами были рассмотрены солнечные вспышки различных рентгеновских классов за период с начала 2015 до конца 2021 гг. Получено, что для максимумов SXR- и Hα –излучения эффект Нойперта наблюдается лишь для 53.9% событий класса B, 61.1% событий класса C и 56.5% вспышечных событий M– и X-класса. Между тем, согласно результатам статистических исследований, представленных в работе [1], которые хорошо согласуются с полученными нами результатами для SXR- и Hα –излучения, в 85% исследуемых событий максимум жесткого рентгеновского излучения HXR опережает SXR. Это предполагает, ввиду малой эффективности теплопроводного нагрева хромосферной плазмы, важную роль процессов энерговыделения в нижней атмосфере Солнца, что несколько противоречит стандартной модели солнечных вспышек и свидетельствует о необходимости развития новых подходов к проблеме вспышечного энерговыделения. В частности, обсуждается возможная важная роль тепловых и нетепловых процессов в хромосфере Солнца. Проведен анализ процесса лавинообразного ускорения электронов в хромосфере/фотосфере Солнца суб-драйсеровскими электрическими полями. Такой подход позволяет избежать трудности, с которыми сталкивается стандартная модель. Во-первых, тепловое энерговыделение и ускорение заряженных частиц в нижней атмосфере Солнца в значительной мере решает проблему солнечных вспышек в белом свете, на которые может приходиться большая доля вспышечного излучения. Во-вторых, поскольку поле Драйсера (характеризует поле, при котором в режим непрерывного ускорения переходят все тепловые электроны и ионы) $E_D \sim n/T$, где n и T - соответственно концентрация и температура плазмы, то предположение о доминировании суб-драйсеровского ускорения заряженных частиц позволяет решить вопрос о малых значениях E_D в короне Солнца, поскольку в рамках принятой модели электроны могут достигнуть релятивистских энергий на расстояниях, значительно меньших характерного масштаба активной области. Наконец, предлагаемый подход в значительной мере позволяет избежать проблему большого числа ускоренных в короне электронов, необходимых для обеспечения наблюдаемых потоков жесткого рентгеновского излучения на импульсной фазе солнечных вспышек.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РНФ N 22-12-00308-П (Цап Ю.Т.).

Литература

1. Veronig, A., Vrsnak , B., Temmer, M., and Hanslmeier, A. Solar Phys.,208, 297 (2002). https://doi.org/10.1023/A:1020563804164

Эрупции плазмы из корональных ярких точек: мини-волокна и мини-КВМ

Цап Ю.Т. [1], Степанов А.В. [2,3], Зайцев В.В.[4], Копылова Ю.Г.[2]
[1]*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пос. Научный, Крым*
[2]*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург*
[3]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург*
[4]*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*
yur_crao@mail.ru

Из наблюдений следует, (например, [1]), что корональные яркие точки (КЯТ) часто сопровождаются эрупциями, содержащими в большинстве случаев вещество хромосферы в виде мини-волокон. Мини-волокно сначала сравнительно медленно, со скоростью 3-10 км/с, поднимается, а затем извергается со скоростью ≥50 км/с. В докладе исследована эрупция мини-волокна, расположенного под магнитными петлями КЯТ. Такое взаимное расположение мини-волокон и петель ЯРТ неоднократно отмечалось в наблюдениях [1,2]. Анализ уравнения движения мини-волокна с замыкающимся в фотосфере Солнца электрическим током I, что соответствует модели Куперуса-Рааду [3], показал возможность преодоления волокном накрывающего магнитного поля КЯТ, если I в мини-волокне превысит 10^9 А. Это приводит к его медленному подъему и достижению либо нового равновесного состояния, либо эрупции, в первую очередь, из-за роста относительного градиента внешнего магнитного поля, характеризуемого параметром decay index. Установлена важная роль потери массы мини-волокна в процессе эрупции, благодаря чему пороговое значение decay index уменьшается. Рост тока и потеря массы приводят к увеличению скорости эрупции мини-волокон. С учетом ионной вязкости уточнены условия эрупции и динамики волокна. Как оказалось, условие неустойчивости, в отличие от эволюции мини-волокна, обусловленного ростом I, слабо зависит от вязкости. Детально рассмотрена эволюция и устойчивость волокон разных масштабов. Показано что высота и размер волокон не оказывают существенного влияния на критерии их устойчивости в случае их вертикального смещения. Вместе с тем уменьшение размера волокна может заметным образом сказаться на его максимальной скорости и высоте нового равновесного состояния. Определены условия преодоления торможения волокна и возможной последующей эрупции. При распространении в короне мини-волокно формирует ядро мини-КВМ, характеристики которого способствуют пониманию механизмов формирования обычных КВМ. Эрупция, как правило, сопровождается мини-вспышками, которые могут возникнуть из-за джоулевой диссипации при повышенном сопротивлении Каулинга. Обсуждается вклад эруптивных мини-КВМ в поток вещества солнечного ветра.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ N 22-12-00308-П (Цап Ю.Т., Степанов А.В., Зайцев В.В.).

Литература

1. Madjarska M.S. at al. Astron. Astrophys. 643, A19, (2020). https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038287
2. Mou Chauzhou et al. Astron. Astrophys. 619, A55 (2018). https://doi.org/10.1051/0004-6361/2018332432018
3. Kuperus, M., Raadu, M.A. Astron. Astrophys. 31, 189 (1974).

Уникальные данные о сверхтонкой структуре радиоизлучения солнечных всплесков

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

Новые радиоспектрографы с недостижимыми ранее разрешениями позволяют получить уникальные данные о сверхтонкой структуре солнечных радиовсплесков [1]. На Рис.1 показан фрагмент рис.4 из [1] с нескольким спектрами вокруг частоты 400 МГц. Спектральные данные были получены на новом китайском радиоспектрографе CBSm в обсерватории Chashan в диапазоне 90 – 600 МГц, Инструмент работает с 12 м параболоидом с высоким разрешением: по частоте 76.29 кГц, по времени 0.84 мс (и до 0.21 мс).

Действительно, на правых фрагментах спектров дрейфующие к низким частотам волокна состоят из изолированных всплесков округлой формы, и авторы присвоили им название «бисера или жемчужин».

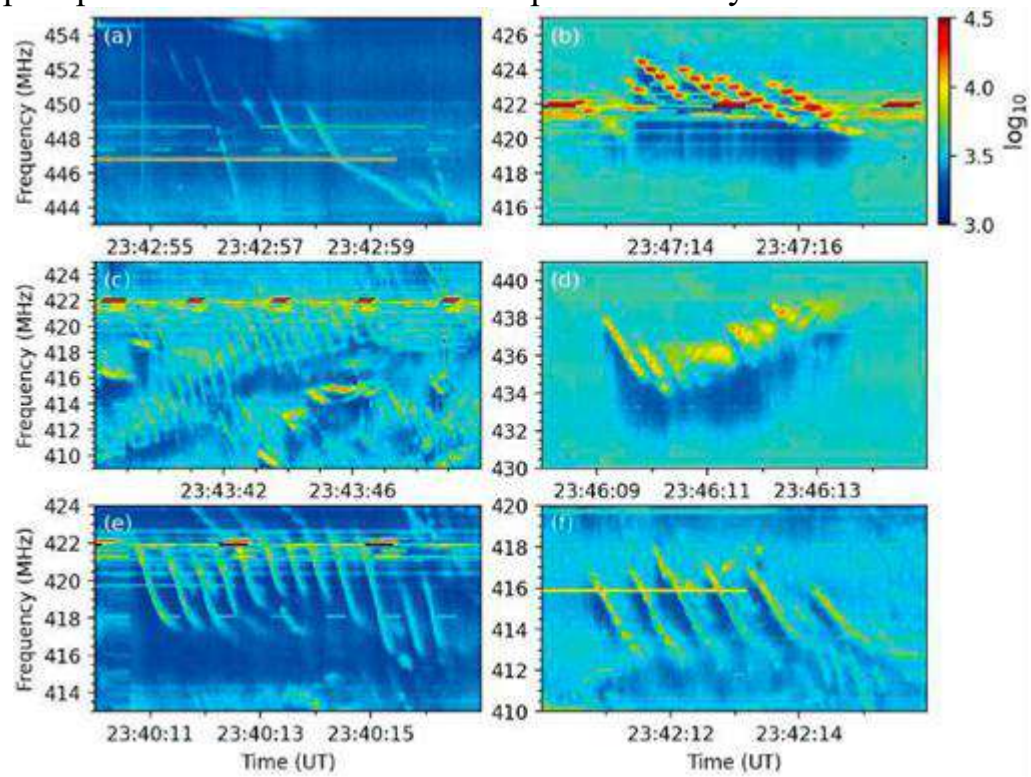


Рис. 1. Волокна, состоящие из мелких всплесков бисерной формы. (Фрагмент рис.4 из [1]).

Цель этого сообщения – показать, что в работе [2] мы обсуждали похожие структуры (Рис. 2) в 2008 г. на частотах выше 1 ГГц, и сравнить их интерпретацию. Там мы называли странные волокна малыми волокнами

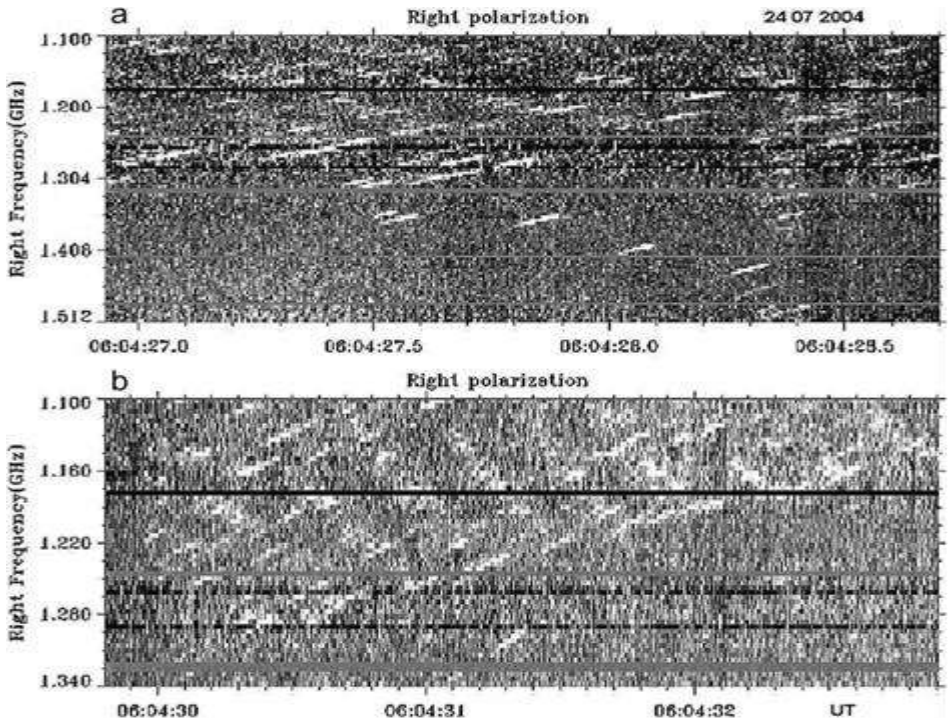


Рис.2 Спектр станции Huairou (явлнение 24 июля 2004 в диапазоне 1.100 – 1.340 GHz). Разрешение по частоте 5 МГц, по времени 1.25 мс. [2].

Основное различие спектров определяется разными разрешениями. На спектрах Хуайроу точечный всплеск (или капля) превращаются в полоску (волокно) в полосе частот 5 МГц. По времени искажение почти незаметное: разрешения сравнимые 1.25 мс и 0.84 мс. Вместо бисера мы видим small fibers. Поэтому спектры, обсуждаемые в [1] и [2] имеют идентичную структуру. Что касается интерпретации бисерной структуры авторы [1] используют возбуждение плазменных волн на верхней гибридной частоте в условиях двойного плазменного резонанса (ДПР). Однако давно известно, что механизм ДПР не работает в точечном источнике, о чем упоминалось в нашей статье [2]. Для объяснения миллисекундной длительности бисера авторы привлекают некую МГД волну, модулирующую концентрацию плазмы и магнитное поле в источнике. В работе [2] полагается, что одновременно с плазменными волнами возбуждаются вистлеры и именно волновые пакеты вистлеров, распространяющиеся с групповой скоростью, высвечивают даже на фоне слабых плазменных волн small fibers без привлечения неких МГД волн. Новые наблюдения показали, что это сверхтонкая структура типа бисера.

Литература

1. Chuanyang Li, Yao Chen, Bing Wang et al., A novel fine spectral structure of solar radio bursts with periodic beaded stripes observed by CBSm of CMP-II, Sci. China-Phys. Mech. Astron. 68, 109611 (2025), https://doi.org/10.1007
2. G.P. Chernov, Y. Yan, Q. Fu et al. Unusual Zebra Patterns in the Decimeter Wave Band, Solar Phys (2008) 250: 115–131. DOI 10.1007/s11207-008-9210-z

Статистические свойства субсекундных импульсов в солнечных вспышках по данным BATSE и NORP

Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е., Склярова Е.М.
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
taoastronomer@gmail.com

Субсекундная переменность жёсткого рентгеновского и микроволнового излучения содержит информацию о тонкой временной структуре ускорения и переноса электронов в солнечных вспышках. В работе исследованы распределения длительностей коротких импульсов в событиях SOL1995-10-13T05:01, SOL1999-08-25T01:35 и SOL2000-01-12T01:36 и проверено, изменяются ли их статистические свойства в зависимости от энергетического диапазона и фазы вспышки.

Использованы данные BATSE, а для двух событий — также наблюдения NoRP на частотах 3,75–35 ГГц. Импульсы выделялись методом многоканальной кросс-корреляции: после вычитания медленного тренда искалась согласованная структура как минимум в трёх каналах при максимальном коэффициенте корреляции не ниже 0,7. Длительность определялась как полная ширина на половине максимума (FWHM) сплайновой аппроксимации. Распределения сравнивались с пятью аналитическими моделями и ранжировались по информационному критерию Акаике. Межгрупповые различия проверялись критериями Колмогорова–Смирнова, Манна–Уитни и отношением правдоподобий с поправкой Бенджамини–Хохберга.

Выборки BATSE без разделения на фазы содержали 243, 309 и 407 импульсов, выборки NoRP — 72 и 71. Все распределения FWHM были асимметричными и имели протяжённый правый хвост. Две выборки BATSE и обе выборки NoRP лучше описывались логнормальным распределением, а выборка BATSE для SOL2000-01-12T01:36 — гамма-распределением.

Разделение данных BATSE на группы ниже и выше 70 кэВ не выявило систематического различия длительностей. В SOL1999-08-25T01:35 обнаружено лишь локальное модельно-зависимое различие, не подтверждённое непараметрическими тестами. Формальное сравнение предвспышечной и импульсной фаз было возможно только для SOL2000-01-12T01:36. В однородной 64-мс выборке значимого фазового различия не найдено. Отдельный модельный сигнал в жёсткой полосе также не получил непараметрического подтверждения.

Полученные FWHM могут отражать совместный вклад временного профиля ускорения и инжекции, переноса и магнитного удержания электронов, а также инструментальных и алгоритмических факторов.

Эволюция магнитных жгутов в активной области на Солнце во время вспышки

Шохин Т.Д., Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н.
ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
shohintima@mail.ru

Магнитные жгуты (magnetic flux ropes) являются характерным проявлением непотенциальной структуры магнитного поля активных областей Солнца с накоплением свободной магнитной энергии и спиральности. Они представляют собой сложную систему скрученных магнитных трубок с центральной осью, локализованных во внешнем магнитном поле. Поэтому устойчивость подобных магнитных жгутов определяется как внутренней структурой самого жгута, так и конфигурацией окружающего магнитного поля; существенное ослабление удерживающего поля с высотой создаёт условия для развития МГД неустойчивости. В случае идеальной МГД рассматриваются тороидальная и кинк–неустойчивости. Первая определяется быстротой спада внешнего поля, вторая – определяется спиральностью (закруткой) самого жгута. Для оценки ослабления удерживающего магнитного поля с высотой использован индекс спада (decay index) [1]:

$$\alpha = -\frac{d\ ln(B)}{d\ ln(h)}$$

где B — величина внешнего удерживающего поля, h — высота над фотосферой. Если $\alpha > \alpha_{crit}$, то “растягивающая” сила превышает удерживающую и жгут теряет равновесие. Однако отметим важный нюанс: само по себе значение ncrit не универсально. Оно сильно зависит от геометрии жгута: для очень тонкого и прямого жгута (его можно приблизить как линейный ток) $\alpha_{crit} \approx 1$. Для жгута, который образует почти замкнутое кольцо (тороидальная геометрия), $\alpha_{crit} \approx 1{,}5$. Для реальных, «толстых» жгутов с изменяющимся сечением диапазон смещается: примерно $1{,}1 - 1{,}3$ (если сечение растёт при эрупции) или $1{,}2 - 1{,}5$ (если сечение постоянно).

В работе исследуется эволюция магнитного жгута в активной области NOAA 11302 на примере вспышки X1.0 (SOL2011–09–25T04:51). Для различных моментов времени на стадии предвестника и самой вспышки построены трёхмерные модели коронального магнитного поля в приближении нелинейного бессилового поля (NLFFF). Уже на стадии предвестника структура магнитного поля представляет протяженный локализованный магнитный жгут и охватывающее по отношению к жгуту внешнее поле. Для выяснения устойчивости подобной структуры построены изоповерхности $\alpha = const$ и выполнено сопоставление их пространственного положения с конфигурацией магнитного жгута. Показано, что на стадии предвспышечных уярчений и вблизи пика вспышки в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом излучении значительная часть жгута

располагается выше изоповерхностей $\alpha = 0{,}5 - 0{,}7$ практически по всей его протяжённости. Это свидетельствует о быстром ослаблении удерживающего поля над жгутом и о приближении его к критическим значениям индекса спада, при которых возможно развитие тороидальной неустойчивости, приводящее к подъему жгута, развитию tether–cutting и, возможно, overbreak–неустойчивостей, и эруптивному процессу высвобождения свободной энергии.

Литература

1. Jiang C., Duan A., Feng X., Zou P., Zuo P., Wang Y. Reconstruction of a Highly Twisted Magnetic Flux Rope for an Inter-active-region X-Class Solar Flare. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 6, 63 (2019). DOI: 10.3389/fspas.2019.00063.

Секция 3.
Гелиосейсмология

Особенности возбуждения и динамики sloshing-колебаний, видимых в горячих корональных петлях

Завершинский Д.И.[1,2], Першин А.А.[1,2], Рящиков Д.С.[1,2], Мердеев Р.А.[1], Шевелев Р.В.[1,2], Сабанина А.Е.[1]

[1] *Самарский университет, Самара, Россия*

[2]*Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия*

zavershinskiy.di@ssau.ru

Медленные магнитоакустические (МА) волны активно наблюдаются в корональных петлях различной температуры. В «холодных» и «теплых» петлях медленные МА волны обычно наблюдаются как быстро затухающие периодические возмущения близ основания петель. В «горячих» корональных петлях, продольные возмущения сжатия, ассоциируемые с медленными МА волнами, часто наблюдаются в иной форме, которая получила название плещущихся, или sloshing-колебаний. Часто sloshing-колебания возбуждаются микровспышками M-, C- и даже B-класса, происходящими близ основания петель, и видны как компактное затухающее возмущение, которое перемещается и отражается от оснований петель на протяжении нескольких периодов.

В ходе данного исследования был собран каталог из более 60 уникальных наблюдений sloshing-колебаний, видимых в каналах 94 и 131 Å в активных областях солнечной короны в период с 2022 по 2026 год включительно. Для найденных наблюдений были построены пространственно-временные карты, характеризующие динамику интенсивности в различных каналах. Оцененные характерные периоды и времена затухания волн имеют сопоставимые масштабы с известными результатами. Кроме того, авторами была исследована пространственно-временная динамика возмущений плотности и температуры путем расчёта меры эмиссии и дифференциальной меры эмиссии. Предварительный анализ пространственно-временных карт показал, что часто в sloshing-колебаниях возмущения плотности и температуры находятся в противофазе, что говорит в пользу их мультигармоничной и вероятно многомодовой природы. Кроме того, в ряде случаев sloshing-колебания возбуждались одновременно с быстрозатухающим возмущением сжатия с синфазной динамикой температуры и плотности. Для применения собранных наблюдений для диагностики плазмы предложено использовать фитирование с помощью полных решений эволюционного уравнения.

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

Быстрые МГД волны в асимметричном солнечном магнитном слое

Лопин И.П.
УАФО ИПА РАН, г. Уссурийск, Россия
lopin78@mail.ru

Магнитные слои (magnetic slabs) традиционно используются в гелиофизике для моделирования различных структур в атмосфере Солнца, таких как аркады корональных петель, стримеры и элементы магнитной сетки. Классические модели рассматривают симметричные и однородные плоские волноводы с резкими границами. Однако реальная солнечная плазма обладает выраженной пространственной неоднородностью и асимметрией. В данной работе изучаются свойства быстрых магнитогидродинамических (МГД) волн в модели неоднородного корональный магнитного слоя с непрерывным профилем плотности и учетом как внутренней, так и внешней асимметрии.

Исследование проводится в рамках линейной идеальной МГД для холодной плазмы. Направленное вдоль оси волновода магнитное поле предполагается однородным. Плотность плазмы непрерывно меняется в поперечном направлении. Границы волновода моделируются с помощью гладкого биэкспоненциального асимметричного поперечного профиля фоновой плотности. В модели учитываются два типа асимметрии:

1. **Внутренняя асимметрия:** различие в распределение плотности относительно геометрического центра слоя.
2. **Внешняя асимметрия:** различие плотности окружающей среды с двух разных сторон от магнитного волновода.

На основе решения волнового уравнения, получено соответствующее дисперсионное уравнение для быстрых магнитоакустических волн.

В отличие от строго симметричных волноводов, где моды разделяются на изгибные (kink) и радиальный (sausage), в асимметричном слое волновые моды приобретают гибридный, смешанный характер. Обнаружено, что внутренняя и внешняя асимметрии не оказывают значительного влияния на дисперсионные свойства быстрых мод, за исключением основной изгибной моды (principal kink mode). Однако асимметрия кардинально меняет пространственную структуру возмущений. Изгибная мода вызывает не только поперечное смещение волновода, но и деформацию его сечения. В свою очередь, радиальная мода приводит как к несимметричному сжатию и расширению границ слоя так и его поперечному смещению. Кроме того, в данном контексте эффект внутренней асимметрии выражен гораздо сильнее, чем эффект асимметрии внешней среды. Данные гибридные свойства волн позволяют предположить, что как глобальная изгибная, так и глобальная радиальная моды могут быть детектированы по колебаниям, как интенсивности, так и доплеровского смещения. Обсуждается применение полученных результатов к интерпретации наблюдаемых осцилляций в корональных магнитных структурах.

Секция 4.
Солнечный ветер и космическая погода

Методика мониторинга космической погоды в реальном времени с помощью системы наземных мюонных и нейтронных детекторов

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

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
vvborog@mephi.ru

В НОЦ НЕВОД МИФИ созданы и работают в непрерывном режиме широкоапертурные мюонные годоскопы (4 модуля УРАГАН) и нейтронные детекторы (4 модуля НЕЙТРОН). Часовая статистическая точность отдельных детекторов составляет от долей до нескольких процентов. Мощная солнечная активность в виде корональных выбросов массы (КВМ), при распространении в сторону Земли в межпланетном пространстве (МКВМ), приводит к возмущениям в потоке космических лучей, проникающих через его область замагниченной плазмы. В отдельных наземных детекторах возникают синхронные вариации, амплитуда которых мала и скрыта в пределах статистической точности измерений потока при отдаленном положении МКВМ. Приближение МКВМ к Земле приводит к хорошо известным и наблюдаемым форбуш-эффектам.

Применение методики фликкер-шумовой спектроскопии [1] к временным рядам потока частиц в мюонных и нейтронных детекторах позволяет заблаговременно получить время возмущений в гелиосфере от распространения МКВМ. Возникающие предикторы наблюдаются рекуррентно в течение нескольких суток до приближения МКВМ к орбите Земли, что повышает достоверность прогноза.

Приводится пример анализа мощного КВМ в январе 2026 г, который вызвал сильное возмущение магнитного поля Земли (индекс Dst = -235 нТ) 20 января.

Литература

1. Тимашев С.Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия: информация в хаотических сигналах. М.: Физмат-лит, 2007. 248 с.

Нейтронные сцинтилляционные детекторы как инструмент мониторинга вариаций космических лучей

Волков Е.П., Громушкин Д.М., Протасова М.А., Хохлов С.С., Хомчук Е.П., Шульженко И.А.
Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия
Eugenvolk00@gmail.com

В Экспериментальном комплексе НЕВОД НИЯУ МИФИ работает несколько установок со сцинтилляционными детекторами тепловых нейтронов: ПРИЗМА-36, УРАН и «Нейтрон». Изначально установки ПРИЗМА и УРАН создавались для исследования нейтронной компоненты широких атмосферных ливней, однако после их модернизации они одновременно и с точной (10 нс) временной синхронизацией формируют непрерывные временные ряды вариаций нейтронного потока.

ПРИЗМА-36 [1] включает 36 детекторов с сцинтиллятором $ZnS(Ag)+^{6}LiF$, суммарная эффективная площадь регистрации составляет около 13 м^2; над установкой расположен железобетонный поглотитель (крыша здания). УРАН состоит из 72 аналогичных по конструкции детекторов со сцинтиллятором $ZnS(Ag)+B_2O_3$, размещённых на крышах зданий; эффективная площадь — около 26 м^2, поглотитель отсутствует [2]. Установка «Нейтрон» содержит 4 нейтронных детектора подобного типа, эффективной площадью 0.75 м^2 каждый, расположенных под разной толщиной поглотителя, что дает возможность исследовать один и тот же гелиофизический процесс в различных условиях.

В докладе продемонстрированы возможности применения подобных нейтронных детекторов как нейтронного монитора нового типа и сопоставление их откликов с Московским нейтронным монитором ИЗМИРАН (MOSC) [3].

Данные нейтронных детекторов ЭК НЕВОД, поправленные на атмосферное давление, сравниваются с Московским нейтронным монитором. После приведения рядов к относительным вариациям и общей временной сетке оценивались коэффициенты корреляции и статистическая погрешность.

Показательным примером является GLE 77 11 ноября 2025 г. Рост темпа счёта ПРИЗМА-36 и УРАН начался около 10:15 UT [4], одновременно с откликом мировой сети нейтронных мониторов [5]. Приведены сравнения полученных характеристик данного события при регистрации на данных детекторах. Характеристики форбуш-понижений, зарегистрированных за время работы нейтронных установок ЭК НЕВОД также согласуются с MOSC.

Эти результаты подтверждают, что чувствительность нейтронных детекторов ЭК НЕВОД достаточна для регистрации вариаций космических лучей на уровне традиционного нейтронного монитора. Преимуществами сцинтилляционных нейтронных детекторов являются модульность,

возможность простого масштабирования установок, отсутствие газонаполненных счётчиков и массивного свинцового генератора, и параллельное изучение локальных, атмосферных и ливневых нейтронов. Совместная работа установок и регистрация потока нейтронов под различными поглотителями (разными перекрытиями) обеспечивает чувствительность к спектральным изменениям. Таким образом, представленный тип сцинтилляционных нейтронных детекторов представляют собой перспективный распределённый нейтронный монитор, дополняющий стандарт NM64 и пригодный для задач космической погоды.

Литература

1. Amelchakov M.B. et al. The PRISMA-36 array for studying variations of the thermal neutron flux // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2025. Vol. 1076. 170547.

2. Gromushkin D., Bogdanov F., Khokhlov S. et al. The URAN array of the experimental complex NEVOD // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. Vol. 798. 012103.

3. NMDB. Moscow, Russia (MOSC): характеристики станции и данные. URL: https://www.nmdb.eu/station/mosc/ (дата обращения: 21.08.2026).

4. Volkov E. et al. The Observation of Ground-level Enhancement GLE 77 by the Neutron Detectors of the Experimental Complex NEVOD // Astrophys. J. 2026. Vol. 921, no. 2. 147.

5. Mishev A. et al. Ground level enhancement GLE #77 on 11 November 2025: a data summary // Adv. Space Res. 2026.

Геоэффективный параметр электромагнитной добротности замагниченного потока солнечного ветра

Губченко В.М.
ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия
ua3thw@ipfran.ru

Геоэффективные безразмерные параметры (ГП) зависят от скорости потока горячей бесстолкновительной плазмы солнечного ветра, формирующего на основе эффекта Вавилова-Черенкова (ЭВЧ) электромагнитную (э.м.) «макро структуру» 3D магнитосферу (МГ) как «волновой пакет». Структура МГ обусловлена 3D вихревыми токовыми системами (ТС) из э.м. поляризационных и омических токов электронов. Эти же ГП вводятся для разлета лазерной плазмы от мишеней, когда формируются «микро» МГ. Через ГП, посредством импеданса Z МГ, выражаются интегральные характеристики мощности диссипативного э.м. взаимодействия P и запасенной э.м. энергии W. Предполагается, следуя Чепмену-Акасафу-Данжи, возможность установления стационарного 3D состояния МГ при постоянных значениях ГП. К нестационарности МГ приводит внешнее изменение ГП во времени - адиабатическое или неадиабатическое, или внутренняя нестационарность - «неустойчивость» на основе сформированного потоком 3D стационарного состояния МГ. Основное ЭВЧ взаимодействия стороннего магнитного момента с электронной компонентой потока это возбуждение э.м. неволновой индукционный моды, описываемой кинетически, полностью определяющей пакет в отсутствии внешнего магнитного (ВМ) поля одним неволновым ГП – электромагнитной добротностью G_V, независимым от волновых ГП из МГД. ВМ поле приводит к введению обыкновенных и необыкновенных мод, что меняет «пакет» МГ: изменяется исходная кинетическая индукционная мода и ее неволновой ГП. Отдельно возникает ЭВЧ возбуждение волновых МГД мод (А, БМЗ, ММЗ) и волновые МГД ГП для описания части пакета МГ. ГП - линейные выражения параметров внешнего потока, не зависят от возбуждаемых ЭВЧ полей МГ, поэтому возможно аналитически введение ГП, верификация введенных ГП и измерения их датчиками. Определение волновых ГП шло исторически из МГД с ВМ полем, а кинетическое шло логически, введением неволнового ГП через форму функции распределения электронов потока. Представлена оценка неволнового ГП электромагнитной добротности при учете ВМ поля.

Литература

Gubchenko V. M. Geomagnetism and Aeronomy, 2020, Vol. 60, No. 7, pp. 896–903. DOI: 10.1134/S0016793220070129

Границы спокойных, слабо возмущенных и сильно возмущенных условий в солнечном ветре и ионосфере

Гуляева Т.Л.
ИЗМИРАН, Москва, Россия
gulyaeva@izmiran.ru

Границы спокойных, слабо возмущенных и сильно возмущенных условий в солнечном ветре и ионосфере определим по следующим критериям. За основу пограничных значений примем общепринятый уровень спокойного состояния среды при геомагнитном индексе kp < 3 (Hpo <3), уровень слабой возмущенности при 3 ≤ kp < 5 (3 ≤ Hpo < 5), и сильное возмущение при kp ≥ 5 (Hpo ≥ 5) [1, 2]. Последнее условие соответствует критериям NOAA, которые разделяют сильно возмущенные условия на бури – от слабых до экстремальных геомагнитных бурь (G1, G2, G3, G4, G5). Для примера в Таблице приведены пороговые значения границ спокойных условий (Q), слабо возмущенных условий (D) и бурь по критериям NOAA. Мы определили границы при сопоставлении выбранных индексов с Hpo индексом по профилям каждого индекса за 90 выбранных дней с минимальным за месяц значением Dst с 2019 по 2026гг.

Уровень в каждой колонке Таблицы указывает наименьшее пороговое значение для данного состояния среды, верхний предел ограничен значением в следующей колонке. Значения Hpo и kp индекса соответствуют критериям, указанным выше. Значения Apo и ap индекса соответствуют по определению исходным значениям Hpo и kp [1, 2]. Полученные пороговые значения Dst, соответствующие значениям Hpo и kp, могут отличаться от принятых по другим источникам данных. Например, полученные здесь границы слабо возмущенных условий D (–40.0 ≥ Dst > –62.8 нТ) и слабой геомагнитной бури G1 (–62.8 ≥ Dst > –83.0 нТ) отличаются от принятых границ спокойных условий (Dst > –30 нТ), малой геомагнитной бури (–30 ≥ Dst > –50 нТ), умеренной бури (–50 ≥ Dst > –100 нТ) и сильной бури (Dst ≤ –100 нТ) [3–5].

Подобным образом исследованы значения скорости солнечного ветра Vsw, межпланетного электрического поля Em, ионосферных глобальных индексов Wp. WU, WL, WE. Полученные результаты обсуждаются в докладе.

Уровень	Q	D	G1	G2	G3	G4	G5
Hpo, kp	0	3	5	6	7	8	9
Apo, ap, nT	0	15	48	80	132	207	400
Dst, nT	8.9	–40.0	–62.8	–83.0	–121.3	–212.6	–354.5

Литература

1. Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O. and Morschhauser, A. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. Space Weather, 2021. https://doi.org/10.1029/2020SW002641.

2. Yamazaki, Y., Matzka, J., Stolle, C., Kervalishvili, G., et al. Geomagnetic activity index Hpo. Geophys. Res. Lett. 2022. 49. https://doi.org/10.1029/2022GL098860.
3. Ермолаев, Ю.И., Лодкина, И.Г., Николаева, Н.С., Ермолаев, М.Ю. Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. Космич. Исслед., 2010, 48, №6, 499-515.
4. Gonzales, W.D., Tsurutani, B.T. Clúa de Gonzales, A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. Space Science Reviews 88: 529–562, 1999. https://doi.org/10.1023/A:1005160129098
5. Gulyaeva, T.L., F. Arikan, I. Stanislawska. Probability of occurrence of planetary ionosphere storms associated with the magnetosphere disturbance storm time events. Advances in Radio Sci., 12, 261-266, 2014. https://doi.org/10.5194/ars-12-261-2014.

Влияние солнечной активности на потоки ГКЛ в первой половине 2026 года по данным установок Экспериментального комплекса НЕВОД

Евстафьева Д.Д., Волков Е.П., Громушкин Д.М., Дмитриева А.Н., Компаниец К.Г., Мишутина Ю.Н., Шутенко В.В., Яшин И.И.
НИЯУ МИФИ, Москва, Россия
DDEvstafeva@mephi.ru

На территории НИЯУ МИФИ, г. Москва расположен уникальный Экспериментальный комплекс НЕВОД (ЭК НЕВОД). В его состав, помимо иных детекторов, входят несколько нейтронных установок и мюонных годоскопов, данные которых используются для исследований вариаций вторичных космически лучей на поверхности Земли. К этим установкам относятся ПРИЗМА [2] и «Нейтрон» [1], УРАГАН [1] и сцинтилляционный мюонный годоскоп (СцМГ) [1]. Детекторы ЭК НЕВОД позволяют изучать влияние солнечной активности на поток и анизотропию галактических космических лучей, например, при исследовании Форбуш-понижений. Возможности ЭК НЕВОД по изучению космической погоды с помощью различных компонент космического излучения и для различных энергетических диапазонов продемонстрированы при изучении вариаций, которые зарегистрированы в первой половине 2026 года.

Литература

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

Соотношение температур альфа частиц и протонов в солнечном ветре в предположении квазинейтральности плазмы

Кислов Р.А. [1*], Евдокимова М.А. [2], Хабарова О.В. [1], Малова Х.В. [2,3]
[1] *ИЗМИРАН, Россия, Москва, Троицк*
[2] *ИКИ РАН, Россия, Москва*
[3] *НИИЯФ МГУ, Россия, Москва*
[*] *kr-rk@bk.ru*

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

Сравнение наблюдаемых и теоретически рассчитанных амплитуд Форбуш-понижений для событий, связанных с приходом ударной волны

Кобелев П.Г., Зиракашвили В.Н., Оленева В.А., Янке В.Г.
ИЗМИРАН, Троицк, Москва
kobelev@izmiran.ru

В работе проводится проверка теоретической модели [1] поведения космических лучей на фронте ударной волны по экспериментальным данным сети станций нейтронных мониторов. Согласно этой модели, разница интенсивности до и после ударной волны определяется как

$$N_1 - N_2 = \frac{2\mu_0^3}{1-\mu_0^2}\frac{j_1}{v\cos\psi_1}, j_1 = -\frac{Vp}{3}\frac{\partial N}{\partial p}, \quad (1)$$

где V – скорость ударной волны, v – скорость частиц КЛ, ψ_1 – угол между нормалью к фронту и магнитным полем перед фронтом, μ_0 – критическое значение косинуса питч-угла, соответствующее магнитному отражению [2] и определяемому отношением магнитных полей за и перед фронтом B_2 и B_1, как μ_0^2=1-B_1/B_2. В уравнении (1) спектр галактических космических лучей является степенным по импульсам $N(p)\sim p^{-(\gamma+2)}$, где γ=2.5 – показатель энергетического спектра частиц.

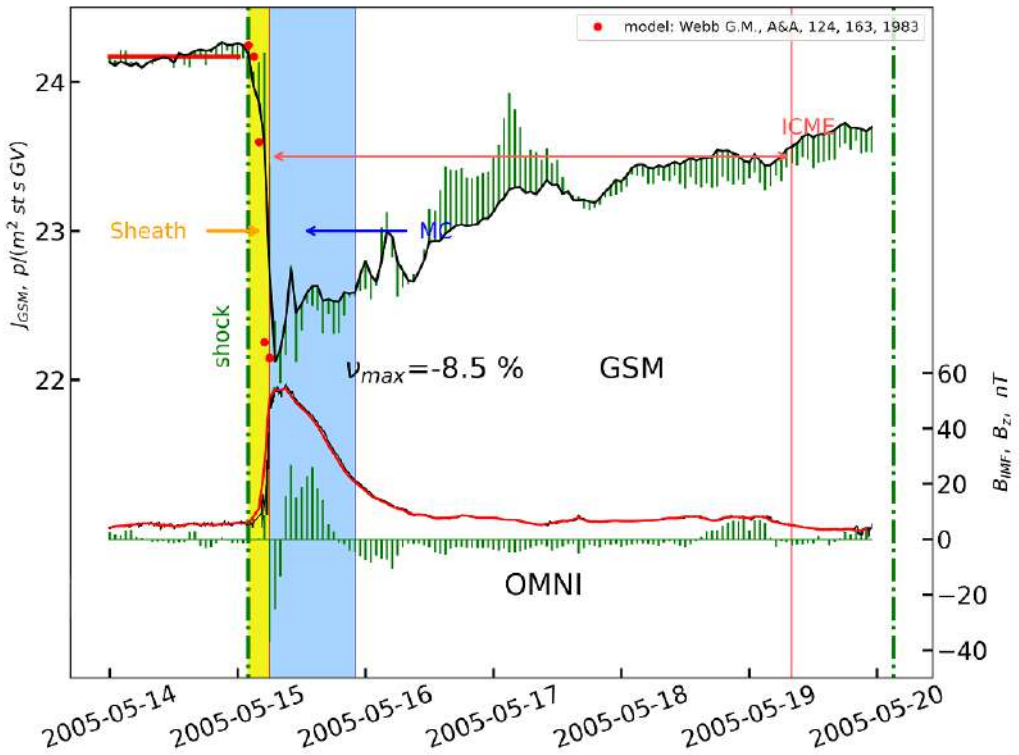


Рис. 1 Форбуш-понижение 15 мая 2005 г.

Рассмотрены группы событий в течение трех последних циклов солнечной активности (2000-2006, 2011-2015, 2023-2026 гг.) Всего

рассмотрено 24 Форбуш-понижения; критерием отбора являлась зарегистрированная амплитуда Форбуш-понижения более 5%. Имеется хорошее согласие полученных результатов с наблюдениями для большей части форбуш-понижений из данной выборки. На рис.1 приведено событие 15 мая 2005, а на рис.2 – 10 мая 2024 г. Желтым цветом выделен переходный слой после ударной волны, ICME, синим – магнитное облако (во втором случае оно не было определено). В верхней части рисунка (левая шкала) черной кривой показана изотропная составляющая потока космических лучей за пределами магнитосферы, полученная методом GSM. На нижней части рисунка (правая шкала) приведена временная зависимость ММП (часовые и минутные данные) и его z-компонента. Ожидаемое согласно модели (1) понижение показано красными точками (левая шкала).

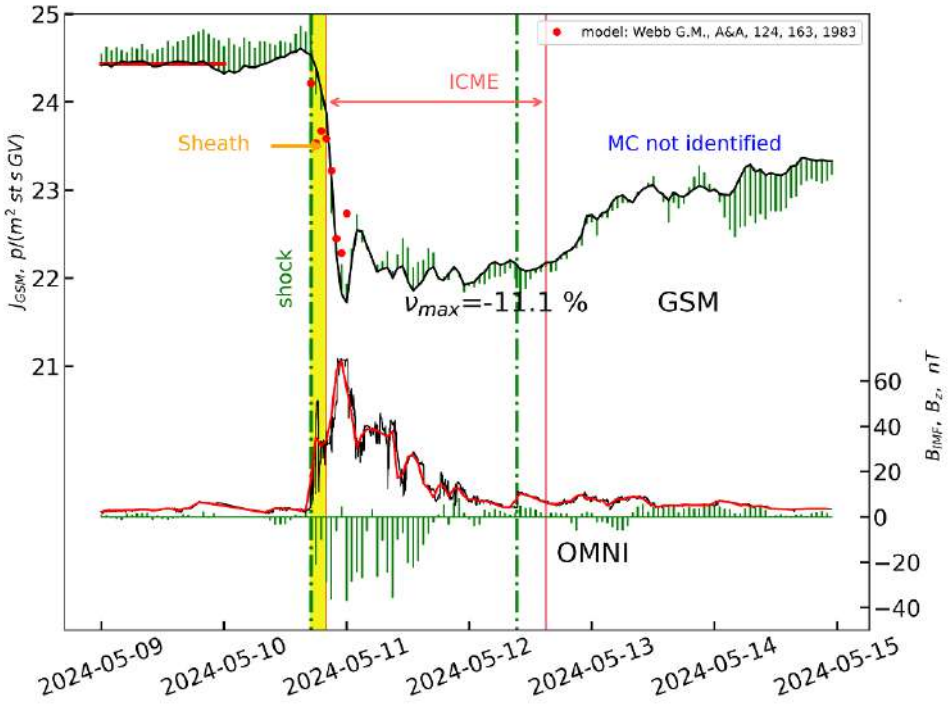


Рис 2. Форбуш-понижение 10 мая 2024 г.

Полученные результаты демонстрируют, что рассматриваемая модель эффективна для исследования переноса галактических космических лучей в межпланетном пространстве и, следовательно, может иметь применение для исследований космической погоды.

Работа проводится в рамках УНУ «Российская национальная наземная сеть станций КЛ (Сеть СКЛ)» [https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536].

Литература

1. G.M.Webb, Astron. Astrophys. 124, 163 (1983).
2. Е.Н.Паркер, Динамические процессы в межпланетном пространстве, Мир 1963.

Параметризация локального межзвездного спектра ядер галактических космических лучей с использованием модели модуляции ЧЖУ

Коробков А.О., Юлбарисов Р.Ф., Сирук С.А., Майоров А.Г.
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
andrey.korobkov04@yandex.ru

Наблюдаемый в окрестности Земли спектр галактических космических лучей (ГКЛ) существенно отличается от локального межзвёздного спектра (ЛМС) вследствие солнечной модуляции – совокупности процессов, изменяющих интенсивность и форму спектра при распространении частиц в гелиосфере [1]. Точное знание ЛМС необходимо для понимания механизмов ускорения в остатках сверхновых и распространения ГКЛ в Галактике, а знание спектра ГКЛ у Земли – представляет интерес для решения задач космической погоды. В работе выполнена параметризация ЛМС для ядер водорода и гелия на основе данных современных экспериментов.

Аналитическая форма ЛМС выбрана на основе работы Биссхоффа и Потгитера [2] с добавлением высокоэнергетического излома по данным коллаборации AMS [3]. Для описания солнечной модуляции применялась эмпирическая модификация Чжу [4] приближения силового поля (FFA) [1], в которой модуляционный потенциал зависит от энергии частицы и описывается функцией с тремя параметрами: потенциал для низких энергий, потенциал для высоких энергий и энергия перехода.

Для построения ЛМС использованы данные прямых измерений за гелиопаузой (Voyager 1, Voyager 2), прецизионные спектры с орбиты Земли (AMS-02, PAMELA, DAMPE, CALET), а также данные баллонных экспериментов (CREAM, ATIC).

Совместная аппроксимация немодулированных и модулированных спектров позволила определить параметры ЛМС и модуляции, описывающие спектры в диапазоне от нескольких МэВ/нуклон до 1 ТэВ (водород) и до 5 ТэВ/нуклон (гелий).

Используемая модель показала значительно лучшее качество аппроксимации по сравнению с классическим приближением силового поля. В настоящее время проводится анализ данных по углероду, кислороду и железу с целью расширения параметризации на более тяжёлые ядра; планируется также использовать месячные временные ряды AMS-02 и PAMELA для проверки плавности изменения модуляционных параметров во времени.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-22-00508 «Исследование зарядовой зависимости солнечной модуляции галактических космических лучей».

Литература

1. Gleeson L.J., Axford W.I. Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays // The Astrophysical Journal. – 1968. – Vol. 154. – P. 1011–1026.
2. Bisschoff D., Potgieter M.S. New local interstellar spectra for protons, helium and carbon derived from PAMELA and Voyager 1 observations // Astrophysics and Space Science. – 2016. – Vol. 361, No. 48.
3. Aguilar M. et al. (AMS Collaboration). Precision measurement of the proton flux in primary cosmic rays from rigidity 1 GV to 1.8 TV // Phys. Rev. Lett. – 2015. – Vol. 114. – P. 171103.
4. Zhu C.-R. New local interstellar spectra of galactic cosmic rays with an energy-dependent solar modulation // The Astrophysical Journal. – 2024. – Vol. 975, No. 270.

О детальной информации эксперимента регулярного баллонного мониторинга космических лучей

Крайнев М.Б. [1], **Гвоздевский Б.Б.** [2]
[1] *Физический институт РАН, Москва, Россия*
[2] *Полярный геофизический институт РАН, Апатиты, Россия*
Mkrainev46@ mail.ru

В рамках эксперимента по регулярному баллонному мониторингу (РБМ) космических лучей в земной атмосфере, проводимого ФИАН с 1957 г. по настоящее время, параллельно с регистрацией стандартной информации (усреднённые за минуту скорости счёта детекторов КЛ, а также моменты отметок давления) последние 30 лет в г. Долгопрудный и 20 лет в г. Апатиты регистрируется т. н. детальная информация (ДИ). Под ДИ РБМ понимается зарегистрированная форма каждого (i-го) принятого импульса (т. е. значения напряжённости U_i^j, в j-ый момент времени $t^j = t^{j-1} + \Delta t$ с малым шагом оцифровки по времени Δt = 25 мкс) [1-4]. Кроме того, при приёме ДИ РБМ на экране ПК визуализируется ход зондирования, а после окончания приёма формируется набор полезных файлов со служебной информацией, а также производных от ДИ РБМ, которые затем анализируются при текущей обработке ДИ [5].

Доклад будет посвящён обзору структуры накопленной базы данных ДИ РБМ и программного обеспечения, используемого при приёме ДИ и её текущей обработке. Также будут приведены основные результаты текущей обработки и рассмотрены перспективы анализа ДИ РБМ.

Литература

1. Корольков Д.Н., Модификация приёма информации в эксперименте частого стратосферного зондирования космических лучей, Дипломная работа, МИФИ, 34с., 1996
2. Корольков Д.Н., Карпец А.М., Кибардин В.М., Крайнев М.Б. Детальная информация в эксперименте частого стратосферного зондирования космических лучей. Изв. РАН, сер. физ., т. 63(10), 2089-2093, 1999
3. Krainev M.B. Some additional results in the regular balloon monitoring of cosmic rays in the Earth's atmosphere. Adv. Space Res., 2009, v. 44(10), 1138-1143, 2009
4. Крайнев М.Б., Гвоздевский Б.Б. Детальная информация в эксперименте регулярного баллонного мониторинга космических лучей в 2005–2010 гг. Препринт ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН № 16. М., 52 с., 2010
5. Гвоздевский Б.Г., Программа RBM-DI (Regular Balloon Monitoring – Detailed Information), Расширенное руководство оператора, версия 100924, 2010

Трёхмерная гибридная модель приполярной лунной аномалии с реалистичной конфигурацией магнитного поля

Матросова Д.Б.[1], Кропотина Ю.А.[1]
[1]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Российская Федерация*
DoraSailor@yandex.ru

Введение. Прогнозирование влияния космической погоды важно для безопасности будущих лунных миссий, поскольку из-за отсутствия у Луны глобального магнитного поля, ее поверхность подвергается прямой бомбардировке солнечным ветром. При этом на спутнике наблюдаются локальные остаточные намагниченности лунных пород, которые создают так называемые лунные магнитные аномалии (ЛМА). За счет защищённости поверхности от космического излучения аномалии могут быть потенциальными кандидатами для расположения будущей лунной инфраструктуры – от научных лабораторий до обитаемых модулей.

В кратерах полярных областей Луны присутствует водяной лёд, при этом льда около северного полюса меньше, чем около южного [1]. Ключевым отличием между двумя приполярными областями является скопление ЛМА в южной области. Таким образом, магнитные аномалии в районе южного полюса могут играть роль дополнительной защиты от солнечного ветра, благодаря чему водяной лёд в этих областях сохраняется эффективнее, чем в северной приполярной области [2].

Целью данной работы является проверка гипотезы о том, что магнитная аномалия способна защитить от обдувания солнечным ветром поверхность Луны (в частности, лед) в южной приполярной области, а также составление карты наиболее защищенных участков поверхности.

Моделирование. Для моделирования был использован гибридный код «Maximus» [3], самосогласованно рассчитывающий динамику заряженных частиц в электромагнитных полях. Особенность гибридного кода заключается в том, что ионы описываются кинетически, а электроны – как безмассовая нейтрализующая жидкость. Реалистичная конфигурация ЛМА была воспроизведена с использованием измеренной спутниками Kaguya и Lunar Prospector структуры магнитных полей Луны [4].

Угол наклона потока солнечного ветра к поверхности Луны выбран равным углу наклона оси вращения Луны к нормали эклиптики (1.5°). Однако, в плоскости поверхности Луны солнечный ветер может натекать на аномалию практически с любого направления. Поэтому было проведено две серии расчетов. Внутри каждой серии параметры системы отличались лишь направлением натекания солнечного ветра на ЛМА в плоскости поверхности луны. Для первой серии расчетов были выбраны относительно низкие значения скорости солнечного ветра V_{sw} = 300 км/с и амплитуды межпланетного магнитного поля B_{sw} = 3.85 нТ, а для второй – более высокие

V_{sw} = 623 км/с и B_{sw} = 8 нТ. Во всех расчетах задавались температура ионов составляла T_i = 2.43 эВ, а электронов - T_e = 9.7 эВ.

Результаты. Были построены усреднённые карты наиболее защищенных участков лунной поверхности на рис. 1. Усреднение проводилось по времени в пределах каждого расчета, а затем по всем направлениям внутри серии. Можно видеть, что поток в области ЛМА спадает более чем вдвое, при этом расположение залежей водяного льда хорошо согласуется с наиболее защищенными областями поверхности.

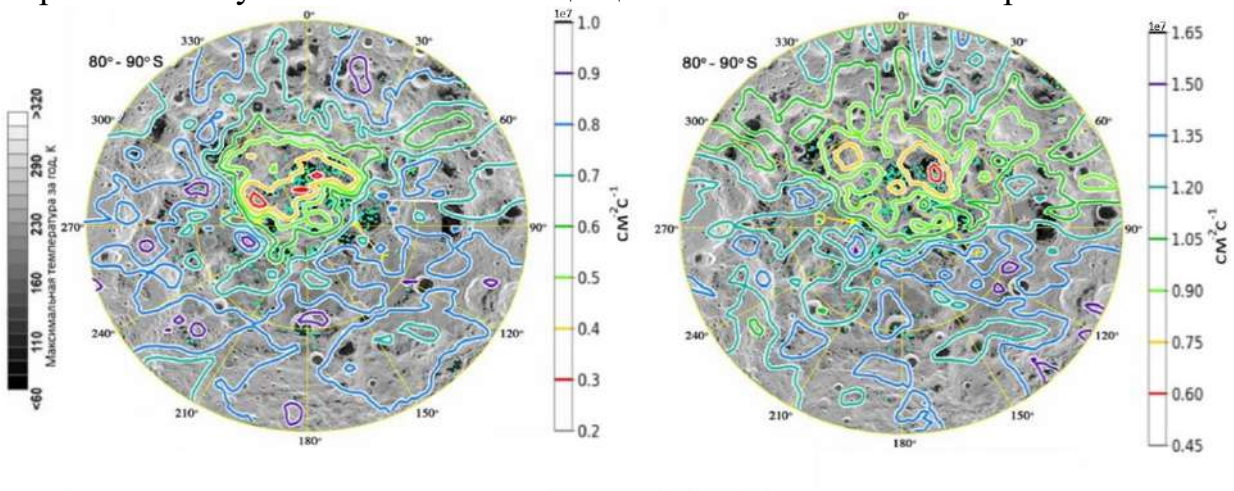


Рис.1. Контурные карты потока солнечного ветра на поверхность Луны (справа серия 1, слева серия 2), наложенные на распределение пикселей, содержащих водяной лед (голубые точки) и на карту прогнозируемой годовой максимальной температуры для южных полярных областей из работы [1]

Заключение. Приполярные ЛМА способны эффективно защищать поверхность Луны от потока солнечного ветра, который вблизи полюсов Луны направлен почти тангенциально к поверхности. Смоделированные области пониженной плотности потока, усреднённые по исследуемым направлениям натекания солнечного ветра, хорошо совпадают с залежами льда в области около Южного полюса Луны.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 25-72-20007.

Литература

1. Li S., Lucey P. G., Milliken, R. E., et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. PNAS. – 2018. – Vol. 115. – P. 8907–8912.
2. Hood, L. L., Bryant, I., van der Leeuw J. Lunar magnetic anomalies and polar ice. // Geophysical Research Letters – 2022. – Vol. 49. – I. 22.
3. Kropotina J., Bykov A., Krassilchtchikov A., et al. Maximus: A Hybrid Particle-in-Cell Code for Microscopic Modeling of Collisionless Plasmas // Communications in Computer and Information Science. – 2019 – №965. – P. 242–253.
4. Tsunakawa H., Takahashi F., Shimizu H., et al. Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar Prospector observations // J. Geophys. Res. (Planets) – 2015. – Vol. 120. – P.1160 – 1185.

Определение энергии атмосферного обрезания космических лучей в контексте мониторинга проявлений солнечной активности

Сирук С.А.[1], Алексеев В.В.[2], Майоров А.Г.[1]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*
[2]*Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия*
SASirukl@mephi.ru

Нейтронные мониторы являются одним из основных наземных инструментов для регистрации вариаций потока космических лучей (КЛ). Их темп счета определяется не только интенсивностью первичных частиц в межпланетном пространстве, но и геомагнитным обрезанием, атмосферным поглощением, конструкцией детектора и условиями проведения измерений.

В окрестности Земли часть КЛ отклоняется от планеты геомагнитным полем. Это экранирование характеризуется жёсткостью геомагнитного обрезания Rc, которая максимальна в экваториальной области и пренебрежимо мала вблизи магнитных полюсов [1]. При проведении широтного обзора детектор перемещается между областями с различными значениями Rc. В низких широтах магнитное поле Земли отсекает значительную часть первичных частиц, тогда как при движении к полюсу Rc уменьшается, в результате чего темп счёта нейтронного монитора возрастает. Однако при достаточно малых Rc дальнейшее уменьшение геомагнитного порога не приводит к увеличению темпа счёта. На графике широтной кривой соответствующий участок выглядит как плато.

Началу этого плато соответствует так называемая энергия атмосферного обрезания Eatm. Эту величину можно определить как минимальную энергию первичной частицы КЛ, необходимую для образования в атмосфере вторичных частиц, регистрируемых на поверхности с ненулевой, практически значимой вероятностью [2, 3]. Последнее подразумевает, что значение Eatm определяется возможностью различить вклад низкоэнергетических частиц на фоне статистической и инструментальной погрешности измерений в конкретном эксперименте. Помимо этого, Eatm падает с уменьшением толщины атмосферы над прибором, т.е. с ростом высоты над уровнем моря.

Детекторы, расположенные в приполярных регионах земли и на большой высоте над уровнем моря оказываются наиболее чувствительны как к проявлениям солнечной модуляции галактических КЛ [4], так и всплескам потока солнечных КЛ [5]. Чтобы количественно охарактеризовать эту чувствительность и определить районы, перспективные с точки зрения установки новых обсерваторий КЛ, необходимо иметь карты значений Rc и Eatm.

Работа посвящена экспериментальной оценке энергии атмосферного обрезания по данным широтных обзоров на кораблях и теоретическому расчету этой величины при других условиях проведения эксперимента.

Основываясь на результатах, представленных работах [6, 7], определены экспериментальные значения Eatm, а также статистической и инструментальной погрешностей темпа счета нейтронных мониторов. Эти значения использованы для вычисления значения коэффициента, отвечающего за неразличимость вклада низкоэнергетических частиц в методике из работ [2, 3]. Затем откалиброванная методика была использована для расчета высотных профилей энергии атмосферного обрезания при разном времени набора статистики и разной инструментальной погрешности в эксперименте. В дальнейшем планируется провести сравнение расчетных значений с результатами, полученными в широтных обзорах, проводившихся на разных высотах на борту самолетов.

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

Литература

1. Kruchinin P. A. et al. Geomagnetic cutoff rigidity in neutron monitor locations //Solar-Terrestrial Physics. – 2025. – Т. 11. – №. 2. – С. 119-124.
2. Mishev A., Poluianov S. About the altitude profile of the atmospheric cut-off of cosmic rays: new revised assessment //Solar Physics. – 2021. – Т. 296. – №. 8. – С. 129.
3. Poluianov S., Batalla O. Cosmic-ray atmospheric cutoff energies of polar neutron monitors //Advances in Space Research. – 2022. – Т. 70. – №. 9. – С. 2610-2617.
4. Siruk S. A., Mayorov A. G., Yulbarisov R. F. Neutron Monitor Effective Energies Based on AMS-02 Data //Geomagnetism and Aeronomy. – 2025. – Т. 65. – №. 9. – С. 1328-1334.
5. Poluianov S. V. et al. GLE and sub-GLE redefinition in the light of high-altitude polar neutron monitors //Solar Physics. – 2017. – Т. 292. – №. 11. – С. 176.
6. Carmichael H., Bercovitch M. V. Analysis of IQSY cosmic-ray survey measurements //Canadian Journal of Physics. – 1969. – Т. 47. – №. 19. – С. 2073-2093.
7. Villoresi G. et al. Cosmic ray survey to Antarctica and coupling functions for neutron component near solar minimum (1996–1997): 1. Methodology and data quality assurance //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2000. – Т. 105. – №. A9. – С. 21025-21034.

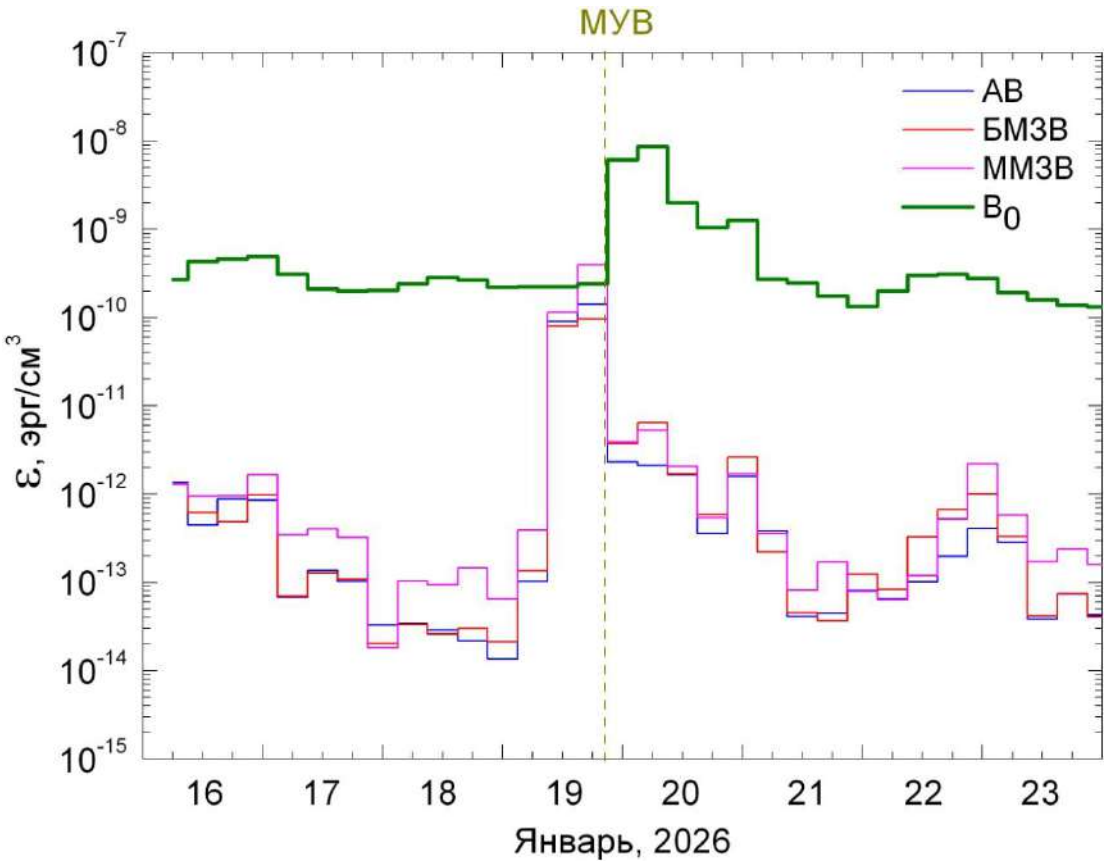
Динамика спектральных характеристик турбулентности солнечного ветра и галактических космических лучей во время мощного гелиогеофизического события 19 января 2026 года

Стародубцев С.А.[1]
[1]*Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г.Якутск, Россия*
starodub@ikfia.ysn.ru

Межпланетное магнитное поле (ММП) является основным фактором модуляции космических лучей (КЛ) в гелиосфере. При этом изучение турбулентности солнечного ветра (СВ) - возмущений, главным образом, ММП с характерным масштабом менее 1 а.е., является одной из актуальных задач физики космической плазмы, поскольку ее наличие во многом определяет протекание различного рода физических процессов в межпланетной среде и магнитосферах планет. Поэтому изучение характеристик и временной динамики турбулентности СВ, а также ее модулирующее воздействие на галактические космические лучи (КЛ) во время мощных гелиогеофизических событий, которые определяют состояние космической погоды на орбите Земли, является важной задачей. В связи с этим в данной работе на основе 1-мин данных измерений параметров ММП и СВ на космическом аппарате (КА) WIND и нейтронных мониторов станций КЛ Якутск и Бухта Тикси изучаются спектральные характеристики МГД-волн в СВ и флуктуаций КЛ во время мощных гелиогеофизических событий 18-19 января 2026 г. Учитывая магнитозвуковую природу флуктуаций интенсивности галактических КЛ [1], спектральный анализ данных измерений проводился на инерционном участке спектра турбулентности СВ в области частот $\sim 10^{-4} \div \sim 10^{-2}$ Гц. Предварительно данные были подвергнуты процедуре приведения к нулевому среднему и цифровой фильтрации в этой области частот. При этом рассчитывались спектры мощности и когерентность различных параметров СВ и КЛ, определялись показатели наклона спектров и плотность энергии 3-х веток МГД-волн (альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых), изучались их динамические изменения до, во время и после прохождения мощной межпланетной ударной волны (МУВ) через орбиту Земли.

В качестве примера, на рисунке показана динамика плотности энергии модуля ММП, альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн усредненные за 6-часовые интервалы. Из него видно, что еще за 12 часов до прихода МУВ наблюдался значительный рост плотности энергии всех 3-х веток МГД-волн. В то же время ее увеличение в модуле ММП отмечалось за фронтом МУВ. Проведенный детальный анализ этого события привел к выводу, что рост плотности энергии МГД-волн обусловлен наличием потоков низкоэнергичных КЛ солнечного и межпланетного происхождения, которые генетически связаны с мощной солнечной вспышкой балла

X1.85/3B, произошедшей 18 января 2026 г. в 17:27 UT в активной области AR 14341 с координатами S14E22 [2], и наблюдались непосредственно перед фронтом МУВ.



Динамика плотности энергии модуля ММП (B_0), альфвеновских (АВ), быстрых (БМЗВ) и медленных магнитозвуковых волн (ММЗВ) за усредненные 6-часовые интервалы времени во время геофизического события 19 января 2026 г. Штриховой линией отмечена регистрация МУВ на КА WIND, который находился вблизи точки либрации Лагранжа L1.

Подобная картина также наблюдается и в динамике когерентности флуктуаций интенсивности галактических КЛ. Полученные результаты интерпретируются как предвестники грядущих изменений и возможных негативных проявлений космической погоды на Земле.

Литература

1. Бережко, Е.Г., Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т.52. С.2361-2363.
2. https://solarmonitor.org

SEP и MS 7-11 октября 2024 года. Аналогия с событиями 10-14 ноября 2025

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

[1]ИКИ РАН, Москва, Россия
[2]ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, Россия
astrum@cosmos.ru

Согласно информации на сайте Центра прогноза космической погоды [1], положительный прогноз о геомагнитной буре (MS – Magnetospheric Storm) 10-11 октября 2024 был выдан только после фиксации вспышки X1.8 9 октября 2024 г. (N13W08, 01:37 UT) и КВМ (1435 км/с, 02:12 UT). Считается, что возмущения достигли Земли 10 октября в 14:46 UT, но были ли они вызваны только КВМ от данной вспышки? Работа посвящена проверке этого факта. Определяющими в нашем анализе будут наблюдения солнечных энергичных частиц (SEP – Solar Energetic Particles) и сравнение с событиями 10-14 ноября 2025 года.

Заметим, что первые слабые потоки SEP наблюдались после вспышки X2.1 и КВМ 7 октября 2024 г. (S19W63, II-тип 20:03 UT, 967 км/с). Если проследить эволюцию потока SEP следующие 5 дней (рис. 1а), то она соответствует эволюции потока от события 10-14 ноября 2025 г., при отсчете времени от первого источника SEP — вспышки X1.2 и КВМ 10 ноября 2025 г. (N23W14, 09:08 UT, 947 км/с). В рассматриваемом случае на развитие ситуации в межпланетном пространстве также мог оказать влияние и КВМ от 8 октября 2024 г. (1095 км/с, IV тип радио 05:51 UT).

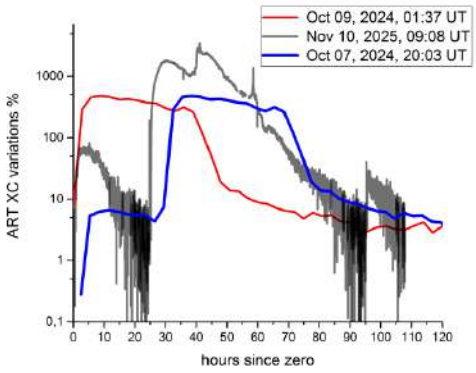


Рис. 1а. Выбор начала по *ART-XC*.

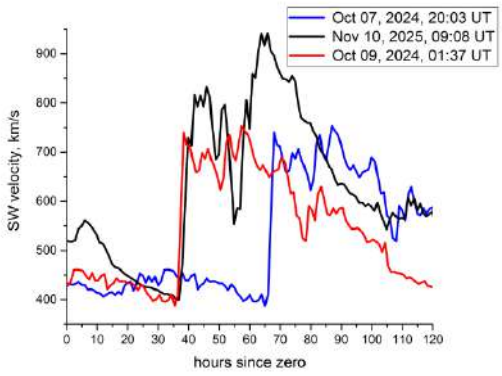


Рис. 1б. Выбор начала по скоростям

На рис. 1б построены временные профили скорости солнечного ветра, наблюдавшиеся у Земли (данные OMNI), для выбранных нулей и интервалов времени в октябре 2024 г. и ноябре 2025 г. Если предположить, что драйвером событий в октябре 2024 г. была вспышка X1.8 и КВМ от 9 октября, то приход КВМ ожидаем на 36 ч (резкий рост красной кривой). Однако в этом случае вспышка X1.8 должна роль, аналогичную вспышке X1.2 10 ноября 2025 г. (рис. 1а), которая не была главным источником SEP. При времени

распространения 36 ч, транзитная скорость будет 1157 км/с, что сомнительно (рис. 1б). Если же предположить, что драйвером была вспышка X2.1 и КВМ от 7 октября, то вспышка от 9 октября 2024 г. «возвращается на место» вспышки X5.1 11 ноября 2025 г. — главного источника SEP и самого быстрого КВМ, но при этом сдвигается время прихода КВМ на 66 ч, и он становится последним. Причиной высоких скоростей СВ между 36–50 ч, понижения Форбуша и MS вечером 11 и утром 12 ноября 2025 г. были КВМ, родившиеся до 10 ноября и объединившиеся вместе. Аналогичных структур 9-10 октября 2024 г. в солнечном ветре не было.

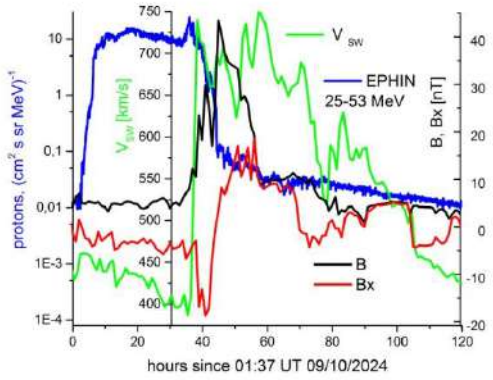


Рис. 2а SEP и SPE в структурах СВ.

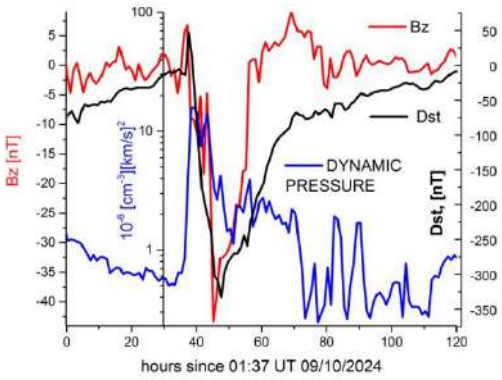


Рис. 2б. Геомагнитная буря и ее драйверы.

На рис. 2а по данным протонного канала 25-53 МэВ SOHO/EPHIN видно протонное возрастание от вспышки X1.8 9 октября 2024 г. (ноль времени), и возрастание штормовых частиц (SPE — Storm Particle Enhancement) перед приходом структуры (36 ч), состоящей, как минимум, из трех КВМ (три всплеска B). Резкий спад потока протонов соответствует началу понижения Форбуша — попаданию SOHO (точки L1) в пролетающие магнитные облака с большим B, а длительный спад после 50 ч — структурам СВ со слабым B и B_x разной полярности.

Начало MS связано с ростом динамического давления (на 36-37 ч, рис. 2б), максимум Dst 47 нТл (37 ч). При этом B_z компонента стала отрицательной на 38 ч, и началось падение Dst. Флуктуации Dst в фазе падения связаны с приходом КВМ от 7 и 8 октября, и разделяются по динамическому давлению (плотности) и магнитному полю (B, B_x, B_z). Минимум Dst (-333 nT) на 47 ч запаздывает на 2 ч от минимума B_z и смены знака B_x, что, возможно, связано с поджатием магнитного поля надвигающимся КВМ от 9 октября (50 ч, транзитная скорость 833 км/с).

Литература

1. http://spaceweather.phys.uoa.gr/archive.html

Моделирование распространения протонов и антипротонов в гелиосферном магнитном поле

Ян Я.[1], Сирук С.А.[1], Юлбарисов Р.Ф.[1], Майоров А.Г.[1]
[1]*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*
yangyd1102@163.com

При прохождении через гелиосферу галактические космические лучи (ГКЛ) — энергичные частицы, приходящие из-за пределов Солнечной системы — испытывают влияние солнечного ветра и вмороженного в него межпланетного магнитного поля. Наблюдаемая величина потока ГКЛ зависит от энергии регистрируемых частиц, времени и положения детектирующей установки в пространстве. Этот процесс известен как солнечная модуляция. Потоки ГКЛ с противоположными знаками заряда демонстрируют различные характеристики в один и тот же период — явление, называемое зарядовой зависимостью солнечной модуляции. В настоящем исследовании изучаются эффекты солнечной модуляции для протонов и антипротонов в диапазоне энергий от 100 МэВ до 100 ГэВ путём обратного трейсинга их траекторий в гелиосфере. В модели учитывается широтная зависимость характеристик солнечного ветра и регулярное магнитное поле Паркера. Потоки протонов и антипротонов на границе гелиосферы рассчитываются исходя из спектров, измеренных в окрестности Земли. Проведён анализ широтного распределения ГКЛ и показано, что в эпоху $A<0$ протоны на границе гелиосферы сосредоточены главным образом на низких широтах, тогда как антипротоны в основном скапливаются на высоких широтах; в эпоху $A>0$ ситуация противоположна.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-22-00508 «Исследование зарядовой зависимости солнечной модуляции галактических космических лучей».

Секция 5.
Космический климат и климат Земли

Вариации состояния высокоширотной атмосферы северного полушария в связи с наиболее мощными солнечными протонными событиями 23-го солнечного цикла

Веретененко С.В.[1], Коваль А.В.[2]
[1]*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С. Петербург, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский государственный университет, С. Петербург, Россия*
s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Проведено исследование вариаций характеристик высокоширотной атмосферы Северного полушария в связи с наиболее мощными солнечными протонными событиями (СПС) 23-го солнечного цикла на основе данных метеорологического архива MERRA-2 [1]. Были рассмотрены три серии событий, произошедших в холодную половину года и сопровождавшихся значительными возрастаниями скорости ионизации в мезосфере и верхней стратосфере [2]: 1) 26 октября – 4 ноября 2003 г.; 2) 15–20 января 2005 г., 3) 5–14 декабря 2006 г. Обнаружено, что в ходе всех исследуемых серий СПС в высокоширотной области Северного полушария имели место возмущения, охватывающие как нижнюю, так и среднюю атмосферу. В нижней атмосфере наблюдалось усиление вторичного углубления (регенерации) внетропических циклонов у юго-восточного побережья Гренландии, а также возрастание индекса Северо-Атлантического колебания (NAO). В средней атмосфере после начала серии СПС имело место усиление стратосферного полярного вихря (рост зональной скорости ветра, а также смещение области наиболее высоких значений скорости в Северо-Атлантический регион). В ходе всех исследуемых событий обнаружены значительные вариации волновой активности, характеризуемой амплитудой планетарных волн с зональными числами 1 и 2 и вертикальной компонентой потока Элиассена-Пальма. Усиление полярного вихря в первые дни после начала серий происходило на фоне ослабления волновой активности, тогда как в последующие дни наблюдалась более интенсивная генерация планетарных волн, которая привела к ослаблению вихря и развитию стратосферных потеплений через 2-3 недели после начала серий СПС января 2005 г. и декабря 2006 г. Полученные результаты позволяют сделать предположение о заметном влиянии значительных резких возрастаний скорости ионизации в средней атмосфере, вызванных мощными солнечными протонными событиями, на динамику и температурный режим высокоширотной атмосферы.

Литература

1. Gelaro R., McCarty W., Suarez M.J. et al. // J. Climate. 2017. V. 30. P. 5419.
2. http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/Catalog_SPE_23_cycle_SA.pdf

Что влияет на климат верхней атмосферы?

Гивишвили Г.В., Шубин В.Н.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия
e-mail: givi_dom@mail.ru
e-mail: vn_shubin@mail.ru

В изучении климата верхних слоев атмосферы сложилась парадоксальная ситуация. Сам факт тренда (многолетних, не зависящих от солнечной и геомагнитной активности изменений) параметров нейтральных и заряженных компонент – температуры, плотности, состава, ветра и т.д. термосферы-ионосферы был обнаружен в серии работ [Гивишвили, Лещенко, 1993; Kokin and Lysenko 1994; Гивишвили, Шубин, 1994; Kokin and Lysenko 1994]. По результатам обсуждения выявленных явлений на первом Международном рабочем совещании в Москве в 1998 г. была сформулирована концепция «Охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы» (Cooling and sinking of the middle and upper atmosphere). Она признавала, что основным инициатором многолетних трендов параметров термосферы-ионосферы является убыль O и O_2, связанная с антропогенной деятельностью [Гивишвили, Голицын, 1999].

Ранее, оценивая роль роста парниковых газов CO_2 и CH_4 техногенного происхождения в теоретически возможных изменениях температуры и состава верхней атмосферы, в работе [Roble and Dickinson,1989] было показано, что даже двукратный рост их содержания не должен ощутимо сказаться на состоянии мезо-термосферы. В свою очередь, принимая их вывод за основу, [Rishbeth, 1990] предсказал, что ионосфера также не должна значимо реагировать на этот гипотетический рост CO_2 и CH_4. Проверка прогноза Roble, Dickinson и Rishbeth была предпринята в [Bremer, 1992] на базе результатов мониторинга ионосферы методом ВЗ. В ее заключении было сказано, что эмпирические данные полностью подтвердили прогноз [Rishbeth, 1990]. Так сформировалась обобщенная концепция этих двух работ – прогностическая модель *RDR*, которая исключала какой-либо отклик термосферы-ионосферы на двукратный рост в атмосфере парниковых газов. Тем самым, возникло противоречие между прогнозом и тем, что наблюдалось в реальности [Гивишвили, Голицын, 1999].

Между тем, другая группа специалистов, фактически, подтвердившая факты значимых трендов практически всех параметров мезо-термосферы и ионосферы [Bremer, 1998; Keckhut et al., 1995; Marcos et al., 2005], тем не менее и вопреки тому, что прогнозировала модель *RDR*, настаивает на том, что они вызваны ростом содержания CO_2 в атмосфере. Их концепция проблемы трендов сформулирована как «Cooling and contraction of the upper atmosphere» [Laštovička et al., 2008]. При этом ее авторы не в состоянии объяснить - каким образом реальный рост CO_2 за последние полвека, который в четверо (!) ниже табулированного Roble and Dickinson, приводит к столь заметным изменениям в параметрах верхней атмосферы. Ибо даже если бы этот рост CO_2 достиг требуемого ими значения, его все равно не хватило бы для их проявления в ионосфере, как показал Rishbeth. Поэтому сторонники *RDR* вынуждены признать следующий неразрешимый парадокс. А именно, что, с одной стороны: «На сегодня совершенно ясно, что концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы, сформулированная более 10 лет назад ([Laštovička et al., 2008]) справедлива». Но с другой стороны, что «в верхней атмосфере в процессе охлаждения и оседания действуют какие-то процессы, о которых науке пока ничего не известно» [Данилов, Константинова, 2020]. Парадокс не разрешим, поскольку самим авторам не ясно, каковы эти неизвестные процессы, которые, не исключено, могут прямо отрицать роль CO_2 в исследуемых явлениях и, соответственно, концепцию *RDR*.

Вместе с тем очевидно другое: что парниковый эффект проявляется не только в тропосфере, но также в мезосфере и термосфере-ионосфере. Однако, в отличие от потепления тропосферы, мезо-термосфера, напротив, глобально охлаждается. При этом общей причиной парникового эффекта во всей толще атмосферы оказывается техногенная деятельность, «связывающая» свободный кислород в диоксид углерода в цикле множества реакций, которые, в конечном счете, сводятся к формуле:

$$C + O_2 = CO_2 + Q$$

где Q - тепловой эффект реакции. При этом $[CO_2]$ растет, нагревая тропосферу, а $[O_2]$ падает, охлаждая термосферу. И нет никакой необходимости искать «процессы, о которых науке пока ничего не известно» [Данилов, Константинова, 2020]. Сегодня, по прошествии многолетних споров о природе трендов настало время признать справедливость выводов, сформулированных в [Гивишвили, Голицын, 1999].

При всем том, вместе с техногенным ростом $[CO_2]$ и падением $[O_2]$ в атмосфере, с 1957-58 гг. на ее верхние слои стали оказывать заметное влияние регулярные запуски межконтинентальных ракет и спутников, а также испытания ядерного оружия, к счастью, завершившиеся в 1985-86 гг. Наконец, как было показано в [Smith and King, 1981], для корректной оценки ключевых параметров ионосферы (*foE* и *foF2*) необходимо учитывать не только значения Rz или F10.7, но и параметр, характеризующий эффективную площадь флоккул (facular area). К сожалению, соответствующие наблюдения были свернуты в 1967 г. и более не возобновлялись.

Литература

- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Долговременные тренды свойств ионосферы и термосферы средних широт. *Доклады АН*. 1993. т. 333. № 1. с. 86-89.
- Гивишвили Г.В., Шубин В.Н. Долговременные вариации содержания атомного кислорода в верхней атмосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1994. т. 34. № 4. с.169-173.
- Гивишвили Г.В., Голицын Г.С. О Международном рабочем совещании «Охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы» (Москва, 6-10 июля 1998 г.). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1999. т.39. № 3. с. 139-144.
- Данилов А.Д., А. В. Константинова. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы (Обзор). *Геомагнетизм и аэрономия.* 2020. т.60. №4. с.411- 435.
- Bremer J. Ionospheric trends in mid-latitude as a possible indicator of the atmospheric greenhouse effect. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1992. vol. 54. iss.11-12. pp. 1505 – 1511.
- Bremer, J. Trends in the ionospheric E and F regions over Europe. *Ann. Geophysicae*. 1998. vol.16. pp. 982-996.
- Givishvili G. V. and Leshchenko L. N. D region depletions about the Persian Gulf. *J. Atmos. Terr.Phys.* 1993a. vol. 55. iss.1. pp. 125–128.
- Keckhut P., Hauchecorne A., Chanin M. L. Midlatitude long-term variability of the middle atmosphere: trends and cyclic and episodic changes. *J. Geophys. Res.* 1995. vol.100. pp. 18-87.
- Kokin G.A., Lysenko E.V., On temperature trends of the atmosphere from rocket and radiosonde data. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1994. vol. 56. iss.9. pp. 1035–1040.
- Laštovička, J., Akmaev, R.A., Beig, G., Bremer, J., Emmert, J.T., Jacobi, C., Jarvis Martin J., Nedoluha, G., Portnyagin, Yu.I., Ulich, T., 2008. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. *Ann. Geophysicae.* vol. 26. iss. 5. pp.1255-1268.
- Marcos F.A., Wise J.O., Kendra M.J., Grossbard N.J., Bowman B.R. Detection of a long-term decrease in thermospheric neutral density. *Geophys. Res. Lett*. 2005. vol. 32.
- Rishbeth H. A greenhouse effect in the ionosphere? *Planet. Space Sci*. 1990. vol.38. iss.7. pp. 945-948.
- Roble R.G., Dickinson R.E. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett*. 1989. vol.16. iss.7. pp. 1441-1444.
- Smith P.A. King J.W. J.of Atmospheric and Terrestrial Physics. V.43, № 10, p. 1057-1063, 1981.

Особенности сезонной перестройки средней атмосферы в эпохи различной солнечной активности

Диденко К.А.[1], Ермакова Т.С.[2,3], Шлык Н.С.[1], Маурчев Е.А. [1], Коваль А.В.[2]

[1] *ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*
[2] *СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*
[3] *ГГО, г. Санкт-Петербург, Россия*
didenko@izmiran.ru

С использованием данных реанализа MERRA-2 [1] исследованы особенности динамики атмосферы, а также выявлены различия сезонной перестройки средней атмосферы в эпохи 22–23 и 24–25 солнечных циклов (СЦ). Для этого было проведено сравнение композитов приращений температуры, зонального ветра и амплитуд атмосферных планетарных волн (ПВ) с зональными волновыми числами m = 1 и 2 (ПВ1 и ПВ2) в максимумах и минимумах СЦ с использованием перестановочного теста. Установлено, что наиболее выраженные различия в отклике стратосферы наблюдаются в отдельные периоды начала зимнего сезона и в марте. В эпоху 24–25 СЦ в январе и марте отмечается более высокая температура полярной стратосферы относительно соответствующего периода 22–23 СЦ, сопровождаемая ослаблением зонального ветра. В марте эти различия особенно выражены и согласуются с переходом стратосферной циркуляции к летнему режиму.

Вариации температуры и зонального ветра сопровождаются статистически значимыми различиями в динамике планетарных волн между эпохами СЦ22–23 и СЦ24–25. Наиболее выраженные различия наблюдаются в марте: усиление ПВ1 и ПВ2 сопровождается ослаблением зонального ветра и повышением температуры в стратосфере. Согласованное изменение температуры, зонального ветра и волновой активности указывает на более выраженную волновую перестройку стратосферы в СЦ24–25 и её переход к летнему режиму поздней зимой. Таким образом, различия между эпохами СЦ22–23 и СЦ24–25 проявляются не только в величине отклика на солнечную фазу, но и в характере сезонной перестройки стратосферной циркуляции, наиболее отчётливо выраженной в марте.

Литература

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

Вариации климата Земли и солнечной активности после максимума последнего оледенения на различных временных шкалах: возможная связь

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, Троицк, Москва, Россия*
Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru

Максимум последнего глобального оледенения на Земле, как известно, имел место около 20 тысяч лет назад. Процесс перехода к теплому периоду Голоцен, который длится и в настоящее время, составляет несколько тысяч лет. Переход к Голоцену произошел около 11700 лет назад. На рисунке представлено изменение глобальной температуры в северном полушарии Земли согласно работам [1-3]. Как видно из этого рисунка, увеличение температуры не происходило монотонно, в 13 веке до нашей эры начался сильный рост температуры с достижением локального максимума в середине 12 века до нашей эры. После этого происходил спад температуры с переходом к последующему её росту. Отмеченное локальное увеличение температуры соответствует Майендорфскому потеплению, а последующий минимум – похолоданию под названием Поздний Дриас. В Голоцене также происходили существенные изменения температуры, при этом период 7-3 тысяч лет до н.э. соответствует климатическому оптимуму Голоцена. После этого периода следует спад температуры вплоть до малого ледникового периода, в течение которого, как известно, прослеживается ряд минимумов активности Солнца. Отмеченный спад температуры также происходил не монотонно, имели место локальные минимумы и максимумы. В докладе приводятся аргументы в пользу того, что, по крайней мере, часть отмеченных температурных особенностей может быть результатом вариаций солнечной активности. В работе используется авторская реконструкция гелиосферного модуляционного потенциала. Также обсуждаются возможные физические механизмы влияния вариаций солнечной активности на климатические изменения.

Отклик приземного атмосферного давления в Якутске и Бухте Тикси на приход прямых быстрых межпланетных ударных волн

Петухов И.С., Стародубцев С.А., Герасимова С.К., Зверев А.С.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия
i_van@ikfia.ysn.ru

Рассмотрен отклик изменений приземного атмосферного давления на приход к Земле прямых быстрых межпланетных ударных волн (МУВ). К анализу привлекались данные измерений барографов БРС-1М, установленных на двух станциях космических лучей (КЛ), которые расположены на северо-востоке Сибири в Якутске и Бухта Тикси. Эти пункты наблюдений характеризуются различным климатом: Якутск - резко континентальным, а Бухта Тикси - суровым арктическим.

Методом наложения эпох проанализирована выборка данных за период времени 2003–2024 гг. В качестве нулевого времени t_0, относительно которого проводились расчеты, выбрано время регистрации МУВ космическим аппаратом WIND, находящимся вблизи точки либрации L1.

Анализ 211 событий в течение всех 4-х сезонов года не выявил какого-либо согласованного поведения изменений приземного давления (ΔP) на обеих станциях, за исключением периодов времени близких к равноденствию.

Показано, что в весенний период времени (март–апрель) в течение первых трёх суток после прихода МУВ на обеих станциях ΔP уменьшается, а затем возрастает до 4–6 мб, достигая максимума на 5-е сутки после регистрации МУВ (рисунок 1а).

Для осеннего периода (сентябрь–октябрь) максимум повышения ΔP на обеих станциях приходится на 2-е сутки, тогда как на 5-е сутки рост давления регистрируется только в Якутске (рисунок 1б).

Сделан вывод, что наблюдаемое в этом случае различие обусловлено региональными особенностями климата, в частности началом осеннего пургового сезона в заполярном Тикси.

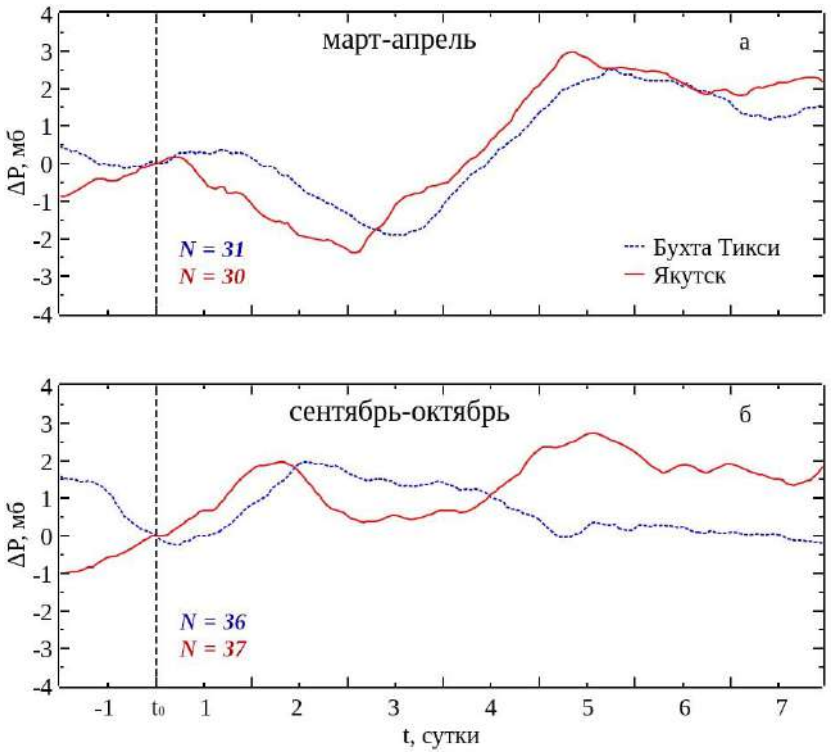


Рис. 1. Изменения приземного давления ΔP относительно t_0 как функция времени по измерениям на станциях КЛ Бухта Тикси и Якутск для марта-апреля (а) и сентября-октября (б).

Длительная задержка (от 2 до 5 суток) возрастания приземного атмосферного давления указывает на высокую инертность отклика атмосферы на крупномасштабные возмущения солнечного ветра (СВ) типа МУВ.

Сопоставление поведения изменения давления ΔP в двух различных климатических зонах выявило существенную роль местных метеоусловий в формировании барического отклика на возмущения космической погоды.

Высказано предположение, что наблюдаемое поведение изменений приземного атмосферного давления (ΔP) в периоды, близкие к равноденствиям, может быть обусловлено эффектом Рассела–Макферрона.

Результаты получены с использованием оборудования УНУ-85 «Российская национальная сеть станций космических лучей» [https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536/]. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 125102712109-5).

Атмосферная турбулентная термодиффузия как биологический и климатический фактор

Клиорин Н.[1], Рагульская М.[1], Рогачевский И.[2]

[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия*
[2]*Университет Бен-Гуриона, Негева, Израиль*
nat@bgu.ac.il; ra_mary@mail.ru

В работе (Рагульская, Обридко, Розанов, 2026) показано, что при совпадении минимумов цикла Гляйсберга и цикла Швабе-Вольфа возникают вирусные пандемии с крайне низкой эффективностью социальных локдаунов. Заражение новых стран и возникновение новых штаммов патогенных вирусов происходит вне зависимости от степени изоляции населения, возрастного состава, погодных условий и уровня медицины. На первый план в пандемиях минимумов солнечной активности (СА) выходит генетический состав населения и степень активности лейкоцитарных антигенов к данному возбудителю инфекции. Поэтому важен поиск экзогенного общемирового фактора, способствующего возникновению новых мутировавших штаммов патогенных вирусов в минимумах СА, а также изучение механизма мутаций и путей распространения вирусных пандемий, которые находятся в противофазе с динамикой СА. Основной кандидат – галактические космические лучи (ГКЛ). Космические лучи (КЛ) активно влияют на биологические объекты и клеточные структуры (Belisheva и др., 2012), но из-за защитной функции атмосферы до поверхности Земли КЛ доходят ослабленными и переизлученными. Однако при подъеме на высоту биоэффективность ГКЛ существенно возрастает: в 10 раз на высоте 5 км, и на 2 порядка на высоте 11 км (Maurchev и др., 2022). При подъеме на такие высоты из-за разреженности атмосферы происходит активная бомбардировка аэропланктона (включая вирусы) космическими лучами, рентгеновским и УФ-излучением Солнца, что приводит к активным процессам мутации биообъектов и вирусов. Круговорот аэропланктона и вирусов в атмосфере (Ragulskaya, Snytnikov, 2026) способствует дальнейшему переносу мутировавших вирусов и бактерий на высотах до 15-20 км. В дальнейшем повышенное образование облачности на аэропланктоне в температурных диапазонах, отличных от диапазонов конденсации влаги на чистой пыли, и последующее выпадение мутировавших патогенных микроорганизмов вместе с дождями на новых территориях на расстоянии до 3 тысячах км от первичного эпидемиологического очага, вносят свой вклад как в биологические, так и в климатические процессы.

Необходимой задачей является оценка механизма и времени существования локальных атмосферных концентраторов вирусов и

аэропланктона. Как следует из работ (Elperin T., Kleeorin N. and Rogachevskii I., 1996) и (Sofiev et al, 2009), возможно длительное существование устойчивых атмосферных потоков. По оценкам (Natan Kleeorin, 2026), механизм турбулентной термодиффузии является структурирующим фактором, способным удерживать атмосферные аэрозоли вблизи минимума температуры атмосферы (тропопауза) в устойчивых атмосферных потоках на протяжении нескольких месяцев. Характерное время вертикального транспорта горизонтальной неоднородности порядка месяца, горизонтального – до 10 месяцев. Время существования, масштабы устойчивых атмосферных областей долговременной локализации вирусов и их перемещение благодаря механизму турбулентной термодиффузии зависят от аэрономических свойств атмосферы, солнечных вспышек и грозовых процессов. Такие «атмосферные ловушки для вирусов» могут служить местами ускоренного мутирования патогенных микроорганизмов. Поскольку свойства тропопаузы также зависят от СА, то цикличность пандемий оказывается привязанной к максимумам интенсивности солнечных КЛ и коротковолнового излучения Солнца в максимуме цикла СА, и к максимуму интенсивности ГКЛ в минимуме цикла СА.

Литература

1. Рагульская М.В., Обридко В.Н., Розанов А.Ю. Солнечная активность, геомагнитная активность, космические лучи и атмосферные воздействия как биотропные факторы // Геомагнетизм и аэрономия. 2026. Т. 66. № 1. С. 21−40. DOI:10.7868/S3034502226010026

2. Maurchev E.A., Mikhalko E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. Estimated equivalent radiation dose at different altitudes in Earth’s atmosphere // Sol.-Terr. Phys. 2022. V. 8. № 3. P. 27–31. DOI: 10.12737/stp-83202204.

3. Ragulskaya M., Snytnikov V. Earth’s Biosphere Atmospheric Transport:A Key to Venus’s Biosphere. Solar System Research, 2026, Vol. 60:55

4. Elperin T., Kleeorin N. and Rogachevskii I. "Turbulent Thermal Diffision of Small Inertial Particles". Physical Review Letters, 1996, v. 76, pp. 224 - 228.

5. Sofiev M., Sofieva V., Elperin T., Kleeorin N., Rogachevskii I., Zilitinkevich S.S. Turbulent diffusion and turbulent thermal diffusion of aerosols in stratified atmospheric flows // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. ID D18209. DOI:10.1029/2009JD011765

Секция 6.
Геоэффективные проявления солнечной активности

Влияние корональных дыр на геоэффективные события 25-го солнечного цикла

Андреева О.А.
ФГБУН КрАО РАН, Научный, Крым, Россия
olga@craocrimea.ru

Космическая погода – это процесс, создаваемый солнечными событиями в околоземном пространстве Земли. Источники таких событий - явления и процессы, происходящие в атмосфере Солнца и гелиосфере. Солнечные вспышки, корональные выбросы массы (КВМ), эруптивные протуберанцы, высокоскоростные потоки солнечного ветра. Все они вызывают магнитные возмущения, колебания магнитного поля Земли, называемые геомагнитными бурями [1].

Одним из ключевых факторов изменений космической погоды являются корональные дыры (КД). КД представляют собой темные области в солнечной короне и часто наблюдаются в фазах роста и спада, реже в максимуме каждого солнечного цикла. Эти области можно увидеть при наблюдениях Солнца в экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах. Температура и плотность плазмы в области КД ниже, чем в окружающей ее солнечной короне [2]. Благодаря открытому магнитному полю, КД являются источником высокоскоростного солнечного ветра, распространяющемуся в межпланетное пространство. Высокоскоростной солнечный ветер обгоняет низкоскоростной, в результате чего плотность плазмы и магнитное поле сжимаются на границе между ними [3]. Когда эта структура солнечного ветра, достигает магнитосферы Земли, геомагнитная активность часто усиливается, а плазменная среда в магнитосфере меняется.

Геоэффективными в солнечно-земной физике принято называть события, непосредственно влияющие на радиационную, геомагнитную и электромагнитную обстановку в околоземном пространстве. Геоэффективность КД — это мера того, насколько сильно такие дыры на Солнце влияют на магнитосферу Земли, то есть вызывают ли они заметные геомагнитные возмущения или бури. Изучение характеристик КД крайне важно для оценки влияния Солнца на окружающую среду в геокосмосе.

Цель данной работы – выполнить обзор наиболее мощных геомагнитных бурь 25 цикла солнечной активности и выявить взаимосвязь между крупными корональными дырами и потоками солнечного ветра с целью анализа их геоэффективности, т.е. их воздействия на окружающую среду Земли.

В работе показано, что на геоэффективность КД влияет несколько факторов: расположение КД на диске Солнца (широта, долгота), ее размер, а также полярность магнитного поля. Оказалось, что особенно эффективны трансэкваториальные КД, которые чаще всего и становятся главными

источниками сильных геомагнитных возмущений. Для возникновения заметной геомагнитной бури очень важна отрицательная (южная) компонента межпланетного магнитного поля (Bz). Также геоэффективность повышают крупномасштабные потоки, которые расширяются от полюса к полюсу, усиливают процесс взаимодействия движущегося межпланетного поля с магнитным полем Земли, что согласуется с результатами [4]. В целом, даже при наличии благоприятных условий (КД у центрального меридиана, нужная Bz) интенсивность бури зависит и от того, как ведёт себя сам солнечный ветер (скорость, плотность) на пути к Земле. Иногда для сильной бури необходимо не только наличие КД, но и наложение нескольких факторов. Среди анализируемых случаев, часто бури возникали в результате сложных взаимодействий: когда высокоскоростной поток от КД «накладывался» на другие явления — выбросы корональной массы от вспышек или изменения границ самой дыры из-за эрупций протуберанцев. Анализ показал повышенную геоэффективность 25-го по сравнению с 24-м солнечным циклом. Помимо КД, на геоэффективность влияет целый комплекс факторов — от параметров самого солнечного выброса до состояния межпланетной среды и самой магнитосферы. Понимание этой связи напрямую влияет на прогнозирование космической погоды.

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

Литература

1. Gonzalez, W.D., Tsurutani, B.T., Clua de Gonzalez, A.L.: 1999, Interplanetary origin of geomagnetic storms. Space Sci. Rev. 88, 529
2. Altschuler M D, Trotter D E and Orrall FQ 1972 Coronal holes Solar Phys. 26 354
3. Tsurutani B T, Gonzalez W D, Gonzalez A L C, Tang F, Arballo J K and Okada M 1995 Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle J.Geophys. Res. 100 21717
4. Abunina M, Abunin A, Belov A, Eroshenko E, Gaidash S, Oleneva V, Yanke V, Kryakunova O (2015) On the influence of the coronal hole latitude and polarity on the geomagnetic activity and cosmic ray variations. In: Proceeding of Science, The 34th International Cosmic Ray Conference, 082

Экстремальные всплески геомагнитного AU-индекса как эффект солнечной активности

Громова Л.И.[1], Громов С.В.[1], Клейменова Н.Г.[2]
[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия*
[2]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия*
gromova@izmiran.ru

Известно, что во время значительных магнитных возмущений возрастает интенсивность ионосферных авроральных электроджетов, состоящих из двух противоположно направленных частей – восточного (EE) и западного (WE) тока, интенсивность которых оценивается геомагнитными *AL* и *AU* индексами. При этом интенсивность WE, т.е. индекс *AL*, примерно в 2.0–2.5 раза выше, чем интенсивность EE, т.е. индекса *AU*. Однако иногда можно наблюдать экстремально большое усиление восточного электроджета. Мы предположили, что возмущения с *AU*-индексом больше 1000 нТл можно классифицировать как экстремальные *AU*-события. Цель данной работы — исследовать возможную связь появления экстремальных *AU*-событий с особенностями параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра, являющихся важной характеристикой солнечной активности.

На основе анализа данных аврорального AU-индекса за 2000–2025 гг. (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/) было установлено, что, как правило, экстремальные AU-событий наблюдаются только во время сильных (|Dst| > 100 нТл) магнитных бурь. За рассмотренный временной интервал было зарегистрировано 113 сильных магнитных бурь, из которых в 18 бурях наблюдались экстремальные AU-события на разных фазах бури, но преимущественно на начальной и главной. Анализ параметров межпланетной среды (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/) показал, что экстремальные AU-события отмечались только при положительном значении By-компоненты ММП не зависимо от знака Bz-компоненты ММП. Можно предположить, что развитие экстремальных AU-событий вызвано усилением ионосферных токов системы DPY. направление которых в дневном секторе полярных широт контролируется знаком By-компоненты ММП. Физическая причина обнаруженного факта требует дальнейших исследований.

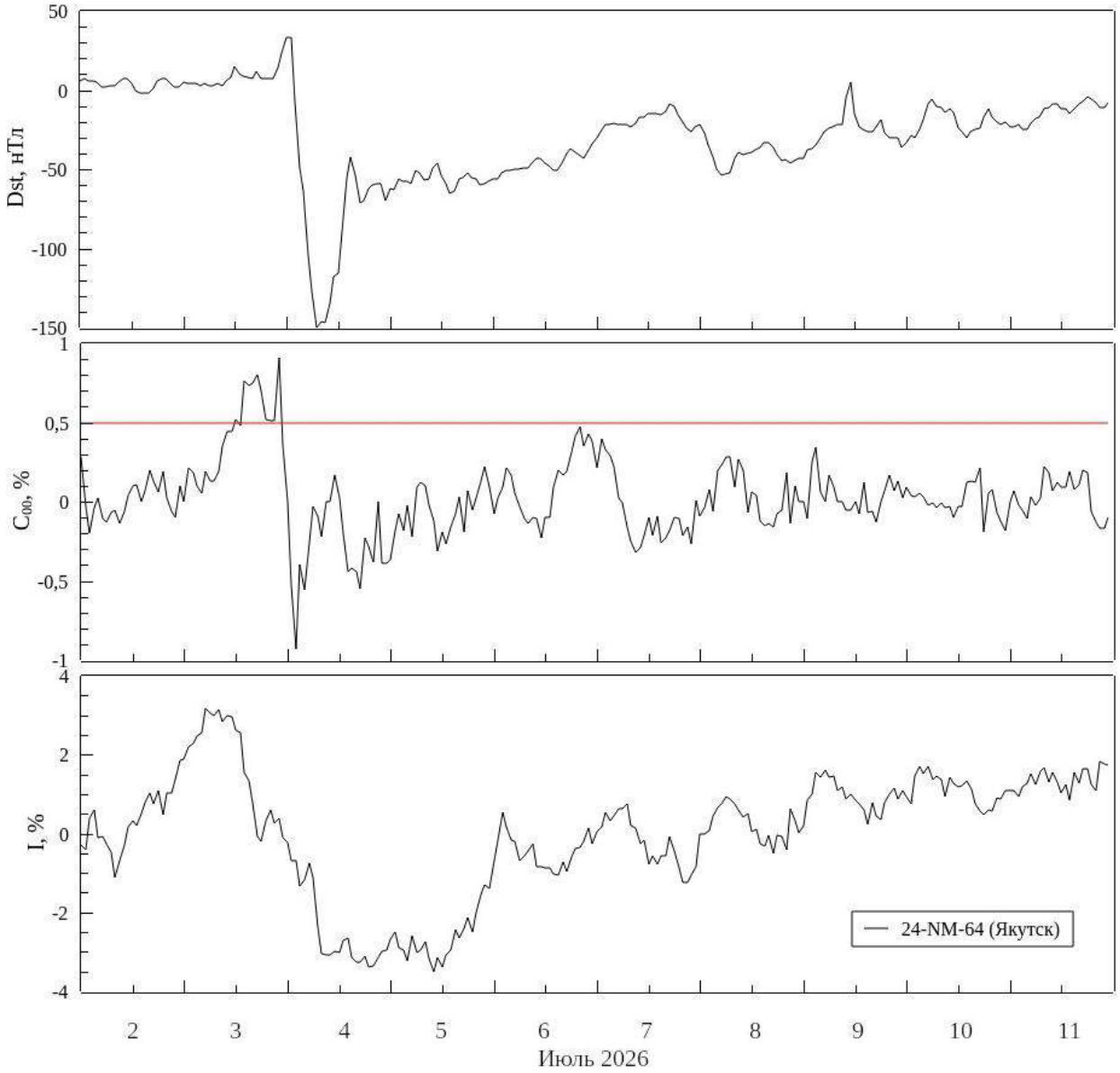
Динамические эффекты в распределении космических лучей перед началом геомагнитных бурь в 2026 году

Зверев А.С., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю.
Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия
ZverevAS@ikfia.ysn.ru

Наблюдаемую интенсивность космических лучей (КЛ) I можно разложить в ряд по первым двум сферическим гармоникам, которые практически наблюдаются. В этом случае наблюдаемые 9 компонент распределения КЛ можно найти из решения матричной системы уравнений I=MA, где M - матрица приемных векторов станций мировой сети нейтронных мониторов и A - матрица компонент распределения [1]. В используемом нами методе глобальной съемки, который был разработан в ИКФИА СО РАН в конце 1960-х годов, система решается методом наименьших квадратов. Как уже было показано раннее в [2], при исследовании динамики компонент распределения КЛ перед началом геомагнитных бурь, характерным является отдельное или общее повышение положительных величин зональных (северо-южных) компонент высокочастотной части изотропной интенсивности C_{00}, первой C_{10} и второй C_{20} гармоник распределения КЛ. При этом, превышение возрастаний выше некоторого критического уровня в этот период времени даже одной из указанных компонент является с вероятностью ~ 0.7, предиктором предстоящего геомагнитного возмущения. При этом заблаговременность составляет величину от нескольких часов до суток. На основании анализа таких возрастаний, в ИКФИА СО РАН с 2013 г. проводится мониторинг прогноза геоэффективных возмущений солнечного ветра в режиме реального времени [3].

В качестве примера на рис. показана динамика поведения Dst-индекса, компоненты анизотропии КЛ C_{00} и изотропной интенсивности КЛ перед началом сильной геомагнитной бури 4 июля 2026 г., во время которой также наблюдался значительный форбуш-эффект в КЛ. Как видно из рис., за 8 часов до начала геомагнитного возмущения наблюдается превышение критического уровня амплитуды C_{00}. Причем в этом событии превышения соответствующих критических значений величинами C_{10} и C_{20} до начала возмущения не наблюдалось.

Анализ результатов мониторинга параметров анизотропии КЛ за 7 месяцев текущего 2026 г. привел к выводу, что вероятность прогноза геоэффективных бурь составила величину ~ 0.7.



Литература

1. Altukhov A.M., Krymsky G.F., Kuzmin A.I. // Proc. 11-th Int. Cosmic Ray Conf. 1969. V.4.P.457-460.

2. Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Метод глобальной съемки в режиме реального времени и прогноз космической погоды // Изв. РАН. Сер.физ. 2015. Т. 79, № 5. С. 703–707. DOI: 10.7868/S0367676515050233.

3. Зверев А.С., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А. Мониторинг параметров анизотропии космических лучей в реальном времени и краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений. Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 4. С. 42–45. DOI: 10.12737/szf-64202005.

Влияние ультрафиолетового и рентгеновского излучений от солнечных вспышек на полное электронное содержание

Зинкин Д.В.[1], Сурков В.В.[1], Рябова С.А.[1,2], Пилипенко В.А.[1]
[1] *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*
[2] *Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия*
zinkin.deniz@yandex.ru

Важным аспектом солнечно-земных взаимодействий является комплекс явлений, связанных с воздействием ультрафиолетового (УФ) и рентгеновского излучений (РИ) от солнечных вспышек (СВ) на ионосферу Земли [1]. Это излучение существенно влияет на ионизацию ионосферной плазмы во время СВ. Ионизация D и E слоев ионосферы в большей степени зависит от РИ, обладающего большей проникающей способностью, в то время как УФ излучение играет наибольшую роль в ионизации F-слоя. Для изучения воздействия РИ и УФ излучения СВ на ионосферу были созданы упрощённые модели. С их помощью получены аналитические выражения, которые описывают частоту образования электронов в единице объёма и изменения концентраций электронов и ионов в зависимости от высоты и времени.

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

На примере 19 СВ от X2.0 до X9.0, произошедших в 2024-2025 годах показано, что рассчитанные по модели и экспериментально полученные изменения ПЭС во время СВ схожи как по амплитуде, так и по форме. Анализ высотного распределения электронов показал, что в диапазоне высот от 150 до 250 км сосредоточено около 65% изменения ПЭС. Также установлено, что зависимость между изменениями ПЭС и интенсивностью УФ излучения имеет слабо нелинейный характер.

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

Литература

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

Возможные причины появления Δ^{14}C-всплесков в атмосфере Земли

Остряков В.М.[1], Иванов И.А.[2], Константинов А.Н.[1,2], Павлов А.К.[2]
[1]*СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*
valery.ostryakov@mail.ioffe.ru

В работе предложено описание всплесков содержания ^{14}C в кольцах деревьев, известных как события Мияке, с применением 6-резервуарной модели переноса радиоуглерода на Земле. Эта модель содержит 6 земных резервуаров: стратосферу, тропосферу, биосферу, гумус, перемешиваемый и глубоководный слои океана, времена переходов между ними, значения которых близки к работе [1] и два из которых, τ_{ST} и τ_{TS}, изменяются под действием различных факторов. Такими внешними факторами могут быть увеличение средних потоков частиц и/или УФ и рентгеновского излучения, падающих на атмосферу Земли. Физической основой предлагаемых вариаций величин τ_{ST} и τ_{TS} является возможность изменений скоростей обмена воздушными массами между тропосферой и стратосферой под воздействием вариаций содержания озона, изменений температуры стратосферы, тропосферы, высоты и проницаемости тропопаузы. В рамках предлагаемой модели естественным образом объясняются депрессии величины Δ^{14}C(t) непосредственно перед “событием”, на которые ранее не обращалось внимание в известной нам литературе. Эта модель использовалась для объяснения событий Мияке 774 г. н.э., 5259 г. до н.э., 7176 г. до н.э. и 12350 г. до н.э. Данные по этим событиям взяты из [2-4]. На рис. 1,2 приведены примеры возможных вариантов модельных расчётов. На них зеленые кривые – решения системы дифференциальных уравнений, которая описывает модель; красные ломаные построены методом скользящего среднего. Для объяснения событий 5259 г. до н.э. и 7176 г. до н.э. потребовалось увеличить скорость перехода радиоуглерода из тропосферы в поверхностный слой океана.

Обсуждаемые Δ^{14}C-всплески ранее связывались в основном с воздействием на атмосферу Земли высокоэнергичных частиц солнечного происхождения, что требовало энергетики вспышки в 40-120 раз превышающей энергию самых мощных из известных солнечных вспышек. Модель, представленная в данной работе, требует нестационарного поведения τ_{ST} и τ_{TS} и при этом дает объяснение вышеперечисленным событиям Мияке либо с меньшей требуемой энергетикой вспышки до 20-40 раз, либо вообще без нее.

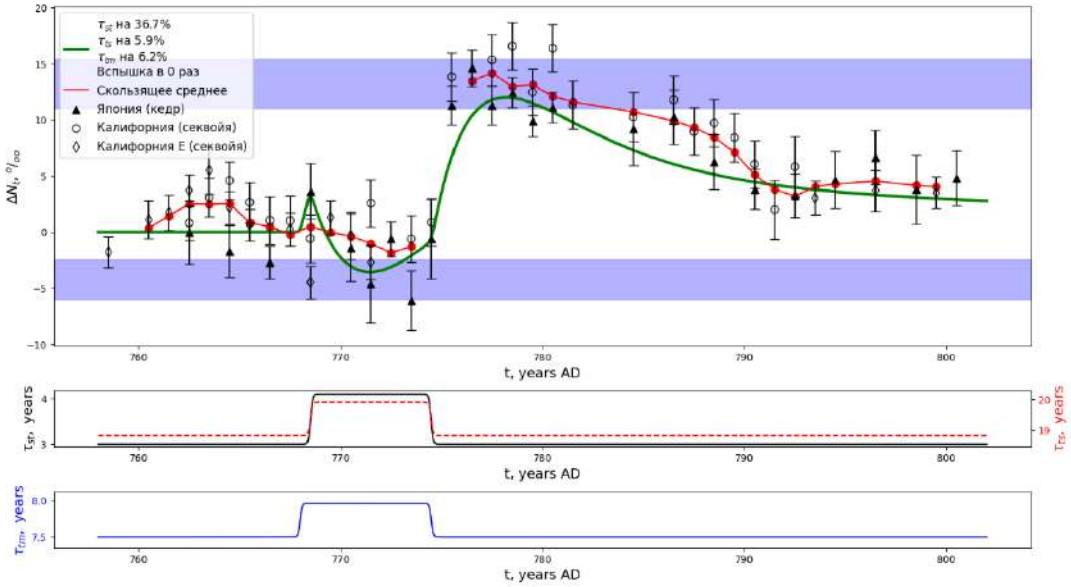


Рис. 1. Событие Мияке 774 г. н.э.

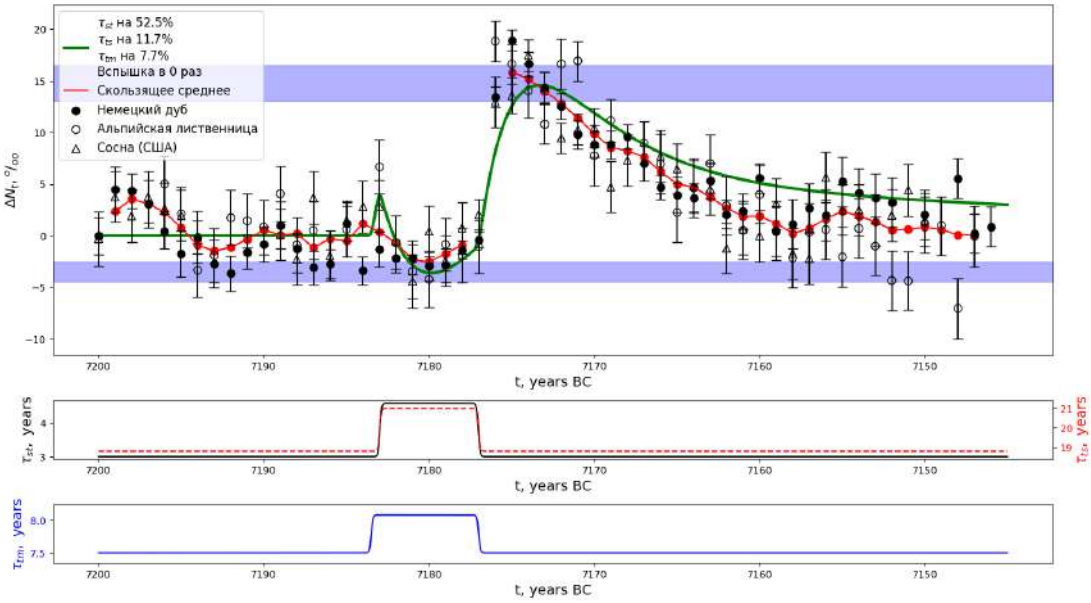


Рис. 2. Событие Мияке 7176 г. до н.э.

Литература

1. Дорман Л.И. Особенности исследования вариаций космических лучей радиоуглеродным методом / Труды шестого всесоюзного совещания по проблеме «Астрофизические явления и радиоуглерод», 13-15 октября 1978 г. – Тбилиси: изд. Тбилисского ун-та, 1978. – С.49-96.

2. Park J., Southon J., Fahrni S., Greasman P.P., Mewaldt R. Relationship between solar activity and $\Delta^{14}C$ peaks in AD 775, AD 994, and 660 BC // Radiocarbon. – 2017. – Vol. 59 (4). – P. 1147-1156.

3. Brehm N., Christl M., Knowles T.D.J. et al. Tree-rings reveal two strong proton events in 7176 and 5259 BCE // Nat Commun. – 2022. – 13. N 1196.

4. Bard E. Miramont C., Capano M. et. al. A radiocarbon spike at 14300 cal yr BP in subfossil trees provides the impulse response function of the global carbon cycle during the Late Glacial // Phil. Trans. R. Soc. A 381.

Статистический эффект 11-летних циклов солнечной активности в долговременных вариациях действующей высоты слоя E-спорадического ионосферы в средних широтах

Куминов А.А.
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Россия
airship@mail.mipt.ru

Временны**е** ряды ежечасных значений действующей высоты слоя *E*-спорадического ионосферы (*h'Es*), полученные на европейских станциях *Dourbes* (1958-1988 гг), *Uppsala* (1965-1989 гг), *Slough* (1967-1989 гг), *Poitiers* (1970-1989 гг), *Москва* (2007-2025 гг), были подвергнуты Фурье-анализу. В спектрах амплитуд были выделены области низкочастотных гармоник с периодами, б**о**льшими одного года. Для каждой станции эти гармоники были просуммированы, что дало сглаженные ряды данных, очищенные от «высокочастотного шума». Предполагается, что они должны содержать следы трендов, эффекты 11-летних циклов солнечной активности и иные долговременные вариации. С целью выявления влияния именно 11-летних циклов солнечной активности, был проведен кросскорреляционный анализ величин *h'Es* из сглаженных рядов данных и ежедневных величин индекса солнечной активности $F_{10.7}$ – наблюденных плотностей потока солнечного радиоизлучения на частоте 2800 МГц (1947-2025 гг). Последние также были подвергнуты очистке от «высокочастотного шума» по упомянутой выше методике. Смещение каждого ряда *h'Es* по времени вдоль ряда $F_{10.7}$ с суточным шагом позволило построить кросскорреляционные функции, аргументами которых были запаздывания рядов *h'Es* по отношению к ряду $F_{10.7}$ по времени.

Обнаружено, что максимальные значения коэффициента корреляции для разных станций лежат в диапазоне 0,29÷0,85 при среднем запаздывании 5 лет.

Аналогичная процедура с использованием ряда *Dst* (1957-2025 гг) – индекса геомагнитной активности (вместо ряда $F_{10.7}$) обнаружила, что экстремальные значения коэффициента корреляции для разных станций лежат в диапазоне -0,27÷-0,86 при среднем запаздывании 3 года.

Модель пенумбры протонов космических лучей в околоземном пространстве

Малахов В.В.[1]
[1]*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*
vvmalakhov@mephi.ru

В докладе будет представлена модель области пенумбры протонов космических лучей в околоземном космическом пространстве. Модель основана на траекторных расчётах в пакетах программ OTSO [1] и GT [2] для магнитоспокойных периодов. В основе модели лежит анализ структуры запрещённых и разрешённых полос жёсткостей, образующих характерный «штрих-код» в этой области. В рамках предлагаемого подхода вся область разбивается на стабильные широкие (>10МэВ) запрещённые и разрешённые, а также нестабильные области (см. рисунок 1)

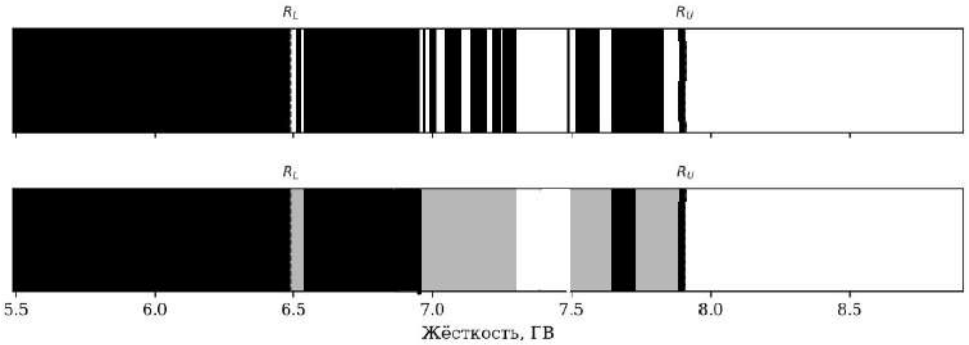


Рис. 1 Разбиение области пенумбры на стабильные разрешённые (белые), запрещённые (чёрные) и нестабильные (серые) зоны. Сверху оригинальный «штрих-код», снизу – разделённый на стабильные зоны.

В качестве параметров, характеризующих структуру области, были введены следующие:

1. Ширина пенумбры (ширина между первой разрешённой полосой и последней запрещённой в ГВ)
2. Количество стабильных (не серых) полос шириной более 100 МВ
3. Количество стабильных полос шириной более 400 МэВ
4. Ширины самой широкой запрещённой, разрешённой и серой полос.
5. Суммарная ширина всех запрещённых зон
6. Суммарная ширина всех разрешённых зон
7. Суммарная ширина всех серых зон
8. Отношение суммарной ширины всех разрешённых полос к ширине пенумбры
9. Отношение суммарной ширины всех серых зон к ширине пенумбры

Модель представляет из себя географическое и угловое распределение этих параметров. В рамках работы получены 5-мерные распределения каждого из параметров в пространстве широт, долгот, высот, зенитного и

азимутального углов. На рисунке 2 в качестве примера приведена географиеская карта ширины пенумбры на высоте 400 км для вертикального направления.

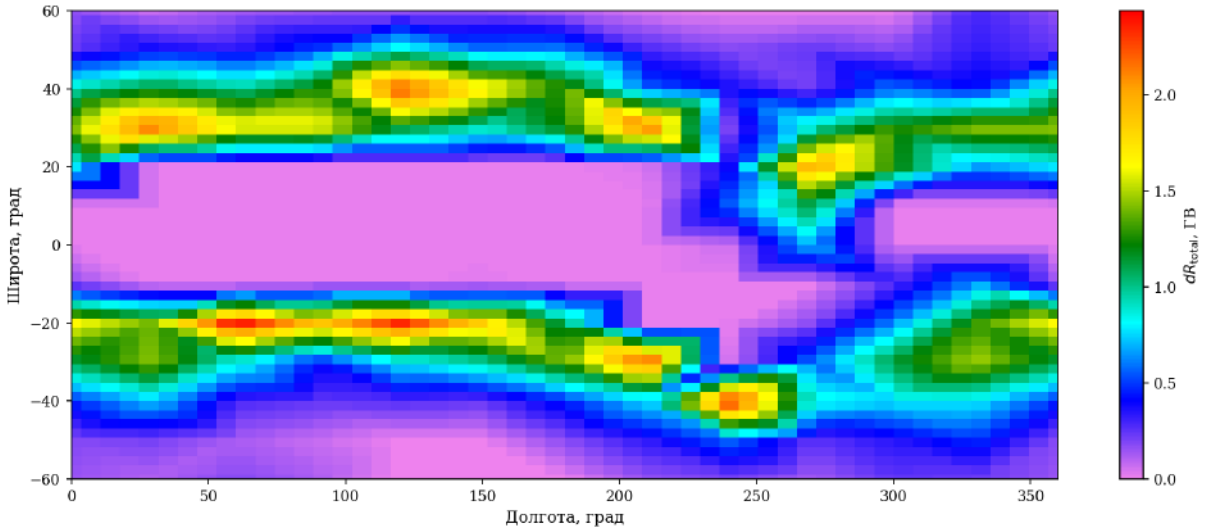


Рис. 2 Географическое распределение ширины пенумбры на высотк 400 км для вертикального направления

Литература

1. Larsen, N., Mishev, A. and Usoskin, I. (2023) “A New Open-Source Geomagnetosphere Propagation Tool (OTSO) and Its Applications,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(3). Available at: https://doi.org/10.1029/2022JA031061.

2. Mayorov, A. et al. (2026) “GT simulation: A numerical package for cosmic ray trajectory tracing in electromagnetic fields,” Computer Physics Communications, 325, p. 110202. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cpc.2026.110202.

Динамика дифференциальных спектров протонов во время СПС и оценка скорости ионизации высокоширотной атмосферы Земли

Маурчев Е.А.[1], Диденко К.А.[1]
[1]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Троицк, Россия*
maurchev@izmiran.ru

В этой работе изучается динамика энергетической спектральной характеристики протонов космических лучей во время солнечных протонных событий, а также проводится оценка скорости ионизации высокоширотной атмосферы Земли. Дифференциальные спектры были восстановлены на основе измерений спутника GOES и аппроксимированы логнормальной функцией со степенным хвостом. Моделирование прохождения протонов космических лучей через атмосферу Земли выполнено при помощи программного комплекса RUSCOSMICS, основанного на GEANT4, с использованием модели атмосферы NRLMSISE-00. Жесткость геомагнитного обрезания R = 0.17 ГВ была выбрана как соответствующая высокоширотному региону. В результате работы была проведена оценка формы спектров в разные моменты времени солнечных протонных событий, а также исследовано влияние спектральных характеристик на высоту и абсолютные значения пика ионизации.

Потенциальная опасность возникновения экстремальных геоиндуцированных токов при повторении экстремальных магнитных бурь 1859 и 1989 гг.

Огородников А.В.[1], Пилипенко В.А.[1,2]
[1] *Институт физики Земли РАН, Москва, Россия*
[2] *Геофизический Центр РАН, Москва, Россия*
Pilipenko_va@mail.ru

Сбои в энергосистемах, вызванные геоиндуцированными токами (ГИТ) во время экстремальных магнитных бурь, грозят коллапсом для человечества, слишком зависимого от современных технологий. В работе сравниваются характерные особенности трех экстремальных магнитных бурь: 1–2 сентября 1859 г. (событие Кэррингтона с оценочным среднесуточным |Dst|~850 нТл), 13 марта 1989 г. (Hydro-Quebec коллапс со среднесуточным |Dst|~590 нТл), 30-31 октября 2003 г. (Halloween буря с максимальным |Dst|~410 нТл). Для бури 1859 г. данные магнитных станций в Англии были оцифрованы и пересчитаны в физические единицы, и теперь стали доступны для анализа. Мы оценили возможные риски возбуждения интенсивных ГИТ во время этих трех экстремальных бурь, сопоставляя вариабельность поля dB/dt. Сопоставление показывает, что величина Dst не связана однозначно с величиной вариабельности поля dB/dt, поэтому интенсивность кольцевого тока не является надежной характеристикой геоэффективности бури относительно возбуждения ГИТ.

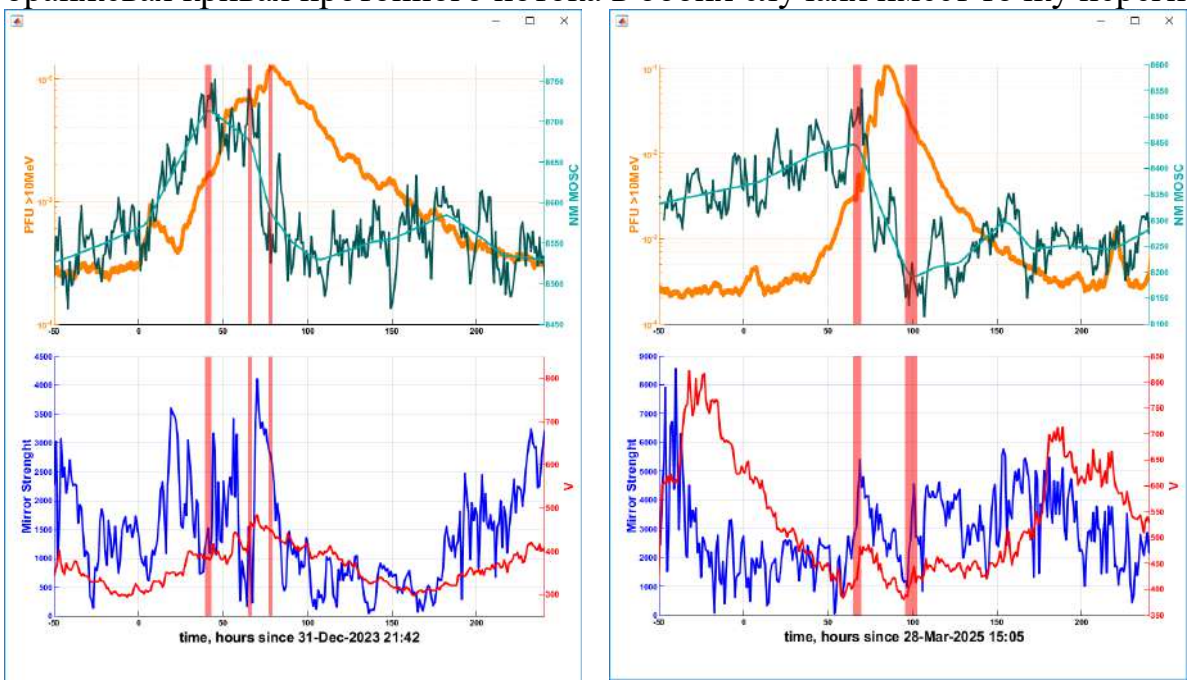
Работа поддержана грантом РНФ 21-77-30010-П.

Восточные вспышки как источник солнечных протонов, штормовых частиц и форбуш-понижений

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

Восточные вспышки с ассоциированными слабыми КВМ практически никогда не являются источниками значимых протонных возрастаний. Ситуация кардинально меняется, если восточная вспышка сопровождается высокоскоростным КВМ. Гипотеза состоит в том, что в этом случае протоны активно движутся поперек направления спиралей Паркера за счет множественного пересоединения магнитных линий. Вместо «радиального» движения и крайне медленной поперечной диффузии происходит достаточно быстрое распространение энергичных протонов. Современные солнечные инструменты не позволяют подтвердить или опровергнуть эту гипотезу прямыми измерениями. Однако, мы предлагаем косвенный метод проверки, основанный на одновременном отслеживании протонного потока > 10MeV на спутниках GOES и замагниченных структур солнечного ветра в точке L1. Рассматриваются пять восточных вспышек: 07.09.2005 X17 S06E89, 25.02.2014 X4.9 S12E82, 31.12.2023 X5.0 N04E73, 14.09.24 X4.5 S15E56 и 28.03.2025 X1.1 N02E76, которые сопровождались высокоскоростными КВМ (средняя скорость порядка 2000км/сек) и дали значимое протонное возрастание на орбите Земли раньше, чем туда успели прийти протоны, захваченные структурами солнечного ветра, что подтверждает гипотезу. В качестве иллюстрации рассмотрим события 31.12.2023 и 28.03.2025 (см. рисунки). Чтобы объективно оценить время прихода порождаемых вспышкой магнитных структур солнечного ветра, мы ищем положение интервалов перелома тренда на очищенных от суточных вариаций данных нейтронного монитора NM MOSC. Внешняя поверхность структур солнечного ветра работает как магнитное зеркало, не пропуская внутрь галактические космические лучи, поэтому приход «стенки» такой структуры на орбиту Земли создает точку перелома тренда (бордовые столбики) в сигнале с нейтронного монитора (циан). Отражающая сила этого магнитного зеркала (условно обозначаемая на графиках как Mirror Strength) является монотонно растущей функцией величины векторного произведения $\mathbf{V}\times\mathbf{B}$, которую мы приближенно оцениваем как произведение скорости солнечного ветра на перпендикулярную направлению распространения солнечного ветра компоненту магнитного поля: $V\sqrt{B_y^2+B_z^2}$. Резкий рост скорости V одновременная смена режимов динамики параметра $V\sqrt{B_y^2+B_z^2}$, синхронизированная с найденными по точкам перелома моментами понижения и затем восстановления уровня интенсивности галактических

лучей, свидетельствует о входе и последующем выходе Земли из магнитной структуры солнечного ветра. Если задолго до момента пересечения Землей передней «стенки» такой структуры наблюдалось значимое протонное возрастание, то оно было обязано исключительно поперечному распространению частиц. Действительно, в обоих случаях, 31.12.2023 и 28.03.2025, мы видим почти одновременное с моментом начала вспышки (ноль по горизонтальной оси) первичное протонное возрастание (оранжевая кривая), которое, однако, спустя несколько часов начинает резко затухать вследствие короткого времени жизни созданных эрупцией поперечных магнитных линий. Далее, мы видим начало вторичного протонного возрастания, обусловленное диффузией частиц через полупрозрачные магнитные «стенки» структур солнечного ветра (на Земле вначале регистрируются протоны, которые структура выпустила из себя, и только затем – те, что захвачены внутри). Далее, момент первого перелома тренда в сигнале нейтронного монитора совпадает с резким подъемом скорости (красная кривая) и со сменой режима флуктуаций в параметре Mirror Strength, что сигнализирует о начале протонного шторма (в этом месте оранжевая кривая протонного потока в обоих случаях имеет точку перегиба).



Динамика уровня галактических космических лучей (темно-бирюзовый это исходный сигнал с NM MOSC, ярко-бирюзовый – очищенный от суточных вариаций тренд). Оранжевая кривая изображает интенсивность протонного потока в PFU. Нижняя панель относится к параметрам солнечного ветра: скорость (красная линия) и сила магнитного зеркала структуры (синяя кривая)

Особенности пространственной морфологии геомагнитного эффекта солнечной вспышки

Петрищев М.С.[1]
[1]*СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия*
ms_petr@mail.ru

Доклад опирается на результаты предыдущего исследования автора [1] и посвящен их детальному обсуждению. Геомагнитный эффект солнечной вспышки (SFE) в традиционной интерпретации сводится к простому масштабированию *Sq*-системы из-за резкого усиления ионосферной проводимости [2], что не предполагает образования новых токовых структур. Однако в ряде работ показано, что SFE не сводится к простому масштабированию спокойной солнечно-суточной *Sq*-вариации – наблюдаются фазовые сдвиги, смещение центров вихрей и другие морфологические отличия. Основная задача исследования – проверить предположение о том, что значимый вклад в формирование геометрии вспышечного отклика вносят горизонтальные градиенты ионосферной проводимости, обусловленные неравномерностью солнечного освещения. Объектом анализа выбрана мощная вспышка класса X9.3, произошедшая 6 сентября 2017 г.

С применением метода сферических элементарных токовых систем [3] по результатам обработки данных 89 геомагнитных обсерваторий было выполнено восстановление пространственной структуры эквивалентных ионосферных токов. Установлено, что токовые функции SFE наследуют вихревую конфигурацию *Sq*, однако распределения их амплитуд существенно различаются. Радиальный профиль полной горизонтальной магнитной компоненты вспышечного отклика имеет второй, более выраженный, максимум при солнечных зенитных углах 55–75°. В распределении радиальной магнитной компоненты вспышечного отклика выделяется кольцевая знакопеременная структура со сменой знака при указанных зенитных углах, для *Sq* аналогичная структура практически отсутствует.

Корреляционный анализ позволил установить тесную связь между амплитудами SFE и модулем горизонтального градиента потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы. При этом зависимость от косинуса солнечного зенитного угла оказалась незначительной. Для фоновой *Sq*-вариации подобные связи выражены слабо. Это позволяет сделать вывод о том, что горизонтальные градиенты освещенности могут вносить существенный вклад в формирование пространственной структуры вспышечного отклика, выступая важным фактором наряду с абсолютным уровнем фотоионизации.

Для интерпретации этих фактов автором ранее был предложен механизм, учитывающий инерционность глобального электрического поля

суточного динамо [1]. Предложенный градиентный механизм не заменяет традиционное представление о SFE как о простом масштабировании Sq-системы, а дополняет классическую модель, объясняя локальные аномалии. Полученные результаты основаны на анализе одного события и требуют проверки на расширенной статистике вспышек различной мощности.

Литература

1. Петрищев М.С. Кольцевая структура геомагнитных возмущений во время солнечной вспышки X9.3 // Геомагнетизм и аэрономия. 2026. Т. 66. № 5. С. 887–904. DOI: 10.7868/S3034502226050044

2. Curto J.J. Geomagnetic solar flare effects: a review // J. Space Weather Spac. 2020. V. 10. ID 27. https://doi.org/10.1051/swsc/2020027

3. Amm O. Ionospheric elementary current systems in spherical coordinates and their application. J. Geomagn. Geoelectr. 1997. V. 49. No. 7. P. 947–955. https://doi.org/10.5636/jgg.49.947

Анализ вклада параметров эруптивных процессов в прогноз профиля солнечного протонного события

Рославцев С. В.[1], Н. А. Власова[2], В. В. Калегаев[1,2]
[1]МГУ имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,
[2] НИИЯФ имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия
roslavtcev.sv22@physics.msu.ru

Целью работы является определение относительной значимости наблюдательных параметров источников солнечных энергичных частиц при прогнозе максимального потока протонов с энергией >10 МэВ и профиля фазы его нарастания методами машинного обучения. Такой прогноз по мере поступления данных опирается на характеристики родительского явления на Солнце и на уже наблюдённую часть возрастания. Помимо параметров вспышки в мягком рентгеновском диапазоне доступны и другие наблюдения солнечной эрупции: параметры корональных выбросов массы (КВМ) по данным коронографа SOHO/LASCO, радиовсплески II и III типов по данным Wind/WAVES, потоки надтепловых электронов по данным ACE/EPAM. Всплеск II типа порождается ударной волной, всплеск III типа — пучками электронов, уходящих вдоль открытых силовых линий, а околорелятивистские электроны достигают орбиты Земли раньше протонов.

Базовая модель — свёрточная нейронная сеть с расширенными причинными свёртками, привязанная к наблюдённой части профиля по данным спутников GOES. Обучение выполнено по событиям 23 и 24 циклов солнечной активности, тестирование — по 51 событию 25 цикла. Проверено 26 признаков: линейная и депроецированная скорость КВМ, его угловой раствор и ускорение; наличие, граничные частоты и длительность всплеска II типа; интенсивность излучения III типа на частоте 1 МГц и скорость накопления радиофлюэнса; время начала возрастания и темп нарастания потока электронов. Каждый признак подавался в отдельную позицию входного вектора неизменной длины. Дополнительно была произведена проверка значимости признаков — порог откалиброван по 18 контрольным признакам, не несущим сведений о событии (гауссов шум).

Вклад каждого признака оценивался раздельно по интервалам времени от начала прогноза, поскольку оценка, усреднённая по всей длительности события, нечувствительна к признакам, действующим в начале возрастания. Проверку против контрольных признаков проходят только радиофизические характеристики; параметры КВМ и потоки электронов порога значимости не превышают, несмотря на то что скорость КВМ обладает наибольшей в наборе корреляцией с максимальной интенсивностью потока протонов. Наиболее значимыми оказались интенсивность излучения III типа на частоте 1 МГц и скорость накопления радиофлюэнса в километровом диапазоне. Обсуждаются полученные результаты и высказываются предположения о значимости различных механизмов ускорения при генерации солнечных энергичных протонов.

Влияние рентгеновского излучения солнечной вспышки X2.2 20 апреля 2022 г. на распространение СДВ

Рябова С.А.[1,2], Сурков В.В.[1], Зинкин Д.А.[1], Пилипенко В.А.[1]
[1]*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*
[2]*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия*
riabovasa@mail.ru

Одним из факторов, влияющих на ионосферу, являются солнечные вспышки. В результате увеличения плотности потока энергии во время солнечной вспышки изменяются электронная концентрация в ионосфере и эффективная высота отражающего слоя волновода Земля-ионосферв, что, в свою очередь, приводит к изменению амплитуды и фазы сверхдлинноволновых (СДВ) радиосигналов в точке приема [1, 2].

В настоящей работе были проанализированы вариации СДВ сигналов, принимаемые станцией в Петропавловске-Камчатском, для солнечной вспышки 20 апреля 2022 г. с максимумом в 03:57 UTC в активной группе пятен 2992 на западном лимбе Солнца. По данным измерений рентгеновского излучения точный класс события составляет X2.2, что делает его самым крупным с 6 сентября 2017 года, когда была зарегистрирована вспышка такого же уровня.

Вычислены амплитуды и фазы СДВ радиосигналов с использованием полуаналитической модели, предложенной в работе [3] для расчета изменений концентрации в ионосфере под действием рентгеновского излучения и радиофизической модели LWPC. Проводилось сравнение модельных расчетов амплитуды и фазы СДВ сигналов, вызванных вспышкой, с данными измерений, которое показало близость по форме расчетных и измеренных вариаций СДВ сигналов.

Работа поддержана грантом РНФ 25-27-00539.

Литература

1. Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Ляхов А.Н., Поклад Ю.В., Рыбаков В.А., Ряховский И.А. Восстановление параметров среднеширотной нижней ионосферы при солнечных вспышках M- и X-классов // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 6. С. 762–768. DOI: 10.31857/S0016794020060048

2. Basak T., Chakrabarti S.K. Effective recombination coefficient and solar zenith angle effects on low-latitude D-region ionosphere evaluated from VLF signal amplitude and its time delay during X-ray solar flares //Astrophysics and Space Science. 2013. Vol. 348. No. 3. https://doi.org/10.1007/s10509-013-1597-9

3. Surkov V.V. The effect of X-ray radiation from a solar flare on the frequencies of Schumann resonances // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2025. Vol. 271. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106537

Сильные магнитные бури и сейсмическая активность Земли: сравнительный анализ данных наблюдений

Хегай В.В.[1], Легенька А.Д.[1], Корсунова Л.П.[1]
[1]*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*
hegai@izmiran.ru

Получено независимое подтверждение результата работы [Гульельми и др., 2015] о снижении глобальной сейсмической активности Земли (САЗ) после внезапного импульса (SSC/SC) для сильных геомагнитных бурь с внезапным началом [Хегай и Легенька, 2025]. При этом ВПЕРВЫЕ показано [Хегай и Легенька, 2025; Хегай и др., 2026] (на основании ограниченной, но достаточно большой статистики с помощью метода наложения эпох, МНЭ), что при развитии сильных геомагнитных бурь с постепенным началом наблюдается значимый рост САЗ в сутки пика бури (нулевые) по *DST*-индексу для «коротких» геомагнитных бурь. Еще более существенное увеличение САЗ наблюдается на +7-ые сутки после пика бури для «длинных» геомагнитных бурь.

В качестве базовой меры интенсивности глобальной САЗ было принято число сильных (с магнитудой $M \geq 5.0$) коровых (глубина гипоцентра $0 \leq h \leq 60$ км) землетрясений в сутки (N_{EQ}) по всему миру и при этом рассматривались только сильные магнитные бури, отвечающие условию $DST_{extr} \leq -150$ нТл. Для бурь с постепенным началом был рассмотрен также диапазон магнитуд $M \in [4.0, 4.9]$.

«Короткими» считались такие геомагнитные бури, когда $\Delta T_{DSTextr} \leq 24$ ч, а «длинными» - те, для которых $\Delta T_{DSTextr} > 24$ ч. Величина $\Delta T_{DSTextr}$ определялась как интервал времени между максимальным значением *DST*-индекса перед началом главной фазы геомагнитной бури (DST_{max}) и моментом времени DST_{extr}.

Предлагаются и обсуждаются возможные физические механизмы для объяснения такого поведения глобальной САЗ в периоды сильных геомагнитных бурь.

Литература

1. Гульельми А.В., Лавров И.П., Собисевич А.Л. Внезапные начала магнитных бурь и землетрясения // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 1. С. 98–103. 2015.

2. Хегай В. В., Легенька А. Д. Сильные геомагнитные бури и глобальная сейсмическая активность Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 65. № 5. С. 739–752. 2025. DOI: 10.7868/S3034502225050165

3. Хегай В. В., Легенька А. Д., Корсунова Л. П. Сильные магнитные бури с постепенным началом и сейсмическая активность Земли: сравнительный анализ данных наблюдений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 66. № 4. С. 755–770. 2026. DOI: 10.7868/S3034502226040078

Анализ повышений скорости счёта в нейтронных мониторах

Челидзе К.С.[1], Петрухин А.А.[1]
[1]*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*
KSChelidze@mephi.ru

Наблюдения вариаций интенсивности вторичного космического излучения с использованием наземных нейтронных мониторов позволяют исследовать проявления солнечной активности и распространение солнечных космических лучей в околоземном пространстве. Одной из задач при обработке данных нейтронных мониторов является выявление кратковременных повышений интенсивности на фоне постоянных флуктуаций, например Ground Level Enhancement (GLE), и последующая оценка их статистической значимости.

В работе представлен алгоритм автоматического поиска повышений в открытых данных сети нейтронных мониторов (NMDB [1]). Алгоритм предназначен для первичного выделения повышений скорости счёта и последующего определения статистически значимых изменений интенсивности.

Для анализа используются временные ряды счёта нейтронных мониторов. Данные берутся с коррекцией на атмосферное давление и на эффективность для каждой станции. За одну итерацию программа анализирует временной промежуток равный 48 часам. Внутри выбранного окна проводится поиск вариаций интенсивности космических лучей, наблюдаемых в работающих станциях. На выходе даётся массив, содержащий даты, амплитуды и примерные длительности повышений скорости счёта. Такой подход позволяет осуществлять поиск событий на больших массивах данных без необходимости визуального просмотра временных рядов.

Для дополнительной оценки значимости обнаруженных повышений используется метод кумулятивной суммы, предложенный в статье [2]. Метод позволяет выявлять устойчивые изменения статистических характеристик временного ряда и оценивать, насколько наблюдаемые отклонения отличается от случайных флуктуаций. В качестве критериев отбора рассматриваются повышения, соответствующие уровню статистической значимости более 3σ.

Разработанная программа была применена к данным сети нейтронных мониторов за период с 1970 по 2026 года. В результате автоматического анализа было обнаружено более 200 эпизодов повышения интенсивности. Для дальнейшего анализа из общего числа кандидатов выделены несколько наиболее интересных событий, которые можно сопоставить с уже известными событиями GLE. Для них проводится детальное сравнение временных профилей на различных станциях и оценка статистической значимости с использованием метода кумулятивной суммы. Далее

рассматриваются возможные источники повышений и наличие одновременных наблюдений солнечных протонных событий.

Полученные результаты показывают перспективность автоматизированного анализа данных нейтронных мониторов для систематического поиска кратковременных вариаций интенсивности космического излучения.

Литература

1. http://www.nmdb.eu
2. Poluianov, S., Mishev, A., Kryakunova, O. et al. Ground-Level Enhancement of 8 June 2024 (GLE 75) Caused by Solar Energetic Particles. Sol Phys 300, 113 (2025). https://doi.org/10.1007/s11207-025-02518-9

Влияние геомагнитной активности на дорожно-транспортную ситуацию в городе

Шибаев А.И.[1], Шибаев И.Г.[2]
[1]МГУ им.М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[2]ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия
alexshibaev@yandex.ru

Известно воздействие повышенной геомагнитной активности (ГА) на спутниковую связь с навигацией и работу электроэнергетических сетей [1-2]. К вариациям различных факторов внешней среды также чувствительна нервная система человека. При геомагнитных возмущениях, например, изменяется целый ряд психофизических параметров, что скажется на функциональных и поведенческих показателях человека. Это может привести к ошибочным решениям. [3].

Функционирование и развитие современного общества тесно связано с дорожным транспортом. Дорожно-транспортные происшествия (ДТП) имеют различные причины, но ключевую роль в них играет человеческий фактор. В работе, опираясь на Kp-index, исследуется связь ГА и числа ДТП в г. Лос-Анджелес, США.

Литература

1. Astafyeva E. et al. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. V. 12. I. 7. P. 508-525. 2014.
2. Baker D.N. et al. Effects of space weather on technology infrastructure // Space Weather V. 2 I. 2. P. 20-22. 2004.
3. Григорьев П.Е. и др. Авиационные происшествия и космофизические факторы:ретроспективный анализ данных 1910-1940 гг. // Пространство и время, № 3-4. с. 251-260. 2016.

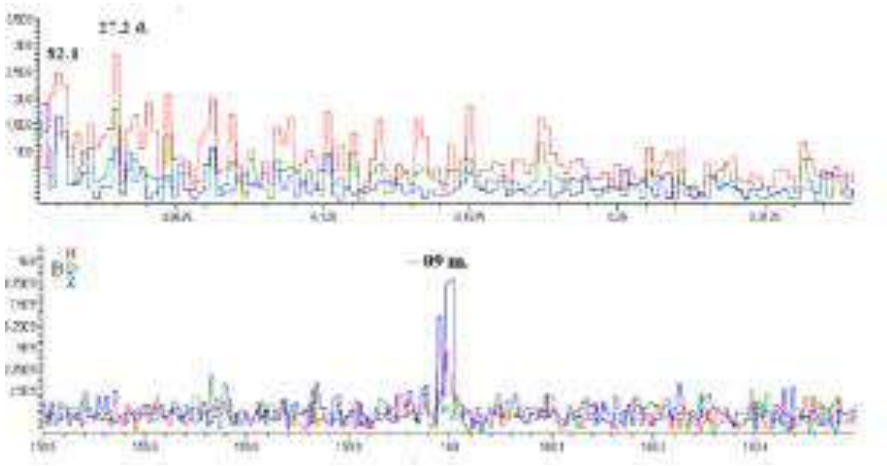
Геомагнитная активность в эпизодических событиях и при длительных наблюдениях

Шибаев И.Г.[1], Теодосиев Д.[2]
[1]*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*
[2]*ИКИТ БАН, г. София, Болгария*
ishib@izmiran.ru

В работе, на расширенном материале, представлены итоги проекта "Шуман" (выполнялся в рамках российско-болгарского сотрудничества и завершился в 2018 г.). Фиксировались три магнитные компоненты, две электрические и акустический канал, время квантования 0.5 сек. [1].

Регистрация и анализ как эпизодических событий (солнечные вспышки разного класса, прохождение грозовых облаков), так и длительных регулярных наблюдений (влияние светового дня и Луны на динамику суточных компонент) демонстрируют качество данных.

Высокочастотная часть спектра годовых массивов B-компонент содержит периоды ~9 и 18 минут. Спектральные представления лунного периода и 9-минутной гармоники иллюстрирует рисунок ниже.



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

Устойчивые проявления, в разные периоды длительных наблюдений, гармоник ~18 минут говорит о регулярности их генерации.

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

Литература

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

Связь возрастаний высокоэнергичных электронов с разными типами межпланетных возмущений

Шлык Н.С., Белов С.М., Абунина М.А., Белов А.В.
ИЗМИРАН, Москва, Россия
nshlyk@izmiran.ru

В работе исследуются возрастания потоков высокоэнергичных (>2 МэВ) магнитосферных электронов на геостационарных орбитах за период с 1986 по 2024 гг., возникшие в результате воздействия межпланетных возмущений трех различных типов: (1) корональных выбросов массы, (2) потоков плазмы из корональных дыр и (3) их комбинаций. Проанализированы связи различных характеристик межпланетных и геомагнитных возмущений с максимальным потоком магнитосферных электронов и временем его регистрации. Также с помощью метода наложения эпох показано, что все три группы межпланетных возмущений по-разному воздействуют на регистрируемые впоследствии потоки электронов. Установлено, что учет типов межпланетных возмущений позволяет точнее прогнозировать уровень и длительность опасных электронных возрастаний.

Секция 7.
Солнечно-звёздные аналогии, звёздные циклы активности

Характеристики пятен на поверхности красного карлика V639 HER

Бондарь Н.И. [1]*,Кожевникова А.В. [2], Антонюк К.А. [1], Пить Н.В.[1]
[1]ФГБУН Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Россия
[2] Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
**otbn@mail.ru*

Звезда V639 Her (GJ 669 B, V=12.92) – слабый компонент астрометрической двойной системы GJ 669 AB, находящейся на расстоянии 10.75 пк от Солнца. Спектральный класс звезды M4.5 V и согласно массе, равной 0.31 $M_\odot$, она является полностью конвективной звездой, проявляющей активность в разных спектральных диапазонах. Возраст звезды не превышает 300 млн лет [1], период осевого вращения составляет 1.45 сут [2].

По результатам ПЗС-фотометрии в полосах BV(RI)$_c$, выполненной в Крымской астрофизической обсерватории в 2019, 2022, 2024 гг. на 1.25-м рефлекторе, исследовано поведение блеска звезды, получены фотометрические данные, необходимые для оценки параметров пятен в рамках зональной модели [3]. Значение блеска незапятненной фотосферы V_{max}=12.88 принято по наблюдениям 2019 г., амплитуда вращательной модуляции блеска в разные сезоны составляла $0.03<A_{mod}<0.08$, определены сезонные величины ΔV_{max}, коэффициенты $\Delta B/\Delta V$=1.019±0.03, $\Delta R/\Delta V$=0.607±0.02, $\Delta I/\Delta V$=0.42±0.03. В расчетах приняты физические параметры звезды: T_{eff} = 2667 K, угол наклона оси вращения $\imath$ = 40^o. log g=4.5 [4].

В 2019 г. пятна формировались в широтном поясе $47^o<\phi<69^o$, в 2022 - $37^o<\phi<52^o$, в 2024 - $29^o<\phi<46^o$, т.е. область формирования пятен смещалась к экватору. Пятна наблюдались на обеих полусферах, при этом, одна из полусфер запятнена в большей степени - по наблюдениям 2019 г. и 2022 г. почти в 3 раза, в 2024 г. различие составило 23%. Занимаемые пятнами площади, выраженные в процентах от полной поверхности звезды составили $9<S_{spot}<23$ (%), с наибольшей площадью покрытия в 2024 г., в 2022 г. занимаемая площадь была меньше почти в 2 раза - 9-12%. В максимуме блеска, в один из сезонов 2019 г., звезда оставалась запятненной на 12%. Средняя температура пятен составила 2490±50 K, что на 177 K ниже температуры фотосферы звезды.

Сравнение полученных параметров пятен выполнено с результатами моделирования для красных карликов EV Lac (такого же спектрального класса) [5] и V647 Her (M3.5 V) [6]. Температура пятен у звезды V647 Her по наблюдениям в 2019 г. и 2022 г. составила 2700 K, что на 600 K ниже T_{eff} = 3300 K. Пятна занимали 26% площади поверхности в 2019 г., а в 2022 г. – 32%, зона формирования пятен в 2019 г. ограничена широтой 16^o, а в 2022 - 20^o, предельные значения площади запятнения $8< S_{spot}<32$ (%) наблюдались в

2007 г. (S_{min}), когда звезда была в максимуме блеска, и в 2022 г. (S_{max}) при минимальном блеске.

У EV Lac 8< S_{spot}<27 (%), ширина полосы запятнения, которая примыкает к экватору, 6<$\Delta\phi$<20 градусов, T_{eff} = 3300 K, температура пятен на 340-190 К ниже.

Таким образом, в эпохи наблюдений звезды V639 Her площадь ее запятнения была сравнима с площадью запятнения поверхности EV Lac , но на 28% меньше, чем у V647 Her, пятна у V639 Her более холодные, чем у указанные звезд, и формируются в области высоких и средних широт.

Литература

1. Quiroga-Nuñez L.H., Intema H.T., Callingham J. R., Villadsen J., Langevelde H. J., et al. // Astron. Astrophys. V. 633. id. A130, 9 pp., 2020.

2. Бондарь Н. И., Антонюк К. А., Пить Н. В. // Геомагнетизм и Аэрономия, Т. 65, № 7, с. 998–1004, 2025.

3. Alekseev I.Yu., Gershberg R.E. // Astron. Rep., V. 40, No. 4, pp. 528–537,1996.

4. Pass E. K., Charbonneau D., Irwin J. M., and Winters J. G. // AphJ., 936:109 (20pp), 2022.

5. Алексеев И. Ю. Запятненнные звезды малых масс. Одесса: Астропринт, 2001, 137 с.

6. Bondar’ N. I., Alekseev I. Yu., Antonyuk K. A., and Pit’ N. V. // Geomagnetism and Aeronomy, V. 64, No. 8, pp. 132–139, 2024.

Об ультрафиолетовом излучении вспыхивающих М-карликов

Гершберг Р.Е.[1], Шляпников А.А.[2], Бескин Г.М.[3]
[1]*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия*
[2]*Независимый исследователь-астрофизик, Научный, Крым, Россия*
[3]*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия*
gershberg@craocrimea.ru

Успешная разработка на НПО имени С.А. Лавочкина серии аппаратов «Венера» и успешное проведение на одном из аппаратов этой серии Крымской астрофизической обсерваторией РАН космического эксперимента «Астрон» позволили в середине 80-х годов выдвинуть на десятилетия вперёд амбициозные проекты трёх космических экспериментов «Спектр» для изучения радиоизлучения, высокоэнергетического излучения в диапазонах рентген-гамма и ультрафиолетового излучения небесных тел. Эксперимент Радиоастрон успешно выполнен, достигнутое в нём рекордное угловое разрешение позволило получить ряд принципиально новых результатов. В рамках эксперимента Спектр-РГ получен огромный и во многом уникальный наблюдательный материал, освоение которого ведётся в Германии и в России. По эксперименту Спектр-УФ обещано финансирование для его запуска в 2031 году. В связи с этим возрастает активность к его подготовке. В июне текущего года в ИНАСАНе - ведущей научной организации по этому эксперименту - была проведена конференция «УФ Вселенная 2026». Мы продолжаем работать над заявленным сообщением «Об ультрафиолетовом излучении вспыхивающих М-карликов».

По своей численности красные карлики превосходят все другие звёздные совокупности, выделяемые как общие носители тех или иных физических и/или эволюционных характеристик. Эти объекты составляют большую часть звёзд с активностью солнечного типа и значительная доля красных карликов является вспыхивающими. Их ультрафиолетовое излучение состоит из двух компонент: излучения верхних слоёв атмосферы - хромосфер и корон, с характерными временами изменения в годы, и излучения спорадических звёздных вспышек длительностью от секунд до многих часов. Анализ этих излучений позволяет получать представление о физической структуре этих компонент и их влиянии на атмосферы открываемых у звёзд экзопланет.

Более половины предлагаемого сообщения составляет раздел «Что известно об ультрафиолетовом излучении вспыхивающих красных карликов». И какая космическая техника привела к этому. М-карликам посвящены тысячи работ, и в этом разделе мы обсуждаем менее сотни из них, в которых рассмотрены основные наблюдаемые характеристики этих звёзд в спокойном состоянии и во время вспышек. Завершается этот перечень упоминанием об открытии Г.М. Бескиным субсекундных всплесков

синхротронного излучения во вспышке UV Cet [1]. Полтора десятка рисунков из этих работ включены в эти обсуждения.

Данная работа заканчивается соображениями об отборе М-карликов для эксперимента Спектр-УФ. Прежде всего, необходимо повторить те наблюдения, которые дали ранее принципиально важные результаты с более современной техникой. Далее, здесь отмечается особое положение среди подтипов М карликов М3-М4, оно состоит в том, что они отделяют звёзды более высоких масс и температур, где протекают термоядерные реакции, от менее массивных и более холодных звёзд, где такие реакции происходят гораздо медленнее. И мы предлагаем по данным будущих наблюдений на Спектре-УФ провести сравнение физико-химических характеристик представительных наборов карликов субтипов М0-М1 с М3-М4 и М5-М6 и организовать их наземный синхронный мониторинг на разных телескопах в оптическом диапазоне, в том числе на БТА. Наконец, необходимо включить М-карлики с экзопланетами и без них.

Доклад проиллюстрирован спектрами Gl 825, Gl 803, Gl 867A, полученными во вспышках и Gl 867A в спокойном состоянии, наблюдавшимися обсерваторией IUE [2]. Вспышкой EV Lac 24 февраля 1984 года, зарегистрированной на «Астроне» [3]. Наблюдаемыми Бальмеровскими декрементами в максимумах трёх вспышек Gl 866 и их представлением варьированием оптической толщины в Ly-альфа, электронной температуры и плотности [4]. Иллюстрацией запрещённых корональных линий Fe XII $\lambda = 1349$ Å и Fe XXI $\lambda = 1354$ Å в спектре AD Leo [5]. Показаны примеры наблюдаемых спектральных распределений энергии для двух звёзд в сравнении со спектрами моделирования непрозрачности пыли, что актуально для анализа горячих красных карликов, а также продемонстрирована возрастная эволюция ультрафиолетовой и рентгеновской светимости звёзд М0–М3 [6].

Авторы глубоко благодарны Б.М. Шустову и Сергею Сичевскому, ознакомивших нас с актуальными параметрами будущей обсерватории Спектр-УФ и сообщивших ожидаемые возможности для наблюдений.

Литература

1. Beskin G.M. et al. , 2017 – PASA, V. 34, e010, 12 pages.
2. Byrne P.B. et al., 1980 - Irish Astronomical Journal, V. 14, P. 219-226.
3. Гершберг Р.Е., Петров П.П., 1986 – в книге Л.В. Мизояна (ред.) «Вспыхивающие звёзды и родственные объекты». Ереван, издательство Армянской ССР. С. 38.
4. Jevremovic D et al., 1998 – Astronomy and Astrophysics, V. 338, P. 1057-1065.
5. Ayres T.R. et al., 2003 – The Astrophysical Journal, V. 583, P. 963-984.
6. Stelzer B. et al., 2013, – MNRAS, V. 431, P. 2063–2079.

Исследование периодов вращения звезд в скоплениях Плеяды, Гиады и Blanco 1 по данным TESS

Горбачев М.А.[1,2], Хамитов И.М.[2], Бикмаев И.Ф.[2,3]
[1]*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия*
[2]*Академия наук Республики Татарстан, Казань, Россия*
[3]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*
mgorbachev17@gmail.com

Стадия Главной Последовательности является наиболее длительной частью эволюции звезд и характеризуется медленным изменением их макроскопических параметров. Для звезд поздних спектральных классов солнечного типа ключевую роль играет взаимодействие конвекции и осевого вращения, которое генерирует магнитное динамо в основании конвективной зоны. Проявлениями работы динамо служат магнитные пятна, вспышки и другие формы звездной магнитной активности. Обнаружено, что уровень рентгеновской светимости коррелирует со скоростью вращения звезды. При этом наиболее тесная связь наблюдается при сравнении числа Россби с долей рентгеновского излучения в полном электромагнитном излучении [1,2,3]. Эта зависимость имеет режим насыщения для быстровращающихся звезд и ненасыщенный режим для медленных, где чувствительность излучения к малейшим изменениям периода вращения крайне высока. Это делает необходимым получение высокоточных данных о периодах вращения большого числа звезд.

Рассеянные звездные скопления, объединяющие объекты одного возраста и химического состава, выступают в роли идеальных эволюционных лабораторий для таких исследований, а высокоточная фотометрия позволяет измерять периоды вращения по модуляции блеска, вызванной вращением звездных пятен, избегая при этом ограничений спектральных методов, зависящих от наклона оси вращения к наблюдателю. В качестве ключевых объектов для анализа в работе были выбраны три рассеянных скопления (Плеяды, Гиады и Blanco 1), членство звезд в которых подтверждено данными астрометрической миссии Gaia [4]. Скопление Плеяды является одним из богатейших и наиболее известных молодых скоплений с возрастом около 120–135 миллионов лет на расстоянии порядка 135 парсек, насчитывающим более двух тысяч подтвержденных членов. Скопление Гиады представляет собой ближайший к Солнечной системе объект такого типа, удаленный всего на 47 парсек и имеющий возраст около 650 миллионов лет, что позволяет изучать более поздние стадии эволюции магнитной активности. Третьим объектом стало скопление Blanco 1, расположенное на расстоянии около 234 парсек, а его возраст, оцененный по границе истощения лития, составляет примерно 130 миллионов лет, что делает его отличным аналогом Плеяд для сравнительного анализа. Совокупная выборка исследуемых звезд, отобранных на основе каталогов Gaia, составила 2226,

790 и 752 источника для Плеяд, Гиад и Blanco 1 соответственно. Стоит отметить, что несмотря на значительное число опубликованных работ, посвященных переменности звезд этих скоплений, представленная в них информация не является полной, а для некоторых звезд наблюдаются противоречия в определении параметров, в частности периода вращения.

На основе фотометрических данных космической обсерватории TESS [5] были проанализированы все доступные на текущий момент кривые блеска звёзд в рассматриваемых рассеянных скоплениях с различным временным разрешением. С помощью различных статистических методов оценки периодичности (FAP, SNR, PDM) и с учетом особенностей углового разрешения TESS в работе определены периоды вращения методом Ломба-Скаргла [6,7] для 635, 222 и 98 звезд в Плеядах, Гиадах и Blanco 1 соответственно. Поиск периодических сигналов ограничен 13 днями, поскольку примерная длительность кривой блеска TESS для одного сектора составляет около 27 дней, а объединение нескольких последовательных секторов затруднено из-за смещения нуль-пункта инструментального потока.

Для формирования общего сводного каталога периодов мы собрали всю имеющуюся информацию из открытых обзоров, опубликованных в базе данных VizieR. В результате оценки периодов получены для 936 (42%), 584 (74%) и 250 (33%) звезд в Плеядах, Гиадах и Blanco 1 соответственно. При этом для 44, 28 и 12 звезд в указанных скоплениях периоды определены впервые. Таким образом, в докладе представлен наиболее полный на сегодняшний день каталог периодов вращения звезд в указанных скоплениях. Сводный каталог размещен в открытом доступе в VizieR (J/other/AstL/51.498).

Исследование поддержано субсидией 30000P.16.1.OH17AA81027, выделенной ИПИ АН РТ для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Vilhu O. // Astronomy and Astrophysics, -1984, V. 133, P. 117-126.
2. Wright N.J., et al. // The Astrophysical Journal, -2011, V. 743, id. 48.
3. Khamitov I.M., et al. // Astronomy Letters, -2024, V. 50, P. 780.
4. Gaia Collaboration, et al. // Astronomy & Astrophysics, -2021, V.649.
5. Ricker G.R., et al. // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, –2015, V. 1.
6. Lomb N.R., // Astrophysics and Space Science, 1976, V. 39, P. 447.
7. Scargle J.D. // Astrophysical Journal, -1982, V.263, P.835.

Циклы активности звёзд с супервспышками из архива миссии Kepler

Калинкин А.Д., Саванов И.С.
ИНАСАН, Москва, Россия
kalinkintolya@yandex.ru

Массовое открытие и исследование звёзд с супервспышками стало доступно с появлением космических фотометрических инструментов для мониторинга участков звёздного неба, таких, как Kepler и TESS. Поиски отличий от нормальных звёзд позволили установить только повышенную запятнённость звёзд с супервспышками. Наше исследование посвящено исследованию их циклической активности и поиску возможных отличий.

В предыдущем исследовании [1] мы рассматривали цикличность G-звёзд с супервспышками, обнаруженными по наблюдениям из архива миссии TESS (более яркие, относительно быстровращающиеся, см. рис. 1), с использованием кривых блеска обзора KWS [2]. В продолжение этого нами исследованы кривые блеска G-звёзд, супервспышки на которых обнаружены по данным миссии Kepler [3] (менее яркие, широкий диапазон периодов вращения), из архива ZTF DR24 [4]. Видимый блеск последних позволяет использовать только временные ряды проекта ZTF (7.5 лет для ZTF DR24) для анализа долговременной переменности.

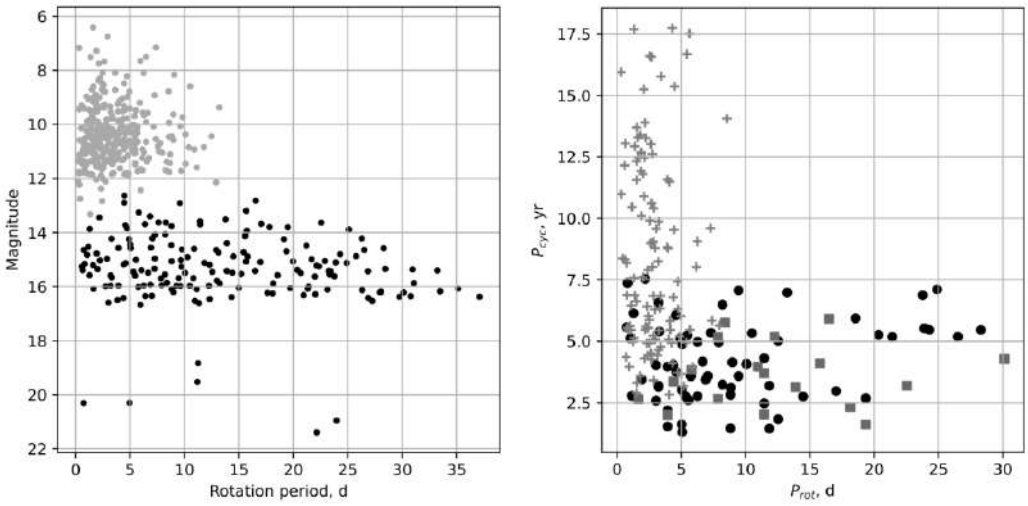


Рис. 1. Слева: медианные звёздные величины и периоды вращения звёзд с супервспышками из исследований по данным Kepler (чёрные, данные ZTF в полосе g) и TESS (серые, данные KWS в полосе V). Справа: длительности циклов и периоды вращения для звёзд с супервспышками. Кружками показаны звёзды с цикличностью в 2 полосах ZTF, квадратами — в одной полосе. Символом “+” показаны результаты [1].

Нами проведено исследование 168 кривых блеска звёзд из [3], у 66 звёзд обнаружены циклы активности, в том числе у 16 звёзд возможны двойные

циклы. Амплитуда цикла для одной из звёзд превысила 0.1^m. На диаграмме log(Pcyc/Prot)—log(1/Prot) наклон зависимости составил 0.994±0.003 (рис. 2). Близкий наклон зависимости получен, например, в исследовании циклов активности G- и K-карликов в молодых звёздных ассоциациях [5], что является свидетельством совпадения свойств цикличности исследованных G-карликов с супервспышками и других звезд. Это согласуется со сделанным нами ранее выводом о вероятной общности механизма их активности.

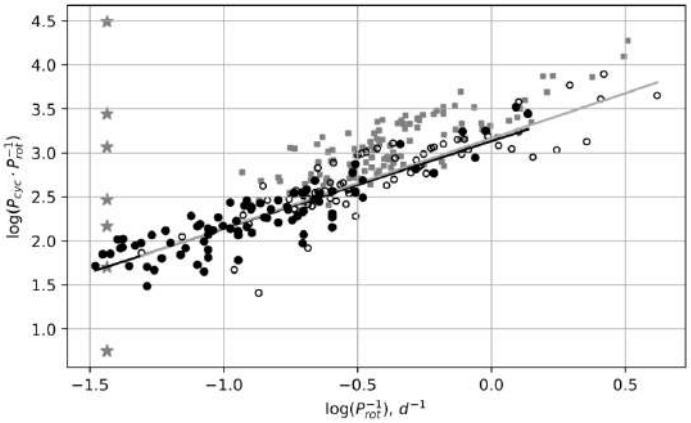


Рис. 2. Связь длительностей циклов активности с периодами вращения. Кружками показаны циклы, полученные в этой работе, квадратами — результаты [1], открытыми кружками — главные периоды из исследования [5]. Звёздочками показаны солнечные циклы активности (снизу вверх): Ригера, 3-4-летний, Швабе, Хейла, Гляйсберга, де Врис и Хольштатта. Чёрная прямая — наша аппроксимация, серая — аппроксимация [5].

Полученный результат соответствует выводам нашей предыдущей работы [1]. Прямое объединение двух наших выборок, тем не менее, не представляется возможным в силу разных диапазонов по периодам вращения и видимому блеску звёзд, разной точности и длительности кривых блеска. Также показано, что свойства временных рядов данных ZTF (7.5 лет для ZTF DR24) достаточны для массового исследования коротких (несколько лет) циклов активности звёзд до 16^m, в частности, большей части звёзд, наблюдавшихся КА Kepler.

Литература

1. I. S. Savanov and A. D. Kalinkin, Astronomy Reports 69 (10), 983 (2025).
2. H. Maehara, JAXA Research and Development Report: Journal of Space Science Informatics Japan 3, 119 (2015).
3. S. Okamoto, Y. Notsu, H. Maehara, et al., Astrophys. J. 906 (2), 72 (2021)
4. F. J. Masci, R. R. Laher, B. Rusholme, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific 131 (995), 018003 (2019).
5. E. Distefano, A. C. Lanzafame, A. F. Lanza, et al., Astron. and Astrophys. 606, A58 (2017).

Спектральная активность запятненного гиганта типа FK Com HD 199178 в 2024-2025 гг.

Козлова О.В.[1], Алексеев И.Ю.[1]
[1]*Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия*
oles_kozlova@mail.ru

Звезды типа FK Com - это быстро вращающиеся гиганты спектральных классов G и K. У некоторых звезд этого типа скорость вращения оказывается близка к критической (например, у FK Com она составляет 83% от критического значения), что делает их холодными аналогами хорошо известной группы горячих звезд спектрального класса B - Be звезд. При таком вращении газ с поверхности звезды начинает убегать, формируя вокруг нее околозвездный газовый диск. У Be звезд такие диски хорошо известны – они обнаруживаются по околозвездным эмиссионным линиям с характерными P Cyg профилями. У хромосферно активных звезд типа FK Com наблюдаемая физическая картина отличается: истекающий газ задерживается в зоне локальных магнитных полей и формирует твердотельно вращающиеся газовые структуры, размер которых обычно не превышает 2-х радиусов звезды ([1]). Именно там формируются широкие 2-х компонентные профили эмиссионных линий, наблюдаемые у FK Com. Звезда HD 199178 вращается гораздо медленнее – ее скорость вращения составляет около 30% от величины критической скорости, поэтому характер спектральной активности звезды оказывается несколько иной.

В представленной работе приводятся результаты высокодисперсионных (R=20000) спектральных наблюдений запятненного гиганта HD 199178. Наблюдения проводились в Крымской астрофизической обсерватории в 2024-2025 гг на 2.6 м телескопе ЗТШ в области спектральных линий Hα, резонансного дублета натрия Na I D и гелия He I 5876. Этот выбор не случаен: фотосферные линии натрия чувствительны к температуре, поэтому изменение эквивалентной ширины резонансного дублета Na I D в зависимости от фазы вращения звезды отражает распределение холодных пятен по диску звезды. Переменная эмиссия в линии Hα, которую демонстрируют все запятненные звезды, связана с хромосферной активностью. Линия гелия He I 5876 в спектрах обычных холодных звезд практически не видна, но у звезд типа FK Com она хорошо заметна. Данные моделирования Тамбовцевой и др. [2] показывают, что для ее формирования необходим горячий и плотный газ с T > 17000 K. Похожие условия могут достигаться в области звездной хромосферы.

В представленной работе мы анализируем переменность HD 199178 в области линий Hα, Na I D и He I 5876 и сравниваем полученные результаты с данными для других звезд типа FK Com.

Литература

1. Козлова О.В., Алексеев И.Ю., Кожевникова А.В., Астрофизика, т.60, с.51-68, 2017
2.Тамбовцева Л.В., Гринин В.П., Козлова О.В., Астрофизика, т.42, с.75-88, 1999

Низкомодовые модели динамо Паркера

Наумов А.С.[1], Соколов Д.Д.[1,2]
[1]МГУ, Москва, Россия
[2]Измиран, Троицк, Москва,Россия
naumov.as22@physics.msu.ru

В рамках классической теории Паркера эволюция крупномасштабного магнитного поля звезды определяется совместным действием двух основных механизмов: дифференциального вращения (ω-эффекта) и зеркально-асимметричной конвекции (α-эффекта) в тонком слое активной области. Эти процессы описываются системой уравнений в частных производных для полоидальной и тороидальной компонент поля. Для качественного анализа вводится феноменологическое насыщение α-эффекта, которое ограничивает неограниченный рост поля.

Чтобы упростить изучение, исходные уравнения сводятся к низкомодовым моделям путём усечения разложения по гармоникам. Для дипольного поля это приводит к системе четырёх обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие основных мод. Линейный анализ такой системы позволяет выявить критические значения динамо-числа D (основного управляющего параметра, отражающего интенсивность α- и ω-эффектов). При определённых значениях D (в частности, около −97 и 282) происходят переходы между затухающими, стационарными и колебательными режимами поведения магнитного поля. Аналогичные переходы наблюдаются и в окрестностях других значений D.

Для квадрупольного поля используется усечение, соответствующее квадрупольной симметрии, что приводит к другой четырёхмодовой системе. Линейный анализ показывает свои критические точки: при $D \approx -130$ наблюдается переход от колебательного режима к стационарному, от $D \approx -7$ до $D \approx 200$ наблюдается затухание, при $D \approx -200$ наблюдается переход от затухания к колебательному режиму. Характерной особенностью квадрупольного динамо является широкая область стационарных решений при отрицательных D и обширные зоны колебаний при положительных значениях динамо-числа.

Определение периодов вращения по непериодическим кривым блеска солнцеподобных звёзд

Низамов Б.А.[1], Фрик П.Г.[2], Окатьев Р.С.[2], Соколов Д.Д.[3], Обридко В.Н.[3], Кацова М.М.[1]

[1]ГАИШ МГУ, Москва, Россия
[2]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия
[3]ИЗМИРАН, Троицк, Россия
nizamov@physics.msu.ru

Измерение периода вращения звёзд имеет большое значение, поскольку именно он главным образом определяет уровень активности звезды. Для солнцеподобных звёзд измерение периода по оптическим кривым блеска классическими способами, например с помощью функции автокорреляции, затруднительно, поскольку пятна живут лишь порядка одного оборота, их вклад в общий блеск сравнительно мал и компенсируется факелами. Недавно появился новый метод определения периода вращения, так называемый метод градиента спектра мощности [1,2,3]. С его помощью были определены периоды вращения для более чем 60000 холодных карликов, в том числе солнцеподобных, наблюдавшихся в миссии Кеплер. Для 20000 звёзд период был определён впервые. Однако метод чисто эмпирический, и авторы не дали объяснения того, почему он работает. В докладе представлено это объяснение. Выявлена взаимосвязь между спектром мощности кривой блеска и её характерными особенностями – в частности, точкой перегиба – с периодом вращения звезды. Показано, как на определение периода новым методом может влиять время жизни пятен, а также угол наклона оси вращения к лучу зрения.

Литература

1. Shapiro A.I., Amazo-Gomez E.M., Krivova N.A., Solanki S.K. 2020. Astronomy&Astrophysics, 633, A32.
2. Amazo-Gomez E.M., Shapiro A.I., Solanki S.K., Krivova N.A., Kopp G., Reinhold T., Oshagh M., Reiners A. 2020. Astronomy&Astrophysics, 636, A69.
3. Amazo-Gomez E.M., Shapiro A.I., Solanki S.K., Kopp G., Oshagh M., Reinhold T., Reiners A. 2020. Astronomy&Astrophysics, 642, A225.

Нециклическая звездная магнитная активность?

Соколов Д.Д.[1,2], Коробейников Д.В.[3]
[1]*МГУ, Москва, Россия*
[2]*Измиран, Троицк, Москва,Россия*
[3]*Институт физики Земли, Москва, Россия*
Sokoloff.dd@gmail.com

Цикл магнитной активности Солнца является одним из основных явлений, изучаемых в физике Солнца. Подобные циклы активности известны и для значительного числа других звезд, похожих на Солнце по своим физическим характеристикам. Естественно, что при изучении активности этих звезд внимание, прежде всего, обращалось именно на циклическое поведение. В то же время для значительного числа звезд, которые изучались в ходе таких поисков, не удалось выделить циклов активности, хотя сама по себе активность фиксировалась. Конечно, часть из подобных случаев связана с трудностями наблюдений, ограниченностью времени мониторинга активности и т.п., однако накопление наблюдательного материала не приводит к заметному повышению доли звезд с хорошо выделенными циклами (порядка пятой части выборки). Это заставляет думать, что на ряде звезд, похожих на Солнце, имеет место нециклическая активность, природа которой требует объяснения в рамках теории динамо или какой-либо иной теории. В докладе мы обращаем внимание на то, что хорошо известен пример другого небесного тела – Земли – на котором имеется магнитная активность, не имеющая циклического характера. Она характеризуется нециклической последовательностью эпох почти постоянного дипольного магнитного поля с быстрыми инверсиями дипольного магнитного момента при переходе от одной эпохе к последующей. Это поведение находит объяснение в одной из версий механизма динамо, который в этой связи известен как геодинамо. Мы предполагаем, что по крайней мере на части звезд, обнаруживающих нециклическую активность, может реализоваться механизм, похожий на геодинамо. В рамках этой гипотезы мы оцениваем медианное время между инверсиями (порядка тысяч лет) и продолжительность самих инверсий (десятки лет). Последняя оценка в принципе совместима с возможностями наблюдений.

Почти критическое динамо звезд подобных Солнцу

Старченко С.В.
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) Троицк, Москва, Россия
e-mail: svstarche@gmail.com

Используется интегральная динамическая система из [1, 2] для среднеквадратичной скорости u(t) и магнитного поля b(t) во всей конвективной зоне (КЗ) звезды, которая здесь считается подобной Солнцу по ряду приведенных ниже параметров. Для получения уравнения эволюции среднеквадратичной скорости u, проинтегрируем по всему объему Конвективной Зоны (КЗ) звезды скалярное произведение вектора скорости на уравнение импульса. Получим, что $u\mathrm{d}u/\mathrm{d}t$ равна удельной интегральной мощности силы плавучести Архимеда a (которая, из-за доминирующего конвективного переноса тепла, близка к величине солнечной светимости деленной на вес КЗ и $a \approx 8$ мВт/кг в Солнце) за вычетом удельных интегральных мощностей сил вязкости u^2/T и Лоренца ub^2/H. Здесь среднеквадратичное магнитное поле $B=b(\rho\mu)^{1/2}$, где ρ – средняя плотность, μ – фундаментальная постоянная. Удобным образом и скорость u, и нормированное магнитное поле b оба измеряются в м/с. Все соответствующие интегралы представлены через их составляющие, которым они прямо пропорциональны. Турбулентное время T – для единой кинематической и магнитной вязкости, H – характерный магнитный масштаб, деленный на типичный синус угла между векторами скорости и магнитного поля.

Аналогичным образом проинтегрируем по объему скалярное произведение вектора магнитного поля на уравнение индукции. Окончательно получим (детали вывода этой системы в [1]):

$$u\mathrm{d}u/\mathrm{d}t = a - ub^2/H - u^2/T,\ b\mathrm{d}b/\mathrm{d}t = ub^2/H - b^2/T. \qquad (1, 2)$$

Устойчивые стационарные (индекс s) точки или уровни стабилизации этой системы:

$$u_s = H/T,\ b_s = \pm(aT - H^2/T^2)^{1/2}. \qquad (3, 4)$$

Генерация магнитного поля возможна только, когда мощность a достаточно велика

$$a > H^2/T^3. \qquad (5)$$

При $(T_c)^3a=(H_c)^2$, используя (3, 4), выразим критические H_c и T_c через u_s и a как

$$H_c = (u_s)^3/a,\ T_c = (u_s)^2/a. \qquad (6, 7)$$

При общепринятом для Солнца $u_s = 100$ м/с получаем $H_c = 125$ Мм, что почти совпадает (!) с полутолщиной конвективной зоны, а $T_c = 1.25$ Мс близко к половине длительности среднего периода вращения Солнца и к среднему времени жизни солнечных пятен! Такие явно не случайные «совпадения» свидетельствуют о соответствующем почти критическом

уровне динамо Солнца, когда два вышеупомянутых параметра лишь слегка отклоняются от своих критических значений. При этом динамо практически линейно, что способствует успешному продвижению общеизвестных динамо-моделей среднего поля.

Кинетическая энергия всей КЗ Солнца, очевидным образом, равна $(u_s)^2M/2=2.5\cdot10^{32}$Дж, где $M=5\cdot10^{28}$ кг – известная масса КЗ. Магнитная энергия $M(aT - H^2/T^2)/2$ обнуляется при критических параметрах. При отклонении от критической ситуации в сторону роста этой энергии она проходит все промежуточные значения вплоть до примерно тех же $MaT/2 \approx 2.5\cdot10^{32}$Дж, что говорит о предельном равнораспределении энергий. В основном же диапазоне параметров кинетическая энергия доминирует над магнитной.

Для примера рассмотрим малое превышение критического уровня при $T=1.1T_c$ ($\varepsilon = 0.1$) и $H= H_c$ с магнитной энергией $5\cdot10^{31}$Дж. Магнитное поле при этом B = 90 мТл = 900 Гс. В общем случае при малых ε получаем:

$$B = [\rho\mu\varepsilon(aT_c + H_c^2/T_c^2)]^{1/2}. \qquad (8)$$

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Получена интегральная динамическая система для среднеквадратичной скорости u и магнитного поля b во всей КЗ подобной Солнцу звезды. Равновесные значения (индекс “s”) системы зависят от относительной светимости a, масштаба H и времени диффузии T.

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

3. Кинетическая энергия ($2.5\cdot10^{32}$Дж в Солнце) задана, а магнитная пропорциональна отклонениям от критических значений. Так при $T=1.1T_c$ и $H=H_c$ – магнитная энергия $5\cdot10^{31}$Дж, чего достаточно для миллиона вспышек Кэррингтона. Соответственно среднее магнитное поле 900 Гс.

1. Starchenko S.V. Levels of stabilization of velocity and magnetic induction in the convective zone of the Sun // Proceedings IAU Symposium No. 365. A. V. Getling & L. L. Kitchatinov, eds. P. 364-367. 2024. https://doi.org/10.1017/S1743921323005252
2. Kislov R.A. and Starchenko S.V. Evolution of the Total Magnetic and Kinetic Energy in the Convective Zone of a Star // Geomagnetism and Aeronomy, 2025, Vol. 65, N. 8, pp. 1142–1150. https://doi.org/10.7868/S3034502225080022