

**XXIX Всероссийская ежегодная конференция  
по физике Солнца  
"Солнечная и солнечно-земная физика – 2025"  
(ССЗФ-2025)**

**СБОРНИК ТЕЗИСОВ**

**13 – 17 октября 2025**

**Москва, Троицк, ИЗМИРАН**



# Оглавление

## Приглашенные доклады ..... 10

Прогнозирование космической погоды: создание третьей очереди автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП).....	11
Самоорганизация магнитного поля: изменения в процессе эволюции активной области .....	12
Некоторые нерешённые проблемы звёздной активности.....	14
Исследование механизма солнечного динамо методами гелиосейсмологии .....	15
Космические и внеатмосферные исследования Солнца .....	17
Космический климат и проблемы длительных связей в системе «Солнце–Земля».....	18
Магнитогидродинамическая сейсмология короны Солнца.....	20
Солнечная цикличность: факты и проблемы .....	21
Солнечное динамо – современные проблемы и перспективы .....	23

## Секция 1. Цикл солнечной активности: наблюдательный и теоретический аспекты ..... 24

Полярные фотосферные и корональные магнитные поля Солнца .....	25
Оценка долговременной вариации скорости приполярной меридиональной циркуляции по десинхронизации солнечных индексов.....	27
Периодические структуры в слабых магнитных полях фотосфера.....	29
Связь между яркостью тени и магнитным полем в солнечных пятнах: эффект насыщения .....	31
Неоднозначности в применении систем классификации групп солнечных пятен .....	33
Солнечная активность по наблюдениям Филиппа де Ла Ира с 1684 по 1702 Г. .....	35
Как долго живут активные долготы? .....	37
Оценка параметров динамо-моделей с помощью нейро-дифференциальных уравнений.....	39

Развитие текущего цикла солнечной активности на ветви роста и в начале спада .....	40
О мере площади солнечного пятна на магнитограммах SDO/HMI .....	42
Квази-двуухлетние вариации площади солнечных пятен: оценка вклада больших активных областей .....	44
Лабораторные и численные исследования гравитационных и инерционных волн в конвекции и их связь с 5-минутными колебаниями на Солнце .....	46
Оценка пятнообразовательной активности Солнца по всей поверхности вблизи максимума 25 цикла СА .....	48
Токовая спиральность активных областей обратной полярности .....	49
Средние времена рекуррентности солнечных вспышек в активных областях и их циклические изменения .....	50
Применение фотоэлектрических преобразователей для измерения и регистрации энергетических параметров солнечного излучения в наземных условиях .....	52
Изменение параметров источника полоидального магнитного поля Солнца 21 – 25 циклы .....	54
Различные модификации правила Вальдмайера .....	56
Почти критическая энергетика динамо солнца .....	58
Меридиональные перемещения отдельных солнечных пятен и пор .....	60
Коррекция восстановленных циклов, опирающихся на наблюдения Г. Швабе .....	61
Статистика годовых чисел Вольфа, их производных, характерных частот и соответствующих знакопеременных полей .....	63
Сpirальность магнитных полей в сверхактивных областях на Солнце .....	65
<b>Секция 2. Активные солнечные образования, процессы и явления.....</b>	<b>67</b>
Симпатические явления на Солнце по радионаблюдениям .....	68
Радиоастрономические предвестники солнечных вспышек .....	70
Анализ явления резонансного поглощения волн в короне Солнца при учете эффекта теплового дисбаланса .....	72
О переносе нетепловых электронов вдоль внешнего шипа круговой ленточной вспышки SOL2024-03-25t06:37:00 .....	73

Некоторые аспекты использования данных наблюдений Солнца в линии Не I 10830 Å, полученных на телескопе БСТ-2 КрАО .....	74
Временные характеристики вспышек мягкого рентгеновского излучения и вспышек Н-альфа на Солнце .....	76
Солнечные протонные события 1970 – 2024 гг. (55 лет каталогам СПС под редакцией Ю.И. Логачева) .....	78
Пространственное расположение магнитных жгутов и микроволновых источников по данным радиогелиографа в Нобеяме и Сибирского радиогелиографа .....	79
Метод измерения допплеровской скорости хромосферной плазмы при асимметрии в профилях линий Нα (6563Å), Не I (10830Å).....	81
Коллективные процессы в бессиловых конфигурациях магнитного поля солнечной атмосферы.....	83
Перспективы радиоспектроскопии Солнца на РАТАН-600.....	84
Особенности поля скоростей и магнитного поля в центрах активности во вспышечно-продуктивной активной области 12673 .....	87
Проверка модели стохастического ускорения солнечных протонов в среднем электрическом поле $\sim 10^{-4}$ В/см при ускоряющем поле одного акта 1 В/см.....	89
О разделении акустических импульсов в корональной плазме .....	90
О возможных механизмах возникновения синхронных микровспышек в хромосфере Солнца.....	92
Микроволновый всплеск с квазипериодическими пульсациями 29.01.2024 г: динамика электронов в магнитной ловушке .....	94
Спектрально-пространственное исследование микроволнового и рентгеновского излучения гомологичных солнечных вспышек.....	96
Сравнение интенсивности солнечных вспышек, связанных и не связанных с КВМ .....	97
Многоволновые пространственно-разрешенные наблюдения эруптивной вспышки с рентгеновскими пульсациями и моделирование динамики ускоренных электронов .....	99
Влияние холодных слоёв плазмы в нижней солнечной короне на спектр смыдм излучения активных областей.....	101

Временной анализ излучения вспышки SOL2005-10-05. Объяснение излучения в линиях кальция и водорода в рамках гипотезы усиления нагрева МГД-волнами .....	103
Магнитные поля активных областей по наблюдениям в нескольких спектральных линиях.....	105
Свойства турбулентности в окрестностях униполярных пятен .....	106
Состояния поляризации солнечного излучения на лимбе по данным SP/Hinode .....	108
О вкладе корональной вспышечной плазмы в суб-терагерцовое излучение солнечной вспышки 4 мая 2022 года .....	110
Возможное объяснение для наблюданной депрессии солнечных активных областей с волокнами в диапазоне 1.5 ГГц – 1.7 ГГц .....	111
Конфигурация магнитного поля в месте солнечной вспышки на магнитной аркаде: результаты МГД моделирования .....	112
Радиодиагностика вспышки 14 мая 2024 года на основе данных Сибирского радиогелиографа .....	114
Восстановление параметров вспышек на основе частотного спектра при учете анизотропного распределения электронов .....	115
Солнечные вспышки в белом свете и численное моделирование распространения нелинейных альфеновских волн из короны в фотосферу .....	116
Бессиловые магнитные жгуты как активные вспышечные элементы.....	118
К природе ярких рентгеновских точек .....	120
К определению параметров солнечной атмосферы над активными областями по радионаблюдениям .....	122
О развитии наблюдений Солнца на радиотелескопах РТ-32 ИПА РАН....	124
Роль турбулентности вистлеров в формировании распределений нетепловых электронов во вспышечных петлях .....	126
Причины и сценарии развития эрупций солнечных протуберанцев .....	128
Крупномасштабный электрический ток: модернизация метода вычисления .....	130
Ускорение протонов в солнечных корональных вспышках и кулоновские столкновения.....	132
Магнитные жгуты на стадии предвестников солнечных вспышек .....	133

Рентгеновские и радиовсплески в солнечных вспышках .....	135
Статистика корональных выбросов массы солнечных вспышек с гелиосейсмическим откликом .....	136
<b>Секция 3. Колебания и волны на Солнце .....</b>	<b>137</b>
Эти неуловимые гигантские ячейки .....	138
Диагностика магнитных полей в горячих корональных петлях с помощью медленных магнитоакустических волн .....	140
О течениях в окрестностях активной области NOAA 11158 на различных глубинах подфотосферной зоны.....	141
Вопрос о природе глобальных пульсаций Солнца .....	143
Динамика ленгмюровских волн и пучков быстрых электронов с учетом индуцированного рассеяния волн на ионах солнечной плазмы .....	144
О влиянии продольного потока вещества на изгибные колебания солнечных магнитных трубок с эллиптическим сечением .....	146
Динамика источника активной области Солнца.....	147
Волны сжатия в солнечной короне: временные сигналы .....	149
Влияние филаментации электрических токов на эффективность энерговыделения в корональных магнитных петлях .....	150
<b>Секция 4. Солнечный ветер и космическая погода .....</b>	<b>152</b>
Долгопериодные вариации скорости солнечного ветра и данные о корональных дырах.....	153
Первые и последние возрастания интенсивности солнечных протонов в 23-25 циклах.....	154
Большие магнитные бури в фазе максимума 25 цикла солнечной активности и их солнечные источники.....	156
Вариации параметров ММП, геомагнитных и ионосферных индексов при каскаде бурь в октябре 2024г.....	158
Эффекты гистерезиса в зависимостях геомагнитных порогов космических лучей от солнечно-земных параметров во время магнитной бури в марте 2023 года .....	160
Среднестатистические значения средней энергии потока электронов в полуночном секторе аврорального овала .....	162

Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) во время экстремальных явлений космической погоды в 2024 году .....	164
Воздействие солнечных вспышек на электромагнитные процессы в системе атмосфера-ионосфера и на сейсмическую активность .....	166
2D транспортное уравнение галактических космических лучей как следствие 3D уравнения .....	167
Моделирование эффекта мощного неуниполярного электрического поля в высокоширотной гелиосфере.....	169
Об интерпретации долготного распределения интенсивности ГКЛ в коротирующих областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра .....	171
Глобальная гибридная модель магнитосферы Земли: ускорение Ферми .	172
Межпланетные возмущения и высокоэнергичные магнитосферные электроны.....	174
Анализ вариаций потока космических лучей в периоды геомагнитных бурь 2022-2025 гг. ....	176
Какие регионы РФ могут быть подвержены воздействию экстремальных магнитных бурь? .....	178
Модель переноса энергии МГД волн через ионосферу к земной поверхности .....	180
Восстановление спектра галактических космических лучей по данным нейтронных мониторов в приближении силового поля и методами машинного обучения .....	182
Существует ли единый признак активных областей, вызвавших геомагнитные штормы? .....	184
Проблема открытого магнитного потока Солнца и квант магнитного потока .....	186
Низкоширотные корональные дыры и скорость солнечного ветра.....	188
Особенности радиоизлучения ударных фронтов в короне и межпланетном пространстве .....	189
Низкотемпературные периоды в солнечном ветре.....	191
<b>Секция 5. Космический климат и климат Земли .....</b>	<b>192</b>
Слабое влияние солнечной радиации на климат усиливается многократно механизмами обратной связи.....	193

Солнечный цикл Хейла: проявление в геофизических характеристиках и возможный вклад в формирование бидекадных колебаний климата.....	195
Влияние солнечной радиации и солнечной активности на изменчивость климата после окончания последнего оледенения .....	196
Влияние изменений солнечной активности на структуру атмосферных термических приливов.....	198
Вращение Земли и факторы климата последних десятилетий.....	200
Расчет эквивалентной дозы излучения в широком диапазоне высот.....	202
Квазивековая вариация в климате земли и её возможная связь с солнечным циклом Глайссберга .....	203
Космический климат и круговорот вирусов и бактерий в атмосфере.....	205
Э/м засорение околоземного пространства излучением ЛЭП .....	207
Солярные реперы нижней границы голоцена .....	209
Парадокс слабого молодого Солнца для Земли и Марса – возможно ли общее решение?.....	211
«Пятиминутные колебания» атмосферного и артериального давления человека как следствие флюктуаций солнечного излучения UVB-UVA.....	213
Циклические колебания общего содержания озона в Антарктиде под воздействием солнечной активности и вращения солнечной атмосферы .	214
<b>Секция 6. Прогнозирование солнечной активности и её геоэффективных проявлений .....</b>	<b>215</b>
Прогнозирование суточных потоков релятивистских электронов > 2 МэВ на геостационарной орбите на основе нейронных сетей .....	216
Статистическая оценка связи амплитуды геомагнитно-индукционных токов и dB/dt с параметрами межпланетной среды, индексами геомагнитной активности.....	217
Состояние текущего прогноза солнечной активности на основе динамо модели, управляющей нейронной сетью .....	219
Алгоритм построения байесовских сетей для прогнозирования солнечных протонных событий .....	221
О природе $\Delta^{14}\text{C}$ -всплесков в атмосфере Земли .....	223
Прогноз солнечных циклов техникой рекуррентной топологии .....	224

Форбуш-эффект 1-10 июня 2025 года: комплексный анализ по данным нейтронного монитора и космических наблюдений .....	226
Технологии мониторинга начала циклов солнечной активности в ФГБУ ИПГ .....	227
Углы наклона низкоширотных биполей в 15-24х циклах активности .....	229
Прогнозирование полного электронного содержания ионосферы на основе периодической модели коэффициентов сферического разложения.....	230
Сезонные вариации глобальной сейсмической активности Земли и её ежемесячный эмпирический прогноз в 2025 г.....	232
<b>Секция 7. Солнечно-звездные аналогии, звездные циклы активности .....</b>	<b>233</b>
Распределение и время жизни пятен у М карликов в системе GJ 669 AB	234
Генерация энергичных электронов в альфвеновских крыльях Ганимеда и Европы.....	236
Индуктированный звездный ветер в рентгеновских тесных двойных системах .....	238
Природа необычной спектральной активности звезд типа FK СОМ .....	239
Границные условия гармонического магнитного поля в солнечном и звездном динамо.....	241
Исследование вспышечной активности рентгеновского излучения звезд типа $\gamma$ CAS и звезд ранних спектральных классов .....	243
Возможный тип поздних спектральных классов – нерегулярные инверсии магнитного поля .....	245
Индукированное Ганимедом квазипериодическое декаметровое радиоизлучение Юпитера .....	247

## Приглашенные доклады

## **Прогнозирование космической погоды: создание третьей очереди автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП)**

**Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Диценко К.А., Маурчев Е.А., Шлык Н.С.**  
*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*  
[abunin@izmiran.ru](mailto:abunin@izmiran.ru)

С 2006 г. ИЗМИРАН привлечен к работам по созданию, при головной роли АО «ЦНИИмаш», отраслевой автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП). В результате выполнения данных работ на базе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН, в соответствии с требованиями технических заданий головного заказчика, создан и эксплуатируется Сегмент по расчету параметров солнечной и геомагнитной активности (Сегмент РПСГА) АСПОС ОКП.

Сегмент РПСГА обеспечивает в интересах АСПОС ОКП выполнение сбора, обработки, систематизации и хранения информации о космической погоде, а также прогнозирования параметров солнечной и геомагнитной активности (состояния космической погоды) на заданные интервалы временного упреждения, в том числе выдачу предупреждений о резких изменениях основных параметров космической погоды.

В 2015 г. завершено создание второй очереди системы АСПОС ОКП, которая по результатам межведомственных (государственных) испытаний принята в опытную эксплуатацию. На текущий момент, в рамках создания третьей очереди АСПОС ОКП и на основе созданного ранее Сегмента РПСГА, создан и проводятся испытания уже модернизированного сегмента по расчету параметров солнечной и геомагнитной активности (Сегмента РПСГА-М). На текущий момент проводятся межведомственные испытания данной системы. Ввод в эксплуатацию назначен на ноябрь 2025 года.

В работе описываются алгоритмы и методики, заложенные в Сегмент РПСГА-М.

## Самоорганизация магнитного поля: изменения в процессе эволюции активной области

Абраменко В.И., Сулейманова Р.А.  
КРАО РАН, Научный, Россия  
[vabramenko@gmail.com](mailto:vabramenko@gmail.com)

Замагниченная плазма солнечной атмосферы развивается как любая нелинейная динамическая диссипативная система с присущими ей свойствами: высокая степень турбулизации, перемежаемость и склонность к самоорганизации – способность формировать когерентные структуры всех масштабов из мелкомасштабного хаоса. Системы с самоорганизацией (self-organization, SO) включают очень важный подкласс – системы с самоорганизованной критичностью (Self-organized criticality, SOC). В SOC-системах спонтанно случаются эпизоды энерговыделения любого масштаба, вплоть до масштаба всей системы. Возможные переходы системы из SO в SOC (и наоборот) весьма слабо изучены. Один из способов диагностики – это исследование формы и поведения корреляционной функции. Считается общепринятым [1], что в состоянии SOC система обладает степенной корреляционной функцией (степенной спектр обеспечивает отсутствие выделенных масштабов). Напротив, в состоянии SO корреляционная функция имеет участки экспоненциальной зависимости, а также перегибы и бугры. Наличие последних означает способность системы формировать корреляционные связи в отдельных интервалах масштабов.

В работе [2] мы сравнили корреляционные функции для восьми активных областей (АО) разной степени сложности и вспышечной продуктивности. Сравнение результатов показало, что для всех АО корреляционная функция радиальной компоненты магнитного поля не подчиняется степенному закону, а на масштабах менее 40 Мм выполняется экспоненциальный закон. Следовательно, состояние SOC не выполняется для магнитного поля, но при этом имеет место состояние SO. Встал вопрос о том, как меняется корреляционная функция по мере развития АО, в особенности, по мере нарастания ее вспышечной продуктивности. Мы провели такой анализ для АО NOAA 13354, отследив ее развитие по мере прохождения по диску от момента всплытия до мультиполлярного состояния и первых мощных вспышек M3.8 и X1.1. Оказалось, что её корреляционная функция магнитного поля выявляет устойчивый экспоненциальный участок на масштабах менее 35 Мм, но при этом показывает очень интересное поведение на больших масштабах (см. Рис.1). А именно, по мере развития области растут длинные корреляционные связи.

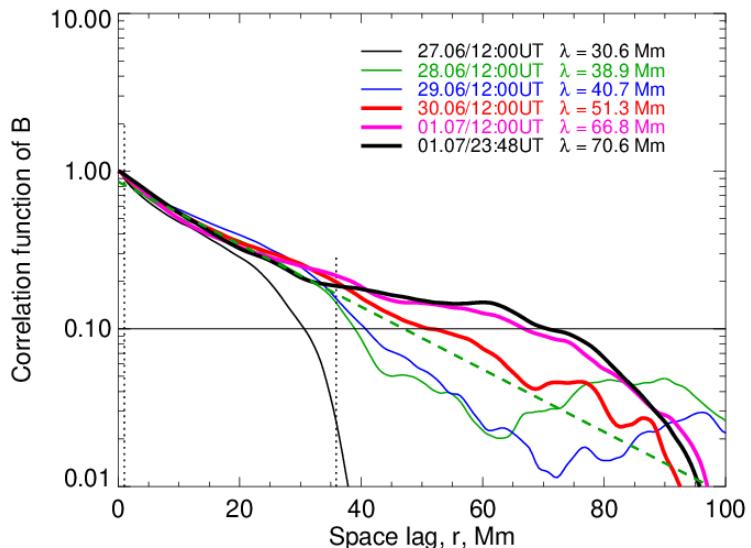


Рис.1 Изменения корреляционных функций магнитного поля АО NOAA 13354 в течение 5-ти дней наблюдений. Хорошо заметно нарастание длинных корреляционных связей, особенно в интервал от первой мощной вспышки M3.8 29.06/14:00 UT к моменту самой мощной вспышки X1.1 02.07/22:54 UT

В качестве вывода следует отметить два момента. Первое, в теории переколяции усиление длинных корреляций является неотъемлемым признаком приближения состояния SOC (состояния протекания). Для того, чтобы устроить, например, крупномасштабный пожар, недостаточно поджечь одно дерево, необходимо предварительно обеспечить длинный связный кластер деревьев, способный передать информацию быстро и на большие расстояния. В этом и заключается роль длинных корреляционных связей в установлении SOC. В нашем случае триггер вспышки (как поджег единичного дерева) где-то в короне (которая, несомненно, находится в состоянии SOC), а вот в реализации длинных корреляционных связей, оказывается, участвует и фотосфера. И второе: оказывается, что для полноценного прогноза вспышек, наряду с хорошо известными подходами анализа сильных градиентов и неоднородностей на малых масштабах, необходим учет изменений на больших масштабах. И возможно, не только в корреляционной длине. Именно процессы на больших масштабах в состоянии обеспечить перенос тех объемов энергии в корону, которые необходимы для вспышек.

### Литература

- Watkins N.W., Pruessner G., Chapman S., Crosby N. B., Jensen H. J. 25 Years of Self-organized Criticality: Concepts and Controversies // Sp. Sci. Res. V. 198. P. 3-44. 2016.
- Abramenko V.I., Suleymanova R.A. Correlation functions of photospheric magnetic fields in solar active regions // Solar Phys. V. 299. P. 299-330. 2024.

## Некоторые нерешённые проблемы звёздной активности

**Кацова М.М.<sup>1</sup>, Гершберг Р.Е.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> КРАО РАН, Научный, Крым, Россия

[mkatsova@mail.ru](mailto:mkatsova@mail.ru)

В минувшем году отмечалось столетие со дня открытия Эйнаром Герцшпрунгом вспыхивающих красных карликовых звёзд и практически одновременно была опубликована большая монография Гершберга и др. (2024) [1], в которой детально изложена история исследований и современное состояние физики звёзд с активностью солнечного типа. В связи с этим представляется естественным сформулировать ещё нерешённые вопросы в этой области астрофизики. Мы ограничимся задачами, касающимися звёздных пятен, вспышек, цикличности активности и магнетизма.

### Литература

1. Gershberg R., Kleeorin N., Pustilnik L., Airapetian V., Shlyapnikov A. – “Physics of mid- and low-mass stars with solar-type activity and their impact on exoplanetary environments”// Simferopol’: “Forma”, 764PP, 2024.

## Исследование механизма солнечного динамо методами гелиосейсмологии

**Косовичев А.Г.<sup>1</sup>, Гетлинг А.В.<sup>2</sup>, Пипин В.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Технологический институт Нью Джерси, Ньюарк, США*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына*

*Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

[alexander.g.kosovichev@njit.edu](mailto:alexander.g.kosovichev@njit.edu)

За последние три десятилетия непрерывные гелиосейсмологические наблюдения Солнца значительно улучшили наше понимание основных механизмов, лежащих в основе солнечной активности [1]. Исследования внутреннего вращения Солнца методами глобальной гелиосейсмологии, и в частности, изучение мигрирующих зональных потоков, известных как крутые колебания, представили важные доказательства существования волн динамо, возникающих у основания конвективной зоны Солнца (рис.1) [2,3]. Эти волны динамо, предсказанные теорией Паркера, мигрируют к поверхности, генерируя магнитные активные области в средних и низких широтах, а также способствуя смене полярности магнитного поля в полярных регионах. Также выявлено, что полный цикл крутых колебаний составляет 22-летний «расширенный» цикл Солнца, ранее известный из наблюдений поверхностного дифференциального вращения и корональных наблюдений [4].

Гелиосейсмологические наблюдения выявили несоответствия с кинематической теорией динамо Бэбкока–Лейтона [5] и подтвердили предсказания трехмерной динамической МГД модели динамо, которая объясняет 22-летний «расширенный» цикл Солнца [6]. Этот цикл сопровождается вариациями меридиональной циркуляции в подповерхностном слое, как показано с помощью метода локальной гелиосейсмологии [7].

Детальные карты подповерхностных течений, полученные этим методом, показывают прямую связь между внутренней динамикой Солнца и внешними проявлениями солнечной активности, такими как солнечные пятна и солнечные вспышки [8]. Кроме того, гелиосейсмологические наблюдения предоставили ценную информацию о механизме формирования и эволюции солнечных пятен в недрах Солнца, указывая на определяющую роль динамики сравнительно тонкого подповерхностного слоя – «лептоклина» [9].

Текущие наблюдения предоставляют все более детализированные данные о внутренней структуре Солнца. Однако, несмотря на значительные достижения, много проблем остаются нерешенными, особенно в части понимания процессов формирования и эволюции активных областей, а также их влияния на глобальную активность.

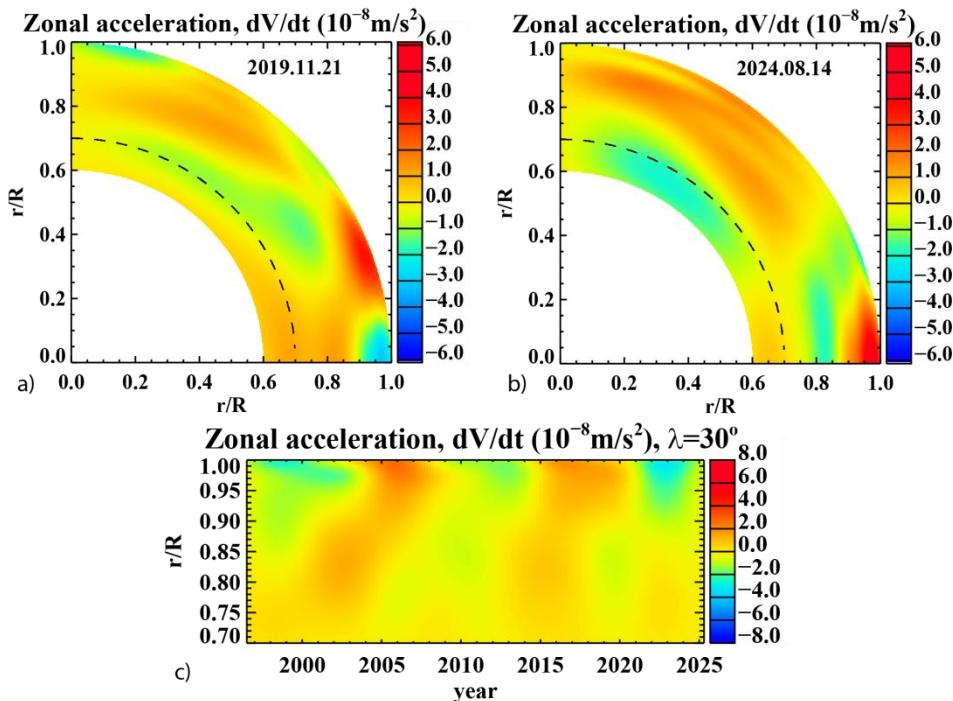


Рис.1. Распределение ускорения зональных течений в конвективной зоне: а) во время солнечного минимума в 2019 г., б) во время солнечного максимума в 2024 г., и с) эволюция радиальной структуры во время солнечных циклов 23-25. Зоны замедления (показанные синим и зеленым цветом) соответствуют концентрациям магнитного поля. Штриховая линия показывает нижнюю границу конвективной зоны.

### 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. Kosovichev A.G. et al. Dynamo Wave Patterns inside of the Sun Revealed by Torsional Oscillations // Astrophys.J.Lett. V. 871. I. 2. P. L20. 2019.
3. Mandal K. et al. Helioseismic Properties of Dynamo Waves in the Variation of Solar Differential Rotation // Astrophys.J. V. 973. I. 1. P. 36. 2024.
4. Pipin V.V. et al. On the Origin of Solar Torsional Oscillations and Extended Solar Cycle // Astrophys.J. V. 887. I. 2. P. 215. 2019.
5. Zhong C. et al. Discriminating between Babcock-Leighton-type Solar Dynamo Models by Torsional Oscillations // Astrophys.J. V. 969. I. 2. P. 75. 2024.
6. Pipin V.V. et al. Effects of Emerging Bipolar Magnetic Regions in Mean-field Dynamo Model of Solar Cycles 23 and 24 // Astrophys.J. V. 949. I. 1. P. 7. 2023.
7. Getling A.V. et al. Variation of Global and Local Flows in the Solar Convection Zone during Activity Cycles 24 and 25 // Astronomy Reports. V. 69. I. 2. P. 144-156. 2025
8. Kosovichev A.G. et al. Subsurface Flows Associated with Formation and Flaring Activity of Solar Active Regions // Proceedings of the International Astronomical Union Symposium S365: Dynamics of Solar and Stellar Convection Zones and Atmospheres. V. 19. P. 275-295. 2024.
9. Kitiashvili I.N. et al. Leptocline as a shallow substructure of near-surface shear layer in 3D radiative hydrodynamic simulations // MNRAS. V. 518. I. 1. P. 504-512. 2023.

## Космические и внеатмосферные исследования Солнца

**Кузнецов В.Д.**  
ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия  
[kvd@izmiran.ru](mailto:kvd@izmiran.ru)

Наблюдения с космических аппаратов дают все более детальную информацию о происходящих на Солнце явлениях и процессах, стимулируя построение физических моделей солнечных явлений и давая более глубокое понимание того, как устроено и как работает Солнце.

Современная концепция солнечных космических миссий включает наблюдения Солнца с близких расстояний, наблюдения из внеэклиптических положений, наблюдения с околоземных орбит с высоким пространственным разрешением, а также внеатмосферные ракетные наблюдения. В рамках этой концепции реализованные, действующие и недавно запущенные солнечные космические миссии (TRACE, RHESSI, SOHO, SDO, STEREO, Hinode, Parker Solar Probe, Solar Orbiter, ASO-S, Aditya-L1, Proba-3 и др.) призваны обеспечить исследователей самыми лучшими на сегодняшний день данными для решения таких актуальных проблем физики Солнца как механизмы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, тонкая и сверхтонкая структура и динамика солнечной атмосферы и триггерные механизмы наиболее мощных проявлений солнечной активности - вспышек и корональных выбросов массы, ускорение частиц и их распространение в короне и гелиосфере, структура и динамика магнитных полей в приполярных областях Солнца, механизм динамо и солнечный цикл, свойства плазменной турбулентности и др.

В докладе дается обзор результатов в исследованиях Солнца [1], полученных за последние годы с помощью космических аппаратов. Эти результаты охватывают все слои солнечной атмосферы от конвективной зоны и фотосфера до солнечной короны и солнечного ветра. Дается также обзор новых солнечных космических миссий.

### Литература

1. Кузнецов В.Д., Космические и внеатмосферные исследования Солнца // Успехи физических наук т.195, 858-874, 2025.

## Космический климат и проблемы длительных связей в системе «Солнце–Земля»

Наговицын Ю.А.

ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

[nag-yury@yandex.ru](mailto:nag-yury@yandex.ru)

Космический климат – проблема, получившая свое название два десятка лет назад. В то же время, исследования в рамках данной проблемы гораздо «старше».

Рабочими определениями проблемы могут быть следующие. Это:

- долгопериодические тенденции космической погоды.
- совокупность солнечно-земных связей, действующих на длительных временах.
- совокупность внешних космических факторов, влияющих на земной климат.

Целями наших исследований являются:

- Получение физически информативных комплексных данных о динамике солнечного магнитного поля (геомагнитного поля, межпланетного поля) на больших временных масштабах.
- Качественный и количественный анализ эволюции солнечной активности на основе реконструкций поведения различных компонент магнитного поля Солнца на длительных временах.
- Исследование связи солнечной активности и климата Земли.

Солнечная активность (СА) – это магнитная активность Солнца, имеющая циклический характер. Глобальное магнитное поле Солнца можно представить в виде двух компонент: полоидальной (ориентированной в меридиональном направлении), которая является частью крупномасштабной, и тороидальной (ориентированной в долготном направлении). Тороидальному компоненту представляют активные области и солнечные пятна – области наибольшей концентрации магнитного поля.

Теория динамики Солнца развивается более 60 лет и объясняет 11-летнюю циклическость в рамках альфа- и омега-эффектов. Построение удовлетворительной теории магнитной активности Солнца – важнейшая проблема. Магнитные пятна и циклы обнаружены также и на других звездах.

11-летние циклы изменяются по мощности, имеет место вековой (секулярный) цикл. В рамках теории динамики секулярные циклы пока – проблема. Их эмпирические закономерности мы представляем слабо. А они играют основную роль в формировании грандиозных максимумов и минимумов СА.

Известно, что солнечная активность оказывает влияние на целый ряд земных процессов, иногда – негативное (направление – космическая погода). Таким образом, нам нужен мониторинг текущих изменений СА. Солнечно-

земные связи надежно зафиксированы для короткой временной шкалы (изменения в гелиосфере, магнитосфере Земли) и интенсивно изучаются.

Поскольку 11-летние циклы изменяются по мощности, образуя секулярные циклы, возникает проблема: может ли солнечная активность воздействовать на длительные земные процессы, главным образом, – на климат, т.е. быть одним из климатообразующих факторов? Таким образом, нам нужны фактические знания о длительных изменениях СА.

Если нам нужны знания о длительных изменениях СА, то насколько адекватно мы сейчас описываем ее на «инструментальных», базовых, временах? Принятые параметры для описания СА – индексы солнечной активности – действительно оптимальны? Если мы имеем в своем распоряжении несколько разных индексов, то какой из них предпочтительнее с физической точки зрения и с точки зрения имеющихся опорных временных рядов?

Насколько мы можем доверять косвенным источникам данных о СА в прошлом – т.н. «proxies»? Как привести косвенные данные в шкалы традиционных индексов? Насколько надежно мы сейчас представляем изменения СА на длительной шкале с точки зрения наблюдательных фактов?

Ответы на все эти поставленные вопросы нужны как для понимания фундаментальных проблем солнечной цикличности, так и для установления реальности солнечно-климатических связей. Отдельные ответы на них уже имеются, и им посвящен доклад.

## Магнитогидродинамическая сейсмология короны Солнца

**Накаряков В.М.**

*САО РАН, Нижний Архыз, Россия*

[vnakariakov@googlemail.com](mailto:vnakariakov@googlemail.com)

Макроскопические волновые и колебательные явления, повсеместно обнаруживаемые в плазме солнечной короны, уверенно интерпретируются как магнитогидродинамические (МГД) волны. В наблюдениях отчётливо различаются быстрые и медленные магнитоакустические волны. Свойства МГД-волн определяются локальными параметрами плазмы, включая характерную для короны структурированность вдоль магнитного поля, что открывает возможности для зондирования плазменных структур короны методом МГД-сейсмологии. Наблюдательные данные, полученные с помощью современных инструментов, в сочетании с теорией МГД-волн создают условия для уверенного применения широкого спектра сейсмологических методик. Например, распространяющиеся медленные волны указывают локальное направление магнитного поля. Стоячие, «плескающиеся» («sloshing») и бегущие медленные волны могут использоваться для диагностики функции нагрева и политропического индекса. Изгибные колебания корональных плазменных петель позволяют оценить абсолютное значение магнитного поля в осциллирующих петлях, определить масштаб поперечного структурирования плазмы, а также выявить каналы, по которым энергия, необходимая для нагрева, поступает в корону.

## Солнечная цикличность: факты и проблемы

**Обридко В.Н., Наговицын Ю.А.**

ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

[obridko@izmiran.ru](mailto:obridko@izmiran.ru), [nag-yury@yandex.ru](mailto:nag-yury@yandex.ru)

Цикл солнечной активности – многопараметрическое явление, в основе которого лежат пространственные и временные изменения магнитного поля. Солнечные пятна – одно из проявлений этого цикла, относительно доступное для наблюдений.

Сформулированы классические законы и «правила» цикличности, современный статус которых еще нужно понять и встроить в физическую картину.

Механизм динамо – основа солнечной цикличности. Доступны основным расчетам вариации крупномасштабного поля. При этом возникают три волны магнитного поля. Две из них дрейфуют к полюсу, но смещены между собой по времени. Третья волна дрейфует от средних широт к экватору. Собственно именно она и наблюдается как основная волна солнечной активности.

Солнечный цикл – это в основном эндогенный процесс, при котором происходит генерация магнитного потока за счет дифференциального вращения. Природа различия циклов по высоте пока неясна, хотя некоторое воздействие планетной системы полностью исключить нельзя. Кроме того, существует малоисследованный эффект антикорреляции между высотой цикла и скоростью вращения Солнца.

Обсуждается зависимость цикла от характерных пространственных и временных масштабов. В целом 11-летний цикл определяется динамо среднего поля. Но непосредственно активность, выражаемая в солнечных пятнах и активных областях, формируется дополнительным механизмом в подповерхностных слоях (лептоклина). Решающим здесь является соотношение магнитного поля с параметрами плазмы. При этом возникает жгутово-волоконная структура.

Отдельно обсуждается асимметрия. Есть основания полагать, что она возникает как следствие процессов в подповерхностных слоях за счет маломасштабных по пространству и по времени процессов.

Также отдельный вопрос – существование двух популяций групп солнечных пятен – мелких короткоживущих SSG и крупных долгоживущих LLG – и отношение этого явления к циклу и его пониманию.

Площади групп пятен распределены билогнормально. Логнормальность распределения в данном случае может быть связана с дроблением среднего магнитного поля конвективными движениями, как это следует из теоремы А.Н. Колмогорова.

Популяции различаются по времени жизни, по дифференциальному вращению, по соотношению меридиональных и долготных движений, по

диапазону широт «бабочек», по соотношению площадей тени и полуутени пятен. В течение цикла изменяется относительное число групп популяций. Средние за 11-летний цикл площади групп пятен испытывают длительные вариации на временах 30-50 лет и драматические изменения средних значений: для SSG – от 5 до 30 мдп, для LLG – от 100 до 350 мдп.

В качестве рабочей гипотезы можно предположить, что первоначально магнитное поле групп LLG популяции образуется в тахоклине и в результате воздействия супергрануляции приобретает логнормальное распределение с типичными супергрануляционными размерами. В то же время, SSG популяция образуется в лептоклине, и размеры ее групп соответствуют мезогрануляции. Эта гипотеза не противоречит наблюдательным фактам.

## Солнечное динамо – современные проблемы и перспективы

**Соколов Д.Д.**  
*МГУ и ИЗМИРАН, Москва, Россия*  
[Sokoloff.dd@gmail.com](mailto:Sokoloff.dd@gmail.com)

По-видимому, можно говорить о том, что современная теория солнечного динамо, поддержанная данными наблюдательного изучения Солнца, достижениями экспериментального изучения явления динамо и другими результатами современной науки, успешно справляется с воспроизведением основных черт цикла солнечной активности Швабе. Как всегда, это не значит, что выяснены все интересные в этой связи вопросы, их изучение будет, конечно, продолжаться в обозримом будущем, но сформировалась возможность наметить определенные перспективы для дальнейшего этапа понимания природы магнетизма Солнца. Цель доклада – сформулировать возможный взгляд на эти перспективы. Как кажется докладчику, среди них можно назвать понимание места солнечного магнетизма среди других видов магнетизма звезд поздних спектральных классов, разработки связи моделей солнечного динамо с изучением природы магнитных явлений в околосолнечной среде и погружение изучения истории солнечного магнетизма в контекст наук о геологической истории Земли.

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

## Полярные фотосферные и корональные магнитные поля Солнца

Биленко И.А.

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
[bilenko@sai.msu.ru](mailto:bilenko@sai.msu.ru)*

Постоянные наблюдения и систематические измерения солнечных магнитных полей начались в шестидесятых годах прошлого века. С первых наблюдений стали понятны сложности наблюдений и интерпретации полярных магнитных полей. Из-за наклона оси вращения Солнца к плоскости эклиптики на  $7.25^\circ$  полярные магнитные поля северного и южного полушарий никогда не наблюдаются одновременно. Фактически можно говорить только о наблюдениях приполярных магнитных полей. При этом следует учитывать, что из-за шарообразной формы Солнца с орбиты Земли реально наблюдается и измеряется не радиальная, а тангенциальная компонента полярных и приполярных магнитных полей. Уже первые наблюдения показали, что напряженность полярных магнитных полей изменяется в ходе цикла солнечной активности, а в максимуме пятенной активности происходит смена знака магнитного поля на полюсах Солнца. На основе этих наблюдений была разработана модель циклического взаимодействия между магнитными полями активных областей и полярных зон [1, 7], которая получила широкое распространение.

Одним из лучших трассеров динамики глобального поля (ГМП) являются корональные дыры (КД). Ряд современных исследований показали, что КД демонстрируют циклическую динамику, которая в корне отличается от циклической эволюции активных областей. Было выявлено смещение зон формирования КД от одного полюса к противоположному [2, 3, 5]. Аналогичные меридиональные потоки были идентифицированы и для фотосферных, и для корональных магнитных полей средней напряженности [4].

Полярные магнитные поля играют важную роль и в физике Солнца, и в процессах формирования межпланетной среды. Параметры полярных магнитных полей являются важными компонентами в моделях космической погоды. На фазах минимума, поздних фазах спада и в начале фаз роста солнечной активности межпланетное магнитное поле практически полностью определяется полярными магнитными полями. В эти периоды в полярных областях доминирует открытая конфигурация магнитного поля, и формируются устойчивые КД, которые являются источниками высокоскоростных потоков солнечного ветра влияющих на состояние космической погоды.

Различные характеристики полярных магнитных полей используются при прогнозировании последующих циклов [6, 8, 9]. Поскольку полярные магнитные поля являются видимым проявлением циклических изменений

полоидальной компоненты ГМП, понимание природы их формирования и эволюции необходимо для построения модели солнечного динамо. Все это говорит о важности изучения полярных магнитных полей и их вариаций в циклах солнечной активности.

Целью данного исследования является детальное рассмотрение закономерностей формирования и циклических вариаций полярных и приполярных магнитных полей в 21-24 и первой половине 25 цикла на основе наблюдательных данные как наземных, так и космических обсерваторий. Результаты свидетельствуют, что основную роль в формировании полярных полей и в процессе смены знака полярного магнитного поля играют транс экваториальные, противофазные, идущие от одного полюса к противоположному, меридиональные потоки магнитных полей положительной и отрицательной полярности, которые однозначно трассируются наблюдаемой динамикой КД.

## Литература

1. Babcock H.W. The Topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle // *Astrophys. J.* V. 133. P. 572-587. 1961.
2. Bilenko I.A. Coronal holes and the solar polar field reversal // *Astron. Astrophys.* V. 396. P. 657-666. 2002.
3. Bilenko I.A. and Tavastsherna K.S. Coronal hole and solar global magnetic field evolution in 1976-2012 // *Solar Phys.* V. 291. P. 2329-2352. 2016.
4. Bilenko I.A. Meridional circulations of the solar magnetic fields of different strength // *Solar. Phys.* V. 299. id. 103. 2024.
5. Huang G.-H., Lin C.-H., Lee L.C. Solar open flux migration from pole to pole: magnetic field reversal // *Scientific Reports.* V. 7. id. 9488. 2017.
6. Kumar P. et al. The polar precursor method for solar cycle prediction: Comparison of predictors and their temporal range // *Astrophys. J.* V. 909. id. 87 (12pp). 2021.
7. Leighton R.B. A magneto-kinematic model of the solar cycle // *Astrophys. J.* V. 156. P. 1-26. 1969.
8. Miletskii E.V., Ivanov V.G., Nagovitsyn Yu.A. Reversals of solar polar magnetic field, amplitudes of 11 year cycles, and special points of sunspot latitude parameters // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 55. P. 1045-1048. 2015.
9. Obridko V.N., Shelting B.D. On prediction of the strength of the 11-year solar cycle no. 24 // *Solar. Phys.* V. 248. P. 191-202. 2008.

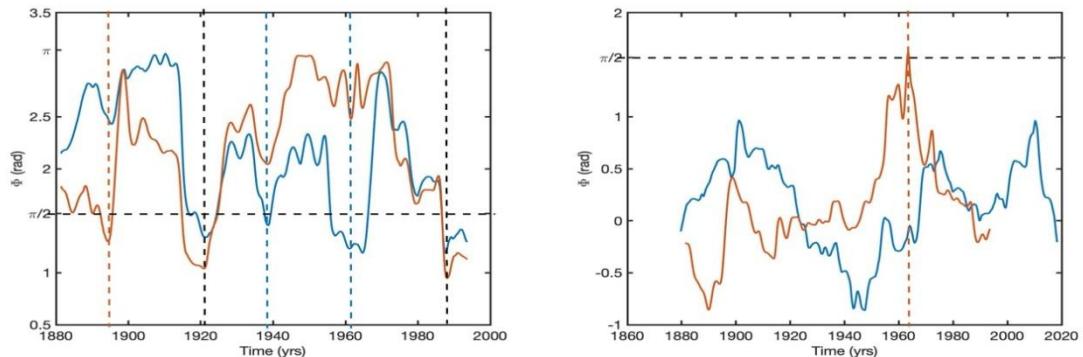
## Оценка долговременной вариации скорости приполярной меридиональной циркуляции по десинхронизации солнечных индексов

Блантер Е.М., Шнирман М.Г.

Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва,  
Россия  
[ablanter@hotmail.com](mailto:ablanter@hotmail.com)

Меридиональная циркуляция вблизи солнечных полюсов изучена хуже, чем на остальных широтах. Понимание того, как устроена меридиональная циркуляция на высоких широтах, позволило бы уточнить модели солнечного динамика и способствовало бы прогнозу солнечной активности [1]. Работа [2] дает оценки высокочастотной вариации меридионального потока на высоких широтах на основе данных станции Debrecen. Мы предлагаем новый метод оценки амплитуды долговременной вариации скорости меридионального потока вблизи полюсов, с временами порядка от 22 лет до цикла Глайсберга, на основе нарушений фазовой синхронизации между полярными факелами и солнечными пятнами вблизи экватора. Мы использовали данные полярных факелов Пулковской обсерватории, интерполированные в дневные ряды и дневные данные площадей солнечных пятен [3], из которых получали временные ряды фаз солнечного цикла при помощи коэффициентов преобразования Фурье. Рис. 1 показывает эволюцию разности фаз  $\Phi$ . Полярные и экваториальные серии в одной полусфере типически находятся в анти-корреляции, захождение из разности фаз за  $\pi/2$  (горизонтальный пунктир) свидетельствует о десинхронизации типа экскурсии. Экскурсии имеют 22-летний цикл. Аналогично, единственная экскурсия между полярными сериями отражает цикл Глайсберга. Мы построили модель синхронизации солнечных рядов при помощи цепочки из четырех Курамотовских осцилляторов (Рис. 2), в которой крайние осцилляторы соответствуют полярным областям, а средние – экваториальной циркуляции в северной и южной полусферах. Модель предполагается, в среднем, симметричной относительно экватора и имеет два постоянных коэффициента связи  $K_1$  и  $K_2$ . Вариация естественных частот, симулирующих скорости меридионального потока, определяется 22-летним циклом, симметричным относительно экватора и циклом Глайсберга, антисимметричным относительно экватора. В предположении, что экскурсии возникают в результате осцилляций естественных частот, мы оценили средние параметры модели и длину цикла Глайсберга из эволюции разностей фаз. Значение кросс-экваториальной связи  $K_2=0.55$  было взято из [4]. Проведя прямое моделирование, мы определили, при каких значениях амплитуд  $A_p$  (22-летнего цикла) и  $a_p$  (цикла Глайсберга) на полюсах, в течение 120 лет могут реализоваться экскурсии, подобные солнечным. Рис. 3 показывает полученную область значений амплитуд (зеленым), в которой могут возникать солнечные экскурсии. Мы получили, что амплитуда цикла

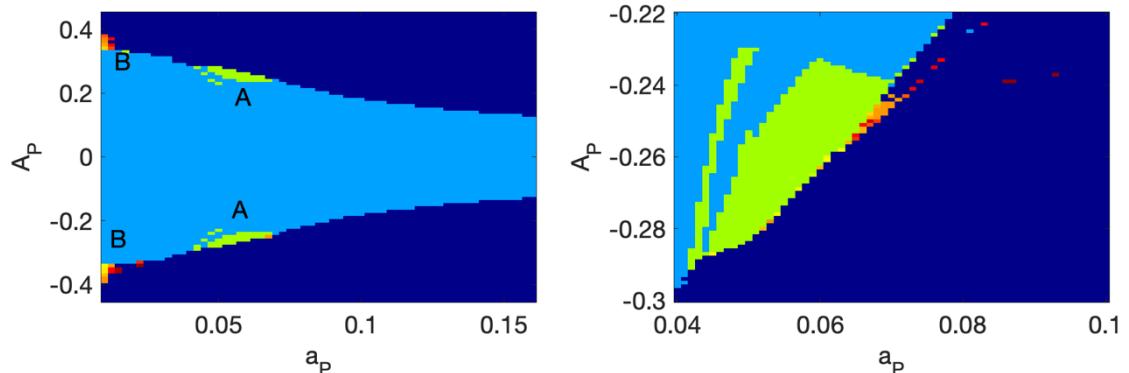
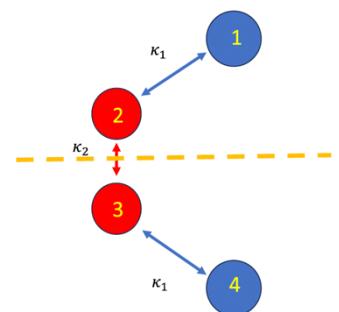
Глайсберга примерно в 5-6 раз меньше амплитуды 22-летнего цикла на полюсе и амплитуды цикла Глайсберга на экваторе.



**Рисунок 1.** Эволюция разницы фаз между экватором и полюсом в одной полусфере (слева: северная полусфера – синим, южная – красным) и между двумя полусферами (справа: экватор – синим, полюса – красным).

**Рисунок 2.** Схема модели симметричной цепочки Курамото, описывающей солнечную синхронизацию.  
Пунктиром изображен экватор.

**Рисунок 3.** Область А (слева) соответствует зоне солнечных экскурсий. Справа она же в увеличенном виде.



### Литература

1. Nandy D. et al. Exploring the solar poles: the last great frontier of the Sun. // Bull. Am. Astron. Soc. V55, P287. 2023
2. Elek A. et al., Exploring spatial and temporal patterns in the Debrecen solar faculae database: part I. // Astrophys. J. V 964, P 112. 2024
3. Mandal S. et al. Sunspot area catalog revisited: daily cross-calibrated areas since 1874. // Astron. Astrophys. V 640, A78. 2020
4. Blanter E. et al., Reconstruction of the North-south solar asymmetry with a Kuramoto model. // Solar Phys. V292, P54. 2017

## Периодические структуры в слабых магнитных полях фотосферы

Вернова Е.С.<sup>1</sup>, Тясто М.И.<sup>1</sup>, Баранов Д.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>СПбФ ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

[d.baranov@bk.ru](mailto:d.baranov@bk.ru)

Исследование циклических изменений слабых магнитных полей выполнялось на основе синоптических карт фотосферного магнитного поля за период 1978–2016 гг. (NSO Kitt Peak). Для выделения вклада слабых магнитных полей порог насыщения для синоптических карт был установлен на уровне 5 Гс. На основе преобразованных синоптических карт была построена диаграмма широта-время, представляющая собой распределение дисбаланса положительных и отрицательных магнитных полей. Проявлением дисбаланса магнитных полей являются потоки Rush-to-the-Poles (RTTP), которые имеют знак магнитного поля, совпадающий со знаком хвостовых пятен. Эти потоки дрейфуют от широты 30° в каждом полушарии до полюса и приводят к переполюсовке полярного поля.

Новое явление, получившее название «ripples», было обнаружено в работах [1,2], в которых наблюдался дисбаланс магнитного поля в виде ряда узких потоков с чередующимися знаками поля. Было показано, что полярность этих потоков изменяется с периодом порядка двух лет подобно квазидвухлетним вариациям.

В нашей работе [3] исследовались свойства потоков ripples, причем было показано, что интервалы, содержащие ripples, располагаются между двумя областями RTTP – по 3 интервала в каждом полушарии.

Были рассмотрены два набора широт, распределенных от экватора до 50° каждого полушария. На протяжении четырех солнечных циклов можно выделить в каждом из полушарий три временных интервала, которые включают спад, минимум и подъем солнечной активности, во время которых наблюдались ripples. Для широт северного полушария интервалы получили названия N1, N2, N3, для широт южного полушария – S1, S2, S3. Исследование периодических структур ripples показало попеременное чередование потоков разной полярности, изменяющейся аналогично квазидвухлетним вариациям.

На рис. 1 показана гистограмма периодов гармоник Фурье для всех значений периодов, которые были получены для разных широт. Диапазон периодов лежал в интервале от 0.5 до 4 лет с максимумом на 1.2 г. и со средним периодом, равным  $T=1.48$  г. Группу ripples с периодом больше 2.5 лет, по-видимому, следует отнести к случайным выбросам. При исключении этой группы (8 случаев из 72) средний период равен  $T=1.30 \pm 0.06$  года.

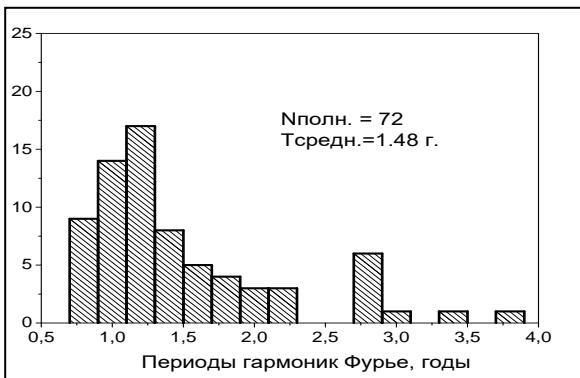


Рис. 1

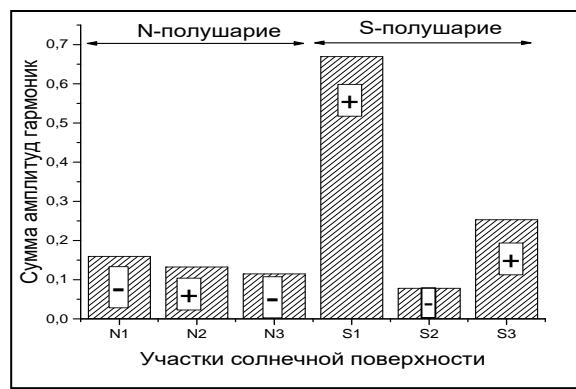


Рис. 2

Между двумя RTTP знак полярного поля в каждом полушарии сохраняется. На рис. 2 дана гистограмма суммарных амплитуд для каждого из интервалов N или S. Период, обозначенный N1, соответствует знаку полярного поля «-», в то время как S1 – знаку «+». Для каждого из 6 интервалов указан знак полярного поля в этот период. Обнаружено, что амплитуда ripples значительно выше для тех интервалов, у которых полярное поле имело положительный знак (рис. 2). Сумма всех значений амплитуды за интервалы с полярным полем «+» в 3 раза больше суммы всех значений амплитуды для интервалов со знаком поля «-». Это указывает на связь амплитуды вариаций типа QBO (ripples) с полярностью 22-летнего магнитного цикла (крупномасштабные магнитные поля). Таким образом, два типа явлений – RTTP и ripples оказываются в тесной связи друг с другом, как во времени, так и в расположении на поверхности Солнца.

### Литература

1. Vecchio A. et al. The dynamics of the solar magnetic field: polarity reversals, butterfly diagram, and quasi-biennial oscillations // *Astrophys. J.* V. 749. Art No 27. 2012.
2. Ulrich R.K., Tran T. The global solar magnetic field – identification of traveling, long-lived ripples // *Astrophys. J.* V. 768. Art No 189. 2013.
3. Vernova E.S., Tyasto M.I., Baranov D.G. Ripples and Rush-to-the-Poles in the Photospheric Magnetic Field // *Sol. Phys.* V. 298. I. 5. Art No 69. 2023.

## Связь между яркостью тени и магнитным полем в солнечных пятнах: эффект насыщения

Живанович И.<sup>1</sup>, Смирнова В. В.<sup>2</sup>, Цап Ю. Т.<sup>2</sup>, Соловьев А. А.<sup>3</sup>,  
Королькова О. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белградская астрономическая обсерватория, Белград, Республика Сербия

<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория, пгт. Научный, Россия

<sup>3</sup>Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

[izivanovic@aob.rs](mailto:izivanovic@aob.rs)

Изучение связи основных физических параметров солнечных пятен играет в физике Солнца важную роль. Такими параметрами являются индукция магнитного поля в различных областях пятна (в частности в центре пятна и на его границе) и яркость пятна внутри его тени. В данной работе проводится исследование взаимосвязи магнитного поля и яркости для темных структур на Солнце различного масштаба (солнечные пятна, поры). В качестве наблюдательного материала использованы данные инструмента HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) [1], расположенного на борту SDO (Solar Dynamics Observatory) [2] и HINODE. Преимущество этих данных в том, что они дают одновременные значения яркости и индукции магнитного поля с высоким пространственным и временным разрешением. Известно, что перемешивающая (overturning) конвекция плазмы эффективно подавляется магнитным полем, и потому при достаточно сильных магнитных полях на Солнце мы наблюдаем образование темных и холодных структур (пор, солнечных пятен).

В данном исследовании получена зависимость яркости в континууме от магнитного поля солнечных пятен (рисунок 1). Отчетливо проявляется эффект подавления конвекции магнитным полем: с ростом напряженности поля яркость уменьшается, что вызвано более сильным подавлением конвекции. Подтвержден эффект насыщения: при тех магнитных полях, которые обычно наблюдаются в солнечных пятнах, с дальнейшим ростом магнитного поля (больше 2600 Гс) яркость тени уже не падает, а остается на некотором постоянном уровне, т.е. достаточно сильное вертикальное магнитное поле полностью подавляет конвективный перенос тепла в области тени пятна, что полностью подтверждает известную идею Бирмана [3]. Эффект насыщения проявляет себя не только для сильных, но и слабых магнитных полей (магнитная индукция меньше 500 Гс), когда уменьшение поля не сопровождается заметным изменением яркости.

Важно отметить, что согласно теоретической модели неглубокого пятна [4, 5], именно солнечные пятна с напряженностью около 2600 Гс наиболее устойчивы, и период их собственных колебаний минимален (10-12 часов), что подтверждается наблюдениями [6].

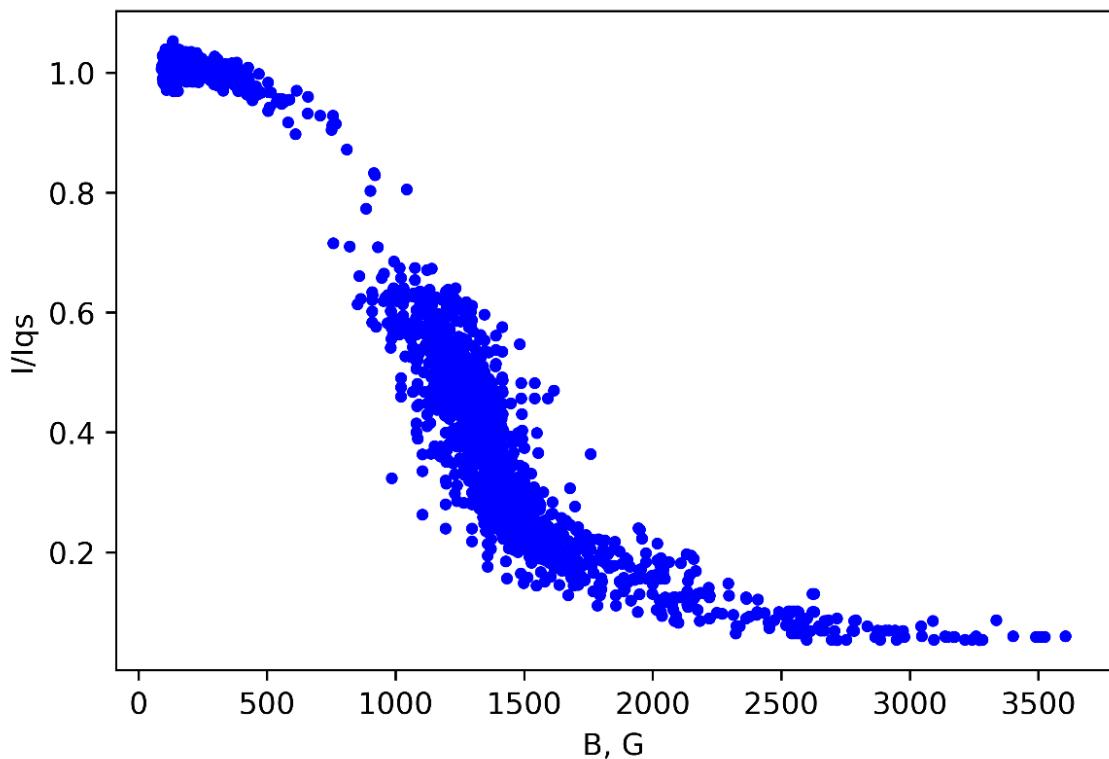


Рисунок 1. Зависимость интенсивности от магнитной индукции. По вертикали отложены измерения интенсивности в континууме (значения нормированы на интенсивность спокойного Солнца). По горизонтали – магнитной индукции в Гс.

#### 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 Physics. V. 275. P. 229 – 259. 2012.
2. Pesnell W. D. et al. The Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics. V. 275. P. 3 – 15. 2012.
3. Biermann L. Der gegenwärtige stand der theorie konvektiver sonnenmodelle // Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft. V. 76. P. 194 – 200. 1941.
4. Solov'ev A.A. et al. Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and eigen oscillations // Astrophysics and Space Science. Vol. 352. No.1, P. 23 – 42. 2014.
5. Соловьев А.А., Основные свойства солнечных пятен: равновесие, устойчивость и собственные колебания мелкого солнечного пятна. В сб. «Современные достижения в плазменной гелиогеофизике». М. ИКИ РАН. стр. 79-108. 2016.
6. Efremov V.I. et al. Long-term oscillations of sunspot magnetic field and a special class of artifacts in SOHO/MDI an SDO/HMI data // Astrophysics and Space Science. V. 363. №3. P. 1 – 14. 2018.

## Неоднозначности в применении систем классификации групп солнечных пятен

Жукова А.В., Абраменко В.И.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым, Россия  
[anastasiya.v.zhukova@gmail.com](mailto:anastasiya.v.zhukova@gmail.com)

Солнечные активные области (АО) могут нести отпечаток глубинных подфотосферных процессов. Особенности магнитной конфигурации АО в значительной мере определяют их вспышечную продуктивность и способность производить сильные геоэффективные события. Для упорядочения информации о магнитном строении АО, описания этапов их эволюционного развития и статистических исследований используются классификационные системы, многие из которых имеют более чем столетнюю историю.

Наиболее часто используются две из традиционных классификационных систем для групп солнечных пятен: классификация McIntosh (модификация более ранней системы Zurich), основанная на наблюдениях в белом свете [1], и классификация Mount Wilson Observatory (MWO или Hale-class), использующая данные о магнитном поле АО [2]. В предыдущих докладах [3], [4] рассмотрены сравнительные особенности этих, а также других, менее известных, классификационных систем, определены их достоинства и ограничения.

Среди установленных важных обстоятельств нужно отметить следующие. Во-первых, для классификационных систем, основанных на наблюдениях в белом свете, принципиально невозможно отождествление существенных магнитных особенностей АО: многополярного характера сложных групп, дельта-структур (близко расположенных ядер разной полярности в общей полути, что формирует конфигурацию, ведущую к экстремальной вспышечной продуктивности подобных АО [5]), анти-Хейловских групп и т.п. Избыточность, пересечение классов и некоторые другие недостатки подобных систем указаны в монографии [6]. Во-вторых, для самой распространенной магнитной классификации MWO существует несколько не вполне согласованных между собой описаний, значительно отличающихся от исходной системы Д.Э.Хейла (оригинальный Hale-class). В-третьих, при использовании автоматических алгоритмов возможность многих ошибок определена самим устройством изначального кода. Невозможность создания, например, идеального алгоритма выделения АО обсуждалась в работе [7]. Кроме того, субъективность подхода наблюдателя (или группы наблюдателей, вносящих свое прочтение в общепринятые, установленные для той или иной системы правила) также имеет место, и может быть выше ожидаемой.

Все это сказывается на качестве классификационных данных: возможны нарушения однородности конкретных рядов, затруднено соединение и сопоставление данных разных рядов между собой.

В представленном докладе приводятся примеры неоднозначностей, возникающих при классификации групп солнечных пятен по системам MWO, McIntosh на основании данных наблюдательных сайтов Helioviewer.org, SolarMonitor.org и длительного ряда наблюдений на сайте Solarcyclescience.com. Проводится сравнение данных, приведенных для каждой конкретной АО в разных источниках. Обсуждаются случаи нарушения принципов, заложенных в основу рассматриваемых классификационных систем, а также ошибки в действии автоматических алгоритмов. Проводится сопоставление полученных по вышеупомянутым схемам классификационных данных с результатами классификации групп солнечных пятен по предложенной недавно [8, 9] магнито-морфологической классификации АО Крымской астрофизической обсерватории.

Делается вывод о необходимости тщательной проверки и подготовки данных существующих рядов наблюдений как при изучении индивидуальных АО, так и при использовании статистических методов исследования. В наибольшей мере это касается работы с большими базами данных с применением методов машинного обучения.

### Литература

3. McIntosh P.S. // Solar Phys. 1990. V. 125. P. 251.
4. Hale G.E., Ellerman, F., Nicholson, S. B. // Astrophys. J. V. 49. P. 153.
5. Жукова А.В., Абраменко В.И. / Двадцатая ежегодная конф. «Физика плазмы в солнечной системе», г. Москва, ИКИ РАН, 10 – 14 февраля, 2025. Сб. тез. С. 35.
6. Жукова А.В., Абраменко В.И. / Всероссийская конф. "Магнетизм и активность Солнца - 2025", пгт. Научный, 30 – 4 июля, 2025. Сб. тезисов (<https://sun.crao.ru/abstracts2025>).
7. Künzel H. // Astron. Nachr. 1960. V. 285. P. 271.
8. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. 1985. Москва: Наука. С. 214.
9. Stenflo J.O., Kosovichev A.G. // 2012 Astrophys. J. V. 745. P. 129.
10. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomag. Aeron. 2018. V. 58. P. 1159.  
Abramenko V.I. // MNRAS, 2021, V. 507, P. 3698.

## Солнечная активность по наблюдениям Филиппа де Ла Ира с 1684 по 1702 г.

Золотова Н.В.<sup>1</sup>, Вохмянин М.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет Оулу, Оулу, Финляндия

[ned@geo.phys.spbu.ru](mailto:ned@geo.phys.spbu.ru)

Солнечные наблюдения в Парижской обсерватории в период второй половины семнадцатого века формируют самый крупный архив прямых наблюдательных данных о пятнообразовании в период минимума Маундера. Наблюдения Жана Пикара, отца и сына ла Ир, семьи Кассини и их учеников были рассмотрены в работе [1]. Элизабет Нем-Риб восстановила число пятен (здесь это эквивалентно числу групп), широтно-временное распределение пятен, вариации солнечного диаметра, широтный профиль дифференциального вращения по пятнам, проанализирована активные долготы, и др. К сожалению, все восстановленные данные и материалы работ Элизабет Нем-Риб были утеряны.

Ввиду востребованности солнечных данных в период минимума Маундера сегодня приходится заново выполнять восстановление параметров солнечной активности по парижским наблюдениям. В данной работе мы представляем восстановление полного набора данных для каждого пятна и каждой группы пятен. На данный момент мы проанализировали наблюдения Филиппа де ла Ира с 1684 по 1702 г. и восстановили широты, долготы и площади (тени и полутени) для каждого пятна. Такой же набор параметров был получен и для групп пятен.

Измерения положения пятен, обычно это наибольшее пятно в группе, или дано указание положение какого пятна измерено, обычно проводились в полдень с использованием маленького 3-футового телескопа. Иногда в утренние или вечерние часы ла Ир использовал телескоп большего размера для зарисовки тонкой структуры группы пятен. Обсерватория в Медоне была оборудована несколькими телескопами. Наибольший из упоминаемых достигал 45 футов.

Мы восстановили гелио-координаты измеренных положений пятен в полдень и вычислили их среднюю скорость вращения, что позволило нам рассчитать координаты каждого пятна в утренние часы, когда были сделаны зарисовки.

Полученное широтно-временное распределение пятен было сравнено с распределением пятен из работы Шпёйера [2] и Нем-Риб [1]. Отметим, что Шпёйер не восстанавливал широты пятен, но собрал широты, рассчитанные ла Иром, отцом и сыном Кассини в их оригинальных публикациях. Сравнение с нашей реконструкцией показало высокое соответствие с широтами из [2], но ряд расхождений с [1]. Возможной причиной последнего

может быть неполный набор наблюдательных архивов, проанализированных нами на данный момент.

Также мы восстановили широтный профиль дифференциального вращения и сравнили его с результатами [1] и гринвичским профилем для регулярных пятен. Наконец, мы оценили долю групп пятен подчиняющихся и нарушающих закон Джоя. Все аннотированные зарисовки и восстановленные данные выложены на сайте <https://geo.phys.spbu.ru/~ned/History.html>.

### Литература

1. Ribes, J.C., Nesme-Ribes, E., The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715 // Astron. Astrophys. V. 276, P. 549. 1993
2. Spoerer, G., Ueber die periodicitat der sonnenflecken seit dem Jahre 1618..., Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1889

## Как долго живут активные долготы?

Иванов В.Г.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург  
[vgivanov@mail.ru](mailto:vgivanov@mail.ru)

Солнечные активные долготы (АД) — это долготные диапазоны, активность в которых повышена в течение продолжительного времени. Исследования АД имеют длинную историю, которая восходит, как минимум, к началу XX века (см. обзор ранних работ в [1]). Для этого изучают распределения как солнечных пятен, так и вспышек [2], корональных образований [3], факелов и ярких точек [4], и т.д. Диапазон времён жизни АД, который рассматривают исследователи, также весьма широк — от нескольких солнечных оборотов до десятилетий и более. Достаточно распространена точка зрения (см., например, [4, 5]), что некоторые АД живут на Солнце более века.

Однако наличие неоднородности в долготном распределении само по себе ещё не говорит о существовании АД. Требуется показать значимость этой неоднородности, и данный доклад посвящён анализу этого аспекта проблемы.

**Данные и метод.** Мы используем данные расширенного Гринвичского каталога [6], который содержит данные о 41282 группах солнечных пятен за 143 года (1874–2016). Каждую группу считаем одним событием с кэррингтоновскими координатами, которые группа имела в тот момент, когда её площадь была максимальной. Разделив долготный диапазон на 9 интервалов (бинов) шириной  $40^\circ$ , мы строим гистограммы распределения групп по бинам за всё время наблюдения («полная гистограмма») или в наборе последовательных промежутков с длинами  $T$  («парциальные гистограммы»). Очевидно, что полная гистограмма равна сумме парциальных. Для определения значимости долготной неоднородности воспользуемся  $\chi^2$ -критерием [7]. Величина  $\chi^2 = \sum_{i=1}^9 \frac{(B_i - E_i)^2}{E_i}$ , где  $B_i$  и  $E_i$  — соответственно наблюдаемое и ожидаемое количество событий в  $i$ -м бине, распределена как хи-квадрат с  $n - 1 = 8$  степенями свободы. Если принять за нуль-гипотезу однородность распределения, то  $E_i = E = Q / 9$ , где  $Q$  — полное число событий.

**Результаты.** Для полной гистограммы групп пятен  $\chi^2 = 20.2$ , что со значимостью  $\alpha = 0.01$  подтверждало бы наличие долгоживущей АД, если бы такие неоднородности отсутствовали на меньших масштабах. Поэтому ставим вопрос так: если парциальные гистограммы, накапливаемые за время  $T$ , неоднородны, но корреляция между ними отсутствует, то какова вероятность  $\alpha$  того, что полная гистограмма будет иметь неоднородность не ниже наблюдаемой? Для оценки  $\alpha$  воспользуемся методом Монте-Карло: будем многоократно случайным образом перемешивать значения в бинах  $B_i$  в

каждой из годовых парциальных гистограмм (тем самым мы гарантируем, что реальные долготные регулярности на временах больше  $T = 1^y$  отсутствуют), а затем соединять их в полную. Полученная статистика показывает, что вероятность получить для полной гистограммы  $\chi^2 \geq 20.2$  примерно равна 0.4. Иными словами, наблюдаемая неоднородность полной гистограммы соответствует однородному распределению со значимостью  $\alpha \approx 0.4$ , и гипотеза о существовании АД со временем жизни около полутора веков должна быть отвергнута. Аналогичным способом можно показать, что долготные неоднородности со временем жизни около цикла также статистически незначимы ( $\alpha \approx 0.9$ ).

Некоторые исследователи не ограничиваются кэррингтоновской системой отсчёта (СО), а ищут такую скорость её вращения, которая давала бы максимальную неоднородность полученного распределения (см., например, [5, 8, 9]). Вычисление показывает, что в диапазоне синодических периодов вращения СО от  $20^d$  до  $34^d$  максимум долготной неоднородности распределения групп пятен достигается при периоде  $P = 27.34^d$  и составляет  $\chi^2 = 79.3$ . Однако используя метод, аналогичный применённому выше — рандомизируя парциальные гистограммы, а затем суммируя их с учётом сдвига, возникающего из-за отличия скорости вращения СО от кэррингтоновской — можно показать, что и в этом случае гипотеза о долготной неоднородности должна быть отвергнута со значимостью порядка  $\alpha \sim 0.25$ .

**Выводы.** Таким образом, данные о группах пятен расширенного Гринвичского каталога не подтверждают наличия АД со временами жизни около одного солнечного цикла или более. Наблюдаемые долготные неоднородности на этих временах незначимы и, по-видимому, являются следствием наличия АД со временами жизни около года.

### Литература

1. Losh H.M. Distribution of sun-spots in longitude // Publ. Observ. Michigan. V. 7. No. 5. P. 127–145. 1939.
2. Warwick C.S. Longitude distribution of proton flares // Astrophys. J. V. 141 P. 500. 1965.
3. Sýkora L. The longitudinal distribution of the green corona activity // Sol. Phys. V. 18. Iss. 1. P.72–83. 1971.
4. Mikhailutsa V.P. and Makarova V.V. The Sector Structure of the Active Longitudes in Solar Cycles // Sol. Phys. V. 155. Iss. 2. P. 391–400. 1994
5. Berdyugina S.V., Usoskin I. Active longitudes in sunspot activity: Century scale persistence // Astron. Astrophys. V. 405, P. 1121–1128. 2003.
6. <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
7. Закс Д. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976.
8. Bogart R.S. Recurrence of solar activity: Evidence for active longitudes // Sol. Phys. V. 76, P. 155–165. 1982.
9. Mikhailutsa V.P., Makarova V.V. The sector structure of the active longitudes in solar cycles // Sol. Phys. V. 155. P. 391–400. 1994.

## Оценка параметров динамо-моделей с помощью нейро- дифференциальных уравнений

Илларионов Е.А.<sup>1,2</sup>, Степанов Р.А.<sup>2</sup>, Кузанян К.М.<sup>3,2</sup>, Киселюс В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИМСС, Москва, Россия

<sup>3</sup>ИЗМИРАН, Москва, Россия

[egor.illarionov@math.msu.ru](mailto:egor.illarionov@math.msu.ru)

Одним из центральных вопросов при изучении динамо-моделей и их согласовании с наблюдательными данными является оценка альфа-эффекта – нелинейного параметра динамо-уравнения, отвечающего за генерацию магнитного поля турбулентностью. Основная трудность состоит в моделировании механизма обратной связи, который приводит к подавлению динамо. Обычно, ее конкретная форма подбирается исходя из качественных соображений и общего согласия результата прямого численного моделирования с поведением, ожидаемым, например, в рамках солнечного цикличности. Мы предлагаем подход, который, во-первых, позволяет автоматизировать процесс подбора оптимальных параметров уравнения и, во-вторых, оценивать степень неопределенности в их значениях. Суть подхода, известного как нейро-дифференциальные уравнения, состоит в том, что неизвестные параметры дифференциальных уравнений заменяются нейросетью (или, иными словами, параметрическим семейством функций), уравнение интегрируется по стандартным численным схемам, решение сравнивается с целевым и вычисляется градиент от получаемой ошибки по параметрам нейронной сети. Далее, методом градиентного спуска находятся параметры, минимизирующие ошибку. На примере простейшей одномерной модели альфа-омега динамо мы показываем, как этот подход позволяет оценивать зависимость альфа от магнитного поля, динамо число и начальные значения. Мы также воспроизводим ситуацию, характерную для реальных данных, когда наблюдаются не все компоненты магнитного поля, а только часть, и показываем многообразие параметров динамо-модели, дающих схожие решения. Для иллюстрации подхода на реальных данных мы приводим результаты подбора параметров динамо-модели, воспроизводящие усредненный солнечный цикл.

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

## Развитие текущего цикла солнечной активности на ветви роста и в начале спада

Ишков В.Н.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.  
Н.В.Пушкина РАН, Троицк, Москва, Россия  
[ishkov@izmiran.ru](mailto:ishkov@izmiran.ru)

Рассмотрены основные характеристики и ход развития текущего 25 цикла солнечной активности (СА) после пяти с половиной лет эволюции, который развивается согласно сценарию цикличности достоверных солнечных циклов (СЦ). Кривая развития в фазе максимума за август 2025 г. относит текущий цикл к средним по величине относительных чисел солнечных пятен и в очередной раз подтверждает, что внутри эпох СА, наблюдательные правила и закономерности развития отдельных СЦ неуклонно выполняются. В октябре 2024 г. СА прошла точку максимума и подтвердила, что текущий цикл стал одногорбым, как и все известные достоверные циклы средней величины кроме переходного СЦ23. Переполосовка началась с северного полушария и прошла довольно быстро – с июля 2023 г. по июль 2024 г. На июнь 2025 г. количество значимых (рентгеновского класса  $M \geq 1$ ) солнечных вспышек достигло 1686, из которых 1457 были средних классов ( $M < 5$ ), 145 – рентгеновских классов M5 – M9.9 и 84 классов X, т.е. текущий цикл обошел предыдущий низкий СЦ24 и переходной между эпохами СЦ23. 8% из этих значимых вспышек (139) осуществилось в мае 2024 г., тогда как в марте 1991 г. их было 179 и на две вспышки класса X больше (23 против 21). Это был первый месяц с сентября 2005 г., когда осуществилось больше десятка вспышек класса X. Вторым вспышечно-активным периодом текущего СЦ стал октябрь 2024 г. (122 вспышки M и X-классов). Т. о., 2024 г. стал третьим годом по количеству значимых вспышек за один год после 1989 и 1991 годов (922, 968 и 979 соответственно), но надо отметить, что последние два года относятся к СЦ повышенной СА. Для сравнения: СЦ24 за все время произвел 1200 вспышек класса M и X. Самыми интенсивными вспышками в текущем цикле были вспышка X9.0 в AR13842 3.10.2024 г и X8.7, в AR13664 14.05.2024 г., однако по данным Solar Orbiter/STIX, в пересчёте на систему GOES в 2024 г. были отмечены вспышки классов X16 (20.05) и X14 (22.07) [1].

Первое солнечное протонное событие (СПС) с энергиями  $\geq 10$  МэВ произошло 29.05.2021 г., (15 pfu). На данный момент осуществилось  $\sim 40$  СПС ( $\geq 10$  pfu), из которых 2 были класса S3 и 11 – S2. Самые интенсивные СПС произошли 8.06 и 9–10.10.2024 г. (1030 pfu и 1810 pfu). Источником первого была вспышка M9, в AR13697 (2-й оборот 13664), второго – вспышки X-класса AR13848. По данным нейтронного монитора в Оулу в текущем цикле уже наблюдалось 4 довольно слабых GLE-события с максимальным ростом числа нейtronов от 8% до 17%. Для сравнения, GLE,

связанные с событиями 14.07.2000 г. и октября 2003 г., достигли 58% и 45% соответственно. Первое из них (#73) было связано с СПС от вспышки X1.0 28.10.2021 г. с пиковой интенсивностью 29 pfu ( $\geq 10$  pfu). Второе (№ 74), – 11.05.2024 г. и от вспышки класса X5.8 в AR13664. Здесь поток протонов с  $E > 10$  МэВ достиг значения 116 pfu. Два других GLE произошли 8.6.2024 г. (AR13697) и 21.11.2024 г.

Сглаженный суточный уровень корональных выбросов вещества (СМЕ) достиг (первого) максимума в 6,1 СМЕ в день в мае 2023 г., то есть через 41 месяц после его минимума. Это значение превышает максимальные значения, зарегистрированные в предыдущие солнечные циклы 23 и 24 (соответственно 5,0 и 5,9 СМЕ в день). Абсолютное месячное значение достигло максимума в феврале 2023 года (7,8 СМЕ в день), что является самым высоким показателем с момента запуска SOHO более 25 лет назад.

Самая интенсивная магнитная буря произошла 10–11.5.2024 г. (экстремальная, 7-е место с момента начала измерений Dst в 1957 г.), когда Кр-индекс достиг 9о в нескольких интервалах наблюдений. Рекордсменом по Dst-индексу является знаменитая экстремальная МБ 13–14.03.1989 г. (-589 нТ). Вторая по величине магнитная буря текущего цикла произошла 10–11.10.2024 г., достигнув уровня очень большой магнитной бури (Кр = 9-, Ar = 300 нТл). С момента введения Dst-индекса в 1957 году и до сентября 2025 г. было 698 дней по крайней мере с одним часовым интервалом, когда Dst достигал -100 нТл или ниже и всего 13 дней, когда отмечен  $Dst < -350$  нТл. Большие магнитные бури произошли 23–24.03 (Dst = -163 нТл), 23–24.04 (Dst = -213 нТл), 5.11.2023 г. (Dst = -163 нТл), 12.08.2024 г. (-188 нТл) и 10–11.10.2024 г. (-333 нТл).

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

Текущий СЦ уникален своими наблюдательными возможностями, предоставляемыми космическими проектами, запущенными во внутреннюю гелиосферу (Solar Orbiter, Parker Solar Probe, BepiColombo), впервые предоставляя отличные возможности для изучения различных активных, в том числе и геоэффективных, явлений на Солнце с помощью нескольких космических аппаратов в сочетании с высокой частотой солнечных, гелиосферных и наземных наблюдений в различных диапазонах электромагнитных и корпускулярных излучений.

### Литература

Stiefel1, M.Z. , Matej Kuhar3 , Olivier Limousin, Using the STIX background detector as a proxy for GOES, A&A, 694, A138 (2025)

## О мере площади солнечного пятна на магнитограммах SDO/HMI

Королькова О.А., Макаренко Н.Г., Волобуев Д.М., Князева И.С.

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

[korolkova@gaoran.ru](mailto:korolkova@gaoran.ru)

Определение площадей солнечных пятен традиционно основано на фотометрических критериях. Однако для изучения физики процессов преимущественно используют магнитограммы, так как именно магнитное поле лежит в основе большинства явлений на Солнце.

Поток магнитной индукции  $\mathbf{B}$  в солнечном пятне чаще всего оценивается по компоненте поля вдоль луча зрения  $B_{\text{los}}$ . В качестве меры площади применяются два подхода: (1) евклидова площадь односвязной области, выделенной как множество точек  $A_u$ , где измеренное значение индукции превышает заданный порог  $B > u$ ; (2) проекционная площадь пятна в фотосфере, определяемая на магнитограммах с использованием традиционных (в том числе градиентных) методов сегментации. Очевидно, что оба подхода существенно зависят от выбора порогового значения магнитной индукции или граничной изофоты и, следовательно, не могут рассматриваться как строго корректные меры [1].

При работе с цифровыми изображениями особый интерес представляют многоуровневые вероятностные подходы, использующие статистическое описание. Перспективным является использование многомасштабного анализа изображений [2] и статистических моделей природных изображений для повышения объективности при определении площадей и магнитных характеристик пятен.

В данной работе мы используем данные SDO, которые являются одними из наиболее полных и популярных в современных исследованиях солнечной активности. Мы обсуждаем оценку площади на магнитограмме, основанную на гельдеровском показателе сингулярности  $h(x)$  для плотности регулярной и локально конечной меры Радона, определяемой существованием магнитного поля на конечной евклидовой области солнечной поверхности, являющейся её носителем. Такую меру можно представить, как «краску», нанесённую на область точками, линиями или равномерными слоями. Соответственно, показатели сингулярности принимают значения  $h(x)=0, 1$  или  $n$ , где для одного равномерного слоя  $n=2$ . Это описание учитывает статистические свойства распределений значений поля на цифровых магнитограммах, которые характеризуются тяжелыми хвостами и высоким куртозисом. Значения  $h(x)$  регулярны для  $h(x)=0$  и  $h(x)=2$ ; все прочие значения называются сингулярными – они выделяют текстурные паттерны магнитограммы. Для численной оценки мы использовали технику ёмкостей Шоке [3].

Анализ выборки пар «изображение пятна в континууме – его магнитограмма» показал, что понятие площади в традиционном смысле

уместно только для фотосферного изображения. Для магнитограмм «обычной» площадь ( $h(x)=2$ ) составляет не более 10% многосвязной текстурной карте всех показателей. Это ставит важный вопрос: каким образом корректно определять магнитный поток для таких сложных форм?

### Литература

1. Obridko, V.N., Katsova, M.M., Sokoloff, D.D. *et al.* Clarifying Physical Properties of Magnetic Fields in Sunspots. *Sol Phys* **297**, 131 (2022).
2. Huang, J., Mumford, D. Statistics of natural images and models. Proceedings. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, CO, USA, Vol. 1, pp. 541-547 (1999).
3. Макаренко Н.Г., Круглун О.А., Макаренко И.Н., Каримова Л.М. Мультифрактальная сегментация данных дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. № 3. С. 18-26. (2008).

## Квази-двуухлетние вариации площади солнечных пятен: оценка вклада больших активных областей

Костюченко И.Г.<sup>1</sup>, Вернова Е.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИФХИ им.Л.Я.Карпова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский Филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия

[irkost46@gmail.com](mailto:irkost46@gmail.com)

Наиболее известной и высокоамплитудной вариацией солнечной активности является 11-летний цикл, развитие которого описывает теория динамики среднего поля. На фоне 11-летнего цикла наблюдаются более короткопериодические вариации с неустойчивым периодом порядка 2-лет, получившие название квази-двуухлетние осцилляции (КДО), природа которых остается дискуссионной. Эти вариации наблюдаются в большинстве индексов солнечной активности, в крупномасштабном магнитном поле Солнца, а также в параметрах межпланетной среды и галактических космических лучей. В спектрах мощности временных рядов этих индексов КДО проявляются в виде увеличения спектральной мощности в диапазоне частот, соответствующих периодам 1-3 года. Кроме того, как показано в [1], спектр мощности временного ряда чисел Вольфа изменяет показатель наклона в области частот, соответствующих периоду 2.5-3 года.

В данной работе исследуются квази-двуухлетние вариации площади солнечных пятен в солнечных циклах 12-24. Анализировалась эволюция площади всех наблюдавшихся солнечных пятен и, отдельно, тех, которые входят в наиболее крупные группы пятен, с площадью больше 500мдп и 1000мдп. При этом, в отличие от предыдущего анализа, площадь каждой такой группы учитывалась за все время ее наблюдения, а не только когда она превышала указанный размер. Анализировались также вариации площади пятен, входящих в группы, площадь которых не достигала размера 500мдп. В каждом из широтных полушарий КДО анализировались отдельно, поскольку из предыдущих исследований известно, что КДО развиваются в широтных полушариях независимо. Использовались данные о площадях и координатах групп солнечных пятен Royal Greenwich Observatory (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>) за 1874–1976гг., а поскольку в 1976 году регулярные наблюдения в RGO были завершены, за 1977–2024 годы использовались аналогичные данные Кисловодской Горной Станции, ([http://158.250.29.123:8000/web/Soln\\_Dann](http://158.250.29.123:8000/web/Soln_Dann)). КДО выделялись вычитанием ряда анализируемого индекса, сглаженного скользящим окном 25 месяцев из ряда, сглаженного скользящим окном 7 месяцев.

Оказалось, что каждом 11-летнем цикле больше половины площади всех наблюдаемых пятен обеспечивается за счёт площади пятен, входящих в большие (больше 500 мдп) группы. Вариации от цикла к циклу площади всех солнечных пятен полностью совпадают с вариациями площади таких больших групп пятен. В площади пятен, входящих в группы, не достигавшие

площади 500мдп, аналогичные вариации заметны значительно слабее. В КДО вклад площади пятен, входящих в группы больше 500мдп, выше, он составляет больше 60 процентов, из которых порядка половины- это площадь пятен, входящих в группы больше 1000мдп. Таким образом именно большие активные области играют определяющую роль в формировании как квазидвухлетних вариаций, так и вариаций амплитуды солнечных циклов. Поэтому особенно важно понимание механизма формирования сильных магнитных полей солнечных пятен.

### Литература

Kostyuchenko I. Dynamic characteristics of area variations of small and large sunspots and quasi-biennial oscillations in solar activity // *Geomagn. Aeron.* 57. 817. 2017.

## Лабораторные и численные исследования гравитационных и инерционных волн в конвекции и их связь с 5-минутными колебаниями на Солнце

Кузанян К.М.<sup>1,2</sup>, Клиорин Н.<sup>1,2,3</sup>, Рогачевский И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИМСС УрО РАН, Пермь, Россия

<sup>3</sup>Университет им.Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль

[kuzanyan@gmail.com](mailto:kuzanyan@gmail.com), [nat@bgu.ac.il](mailto:nat@bgu.ac.il)

Проведена серия модельных экспериментов с Рэлей-Бенаровской конвекцией в прямоугольной ячейке при числах Рэлея порядка  $10^8 - 10^9$  в воде с равномерно нагретой нижней твердой границей и открытой верхней поверхностью. Накоплены длинные временные ряды для лабораторных измерений с использованием метода PIV. Проведено численное моделирование (DNS) полей скорости и температуры. Мы сравнили экспериментальные и численные результаты в перекрывающемся диапазоне параметров: лабораторные эксперименты с воздухом (Беэр-Шева) [1], водой (Пермь), численные эксперименты DNS и расчеты в рамках теории среднего поля [2]. В значительной части области формируются крупномасштабные долгоживущие конвективные ячееки, в которых была обнаружена область устойчивой стратификации (положительный градиент температуры) за исключением приповерхностного и придонного слоев, что согласуется с расчетами в рамках теории среднего поля и лабораторными экспериментами с воздухом в Беэр-Шеве.

Обнаружено, что в случае относительно малых чисел Рейнольдса почти всегда существуют медленные по сравнению с турбулентностью колебания, по-видимому связанные с устойчивой стратификацией в части исследуемой области. Этот эффект известен для атмосферной конвекции, но для астрофизических приложений он недостаточно исследован, поскольку теория длины пути перемешивания в принципе не может дать подобного градиента температуры из-за отсутствия в ней структур, отделенных от турбулентности.

Наши результаты имеет два важных следствия для физики Солнца. Одно касается обоснования метода построения крупномасштабной картины солнечной активности, связанной с солнечным циклом, из отдельных записей солнечных пятен и магнитограмм активных областей. Примером этого является известная диаграмма бабочек Маундера для солнечных пятен, формирующих крупномасштабную картину с типичным временем порядка периода солнечного цикла  $\sim 11$  лет и типичным пространственным масштабом солнечного полушария  $\sim 100$  Мм. В то же время пространственная протяженность отдельных солнечных пятен составляет порядка  $\sim 3-10$  Мм, а типичное время порядка нескольких часов и дней. Для построения диаграмм бабочек используются средние значения (скользящее среднее по солнечной

широте и времени) в масштабах солнечных пятен или групп солнечных пятен. Затем данные сглаживаются по масштабу одного крыла бабочки.

Другое следствие - возможное сосуществование трех масштабов движений: конвективных течений, фоновой турбулентности (грануляции), и внутренних гравитационных волн в зоне солнечной конвекции. Возможное проявление последнего - это 3-5 минутные колебания на Солнце в области с субадиабатическим градиентом температуры по крайней мере в части солнечной конвективной зоны. (Грант РНФ 21-72-20067П). Мы приводим оценки этих колебаний на основе модели солнечной конвективной зоны.

### Литература

1. Barel, L. ; Eidelman, A. ; Elperin, T. ; Fleurov, G. ; Kleeorin, N. ; Levy, A. ; Rogachevskii, I. ; Shildkrot, O. "Detection of standing internal gravity waves in experiments with convection over a wavy heated wall" Physics of Fluids, 32, 5105 (2020)
2. Asulin, A. ; Tkachenko, E. ; Kleeorin, N. ; Levy, A. ; Rogachevskii, I. "Large-scale semi-organized rolls in a sheared convective turbulence: Mean-field simulations" Physics of Fluids, 36, 5131 (2024)

## Оценка пятнообразовательной активности Солнца по всей поверхности вблизи максимума 25 цикла СА

Лебедев Н.И., Лебедев М.Н.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В.Пушкина РАН, Троицк, Москва, Россия  
[lebedev@izmiran.ru](mailto:lebedev@izmiran.ru)*

Общепринятая методика оценки активности Солнца по подсчету относительного числа солнечных пятен (чисел Вольфа) на видимом диске показала свою эффективность на достаточно продолжительных интервалах времени, что нельзя сказать о периодах, сравнимых и меньше кэррингтоновского оборота. К настоящему времени существуют два способа наблюдать активность на обратной стороне Солнца: гелиосейсмология и прямые наблюдения с борта космических аппаратов, обращающихся по гелиоцентрическим орбитам. Гелиосеймологический метод не имеет необходимого разрешения для подсчета чисел Вольфа, в то время как установленный на КА Solar Orbiter прибор Polarimetric and Helioseismic Imager (PHI) проводит регулярные снимки фотосферы с хорошим пространственным разрешением.

В течении пяти месяцев 2024 года с апреля по сентябрь КА Solar Orbiter находился практически на противоположной стороне Солнца. Полученный за это время непрерывный ряд изображений диска Солнца был использован для определения активных областей и подсчета относительного числа солнечных пятен на обратной стороне Солнца. Были проведены сравнительные оценки пятнообразовательной активности на обеих сторонах Солнца и по всей поверхности в целом.

## Токовая спиральность активных областей обратной полярности

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

ФГБУН «КраО РАН», Научный, Россия

[24dasha01@gmail.com](mailto:24dasha01@gmail.com)

Исследованы 13 активных областей (АО) обратной полярности, наблюдавшиеся в 25 и 25 солнечных циклах. Областями обратной полярности являются очень редкие области, нарушающие правило полярностей Хейла ([1], лидирующая полярность соответствует циклу и полушарию). Изучались только те АО, которые наблюдались на видимой стороне диска в момент их всплытия. Вычислены временные профили суммарного магнитного потока и дисбаланса токовой спиральности за время прохождения АО по диску Солнца. Изучены закономерности временных изменений этих величин и проведено сопоставление с другими АО. Результаты способствуют пониманию механизмов возникновения таких необычных магнитных структур и проясняют обстоятельства действия турбулентной составляющей солнечного динамо в целом.

### Литература

Hale, G.E., Ellerman, F., Nicholson, S.B., Joy, A.H.: 1919, The Magnetic Polarity of Sun-Spots.  
// *Astrophys. J.* V. 49, P. 153. 1919.

## Средние времена рекуррентности солнечных вспышек в активных областях и их циклические изменения

**Наговицын Ю. А.<sup>1</sup>, Ларионова А. И.<sup>2</sup>, Осипова А. А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.*

*Пушкина РАН, Троицк, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

[velendia@yandex.ru](mailto:velendia@yandex.ru)

### Введение

Исследуются времена рекуррентности (Recurrence Times, RT) солнечных вспышек в активных областях. В отличие от большинства предыдущих работ, направленных на поиск универсального степенного закона для распределения RT [1, 2], в данной работе исследуется изменение статистических характеристик RT в зависимости от фазы 11-летнего цикла солнечной активности.

### Материалы и методы

В основе работы лежат данные о вспышках в мягком рентгеновском диапазоне, полученные со спутников серии GOES за период с 1998 по 2025 год. Для анализа отбирались только вспышки, ассоциированные с конкретными активными областями (имеющими номер AR), что позволяет изучать именно времена рекуррентности внутри активных областей, минимизируя вклад случайных и «симпатических» вспышек.

Было показано, что распределение времен рекуррентности RT по всему массиву данных является существенно негауссовым и обладает характерным пиком для коротких времен (десятки минут), что не позволяет адекватно описать его простым степенным законом. В то же время, распределение логарифмов этих величин,  $\log(RT)$ , демонстрирует близость к нормальному распределению. Таким образом, для аппроксимации распределения RT был успешно применен логнормальный закон.

Для исследования временной динамики были сформированы группированные выборки с двухлетним скользящим окном и шагом в один год, что обеспечило репрезентативность статистики даже в годы минимума. Для каждой такой выборки вычислялись три оценки среднего значения  $\log(RT)$ :

$X_{LM}$  — среднее значение как параметр логнормального распределения, подобранный методом Левенберга-Марквардта.

$X_{MN}$  — среднее арифметическое значение  $\log(RT)$ .

$X_{ME}$  — медиана распределения  $\log(RT)$ .

### Результаты

На рис.1 представлены временные ряды трех оценок среднего  $\log(RT)$  и чисел солнечных пятен SN, рассчитанные для двухлетних скользящих окон.

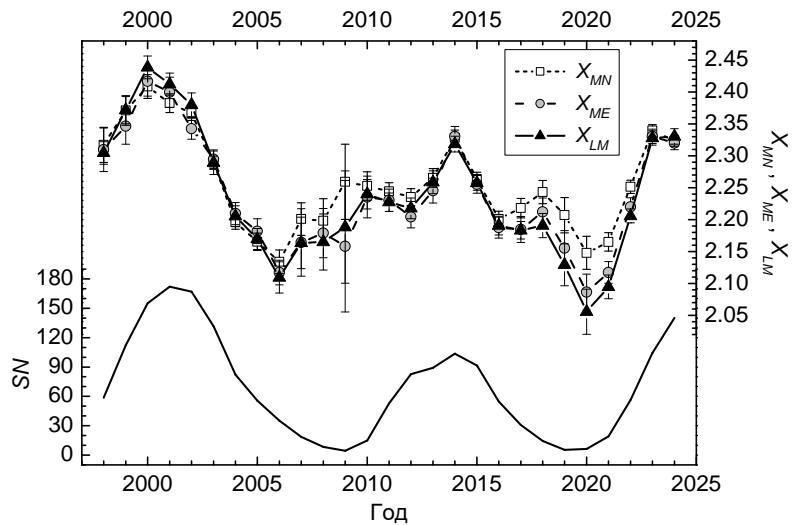


Рис.1

Все три оценки ( $X_{LM}$ ,  $X_{MN}$ ,  $X_{ME}$ ) демонстрируют четкую циклическую модуляцию и выраженную корреляцию с  $SN$  ( $R \approx 0.85$ ), свидетельствующую о связи между глобальной активностью и средним  $RT$ , которое изменялось от  $\sim 110$  мин (минимум) до  $\sim 280$  мин (максимум). Полученный результат — увеличение  $RT$  в максимуме цикла — является нетривиальным [5] и может быть связан с изменением рентгеновского фона, эволюцией магнитной сложности активных областей или коллективными процессами. Обсуждается согласие полученных значений  $RT$  с периодами квазипериодических колебаний в активных областях [6].

#### Литература

1. Aschwanden M.J. Self-Organized Criticality in Astrophysics. Springer-Praxis, 2011.
2. Wheatland M.S. // Astrophys. J. 2000. V. 536. L109.
3. Wheatland M.S. et al. // Astrophys. J. 1998. V. 509. P. 448.
4. Наговицын Ю.А., Кулешова А.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53. С. 985.
5. Aschwanden M.J., Dudok de Wit T. // Astrophys. J. 2021. V. 912. Id.94.
6. Наговицына Е.Ю., Наговицын Ю.А. // Письма в АЖ. 2002. Т. 28. С. 121.

## Применение фотоэлектрических преобразователей для измерения и регистрации энергетических параметров солнечного излучения в наземных условиях

**Никифоров В.Е.**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН  
им. Н.В. Пуцкова, г. Москва, г. Троицк, РФ  
[nika@izmiran.ru](mailto:nika@izmiran.ru)*

В ИЗМИРАН создан и успешно функционирует аналого-цифро-физический измерительно-вычислительный комплекс (АЦФ ИВК) для измерений, регистрации и хранения данных изменений энергетических параметров солнечного излучения в наземных условиях. В качестве измерительных датчиков используются модули фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), выполненные из монокристаллического и поликристаллического кремния. В реальном времени измеряются и регистрируются основные электрические величины фотоэлектрических модулей, обусловленные генерированием электрической мощности фотоэлектрических преобразователей под воздействием на них солнечного излучения.

В основу работы комплекса положена разработанная аналитическая модель фотоэлектрических преобразователей, позволяющая всего по трем измерениям их основных электрических переменных (напряжения и тока) в различных режимах освещения и температуры, используя стандартные измерительные приборы – вольтметр и амперметр, полностью воспроизвести вольт-амперную характеристику ФЭП во всем диапазоне изменения внешних условий эксплуатации [1].

Непрерывно измеряются в круглосуточном режиме напряжение холостого хода, ток короткого замыкания и напряжение и ток в рабочей точке каждого из фотоэлектрических модулей, а также текущие значения их температур и значение температуры окружающей среды. Используя полученные данные, рассчитывается и строится вольт-амперная характеристика каждого модуля ФЭП, в том числе определяются их точки максимальной мощности [2]. Все измеренные и вычисленные переменные отображаются в графическом виде на мониторе в виде графиков и диаграмм в реальном времени. В качестве иллюстрации на рис. 1, рис. 2 приведены типичные суточные графики изменения соответствующих переменных от времени.



Рис. 1.

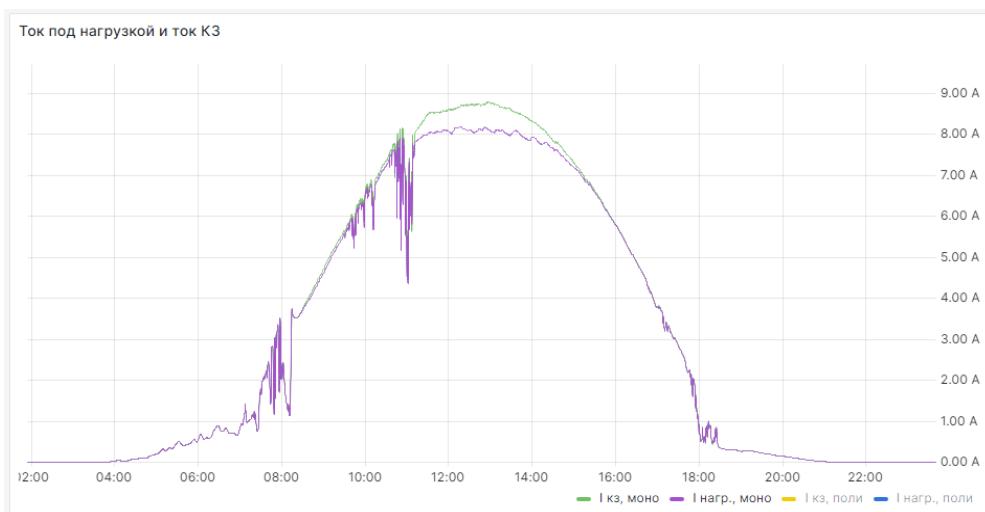


Рис. 2.

Непрерывные измерения и регистрация энергетических параметров солнечного облучения (инсоляции) актуально как при изучении фундаментальных вопросов солнечной активности и физических процессов в системе «Земля – Солнце», так и при проведении прикладных исследований и решении теоретических и практических задач автономной энергетики, например, при оптимальном согласовании генераторов электроэнергии на основе солнечных батарей и буферных накопителей в автономных и резервных системах электроснабжения.

### Литература

1. Nikiforov V.E. et al. Measurement of the Insolation Energy Parameters under the Terrestrial Operation Conditions of Photovoltaic Modules // Instruments and Experimental Techniques. Vol. 67, No. 6, pp. 1164-1167, 2024.
2. <https://solaropt.web.app/>

## Изменение параметров источника полоидального магнитного поля Солнца 21 – 25 циклы

Мерзляков В.Л.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкина, РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия  
[mvl@izmiran.ru](mailto:mvl@izmiran.ru)

Солнечная активность существенно уменьшилась с 24 цикла. Этому предшествовало понижение напряженности полярного магнитного поля Солнца в минимуме 2008 года. В такой ситуации представляется важным изучить изменение параметров источника полоидального магнитного поля, который и создает полярное магнитное поле в эпохи минимумов. Геометрия полярного магнитного поля указывает на соленоидальный характер источника. В этом случае его действие можно аппроксимировать магнитным «зарядом»  $Q$ , расположенным на некотором удалении от центра. Тогда регистрируемое полярное магнитное поле:

$$B = K^*Q + \lambda^*q, \quad (1)$$

где учтено влияние реликтовой составляющей с «зарядом»  $q$ , а коэффициенты зависят от положения «зарядов», наклона оси вращения Солнца к лучу зрения и апертуры магнитографа. Отметим, что реликтовая составляющая имеет постоянную дипольную ориентацию в отличие от полоидального источника. Эта особенность позволяет исключить вклад реликтового поля, имея данные двух соседних минимумов солнечной активности. Поэтому проведем сравнение параметров между эпохами 1986/1996 гг. и 2008/2019 гг.

В качестве наблюдательных данных используем измерения полярного поля Wilcox Solar Observatory [<http://wso.stanford.edu/Polar.html>]. Эти данные усредняем за  $30^\circ$ , чтобы сгладить возможные долготные неоднородности. Такие усредненные величины полярного поля приводим на рис. 1 и рис. 2, относящиеся к двум изучаемым периодам. Сплошные кривые соединяют величины северного полюса, а пунктирные кривые соединяют южные данные. На рис. 1 и рис. 2 приведены две кривые, соответствующие максимальным отклонениям оси вращения Солнца от картинной плоскости.

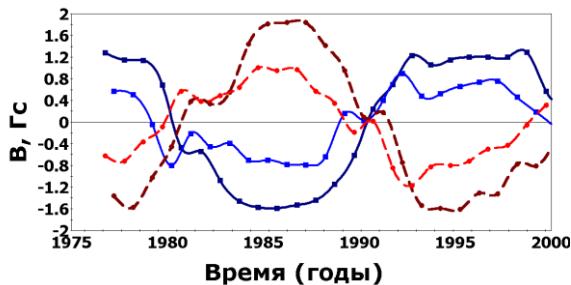


Рис. 1

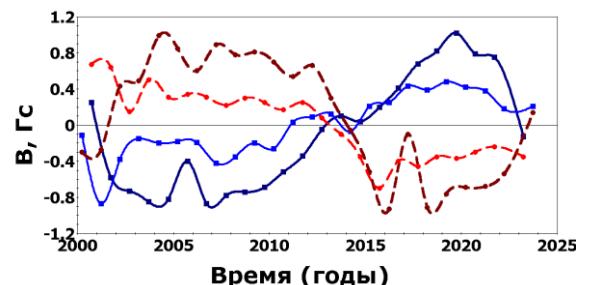


Рис. 2

Из рис.1 и рис.2 находили экстремальные значения в минимумах. Также рассчитали значения коэффициента  $K$  формулы (1) в зависимости от положения «заряда» при двух максимальных отклонениях оси вращения Солнца. Средние положения «заряда» за изучаемые минимумы активности 1986/1996 гг. и 2008/2019 гг. оказались раздельно по полусферам следующими:  $0.618 R_s$  (N),  $0.625 R_s$  (S) и  $0.645 R_s$  (N),  $0.640 R_s$  (S). Найденные значения показывают северо-южную симметрию токовой структуры в пределах 1%. Также происходит небольшой рост широтной протяженности этой структуры на 3%, что вполне может быть следствием естественных флюктуаций.

С учетом найденных положений «заряда» определили и саму его величину, который зависит от протекающих в источнике токов. Эти величины оказались соответственно по двум изучаемым эпохам:  $Q(86/96)=0.44$  (N),  $=0.53$  (S) и  $Q(08/19)=0.265$  (N),  $=0.280$  (S). Из этих результатов получается, что величина «заряда» между изучаемыми периодами минимумов уменьшилась более, чем в 2 раза. А это означает, что произошло уменьшение токов полоидального источника в 2 раза. Также выявился эффект уменьшения неоднородности плотности токов между полусферами. В эпохи 1986/1996 гг. такая неоднородность составляла 21%, а в эпохи 2008/2019 гг. она уменьшилась до 6%.

Таким образом, понижение напряженности полярного магнитного поля Солнца в 24 и 25 солнечных циклов произошло из-за 2-х кратного уменьшения величины тока источника полоидального магнитного поля. В тоже время сама токовая структура источника осталась практически неизменной.

## Различные модификации правила Вальдмайера

**Наговицын Ю.А.<sup>1,2</sup>, Осипова А.А.<sup>3</sup>, Федосеева С.Н.<sup>2,3</sup>,  
Ларионова А.И.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН, Троицк, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия  
[osisasha@mail.ru](mailto:osisasha@mail.ru)*

Обсуждено различие между традиционным правилом Вальдмайера и различными его модификациями, связанными с обусловленностью величины максимумов 11-летних циклов скоростями нарастания активности на ветвях роста.

Рассмотрена теснота связей эффекта Вальдмайера – с одной стороны, и его модификаций, рассматривающих вместо длины ветви роста скорость нарастания активности от минимума до максимума – с другой. С помощью критерия Фишера показано, что традиционный эффект Вальдмайера хуже описывает наблюдательные данные, чем модифицированный (с аргументом максимальной скорости на ветви роста): остаточная дисперсия точек у него значимо больше (уровень значимости  $\alpha = 0.01$ ).

По ряду суммарных площадей солнечных пятен на 400-летней шкале [1] рассмотрена связь его значений в максимумах активности  $AR_M$  со средней скоростью его изменений на ветвях роста  $MAR$ , в том числе во время Маундеровского минимума. Показано, что эта связь нелинейная и тесная: коэффициенты корреляций для двух разных нелинейных аппроксимирующих функций – параболы и степенной – достаточно велики:  $R = 0.96$ .

Важным результатом рассмотрения 400-летнего интервала является выявленное нарушение традиционного эффекта Вальдмайера для эпохи Маундеровского минимума: кроме основной ветви сравнительно больших, «нормальных», циклов, появляется отдельная ветвь малых циклов (см. рис. 1). Это перекликается с результатами «раздвоения» амплитудно-частотной характеристики для высоких частот в работах [2-3], а также с исследованиями [4] по данным [5].

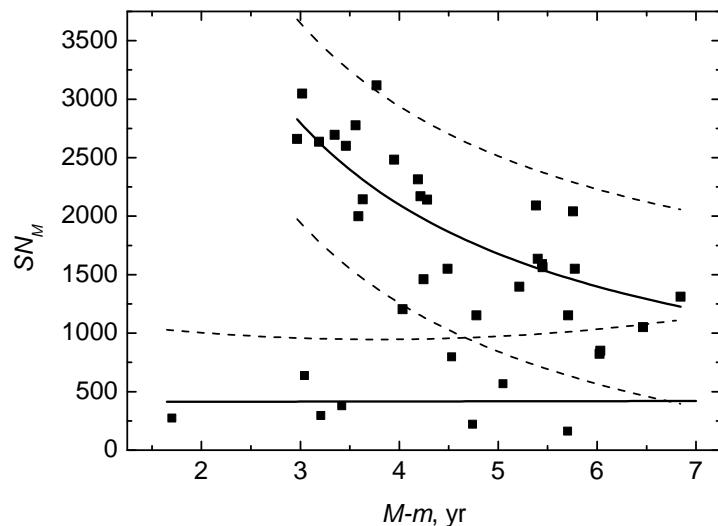


Рис. 1. Традиционное правило Вальдмайера для ряда площадей пятен [6].  
Доверительные области соответствуют прогнозным интервалам для  $\alpha = 0.05$ .

### Литература

1. Nagovitsyn Yu.A, Osipova A.A. Average annual total sunspot area in the last 410 yr: the most probable values and limits of their uncertainties // MNRAS. V. 505. I. 1. P. 1206-1212. 2021.
  2. Nagovitsyn Yu.A. Torsional oscillations and the effective depth of sunspots // Astronomy Letters. V. 23. I. 6. P. 749-751. 1997.
  3. Nagovitsyn Yu.A, Pevtsov A.A. Duffing Oscillator Model of Solar Cycles // Astrophys. J. Lett. V. 888. I. 2. Id. L26. 2020.
  4. Ivanov V.G. The Link between Lengths and Amplitudes of the Eleven-Year Cycle for the Millennium Sunspot Index Series // Geomagn. Aeron. V. 64. I. 7. P. 1069-1072. 2024.
  5. Usoskin I.G., Solanki S.K., Krivova N.A., Hofer B., Kovaltsov G.A., Wacker L., Brehm N., Kromer B. Solar cyclic activity over the last millennium reconstructed from annual  $^{14}\text{C}$  data // Astron. Astrophys. V. 649. Id. A141. 2021.
- Nagovitsyn Yu.A, Osipova A.A. Extreme Values of Sunspot Activity on a Long Time Scale // Astron. Lett. V. 49. I. 7. P. 421-429. 2023.

## Почти критическая энергетика динамо солнца

Старченко С.В.  
ИЗМИРАН, Москва, РФ  
[svstarche@gmail.com](mailto:svstarche@gmail.com)

Для получения уравнения эволюции среднеквадратичной скорости  $u(t)$ , проинтегрируем по всему объему Конвективной Зоны (КЗ) Солнца скалярное произведение вектора скорости на уравнение импульса. Получим, что  $udu/dt$  равна удельной интегральной мощности силы плавучести Архимеда  $a$  (которая, из-за доминирующего конвективного переноса тепла, близка к величине солнечной светимости деленной на вес КЗ, что в результате дает  $a \approx 8 \text{ мВт/кг}$ ) 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  $\rho$  – средняя плотность,  $\mu$  – 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. Тurbulentное 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]):

$$udu/dt = a - ub^2/H - u^2/T, bdb/dt = ub^2/H - b^2/T \quad (1, 2)$$

Устойчивые стационарные (индекс  $s$ ) точки или уровни стабилизации этой системы:

$$u_s = H/T, b_s = \pm(aT - H^2/T^2)^{1/2} \quad (3, 4)$$

Генерация магнитного поля возможна только, когда мощность  $a$  достаточно велика

$$a > H^2/T^3 \quad (5)$$

При  $(T_c)^3 a = (H_c)^2$ , используя (3, 4), выразим критические  $H_c$  и  $T_c$  через  $u_s$  и  $a$  как

$$H_c = (u_s)^3/a, T_c = (u_s)^2/a \quad (6, 7)$$

При общепринятом  $u_s = 100 \text{ м/с}$  получаем  $H_c = 125 \text{ Мм}$ , что почти совпадает (!) с полутолщиной конвективной зоны, а  $T_c = 1.25 \text{ Mc}$  близко к половине длительности среднего периода вращения Солнца и к среднему времени жизни солнечных пятен! Такие «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, очевидным образом, равна  $(u_s)^2 M/2 = 2.5 \cdot 10^{32}$  Дж, где  $M = 5 \cdot 10^{28}$  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  $MaT/2 \approx 2.5 \cdot 10^{32}$  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  $5 \cdot 10^{31}$  Дж. Магнитное поле при этом  $B = 90$  мТл = 900 Гс. В общем случае при малых  $\varepsilon$  получаем:

$$B = [\rho\mu\varepsilon(aT_c + H_c^2/T_c^2)]^{1/2}. \quad (8)$$

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Получена интегральная динамическая система для среднеквадратичной скорости  $u(t)$  и магнитного поля  $b$  во всей КЗ. 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  $a = 8$  мВт/кг и  $u_s \approx 100$  м/с дают критические  $H_c = (u_s)^3/a = 125$  Мм (толщина/2 КЗ) и  $T_c = (u_s)^2/a = 1.25$  Мс (среднее время жизни пятен и половина периода вращения Солнца). Таким образом, оказывается, что глобальное динамо близко к критическому и поэтому почти линейно. При этом кинетическая энергия преимущественно доминирует над магнитной.

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

## Литература

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>

## Меридиональные перемещения отдельных солнечных пятен и пор

Тлатов А.Г.<sup>1,2</sup>, Тлатова К.А<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

<sup>2</sup>КалмГУ, Элиста, Россия

[tlatov@mail.ru](mailto:tlatov@mail.ru)

Выполнен анализ скорости меридиональных перемещений отдельных солнечных пор и пятен. В период 05.2010-03-2025 наблюдений в континууме космической обсерватории SDO/HMI мы выделили для анализа более  $3.6 \cdot 10^5$  солнечных пятен и пор и отследили их перемещение. Скорость меридионального перемещения пятен  $v_m$  зависит от их магнитной полярности, широты и стадии развития. Для солнечных пятен и пор хвостовой полярности скорость перемещения в среднем направлена к полюсам. Для таких пятен зависимость скорости от широты можно представить линейными регрессиями для пор  $v_{tr}^{pr} \sim 2.0 + 0.62 \cdot \theta^\circ$  m/s; для солнечных пятен  $v_{tr}^{sp} \sim 0.02 + 0.94 \cdot \theta^\circ$  m/s. Для солнечных пятен и пор ведущей полярности зависимость носит немонотонный характер от широты. Для пор  $v_{ld}^{pr} \sim 0.35 - 11.7 \cdot \sin(\theta) + 16.5 \cdot \sin^2(\theta) + 76.5 \cdot \sin^3(\theta) - 32.7 \cdot \sin^4(\theta)$  m/s; для солнечных пятен:  $v_{ld}^{sp} \sim -0.35 - 18.3 \cdot \sin(\theta) + 32.2 \cdot \sin^2(\theta) + 71.4 \cdot \sin^3(\theta) - 6.7 \cdot \sin^4(\theta)$  m/s. Наибольшая скорость меридионального перемещения к полюсам наблюдается для солнечных пятен хвостовой полярности на фазе роста площади пятен. Скорость меридионального перемещения зависит от их площади, достигая максимума для площади  $S \sim 50-120$  мдп.

## Коррекция восстановленных циклов, опирающихся на наблюдения Г. Швабе

Шибаев И.Г.<sup>1</sup>, Шибаев А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ, Москва, Россия

[ishib@izmiran.ru](mailto:ishib@izmiran.ru)

**I.** Восстановленная часть ряда чисел Вольфа (1749 – 1849 гг.) сформирована из отрывочных фрагментов разных наблюдателей с отличительными плотностью наблюдений, амплитудным разрешением и масштабированием. С этим связан целый ряд невязок локального характера и нарушение взаимосвязи временных фрагментов разного масштаба, что скажется и на длиннопериодной компоненте. Естественно ожидать отличия свойств и характеристик восстановленной и достоверной частей ряда.

Анализ основной и второй гармоник всего ряда это подтвердил — значительно различается поведение восстановленной и достоверной частей ряда, что демонстрирует рис. 1, отображающий динамику «мгновенных» частот этих компонент (использовано преобразование Гильберта). Нижней маркировкой отмечена область достоверных данных, где проявляются самые длинные циклы и разделяются группы длинных (низких) и коротких (высоких) циклов. Характеристики временной области примыкающей к 1849 году, т.е. область циклов VIII–IX (верхняя маркировка) наименее искажена и степень искажений возрастает с удалением в прошлое. Важно подчеркнуть, что этот временной интервал фактически совпал с периодом наблюдения Г. Швабе (1826–1855 гг.), т. е. из восстановленных данных - **данные периода наблюдения Швабе наиболее надежны**.

Анализ длиннопериодной компоненты всего ряда показал зависимость её периода (цикл Глайсберга) от длины ряда, т. е. от количества достоверных показаний, что ставит вопрос о его существовании [1].

Важно отметить роль девятого цикла, как связующего восстановленные (длительность 65 мес.) и достоверные (длительность 84 мес.) показания. В работе [2] рассмотрены характеристики циклов и отмечена выделенность цикла IX по ряду параметров, что указывает на допущенные Вольфом искажения даже в цикле с преобладающей долей достоверных данных.

**II.** Регистрация и анализ достоверных данных велись одновременно с формированием и коррекцией восстановленных и последняя корректировка реконструированной части ряда сделана Вольфом в 1880 году. Имеем следующее сопоставление датировок у Вольфа и Швабе:

- временная датировка цикла VIII и максимума цикла IX фактически повторила моменты наблюдения минимума / максимума пятен у Швабе;
- максимум цикла VII по Вольфу наступает на два года позже чем у Швабе, что дает аномально длинную ветвь роста -- более половины цикла, у Швабе **ситуация более естественная**;

– разнятся длительности цикла IX, что может оказаться на длине цикла X. Всё это наглядно демонстрирует рис. 2, где сопоставлены показания Швабе и годовые числа Вольфа (нижняя часть рисунка). Сами показания Швабе Вольф значительно отредактировал.

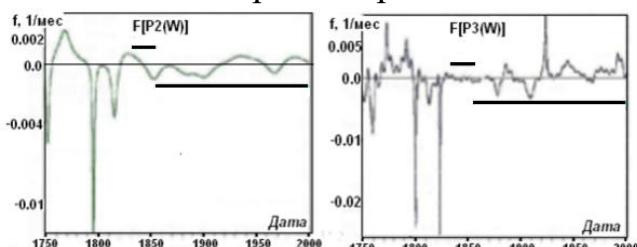


Рис.1. Динамика «мгновенных» частот.

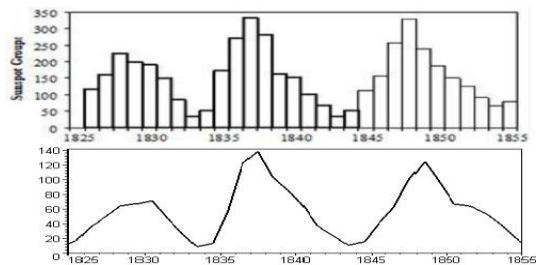


Рис. 2.

**III.** При окончательном редактировании ряда в 1880 г Вольф мог учитывать показания только двух достоверных циклов X и XI, что ограничило его возможности. Оценим профили циклов VIII и IX, как наименее искаженных, используя представление достоверных циклов X÷XXIII при описании их методом главных компонент PCA (Principal component analysis). Оказалось достаточно первых двух компонент PC1 и PC2 для хорошего приближения цикла i в виде:  $\text{Cycle}[i] = W_{\text{mean}} + c_{1i} * \text{PC1} + c_{2i} * \text{PC2}$  (учитывается > 90% дисперсии данных), где PC1, PC2 и средний образ цикла  $W_{\text{mean}}$  – единые массивы формирующие эти циклы. Коэффициенты  $c_{1i}, c_{2i}$  ( $10 \leq i \leq 23$ ) отражают индивидуальность циклов:  $c_{1i}$  корректирует уровень цикла и тесно связан с его средним значением, а  $c_{2i}$  корректирует ветви роста/спада и слабо влияет на уровень цикла. Циклы VIII / IX с их оценкой представлены на рис. 3. Видна близость профилей восьмого цикла и коррекция профиля девятого.

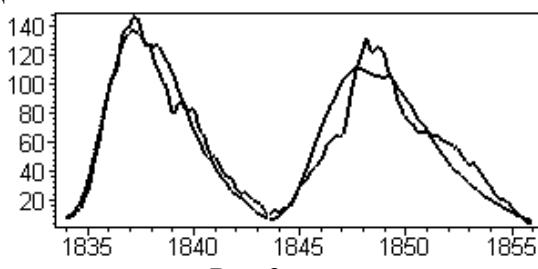


Рис.3.

В работе использована реализация РСА в библиотеке scikit-learn языка программирования Python.

#### Литература

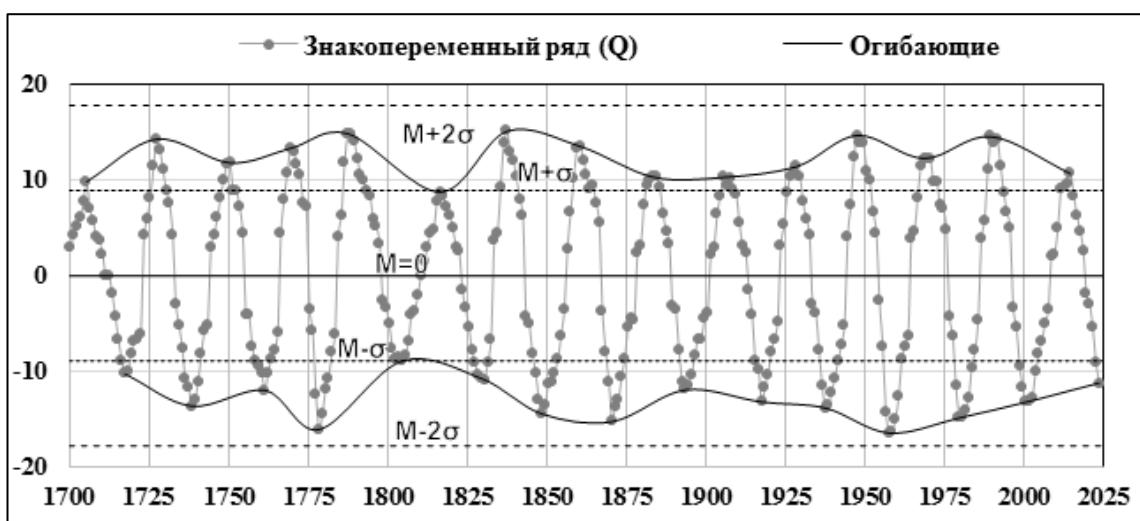
1. Shibaev A. Connection between period of low-frequency component Wolf's numbers (WNS) and length of Wolf's numbers series // Aerospace Research in Bulgaria, V. 29, P. 5–9, 2017.
2. Шибаев А.И. Сопоставление характерных параметров солнечных циклов новой и старой версий рядов чисел Вольфа и динамика длиннопериодных компонент рядов // Тр. XIV конференции молодых ученых –2017. ИКИ РАН, Москва. С. 143–148. 2017.

## Статистика годовых чисел Вольфа, их производных, характерных частот и соответствующих знакопеременных полей

**Яковлева С.В., Старченко С.В.**

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкина РАН (ИЗМИРАН) Троицк, Москва, Россия  
[svyakov@inbox.ru](mailto:svyakov@inbox.ru); [ssarchenko@mail.ru](mailto:ssarchenko@mail.ru)

Уже давно [1] изучается ряд среднегодовых чисел Вольфа ( $W$ ) и знакопеременный ряд ( $Q$ ), являющийся, по энергетическим соображениям [2], рядом квадратных корней из чисел Вольфа со знаками  $Q$ , меняющимися в соответствии с фазой полного магнитного цикла. Мы используем среднегодовые числа Вольфа  $W$  с 1700 по 2024 гг. в версии v2 (<http://sidc.oma.be/silso/datafiles>). Знакопеременный ряд, воспроизведенный нами, соответствует изменению полярного поля в северном полушарии [3]. Эволюция знакопеременного поля ( $Q$ ) со средним значением  $M$  и отклонениями приведены на рисунке:



В этой работе статистически и частотно исследованы ряды  $W$  и  $Q$ , их временные производные  $W'$  и  $Q'$ , а также и характерные частоты  $S$ , представляющие, по определению, отношение временной производной рядов  $W$  или  $Q$  к самим величинам  $W$  или  $Q$ . Их основные статистические характеристики собраны в таблице:

	<i>Ряд чисел Вольфа</i>			<i>Знакопеременный ряд</i>		
	$W$	$W'$	$Sw$	$Q$	$Q'$	$Sq$
Среднее $M$	78.52	0.39	0.048	-0.039	-0.048	0.078
Стандартная ошибка	3.44	1.83	0.040	0.493	0.152	0.034
Медиана MDN	65.55	-5.85	-0.115	2.049	-0.307	-0.027
Мода Mo	15.1	-14.2	-0.240	-8.6 / 4.5	-1.5 / 1.5	-0.147
Стандартное отклонение ( $\sigma$ )	61.92	32.86	0.726	8.889	2.738	0.612
Дисперсия выборки	3833.8	1079.7	0.527	78.999	7.495	0.375
Интервал	269.3	186.5	4.380	31.487	13.651	3.586

Минимум MIN	0	-74.35	-1.607	-16.41	-6.733	-1.281
Максимум MAX	269.3	112.15	2.773	15.076	6.918	2.305
Общее количество N	325	323	323	324	323	323

Вероятностное распределение W преимущественно экспоненциальное с наиболее вероятным значением, равным 18, при существенно от него отличающихся: среднеквадратичном 100, медианном 65 и среднем 79. Для знакопеременного ряда характерны значения: среднее -0.04, медиана 2, среднеквадратичное отклонение 8.9 и наиболее вероятное значение 4.3.

Меньше от нормального распределения отклоняются временные производные от W с наиболее вероятным 24/год, медианным -5.9/год, средним 0.4/год, среднеквадратичным 33/год, минимумом -74/год и потенциально недостоверным максимумом 112/год. Для знакопеременного ряда характерны значения: среднее (-0.05), медиана -0.3, среднеквадратичное отклонение 2.7 и наиболее вероятное значение -2.3.

Информацию к размышлению дает полученное распределение характерных частот  $S_W = W'/W$  и  $S_Q = Q'/Q$ , которые отрицательны, если W или Q убывает и положительны при росте.

Для чисел Вольфа  $S_W$  характеризуется средним, равным 0.05 год<sup>-1</sup>, медианой -0.12 год<sup>-1</sup>, среднеквадратичным отклонением 0.73 год<sup>-1</sup> и наиболее вероятным (за исключением незначимой нулевой моды) значением -0.25 год<sup>-1</sup>. Обратная величина  $1/S_W$  дает времена: 20 лет, -8 лет, 1.4 года и -4 года соответственно. Эти времена, по-видимому, согласуются с периодом полного (с учетом знака) цикла, периодами спада активности, флюктуациям и фазе роста.

Для знакопеременного ряда  $S_Q$  характеризуется средним, равным 0.08 год<sup>-1</sup>, медианой -0.03 год<sup>-1</sup>, среднеквадратичным отклонением 0.61 год<sup>-1</sup> и наиболее вероятным значением -0.15 год<sup>-1</sup>. Соответствующие времена: 12.5 лет, 33 года, 1.6 лет и -7 лет.

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

## Литература

1. Bracewell R.N. The sunspot number series // Nature. V.174. P. 649-650. 1953.
2. Старченко С.В., Яковлева С.В. Корреляция временных рядов чисел Вольфа и их производных // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 6. С. 693–701. 2022.
3. Kane R.P., Trivedi N.B. Spectral analysis of annual sunspot series--an update // PAGEOPH. V. 135, N. 3. P. 463-474. 1991.

## Спиральность магнитных полей в сверхактивных областях на Солнце

Якунина Г. В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

[yakunina45@yandex.ru](mailto:yakunina45@yandex.ru)

Рассмотрены активные области (АО) с высокой степенью активности и особенности структуры магнитного поля в них. Анализируются связи между параметрами солнечной активности, топологией магнитного поля и геомагнитными эффектами. Проводится сравнение с результатами наблюдений АО, показавших разные степени активности. Обсуждаются некоторые закономерности в анализируемых зависимостях.

В 1908 г. Hale [1] и в 1941 г. Richardson [2] обнаружили, что большинство солнечных пятен (около 80%) в северном и южном полушариях вращаются против часовой стрелки, образуя характерные завихрения. Интересно, что только около 66% солнечных пятен соответствуют правилу спирального знака. Это открытие было подтверждено и статистически проанализировано Ding et al. в 1987г. [3], которые рассмотрели распределение солнечных пятен в обоих полушариях в период с 1970 по 1982 год.

Структура МП описывается двумя параметрами: углом наклона  $\phi$ , характеризующим общую ориентацию МП в АО, и параметром  $\alpha$ , вычисляемым из уравнения бессилового поля  $\nabla \times \vec{B} = \alpha \vec{B}$ . Для биполярных АО угол  $\phi$  определяется между магнитной осью АО, соединяющей ведущую и хвостовую полярности, и направлением E-W. Независимо от цикла солнечной активности ведущая полярность, как в северных, так и в южных АО, расположена ближе к экватору, а хвостовая – дальше. Для сложных АО положение центров S и N полярностей вычисляется как средневзвешенное по напряженности МП.

Наблюдения показывают на поразительную особенность магнитных структур, начиная с фотосферы и короны и кончая магнитными облаками в солнечном ветре. В северной полусфере наблюдается отрицательная (левосторонняя, против часовой стрелки) завихренность, а в южной – положительная (правосторонняя, по часовой стрелке) завихренность. Эта закономерность в случае АО на Солнце выражается в том, что большинство АО подчиняются так называемому правилу спиральности, т. е. мелкомасштабное магнитное поле (МП) для АО, расположенных в северном полушарии, имеет левостороннюю завихренность, а для АО, расположенных в южном полушарии, – правостороннюю. Направление закрученности МП определяется в основном вращением Солнца вокруг оси и не зависит от цикла солнечной активности, как это показал еще Richardson [3].

Для большинства АО выполняется закон Хейла-Никольсона, заключающийся в том, что ориентация крупномасштабного МП отличается

от тороидальной и АО развернута определенным образом по отношению к солнечному экватору. Независимо от цикла солнечной активности ведущая полярность, как в северных, так и в южных АО, расположена ближе к экватору, а хвостовая – дальше.

Для анализа были выбраны АО, в которых произошли мощные вспышки, сопровождавшиеся сильными геомагнитными бурями. Отдельно рассматривались протяженные и средние АО с площадями  $S > 1000$  мдп и  $S < 1000$  мдп соответственно. Большинство АО обладало сложной магнитной конфигурацией  $\beta$ -типа. В то время как большинство АО показывают средний уровень закрученности магнитных силовых линий, АО с повышенной активностью имеют необычную морфологию и сильную скрученность магнитных силовых линий. АО первой группы отличались общей особенностью в структуре МП – в них имелась достаточно протяженная конфигурация  $\delta$ -типа, причем часть АО представляла собой компактные  $\delta$ - пятна с обширной полуценью или  $\delta$ -острова (как например, АО NOAA 5395, 5629, 5747, 6659). Другие АО обладали более запутанной структурой и состояли из нескольких частей (как например, АО NOAA 9077, 9393). Рассматривались связи между рентгеновскими вспышками, структурой МП в АО и геомагнитной активностью. Данные брались из SGD (Solar Geophysical Data), Интернета (<http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP> и <http://www.sec.noaa.gov>) и научных публикаций.

При сравнении различных АО становится ясно, что трудно ожидать взаимнооднозначной связи между параметрами. По своим характеристикам АО с повышенной вспышечной активностью отличаются от АО со средним и низким уровнем активности. Чем более активна АО, тем чаще в ней наблюдается нарушение закона Хейла-Никольсона. Для активных областей с низкой активностью более 70 % АО подчиняется закону Хейла-Никольсона, т. е. для АО, расположенных в северном полушарии,  $\phi > 0$ , а для южных АО  $\phi < 0$ . Для АО со средней активностью нарушения происходят почти в половине случаев, а для АО с повышенной активностью часто для 60-70 % случаев нет согласия с законом Хейла-Никольсона. Правило знака спиральности одинаково хорошо выполняется и для АО с низкой активностью, и для АО с высокой активностью (до 70-80 % случаев).

#### Литература

1. Hale G. Solar vortices //ApJ. V..28. P. 100-116. 1908.
2. Richardson R. S. The nature of solar hydrogen vortices // ApJ. V. 93. P.24-28. 1941.
3. Ding, Y. J.; Hong, Q. F.; Wang, H. Z. A Statistical Study of the Spiral Spots on the Solar Disc// Solar Physics, V.107. P. 221-231. 1987.

**Секция 2.**  
**Активные солнечные образования,  
процессы и явления**

## Симпатические явления на Солнце по радионаблюдениям

Абрамов-Максимов В.Е.  
ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия  
[beam@gaoran.ru](mailto:beam@gaoran.ru)

Симпатическими явлениями на Солнце называют активные события (вспышки, всплески), происходящие с небольшим интервалом по времени (например, несколько минут) в активных областях (АО), удаленных друг от друга на значительные расстояния (до  $10^6$  км и более). Считается, что инициирующая вспышка при помощи какого-то возмущающего агента вызывает вторичную, инициируемую, вспышку. Малый интервал времени между событиями в удаленных на большое расстояние друг от друга АО указывает на большую скорость распространения возмущения.

Целью данной работы является выявление и исследование событий, которые предположительно могут быть симпатическими, по анализу архива наблюдений на радиогелиографе Нобеяма, что, возможно, позволит в дальнейшем прояснить природу симпатических вспышек, а также лучше понять механизмы развития солнечных вспышек. Акцент в работе сделан на оценке скорости возмущающего агента. В данной работе мы рассматриваем две серии радиовсплесков, которые, вероятно, являются симпатическими.

Для решения поставленных задач использовался архив наблюдений на радиогелиографе Нобеяма (NoRH) на частоте 17 ГГц. NoRH является инструментом с подходящими параметрами для исследований симпатических явлений в радиодиапазоне благодаря накопленному длинному однородному ряду ежедневных (6–8 часов в день) наблюдений (с 1992 г. по 2020 г.), высокому временному (1 сек) и пространственному (10 сек. дуги) разрешению.

Радиоизображения полного диска Солнца синтезировались за весь день наблюдений с интервалом 10 сек и временем усреднения 10 сек. Затем строились временные профили максимальных яркостных температур исследуемых активных областей (АО). Для этого на каждом изображении выделялась field-of-view (FOV), в которую попадала исследуемая АО, и вычислялась максимальная яркостная температура в FOV.

В настоящей работе мы рассматриваем два серии симпатических событий: 11 сентября 2001 г. и 30 июня 2003 г. В первом случае за день произошло два симпатических события, во втором – три.

По времени задержки между инициирующим и инициируемым всплесками были сделаны оценки скорости возмущающего агента. При этом возникают два вопроса: как измерять задержку и как измерять расстояние. Траектория распространения возмущающего агента неизвестна. Поэтому необходимо было сделать предположения о его возможных траекториях распространения. Как оценку расстояния между АО мы взяли длину дуги большого круга на фотосфере, проходящего через исследуемые АО. В качестве оценки времени распространения возмущения мы приняли интервал

времени между моментом максимума инициирующего всплеска и моментом начала инициируемого всплеска. Очевидно, что такая оценка довольно грубая. Ошибка может достигать 50% и более. Но, тем не менее, она дает представление о порядке величины распространения возмущения.

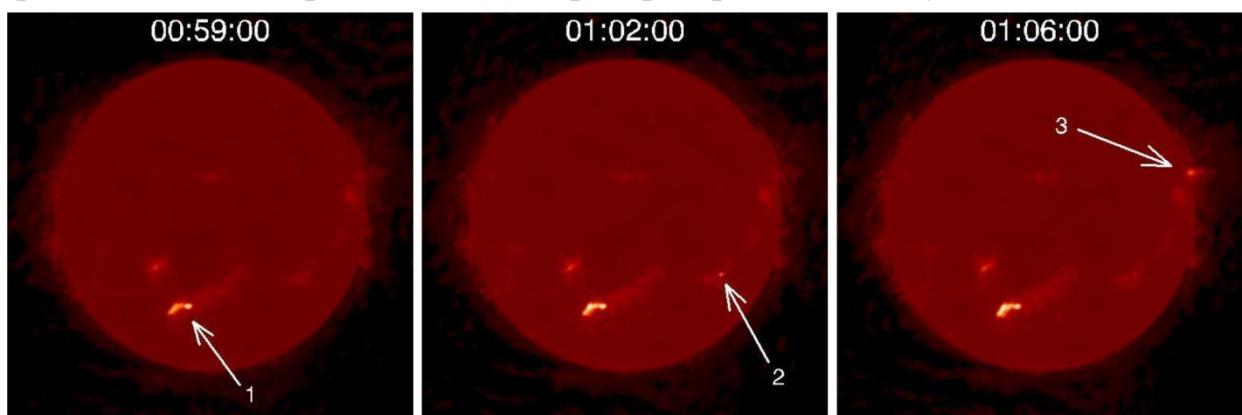


Рис.1.

Рис.1 иллюстрирует один случай. В данном событии один инициирующий всплеск вызывает последовательно два других всплеска. На трех панелях приведены радиоизображения Солнца на частоте 17 ГГц в моменты 0:59, 1:02 и 1:06 UT 11 сентября 2001 г. На левой панели приведено изображение в момент максимума инициирующего всплеска (источник указан стрелкой), на центральной панели – в момент первого инициируемого всплеска, на правой панели – в момент второго инициируемого всплеска. Для этого события оценка скорости возмущающего агента сделана двумя способами. Первый – сначала оценена скорость передачи возмущения от всплеска 1 к всплеску 2 (получено значение 2900 км/сек), затем – от всплеска 2 к 3 (4500 км/сек), предполагая, что в данном случае всплеск 2 – инициирующий. Второй – оценена скорость передачи возмущения от всплеска 1 к всплеску 3 (получено значение 3800 км/сек).

Всего в данной работе рассмотрены две серии симпатических событий: две пары всплесков 11 сентября 2001 г. и три пары всплесков 30 июня 2003 г. В обоих рассмотренных случаях получены примерно одинаковые оценки скоростей передачи возмущения от одной АО к другой, которые составляют 1000–5000 км/сек.

Для будущих исследований симпатических вспышек в радиодиапазоне представляется целесообразным использовать также данные наблюдений на Сибирском радиогелиографе и SDO/AIA.

## Радиоастрономические предвестники солнечных вспышек

Абрамов-Максимов В.Е.<sup>1</sup>, Бакунина И.А.<sup>2</sup>

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

НИУ ВШЭ, Нижний Новгород, Россия

[beam@gaoran.ru](mailto:beam@gaoran.ru)

Квазипериодические флуктуации (КПФ) радиоизлучения Солнца были открыты более 50-ти лет назад и практически сразу же после открытия КПФ выявилась их связь со вспышечной активностью. Три группы исследователей независимо друг от друга обнаружили эффект усиления мощности КПФ микроволнового излучения перед вспышкой, который можно рассматривать как предвестник солнечной вспышки. Отметим, что не существует четкого общепринятого понятия предвестника. Под предвестником мы можем понимать, например, событие (КПФ), которое, как правило, предшествует другому событию (вспышка). При этом мы предполагаем, что между предвестником и последующей вспышкой существует какая-то пока нам неизвестная физическая связь. Отметим, что часто КПФ, которые рассматриваются как предвспышечные, наблюдаются уже на стадии роста сигнала от начинающейся вспышки. Поэтому вопрос, можно ли рассматривать такие наблюдаемые КПФ как предвестники вспышек, остается открытым.

В наших предыдущих работах мы обнаружили, что по данным корреляционных кривых, полученных по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма, у 50-75% рассмотренных событий разной мощности наблюдаются предвспышечные флуктуации микроволнового излучения. Предвспышечные КПФ были выявлены в 75% мощных событий (M5 и мощнее) и в 50% более слабых событий (слабее M5).

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

Для данной работы были использованы многочастотные наблюдения Солнца, выполненные на радиотелескопах сети RSTN. RSTN состоит из четырех обсерваторий, равномерно расположенных по долготам, что позволяет вести непрерывный мониторинг полного потока солнечного радиоизлучения на 8-ми частотах: 245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800 и 15400 МГц. В настоящей работе мы ограничились анализом данных только одной из станций RSTN – Learmonth, расположенной на западе Австралии, и только за период 2000-2002 гг.

Пример одного рассмотренного события приведен на рис.1. На рисунке представлено событие, произошедшее 24 августа 2002 г., вспышка X3.1 в активной области (АО) NOAA AR 10069. На левой панели показаны временные профили полного потока радиоизлучения Солнца по данным наблюдений RSTN (Learmonth). На правой панели приведены те же временные профили, но с вычтеным фоном. Зелеными вертикальными линиями показан момент начала вспышки. Сплошные линии показывают моменты по данным SWPC PRF, прерывистые – по каталогу GOES. В этом случае предвспышечные КПФ можно разделить на три группы. Сначала начинаются КПФ на более высоких частотах 4.995, 8.800 и 15.4 ГГц. Примерно через 3 минуты начинается цуг на частоте 1.415 ГГц и, возможно, на частоте 2.695 ГГц. И еще спустя 6 минут начинаются цуги на частотах 0.610, 0.410 и 0.245 ГГц. При этом цуги на высоких частотах выглядят более плавными.

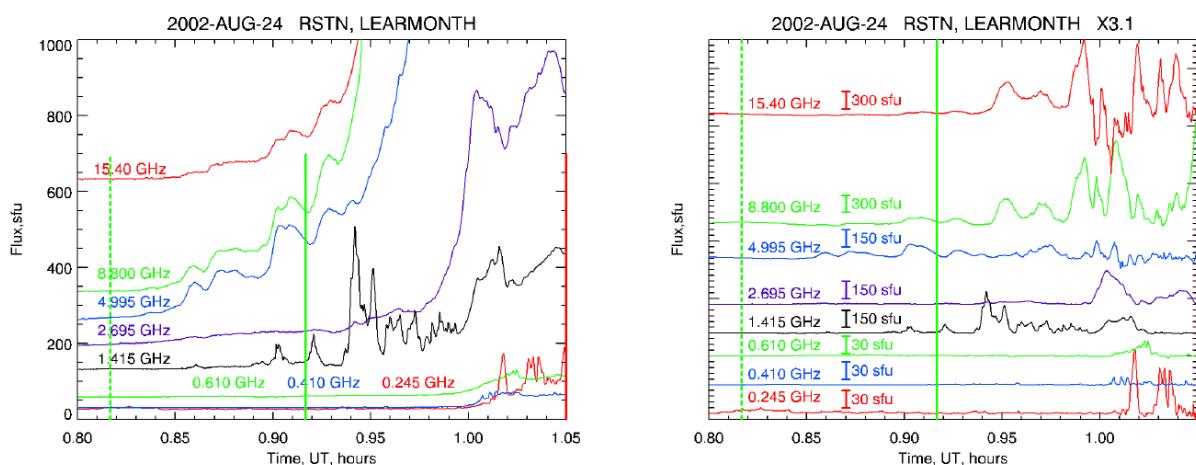


Рис.1.

Всего в данной работе проанализировано 8 вспышечных событий по данным многочастотных наблюдений сети радиотелескопов RSTN. В семи рассмотренных случаях выявлены предвспышечные КПФ. Сделанная по вейвлет-спектрам оценка квазипериодов дает в большинстве случаев значения 40-50 секунд. В одном событии с большой вспышкой класса M8.0 КПФ не проявились. В остальных случаях перед более мощными вспышками наблюдаются более сильные КПФ. Для самого мощного из рассмотренных событий класса X3.1 КПФ на более низких частотах начинаются с задержкой на несколько минут по отношению к КПФ на более высоких частотах.

## Анализ явления резонансного поглощения волн в короне Солнца при учете эффекта теплового дисбаланса

Агапова Д.В.<sup>1,2</sup>, Завершинский Д.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет, Самара, Россия

<sup>2</sup>Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия  
[agapova.dv@ssau.ru](mailto:agapova.dv@ssau.ru)

Резонансное поглощение магнитогидродинамических (МГД) волн считается одним из наиболее перспективных механизмов преобразования магнитной энергии в тепловую, который способен объяснить аномальный нагрев солнечной короны. Физическая основа этого процесса заключается в резонанском согласовании частоты падающей МГД-волны с локальной собственной частотой плазменных колебаний, что приводит к эффективному поглощению волновой энергии на так называемых сингулярных поверхностях. В тонких переходных слоях энергия волны эффективно передаётся плазме, вызывая её нагрев. Данный механизм особенно актуален в короне благодаря сильной неоднородности плазмы, доминированию магнитного поля и наличию существенных пространственных вариаций фазовых скоростей. Однако эффективность резонансного поглощения зависит не только от геометрии магнитной структуры, но и от термодинамического состояния плазмы.

В данной работе исследуется процесс резонансного поглощения с учётом сжимаемости корональной плазмы и наличия теплового дисбаланса. Получено дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами, описывающее распространение и диссипацию МГД волн в неоднородной магнитной среде. Коэффициенты выведенного уравнения позволяют учесть влияние термодинамического состояния плазмы и теплового дисбаланса на эффективность диссипации, повышая точность модели. С использованием приближения магнитного слоя выведено дисперсионное соотношение, позволяющее не только определить условия резонанса, но проанализировать скорость затухания волн.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FMR-2024-0017).

## О переносе нетепловых электронов вдоль внешнего шипа круговой ленточной вспышки SOL2024-03-25t06:37:00

Алтынцев А.Т.<sup>1</sup>, Анфиногентов С.А.<sup>1</sup>, Жданов Д.А.<sup>1</sup>, Мешалкина Н.С.<sup>1,2</sup>,  
Мышьяков И.И.<sup>1</sup>, Иванов Е.Ф.<sup>1</sup>, Tan Chengming<sup>2</sup>, Wu Zhao<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Национальный научный космический центр Китайской Академии Наук

<sup>3</sup>Школа космических наук и физики, Шандоньский Университет, Вейхай, Китай

<sup>4</sup>Лаборатория электромагнитного детектирования, Институт космических наук,  
Шандоньский Университет, Вейхай, Китай

[altyntsev@iszf.irk.ru](mailto:altyntsev@iszf.irk.ru)

Обсуждаются спектральные и поляризационные характеристики радиоизлучения из магнитного жгута, в основание которого инжектируются нетепловые электроны из ядра круговой ленточной вспышки. Основания жгута были разнесены на 215 угл.сек. Согласие КУФ изображений петли с модельными магнитными силовыми линиями позволяет оценить высоту жгута 50 – 70 Мм и величину магнитного поля в вершине как 15 — 20 Гс. Из динамического спектра всплеска J-типа следуют оценки уменьшения плотности плазмы в жгуте с высотой от  $1.8 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$  в месте инжекции (нулевой точке сепаратрисного купола) и до  $2 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$  в вершине жгута. Спектры микроволнового излучения из ядра вспышки и из удаленного основания значительно отличаются друг от друга на частотах выше 5-6 ГГц и зависят от динамики и механизма вспышечного энерговыделения. Из задержки между пиками излучения в микроволнах ( $\geq 3.5$  с) и характеристик всплесков J-типа в метровом диапазоне следует оценка скорости распространения источника излучения  $\leq 0.3$  с. С другой стороны, интерпретация микроволнового спектра удаленного источника в рамках гироシンхротронного механизма предполагает распределение излучающих электронов с индексом степенного спектра  $\sim 2$  до релятивистских энергий  $\sim 1.2$  МэВ. Разрешение противоречия следует из моделирования зависимости степени поляризации удаленного источника от частоты, для объяснения высокой степени которого распределение излучающих электронов в этом источнике должно отличаться большими питч-углами, а магнитное поле закруткой в жгуте. Неравновесность функции распределения потоков электронов, распространяющихся и захваченных в жгуте, проявляется в наблюдении разных типов тонкой спектральной структуры на динамических спектрах метрового диапазона. В целом, анализ наблюдений спектральной и пространственной структуры микроволнового излучения с помощью СРГ и спектрополяриметра SOLARSPEL открывает возможность верификации механизмов переноса ускоренных во вспышках электронов в корону.

## Некоторые аспекты использования данных наблюдений Солнца в линии He I 10830 Å, полученных на телескопе БСТ-2 КрАО

Андреева О.А., Плотников А.А., Малащук. В.М.

ФГБУН КрАО РАН, Научный, Россия  
[olga@craocriimea.ru](mailto:olga@craocriimea.ru)

В настоящее время экспериментальные данные о солнечной активности находят самое широкое применение в области фундаментальных и прикладных научных исследований – изучении явлений, происходящих на Солнце и их влияния на Землю. Инфракрасный солнечный спектр содержит множество физических данных о нашем Солнце и исследуется с помощью современных детекторов и технологий наземных солнечных телескопов. Наиболее ценными являются данные многолетних наблюдений. В КрАО на телескопе БСТ-2 накоплен уникальный наблюдательный материал в линии He I 10830 Å (He I), позволяющий анализировать эволюцию корональных дыр, волокон и активных областей более чем за 2 солнечных цикла (1999-2025 гг). Спектроскопические наблюдения в линии He I дают важную диагностическую информацию о структуре и динамике хромосферы и вышележащей короны.

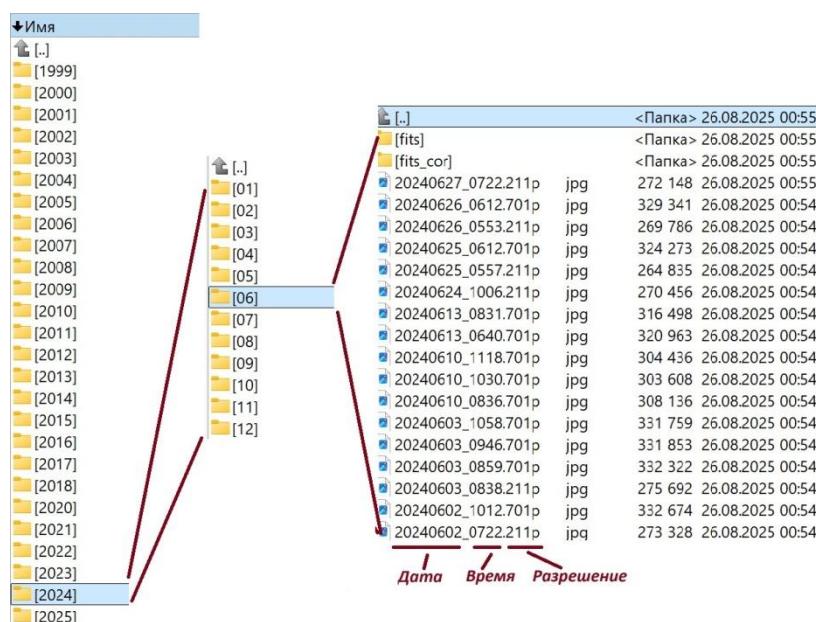


Рис. 1.

В статье приводится описание обновленной структуры унифицированной базы данных, опубликованной в открытом доступе на веб-сайте КрАО (<https://sun.crao.ru/observations/heI-1083nm>). Вверху страницы находятся

ссылки на fits и fits\_cor файлы, а также последнее размещенное изображение в линии He I. Ниже таблица наблюдений по годам и месяцам со ссылками на соответствующие директории. На рис. 1 показана структура обновленной унифицированной базы данных. В корне директории за каждый месяц - jpg-файлы и 2 папки fits и fits\_cor, в которые добавлены карты интенсивности в формате FITS с потемнением к лимбу и без него, соответственно. Названия FITS-файлов совпадают с названиями соответствующих JPEG-изображений. В названии отражены дата, время и разрешение изображения в пикселях. Пример изображений приведен на Рис. 2. JPEG-файл представляет собой пару карт с изображениями диска Солнца, нормализованных к  $3.6'' \times 3.6''$  на один пиксель. Левое изображение – с потемнением к лимбу, правое – без потемнения. Корональные дыры в этой линии выглядят как более яркие образования по сравнению с окружающей поверхностью, а волокна и активные области – как очень темные.

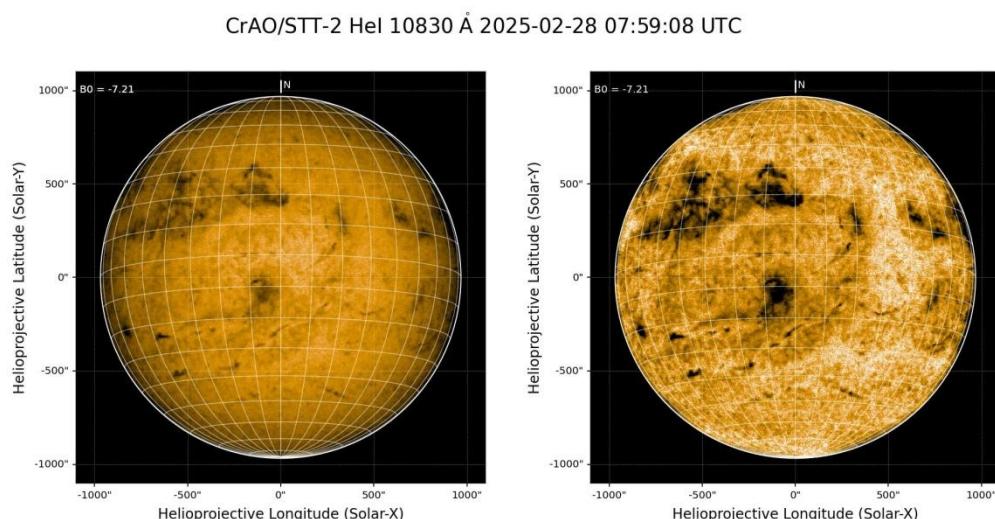


Рис. 2

В ходе работы, сохраняя исторические массивы данных, дополняя их новыми результатами наблюдений, совершенствуя систему управления данными и унифицируя их визуализацию, обеспечивается простой и удобный доступ к ним, повышается ценность научных данных, создаются условия для их более полного использования.

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

## Временные характеристики вспышек мягкого рентгеновского излучения и вспышек Н-альфа на Солнце

Ахтемов З.С., Цап Ю.Т.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный  
[azis@craocriimea.ru](mailto:azis@craocriimea.ru)

Солнечные вспышки можно разбить на два больших класса – импульсные и тепловые (двуухленточные или LDE-события), развитие которых определяется конфигурацией и напряженностью магнитного поля. Поскольку ускорение заряженных частиц и нагрев плазмы тесно связаны между собой, то было бы интересно изучить временные характеристики тепловых и нетепловых проявлений солнечной активности. В частности, было бы полезно провести анализ временных задержек между мягким рентгеновским (SXR) излучением и излучением в линии Нα для вспышек разной мощности, поскольку согласно стандартной модели первое определяется тепловыми процессами, тогда как второе – термолизацией ускоренных заряженных частиц в хромосфере Солнца. Важным представляется также исследование влияния крупномасштабного магнитного поля на развитие вспышечных событий.

Исследованы временные аспекты солнечных вспышек в мягком рентгеновском (SXR) излучении и линии Нα за период с января 2015 по начало июля 2021 гг. По данным Solar-Geophysical Data выявлено 1643 связанных между собой SXR- и Нα-событий с измеренными временем начала вспышек  $t_{\text{SXR}}$  и  $t_{\text{H}\alpha}$ . Показано, что для большинства событий (87.6%), в первую очередь, В-класса начало излучения в Нα запаздывает относительно начала SXR. Диаграммы разности времени начала ( $\Delta t_{\text{start}} = t_{\text{SXR}} - t_{\text{H}\alpha}$ ) вспышек SXR и Нα имеет *медиану*, равную -3 мин (-2 мин для моды), т.е. Нα-вспышки начинаются в среднем на 3 мин позже SXR- вспышек. Для диаграммы разности времени между наступлениями максимумов ( $\Delta t_{\text{peak}} = t_{\text{SXR}} - t_{\text{H}\alpha}$ ) *медиана* как и мода соответствуют 1мин. Пики в пределах точности измерений ( $\pm 1$  мин) происходят одновременно ( $\Delta t_{\text{peak}} = 0$ ) в 21,9% случаев, и есть тенденция (57,8% событий), что Нα-пик предшествует ( $\Delta t_{\text{peak}} > 0$ ) пику SXR. Нα-максимум опережает пик SXR ( $\Delta t_{\text{peak}} = 1$ ) в 21,9% случае. Для сильных SXR вспышек класса М и Х, выделенных в отдельную группу из 87 событий, медиана диаграммы  $\Delta t_{\text{start}} = t_{\text{SXR}} - t_{\text{H}\alpha}$  как и мода равны -3 мин, т.е. излучение в линии Нα начинается в среднем через 3 минуты после начала SXR вспышки. Диаграмма  $\Delta t_{\text{peak}} = t_{\text{SXR}} - t_{\text{H}\alpha}$  для сильных вспышек имеет *медиану*, равную 1 мин, а моду - 0 мин. В 56,5% случаев  $\Delta t_{\text{peak}} > 0$ , т.е. Нα-максимум предшествует максимуму SXR, тогда как вспышки происходят одновременно ( $\Delta t_{\text{peak}} = 0$ ) в 20% рассматриваемых событий. При этом для 77,3% событий разность значений  $\Delta t_{\text{start}} < 0$ .

Таким образом, поведение временных задержек для сильных вспышек рентгеновского класса М и Х отличаются от слабых рентгеновских вспышек

класса В и С. Это свидетельствует о различии в механизмах энерговыделения. Характер поведения задержек зависит также от фазы цикла, указывая тем самым на существование связи крупномасштабного магнитного поля с процессом вспышечного энерговыделения.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Минобрнауки №122022400224-7)

**Солнечные протонные события 1970 – 2024 гг.  
(55 лет каталогам СПС под редакцией Ю.И. Логачева)**

**Базилевская Г.А.<sup>1</sup>, Логачев Ю.И.<sup>2</sup>, Власова Н.А.<sup>2</sup>, Гинзбург Е.А.<sup>3</sup>, Дайбог Е.И.<sup>2</sup>, Дмитриев А.В.<sup>2</sup>, Калегаев В.В.<sup>2,4</sup>, Капорцева К.Б.<sup>2,4</sup>, Мягкова И.Н.<sup>2</sup>, Суворова А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скobel'цына, Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия*

*E-mail: [Bazilevskayaga@lebedev.ru](mailto:Bazilevskayaga@lebedev.ru)*

Каталоги СПС (1970-2024 гг.) включают 628 возрастаний солнечных космических лучей (СКЛ), содержащих солнечные протоны с энергией  $E \geq 10$  МэВ с максимальным потоком  $> 1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ , 368 событий с  $E \geq 100$  МэВ и 54 наземных возрастаний СКЛ. Для всех событий указаны возможные источники потоков протонов, а также сопутствующие явления на Солнце и в межпланетной среде согласно имеющейся экспериментальной информации и представлениям в момент составления Каталогов. В настоящее время считается, что ускорение протонов происходит в результате взрывного энерговыделения на Солнце, характеристики которого отражаются во вспышках (в частности, рентгеновских всплесках) и корональных выбросах массы (КВМ). Относительный вклад вспышек и КВМ в ускорительный процесс обсуждается уже не одно десятилетие и до сих пор остается дискуссионным вопросом. На основе корреляций между числом событий СКЛ и вспышками разного класса, а также числом событий СКЛ и наиболее мощными КВМ показано, что для ускорения протонов с  $E \geq 10\text{-}100$  МэВ важны как вспышки, так и КВМ (с некоторым преимуществом КВМ), тогда как для наземных возрастаний роль КВМ и ударных волн существенно меньше и более тесная связь наблюдается между СКЛ и рентгеновскими вспышками на Солнце.

## Пространственное расположение магнитных жгутов и микроволновых источников по данным радиогелиографа в Нобеяме и Сибирского радиогелиографа

**Бакунина И.А.<sup>1</sup>, Мельников В.Ф.<sup>2</sup>, Шайн А.В.<sup>2</sup>, Кузнецов С.А.<sup>2</sup>,**

**Абрамов-Максимов В.Е.<sup>2</sup>**

*1НИУ ВШЭ, Нижний Новгород, Россия*

*2ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия*

*[rinbak@mail.ru](mailto:rinbak@mail.ru)*

Диссипация электрических токов и свободная магнитная энергия, накопленная в скрученном магнитном поле – магнитных жгутах, главные процессы, приводящие к солнечным вспышкам. Микроволновое излучение является хорошим индикатором процессов энерговыделения в активной области (АО), где магнитная энергия преобразуется в кинетическую энергию плазмы и энергию ускоренных частиц. Поэтому анализ микроволнового излучения так важен и помогает понять механизмы, лежащие в основе солнечных вспышек.

Цель данного исследования – проследить для выборки вспышек рентгеновских классов М и Х пространственную связь магнитных жгутов с источниками микроволнового излучения на частоте 17 ГГц по данным радиогелиографа в Нобеяме (NoRH) и на частоте 6 ГГц по данным Сибирского радиогелиографа (СРГ), а также с источниками крайнего ультрафиолетового диапазона (КУФ) (по данным SDO/AIA). Для поиска и идентификации магнитных жгутов в 3D магнитосфере активных областей использовались пространственные карты плотностей электрических токов, которые являются хорошей количественной характеристикой скрученности силовых линий магнитного поля, восстановленного методом нелинейной бессиловой (NLFFF) экстраполяции.

Всего в данной работе проанализировано 17 вспышечных событий: 15 событий по данным NoRH и два события по данным СРГ. Обобщая результаты, полученные в данном и предыдущих наших исследованиях, можно констатировать, что магнитные жгуты наблюдаются во всех исследованных АО, как до, так и после вспышек. В большинстве случаев жгуты никуда не исчезают после вспышки, но выглядят менее скрученными. Вспышки с СМЕ, в основном, наблюдались в открытых магнитных конфигурациях, а вспышки без СМЕ в закрытых конфигурациях. Магнитные жгуты в событиях с СМЕ располагаются, в основном, квази-параллельно вышележащим магнитным силовым линиям, в событиях без СМЕ - квази-перпендикулярно. Положение наиболее мощных жгутов, характеризующихся

самыми сильными в АО электрическими токами, совпадает с положением максимума радиояркости на 17 ГГц и 6 ГГц в момент пика вспышки. Связь магнитных жгутов с поляризованным радиоизлучением и с излучением в крайнем ультрафиолетовом диапазоне во время максимума яркости вспышки свидетельствует о том, что вспышечные аркады совпадают пространственно с расположением жгутов в АО. Это указывает на важную роль магнитных жгутов во вспышечном энерговыделении. Отметим, что в половине исследованных вспышек выбросы корональной массы (СМЕ) не наблюдались. Поэтому можно сделать вывод, что триггером вспышки является не эruption плазмы с последующим пересоединением (“стандартная модель вспышки”), а другой процесс, вероятно, связанный с диссипацией энергии электрического тока, накопленной в самом магнитном жгуте.

## Метод измерения допплеровской скорости хромосферной плазмы при асимметрии в профилях линий Н $\alpha$ (6563Å), Не I (10830Å)

Барахоева К.А., Челпанов А.А., Пуляев В.А.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

[barakhoeva.k@mail.iszf.irk.ru](mailto:barakhoeva.k@mail.iszf.irk.ru)

В спектральных наблюдениях хромосферных линий в ряде случаев наблюдается сильный (до нескольких ангстрем) допплеровский сдвиг полосы, приводящий к асимметрии профилей поглощения. Эффект может длиться от доли секунды до нескольких десятков минут, при этом смещения полосы могут происходить как в красную область, так и в синюю [1,2].

Данное явление однозначно свидетельствует об импульсном движении хромосферной плазмы в направлении фотосферы или короны. В зависимости от исследуемого объекта и длительности процесса причинами выброса могут быть вспышка [3], спикул II порядка [4], выброс волокна, сопровождаемый испусканием корональных масс в открытое космическое пространство [5].

Знание допплеровских скоростей крупномасштабных течений плазмы при указанных нестационарных процессах могло бы помочь в изучении их энергетики, колебательной характеристики, в целом динамики движения плазмы, способов передачи энергии в нижние и верхние слои солнечной атмосферы.

Ранее в спокойных областях Солнца для определения допплеровского сдвига полосы поглощения был распространен метод биссектора. Однако в случае асимметричных профилей этот метод оказывается неприменим, так как в области формирования хромосферных линий появляются разнонаправленные потоки плазмы, движущиеся с разной скоростью. С другой стороны, применение методов RADYN, STiC, HAZEL, основанных на non-LTE подходе, требует дополнительных данных о поляризации света, а также распределение температуры и магнитного поля по высоте. Кроме того, эти расчеты являются крайне ресурсоемкими.

В настоящей работе предложен полуэмпирический метод определения допплеровской скорости при асимметричных профилях хромосферных линий НеI(10830Å), Н $\alpha$ (6563Å), основанный на многокомпонентной аппроксимации. Количество компонент выбирается исходя из данных о высотах формирования линий и их поведении в активных областях Солнца.

Метод апробирован на четырех спектральных сериях продолжительностью 1-3 часа, с каденцией 1.5-6с, где с разной

интенсивностью и продолжительностью наблюдались синие и красные смещения в линиях поглощения.

### Литература

1. Canfield R. C. et al. H-alpha spectra of dynamic chromospheric processes in five well-observed X-ray flares //Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 363, Nov. 1, 1990, p. 318-325. – Т. 363. – С. 318-325.
2. Alikayeva, K.V., Chornogor, S.N.: 2004, Preflare chromospheric and photospheric line-of-sight velocities. In: Stepanov, A.V., Benevolenskaya, E.E., Kosovichev, A.G. (eds.) Multi Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symposium 223, 227.
3. Tang F. Flare asymmetry as seen in offband H  $\alpha$  filtergrams //Solar Physics. – 1983. – Т. 83. – №. 1. – С. 15-25.
4. Leenaarts J., Carlsson M., Vissers G. ON-DISK COUNTERPARTS OF TYPE II SPICULES IN THE Ca II 854.2 nm AND Halpha LINES //Astrophysical Journal. – 2009. – Т. 705. – №. 1.
5. Cabezas D. P. et al. A fast-filament eruption observed in the H $\alpha$  spectral line-I. Imaging spectroscopy diagnostic //Astronomy & Astrophysics. – 2024. – Т. 690. – С. A172.

## Коллективные процессы в бессиловых конфигурациях магнитного поля солнечной атмосферы

Беспалов П.А.<sup>1</sup>, Савина О.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ им. А.В. Гапонова-Грехова ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

[pbespalov@mail.ru](mailto:pbespalov@mail.ru)

Для разреженных областей солнечной короны характерны стационарные и нестационарные продольные (вдоль магнитного поля) электрические токи. Стационарные продольные токи ответственны за формирование типичных для солнечной короны бессиловых конфигураций с винтовыми линиями магнитного поля. Сравнительно крупномасштабные нестационарные продольные токи имеют место в инерционных и кинетических альвеновских волнах, наличие которых подтверждено наблюдениями. Если в локальном продольном токе упорядоченная скорость электронов превосходит их тепловую скорость, то в плазме развивается апериодическая неустойчивость. Проведенные оценки показывают, что для условий в солнечной короне порог такой неустойчивости может быть превышен. Тогда, согласно выполненным расчетам, образуются многочисленные структуры дебаевского масштаба с квадрупольными электрическими полями. Неупругие столкновения с указанными структурами могут обеспечивать ускорение частиц с формированием близких к одномерным распределений электронов и близких к изотропным распределений протонов.

Работа П.А. Беспалова выполнена в рамках Государственного задания по проекту № FFUF-2023-0002.

## Перспективы радиоспектроскопии Солнца на РАТАН-600

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

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, СПб Филиал  
[vbog\\_spb@mail.ru](mailto:vbog_spb@mail.ru)

Радиоспектроскопия является новым направлением исследования солнечной короны. Это направление возникло благодаря сочетанию высоких пространственно-частотных характеристик радиотелескопа во всем рабочем диапазоне 1-40 ГГц. До сих пор спектроскопия использовалась в крайнем ультрафиолете, оптическом, рентгеновском диапазонах для изучения физических свойств нижних слоев солнечной атмосферы (от фотосфера до хромосфера). Этот весьма эффективный метод используется как в наземных инструментах, так и на спутниках, но имеет ограничения в условиях горячей ( $1\text{--}2$  млн.К) и разреженной короны ( $10^{-8}$  см $^{-3}$ ). С другой стороны, как оказалось, применение современной технологии в радиодиапазоне позволяет решить данную проблему и начать применение радиоспектроскопии короны, простирающейся от хромосферы до границ планетной системы.

Радиодиапазон обладает высокой чувствительностью, и он вполне оптимален для регистрации весьма слабых структур зарождающей активности. Однако, радиоастрономический диапазон работает на более длинных волнах и имеет сложности в наблюдениях, как по пространственному разрешению, так и по ограничению динамического диапазона ввиду высокой температуры короны Солнца.

Наблюдения показывают, что использование рефлекторных инструментов с большой эффективной площадью [Богод и др., 2023] позволяет преодолеть основную проблему, связанную с влиянием мощного излучения спокойного Солнца на ухудшение шумов аппаратуры. При этом, важным фактором является сплошная во всех радиодиапазонах пространственно-частотная характеристика антенны, что совместно с высоким динамическим диапазоном (до 90 дБ) способствует выделению слабых сигналов на фоне мощного сигнала Солнца [Рипак и др., 2023]. Исторически, высокая чувствительность рефлекторного радиотелескопа РАТАН-600 к слабым сигналам по потоку излучения была ранее использована в дециметровом диапазоне при обнаружении слабых микровсплесков на уровне  $10^{-3}$  с.е.п. [Bogod et.al., 2001]. Их исследование и

создание показало, что микровсплески являются результатом процессов магнитного перезамыкания с генерацией ускоренных частиц, которые возбуждают плазменные волны на второй гармонике плазменной частоты [V.M.Bogod, L.V.Yasnov: 2005].

Другим принципиально важным объектом для изучения природы солнечной короны являются предсказанные [Wild J.1952] корональные линии и, по-видимому, зарегистрированные на радиоволнах [Овчинникова и др.,2024] линии гидроксила OH в диапазоне 1.5-1.7 ГГц. Попытки обнаружения рекомбинационных линий в радиоизлучении солнечной короны предпринимались неоднократно [Дравских, 2021]. Проводилось моделирование и расчеты существования таких линий на РАТАН-600 [Херсонский, Варшалович, 1980]. Делались попытки обнаружения циклотронных линий по наблюдениям круговой поляризации в радиодиапазоне [Богод, Железняков и др., 2000]. Привлечение для поиска этих линий в радиоастрономических наблюдениях имело сложности, как по частотному диапазону (миллиметровые ММ, сантиметровые СМ или дециметровые ДМ волны) и пространственному разрешению, так и по динамическому диапазону, ограниченного ввиду высокой температуры короны Солнца.

Высокие чувствительность и спектральное разрешение принципиально важны для центральной задачи физики Солнца по определению механизма нагрева короны.

В САО РАН разработана новая концепция радиометрии для солнечных исследований, которая испытана в дециметровом диапазоне на частотах 1-3 ГГц. Многочисленные серии тестовых и научных наблюдений с высоким частотным разрешением до 0.1 мГц указывают на многообразную структуру солнечной короны. Уже проходит настольные испытания и следующий комплекс на диапазон 3-18 ГГц с плановой его сдачей в эксплуатацию в конце 2025 г. В докладе будут представлены как результаты наблюдений на комплексе 1-3 ГГц, так и результаты первых тестовых наблюдений на комплексе 3-18 ГГц. Обсуждаются планы будущего развития широкодиапазонной радиоспектроскопии Солнца с высоким относительным частотным разрешением около  $\Delta f/f = 10^{-5}$  на РАТАН-600 и рассматриваются перспективные задачи.

### Литература

1. В.М. Богод, М.К. Лебедев, Н.Е. Овчинникова, А.М. Рипак, А.А. Стороженко, Е.А. Курочкин, О новой концепции спектральной радиометрии на РАТАН-600, Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 119, № 4, 17–26 (2023) doi:10.34898/izcrao-vol119-iss4-pp17-26 6

2. А. М. Рипак, В. М. Богод, С. А. Гренков, М. К. Лебедев, Помехоустойчивый радиометр дециметрового диапазона для радиотелескопа РАТАН-600 Астрофизический бюллетень, Том 78, номер 4, 2023, стр 465-478
3. V.M. Bogod, C. Mercier, L.V. Yasnov: About the nature of long-term microflare energy release in the solar active regions, 2001, Geophysical Research, Vol.106, NoA11, pages 25,353-25,360, DOI: 10.1029/2000JA004013
4. V.M.Bogod, L.V.Yasnov: Nature of Decimeter-Wave Microburst emission, Astronomy Reports, Vol 49, No2, 2005, pp.144-154 DOI: [10.1134/1.1862361](https://doi.org/10.1134/1.1862361)
5. J.P.Wild, The radio-frequency line spectrum of atomic hydrogen and its applications in Astronomy, *Astrophys. J.* v.115, no.2, pp.206-221 (1952)
6. Ovchinnikova N.E., Bogod V.M., Lebedev M.K. Detection of hydroxyl (OH) absorption line in the radio emission of the solar corona, in *Solar-Terrestrial Physics// 2024. Vol. 10. Iss. 3. P. 18–24.* DOI: 10.12737/stp-103202403.
7. Дравских А.Ф., Дравских Ю.А. О возможности наблюдений линий водорода // Астрономический журнал. 2021. Т. 98. № 8. С. 694–704. DOI: 10.31857/S0004629921080041.
8. Khersonskii V.K., Varshalovich D.A. The possibility of observing radiation // Астрономический журнал. **1980**, Вып. 57. С. 621-623.
9. Bogod V.M., Garaimov V.I., Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.: Detection of a Cyclotron Line in the Radio Spectrum of a Solar Active Region and its Interpretation, *Astronomy reports*, Vol. 44, №4, 2000, pp.271-277. DOI: [10.1134/1.163850](https://doi.org/10.1134/1.163850)

## Особенности поля скоростей и магнитного поля в центрах активности во вспышечно-продуктивной активной области 12673

Головко А.А.

Институт солнечно-земной физики СО РАН

г. Иркутск

Российская Федерация

[golovko@iszf.irk.ru](mailto:golovko@iszf.irk.ru)

В работе [1] проанализирован большой объем данных, полученных с помощью магнитографов SOT Hinode и HMI SDO. Выявлены особенности структуры и динамики магнитного поля в АО 12673, связанные со вспышками. Они включают совокупность тесно коррелированных в пространстве и времени процессов: формирование участков с увеличенной перемежаемостью магнитного поля и скорости, играющие роль центров активности и расширяющихся во время вспышек; ступенчатое быстрое падение беззнакового магнитного потока со скоростью до  $4 \times 10^{18}$  Мкс/с во время мощной вспышки, смену режима пульсаций максимальной магнитной индукции и возникновение пульсаций с квазипериодом 4 мин после вспышки X9.3, произошедшей 6 сентября 2017 г. Для выявления центров вспышечной активности, использован метод мультифрактальной сегментации. На рис.1 показаны распределения продольного магнитного поля и лучевой скорости, а также выявленные участки перемежаемости **a** и **b**, совпадающие с центрами вспышечной активности.

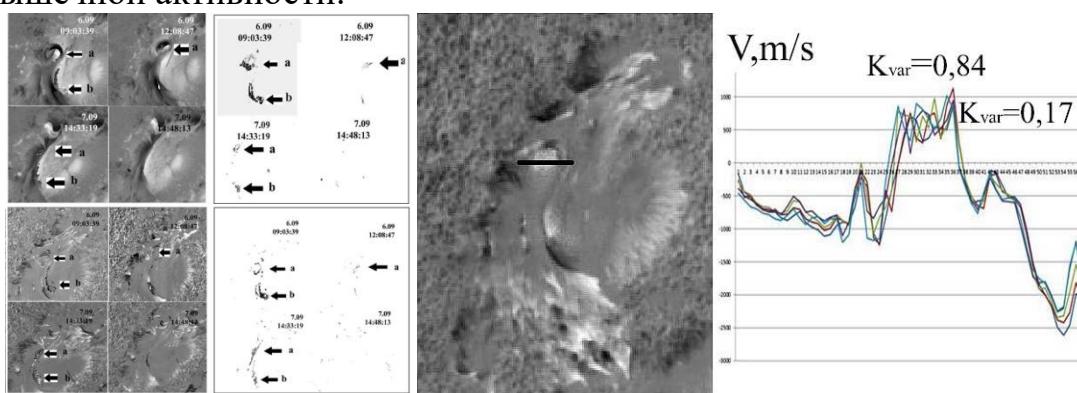


Рис.1. Слева — магнитограммы и тахограммы Hinode, их мультифрактальные сегментированные изображения; справа — тахограмма и место разреза (черной линией), а также распределение скорости вдоль разреза и коэффициенты вариации K<sub>var</sub>.

С целью дальнейшего исследования процессов в этих центрах активности, мы сформировали фильмы из карт продольного магнитного поля и лучевой скорости HMI SDO, следующие с интервалом 45 с.

При просмотре фильмов, составленных из карт допплеровской скорости, видны изменения интенсивности мелкомасштабных турбулентных движений в центрах активности со временем перед мощными вспышками. До 9 часов их интенсивность нарастает, а после второй мощной вспышки X9.3 быстро

спадает. Фильмы из магнитограмм продольного поля показывают аналогичную картину турбулентности и быстрое сокращение размера центра **a** в течение суток 6 сентября.

Была выполнена оценка времени жизни и магнитного потока малых элементов картины турбулентности. Результат представлен на рис.2 с наложением на диаграмму, полученную ранее в работе [2]. Близость положения точек наших оценок к пределу, налагаемому альфвеновской скоростью для фотосферы, может означать волновую природу картины. Гипотеза о существовании каналов выхода энергии в волновой или турбулентной форме сформулирована в работе [3], а в работе [4] указано на возможность существования особых условий для выхода альфвеновских волн.

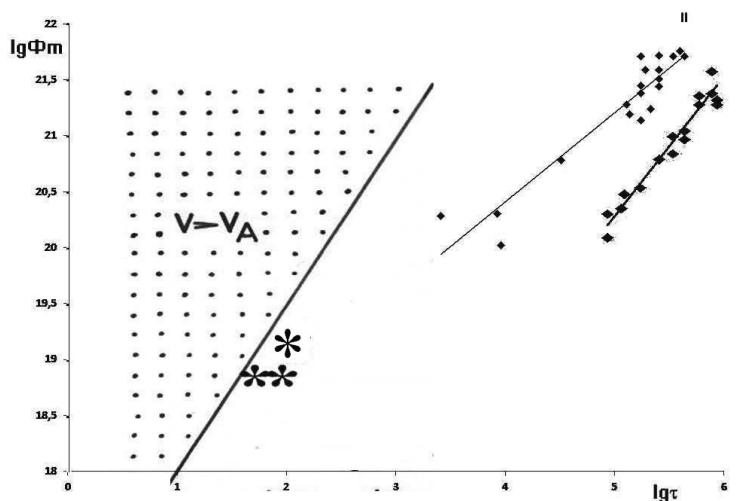


Рис.2. Диаграмма «магнитный поток — время жизни» с ветвями регулярных активных областей I и областей с быстрой эволюцией II. Звездочки — оценки для элементов в центре активности, полученные в данной работе

#### Литература

1. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I.
2. Головко, А.А. Области нового магнитного потока с быстрой эволюцией. I. Диаграмма "магнитный поток - время жизни" // Солнечные данные 1986 г. - Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1986. - Бюлл. №4. - С.48-53
3. Гершберг Р.Е., Могилевский Э.И., Обридко В.Н. Энергетика активности вспыхивающих звезд и Солнца: синергетический подход // Кинематика и физика небес. тел. Т. 3. № 5. С. 3–17.1987.
4. Головко А.А. О критических частотах выходящих альфвеновских волн в солнечных пятнах // Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Иркутск. Вып.20. С.134-142.1971.

**Проверка модели стохастического ускорения солнечных протонов  
в среднем электрическом поле  $\sim 10^{-4}$  В/см при ускоряющем поле  
одного акта 1 В/см**

**Грушин В.А., Струминский А.Б.**  
*ИКИ РАН, Москва, Россия*

[vgrushin@cosmos.ru](mailto:vgrushin@cosmos.ru)

Аргументированное объединение однотипных данных по нескольким событиям позволило получить средние значения электрического поля, которое могло принимать участие в ускорении протонов в солнечных вспышках[1].

Модель стохастического ускорения [2] позволяет провести поиск необходимых параметров длительности одного акта ускорения протона и вероятности покинуть ускоритель после одного акта его ускорения, которые бы не противоречили оценкам работы [1]. Наблюдаемое среднее ускоряющее электрическое поле протонов ( $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  В/см) удается получить при длительности всего процесса ускорения от 2 минут до 20 минут, как при электрическом поле одного акта  $10^{-5}$  В/см, так и 1 В/см, изменяя характеристики единичного акта ускорения протона - длительность и вероятность покинуть ускоритель. Наблюдаемые энергии первых пришедших протонов и максимальные энергии протонов в том или ином событии зависят от среднего ускоряющего поля и длительности процесса ускорения.

**Литература**

1. Struminsky A. B., Ozheredov V. A., Sadovskii A. M. et al., Evidence of prolonged acceleration of solar protons in average electric fields less than 4  $10^{-4}$  V/cm // Advances in Space Research, 2025 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.003>
2. Грушин В.А., Струминский А.Б. Монте-Карло моделирование стохастического ускорения протонов в солнечных вспышках. Вторая научная конференция «Проблемы космофизики» имени М.И. Панасюка, Дубна, 30 июня – 4 июля 2025 г.

## О разделении акустических импульсов в корональной плазме

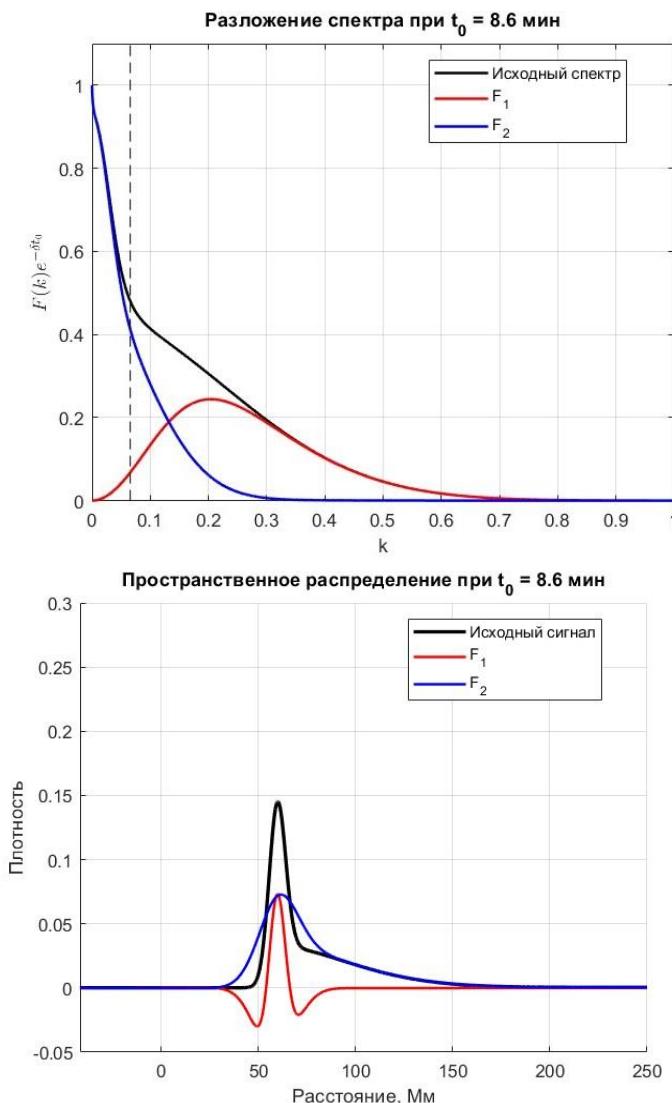
Дертеев С.Б., Сапралиев М.Е., Михаляев Б.Б.

Калмыцкий государственный университет им. Б. Б. Городовикова. Элиста, Россия  
[derteevsergei@mail.ru](mailto:derteevsergei@mail.ru)

К наиболее распространенным нестационарным явлениям в солнечной короне можно отнести так называемые волны сжатия, регистрируемые в крайнем ультрафиолете по вариациям интенсивности. Они наблюдаются практически постоянно во всех корональных структурах, корональных петлях и дырах. Распространенность явления дает возможность его использования в исследовании короны. Для теоретического изучения волн сжатия был предложен метод, основанный на ряде свойств корональной плазмы, в том числе функции излучения, представленной в аналитическом виде [1,2]. Новый подход позволил выявить ряд важных свойств акустических волн в короне, в том числе описать более точно свойства дисперсии и затухания. Была выявлена связь дисперсии и затухания с минимумом групповой скорости, которая приводит к разделению волн на две группы с малыми и большими периодами, различающиеся свойствами дисперсии и затухания.

Было показано, что под влиянием этих различий первоначально локализованный акустический импульс с широким спектром приводит к появлению в вейвлет-спектре акустического сигнала двух максимумов [3]. Предполагается, начальный акустический импульс под действием неравномерной дисперсии и затухания разделяется на два отдельных акустических возмущения, каждому из которых соответствует свой максимум. Такой вывод позволяет по-новому интерпретировать волны сжатия, не как регулярные акустические или магнитоакустические волны с определенной частотой, а как последовательность отдельных, не связанных между собой акустических возмущений, имеющих широкий спектр. Новое представление позволяет иначе формулировать задачи корональной сейсмологии, а также ставить новые задачи о взаимодействии акустических возмущений и потоков плазмы в короне.

Для подтверждения нового взгляда на волны сжатия нами была решена задача о разделении локализованных волновых пакетов, представляемых интегралом Фурье, то есть суперпозицией линейных монохроматических составляющих. Используя свойство линейности волн, мы проводим процедуру спектрального разделения заданного акустического возмущения. Результат представлен на рис. 1 и 2. Спектральная функция возмущения, выделенная черным цветом, разделяется на две аддитивные части, выделенные красным и синим цветами. Алгоритм разделения основан на свойствах дисперсии и затухания акустических волн, где центральную роль играет минимум групповой скорости. На рис. 1 его положение отмечено пунктирной линией.



На рис. 2 представлены две волны, построенные по найденным спектральным функциям. Получены два локализованных акустических возмущения, представляющие собой две части одного пакета, различающиеся спектрами. Они включают гармоники из областей малых и больших периодов и в вейвлет-спектре дают два отдельных максимума.

Рис. 1. Спектральное разделение волнового пакета. Черным цветом обозначена спектральная функция в заданный момент времени изучаемого возмущения, красным и синим цветами – спектральные функции двух сигналов, на которые разделяется исходное возмущение.

Рис. 2. Разделение пространственного распределения волнового пакета. Аналогично черным цветом обозначена локализованная акустическая волна, красным и синим – две отдельные локализованные волны, на которые распадается исходная волна.

### Литература

1. Derteev S.B. et al. Damping and Dispersion of Non-Adiabatic Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma: A Radiative-Loss Function // Physics. Vol. 5. P. 215-228. 2023.
2. Mikhalyaev B.B. et al. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma II. Damping and Instability // SP. Vol. 298. 102. 2023.
3. Derteev S.B. et al. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma III. Two-Periodic Disturbances // SP. Vol. 299. 141. 2024.

## О возможных механизмах возникновения синхронных микровспышек в хромосфере Солнца

Думин Ю.В.<sup>1,2</sup>, Верещагин Ф.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИКИ РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

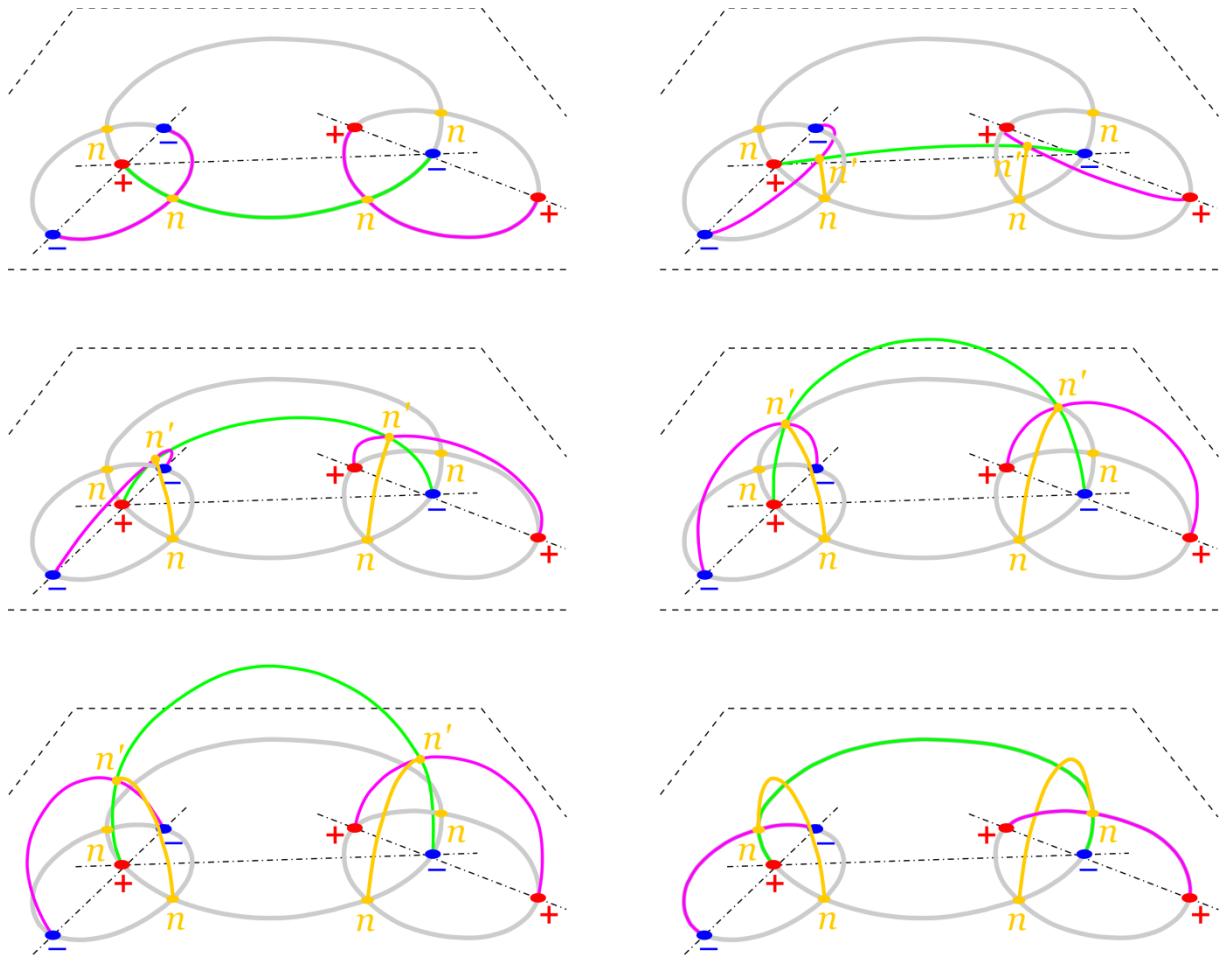
[dumin@yahoo.com](mailto:dumin@yahoo.com)

Анализ архивных данных по эмиссии в хромосферной линии CaII, зарегистрированных прибором SOT на спутнике Hinode [1], выявляет систематическое возникновение специфического типа синхронных микровспышек. Они представляют собой мелкомасштабные (10"-20") кратковременные (1–2 мин.) светящиеся дуги, разнесённые друг от друга на значительные расстояния (сопоставимые или даже в 2–3 раза превышающие их собственные размеры) и имеющие достаточно произвольную (не обязательно параллельную) ориентацию друг относительно друга. На первый взгляд, такие события можно было рассматривать как аналог хорошо известных “двуухленточных” вспышек, когда в вершинах некоторой совокупности магнитных арок происходят процессы энерговыделения, и затем потоки энергичных частиц распространяются вниз, вызывая синхронное высвечивание оснований магнитных арок.

Однако конкретные морфологические особенности вышеупомянутых микровспышек ставят под сомнение возможность такой интерпретации. Во-первых, в отличие от обычных двухленточных вспышек, светящиеся полосы в микровспышках значительно удалены друг от друга и могут иметь различную взаимную ориентацию. Во-вторых, они обычно характеризуются весьма чёткой дугообразной формой. Наконец, что особенно важно, они зачастую локализованы вблизи солнечных пятен одной и той же полярности либо же в областях без заметных магнитных полей. Тем самым, такая пара эмиссионных областей не может представлять собой два основания аркады магнитных силовых линий.

Цель настоящего доклада – показать, что возможной альтернативной интерпретацией синхронных микровспышек может служить так называемая “топологическая” модель магнитного пересоединения [2]. В этом случае ответственные за процесс пересоединения нулевые (или нейтральные) точки магнитного поля формируются не за счёт локальных токовых систем, а в результате специфического наложения воздействий от удалённых источников (солнечных пятен). Наглядно этот процесс может быть представлен как синхронное опрокидывание куполообразных сепаратрисных поверхностей магнитного поля [3]. Например, как видно на рис. 1, опрокидывание трёх куполов, сформированных тремя парами источников противоположной полярности, приводит к синхронному появлению двух новых нулевых точек магнитного поля  $n'$ . Они быстро движутся по

дугобразным траекториям, тем самым приводя к развитию вдоль них процессов магнитного пересоединения и последующего энерговыделения, т.е. к хромосферным микровспышкам.



**Рис. 1:** Схема возникновения синхронных вспышек в топологической модели магнитного пересоединения. Красные и синие кружки – положительные и отрицательные источники магнитного поля, серые окружности – основания сепаратрисных куполов, зелёные и фиолетовые дуги – “топологический скелет” магнитного поля, жёлтые дуги – траектории движения “быстрых” нулевых точек, вдоль которых развивается магнитное пересоединение и возникает свечение.

### Литература

1. Tsuneta S. et al. The Solar Optical Telescope for the Hinode mission: An overview // Solar Physics. V. 249. P. 167. 2008.
2. Горбачев В.С. и др. Новый топологический подход к вопросу о триггере солнечных вспышек // Астрон. журн. Т. 65. С. 601. 1988.
3. Dumin Yu.V., Somov B.V. Unipolar solar flares as a manifestation of ‘topological’ magnetic reconnection // MNRAS Letters. V. 528. P. L15. 2024.

## Микроволновый всплеск с квазипериодическими пульсациями 29.01.2024 г: динамика электронов в магнитной ловушке

Ерофеев Д.В.

Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия  
[dve\\_08@mail.ru](mailto:dve_08@mail.ru)

Исследовался интенсивный и длительный радиовсплеск в микроволновом диапазоне, связанный со вспышкой класса M6.8 (начало вспышки 29.01.2024 в 03:54 UT, импульсная фаза 04:08-04:22). Использованы измерения радиопотока Сибирского радиогелиографа в диапазоне 2.8-21 ГГц, а также других инструментов. Кроме того, использовались данные ASO-S о жестком рентгене (ЖР) 20-50 кэВ и измерения УФ яркости вспышечных лент в канале 1700 Å по данным SDO.

Ранее [1,2] показано, что длительность радиовсплеска в см диапазоне составляла около часа (начало в 04:08), его спектр имел максимум около радиочастоты  $f=5$  ГГц. На фоне плавного изменения радиопотока  $S$  наблюдались квазипериодические пульсации (КПП) с периодом около 90 с (и их гармоника), а также более слабые КПП с периодом около 200 с. Наиболее интенсивные КПП происходили во время импульсной фазы вспышки 04:08-04:22 UT. Амплитуда КПП была максимальна около  $f=5$  ГГц, а при  $f>5$  ГГц уменьшалась с частотой значительно быстрее, чем сглаженные значения  $S$ . При возрастании  $f$  от 5 до 21 ГГц, происходило запаздывание КПП по времени, до 12 с в случае 90-с моды и 20 с для 200-с моды. Подобные КПП происходили также в ЖР и УФ диапазонах, причем синхронно в обеих вспышечных лентах, и опережали КПП в радио на  $\approx 15$  с при  $f=5$  ГГц. Очевидно, генерация КПП происходила в области ускорения частиц.

Судя по характеристикам радиовсплеска, его микроволновое излучение в основном определялось траппингом, т.е. захватом и накоплением электронов в магнитной ловушке со сравнительно стабильной конфигурацией. В этом случае связь радиоизлучения  $S(f,t)$  с потоком ускоренных частиц  $X(t)$  можно приблизительно описать посредством уравнения

$$S(f,t)=\int_0^\infty X(t-\tau)R(f,\tau) d\tau , \quad (1)$$

где импульсный отклик (ИО)  $R(f,\tau)$  отражает особенности динамики электронов в ловушке. На рис.1 (слева) представлены оценки ИО для частот диапазона 8-21 ГГц, где радиоисточник был оптически тонким, причем в качестве *proxy* для  $X(t)$  использовался поток ЖР или УФ яркость вспышечных лент (соответственно, красная и синяя линии). Функции  $R(f,\tau)$  убывают с возрастанием  $\tau$  не монотонно, они содержат два максимума – узкий вблизи начала координат и более широкий при  $\tau\sim 150-200$  с. Первому соответствует время траппинга электронов  $T_1\leq 30$  с, а второму  $T_2>200$  с. Амплитуда узкого максимума падает с ростом  $f$  значительно быстрее, чем широкого, что

говорит о более низких энергиях электронов с  $T_1 \leq 30$  с. Присутствие двух электронных компонент с сильно различающимся временем  $T$  можно показать и другим способом, не используя соотношение (1).

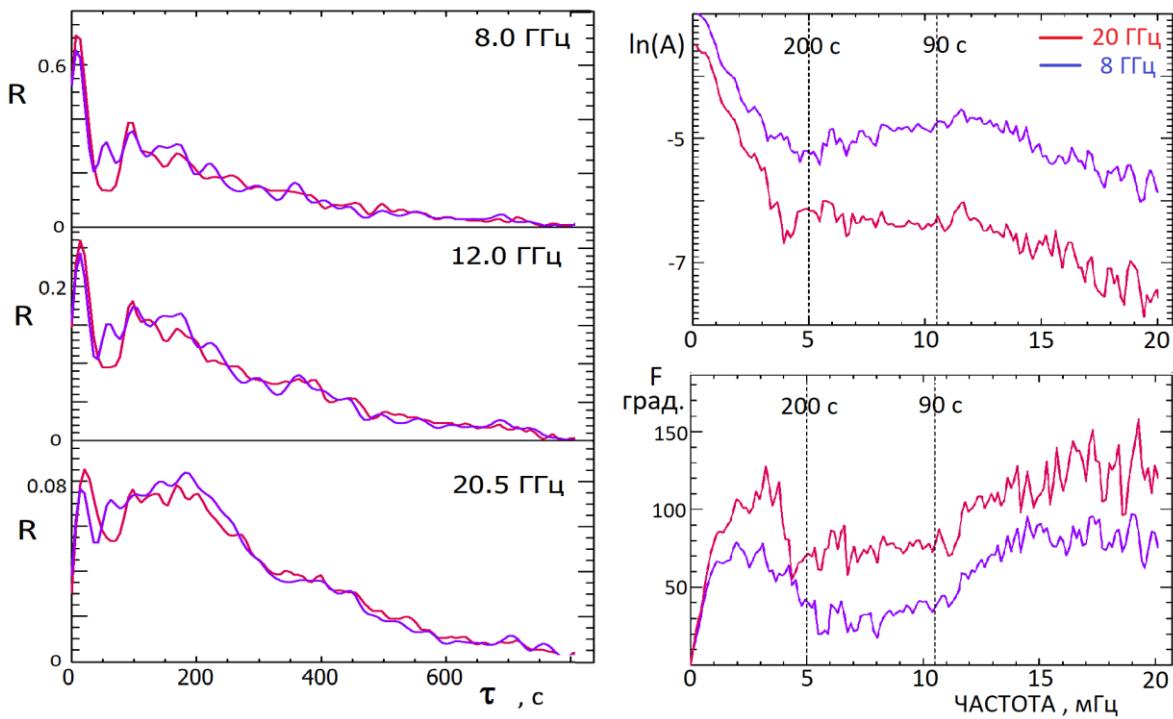


Рис.1

На рис.1 (справа) показаны амплитудно- и фазо-частотные характеристики ИО для  $f=8$  и  $f=20$  ГГц. Видно, что реакция радиоизлучения на вариации потока электронов  $X(t)$  зависит как от радиочастоты  $f$ , так и от частоты вариаций  $X(t)$ . Эти особенности ИО, отражающие динамику электронов в ловушке, существенно влияют на поведение КПП: они приводят к более быстрому спаду амплитуды КПП при возрастании  $f$  по сравнению со сглаженным радиопотоком, к появлению значительных фазовых (и соответственно временных) сдвигов КПП на разных радиочастотах, а также к запаздыванию КПП в радио относительно КПП в ЖР и УФ диапазонах.

### Литература

- Ерофеев Д.В., Кузьменко И.В. Квазипериодические пульсации в радио и других диапазонах спектра во время солнечной вспышки класса М // Сборник тезисов «Магнетизм и активность Солнца – 2024», 1 – 5 июля 2024 г., ФГБУН «КРАО РАН», Научный, С.13. <https://sun.crao.ru/sbornik-tezisov-2024>
- Ерофеев Д.В., Кузьменко И.В. Пространственно-временные вариации энерговыделения во время вспышки класса М по измерениям яркости вспышечных лент // Тр. XXVIII Всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика — 2024», СПб, 7-11 октября 2024 г , С.103-106

## Спектрально-пространственное исследование микроволнового и рентгеновского излучения гомологичных солнечных вспышек

Жмуркина А.Д., Кашапова Л.К.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

[angelina.zh22@gmail.com](mailto:angelina.zh22@gmail.com)

Мы представляем результаты исследования эволюции пространственно-спектральных характеристик излучения в микроволновом и рентгеновском диапазонах серии солнечных вспышек, произошедших 5 февраля 2024 года в активной области 3576. Основой активной области является группа пятен со сложной магнитной конфигурацией. В работе исследуются две вспышки, которые произошли в одной и той же активной области с разницей в час. Эти события имели классы C8.8 и M2.1 по классификации GOES. Данные вспышки привлекли внимание длительной фазой начала. Был проведен совместный анализ изображений источников в рентгеновском и микроволновом диапазонах, по данными инструментов ASO-S(HXI) и Сибирского Радиогелиографа (СРГ) соответственно. А также спектральный анализ микроволнового и рентгеновского излучения. В работе обсуждаются возможные причины возникновения необычного поведения вспышки, отраженного во временных профилях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00315, <https://rscf.ru/project/24-22-00315/>

## Сравнение интенсивности солнечных вспышек, связанных и не связанных с КВМ

Загайнова Ю.С.<sup>1</sup>, Файнштейн В.Г.<sup>2</sup>, Обридко В.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Российская Федерация  
\*e-mail: [yuliazag@izmiran.ru](mailto:yuliazag@izmiran.ru), [yuliazagainova@mail.ru](mailto:yuliazagainova@mail.ru)

Данная работа посвящена сравнению мощности солнечных вспышек, связанных и не связанных с корональными выбросами массы (КВМ) на примере вспышечной продуктивности в 2014 г. Выбор этого периода времени для анализа обусловлен тем, что в 2014 г. зарегистрированы мощные вспышки, не связанные с КВМ (Thalmann, Temmer, Veronig, 2015).

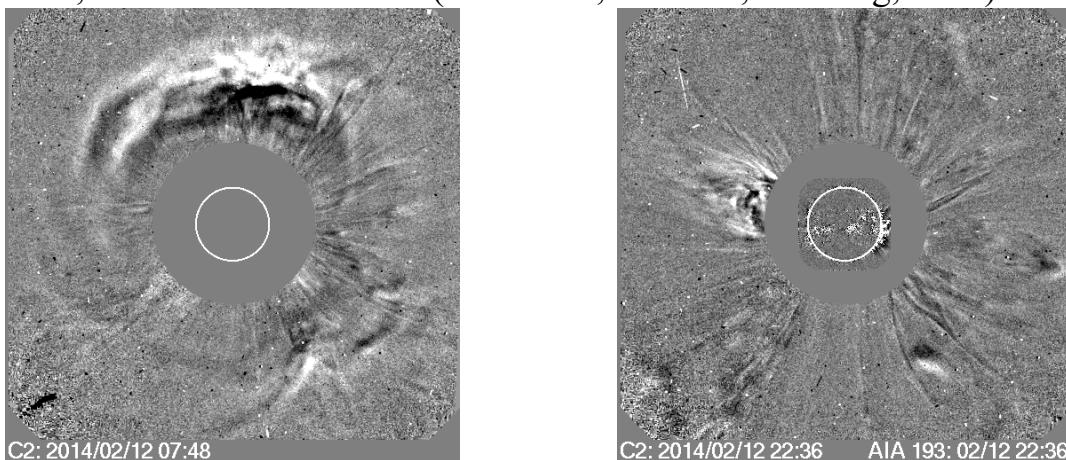


Рис. 1. Пример гало-КВМ (слева) и не гало-КВМ (справа) от 12 Февраля 2014 г.

Для начала сравним мощности солнечных рентгеновских вспышек, связанных с КВМ типа «гало» (гало-КВМ), и всех вспышек, не связанных с КВМ, но зарегистрированных в те же дни и в тех же активных областях (АО), что и гало-КВМ. Для анализа отобраны из каталога SOHO/LASCO HALO CME ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/halo/halo.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/halo.html)) все гало-КВМ, произошедшие в 2014 г. и возникшие на видимом диске Солнца (см. на Рис. 1). Всего отобрано 24 гало-КВМ. Из этого списка исключили гало-КВМ, впервые зарегистрированный на большом расстоянии от лимба Солнца. Из каталога солнечных вспышек ([https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/goes-xrs-report\\_2014.txt](https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/xrs/goes-xrs-report_2014.txt)) выписывались все вспышки (Список-1), произошедшие в день каждого из отобранных гало-КВМ и в той же АО. Далее, из каталога SOHO/LASCO CME ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)) выписывались все КВМ (Список-2), зарегистрированные в день каждого отобранного гало-КВМ. Для дат, в которые регистрировали гало-КВМ, из Списка-1 отбирали вспышки, не связанные с КВМ из Списка-2. Рассматривались только те вспышки, для которых в каталоге были даны координаты на диске Солнца. Использовалось два критерия отсутствия связи вспышки и КВМ: (1)

несовпадение по времени и (2) несовпадение направления движения КВМ с положением вспышки. Вспышка и КВМ считались не связанными, если позиционный угол КВМ и положение вспышки сильно различались. Если разница между началом вспышки  $t_0$  и оцененным началом КВМ  $t_{\text{CME}}$  превышает 45 минут (в отдельных случаях  $t_{\text{CME}} - t_0 \sim 60$  минут), то считали, что вспышка и КВМ не связаны друг с другом. Время  $t_{\text{CME}}$  находили вычитанием из момента первой регистрации КВМ  $t_1$  (в поле зрения LASCO C2) времени движения КВМ  $\Delta t$  от момента его появления  $t_{\text{CME}}$  до момента первой регистрации  $t_1$ . Время  $\Delta t$  находилось делением расстояния  $r_1 - R_s$  на среднюю скорость движения КВМ  $\langle V_{\text{CME}} \rangle = [(r_2 - r_1)/(t_2 - t_1)]/2$  в этом промежутке, где  $r_1$  – положение КВМ в момент первой его регистрации,  $R_s$  – радиус Солнца,  $r_2$  – положение КВМ во второй момент его регистрации в  $t_2$ . Здесь пренебрегаем различием реальной начальной высоты образования КВМ от поверхности Солнца  $R_s$ . По нашим оценкам средний балл вспышки  $\langle P \rangle$ , связанной с гало-КВМ оказался равным **M3.74.**, а для вспышек, не связанных с КВМ, зарегистрированных в те же дни, что и гало-КВМ, и в тех же АО, что гало-КВМ составил  $\langle P \rangle \sim \text{C6.7}$ . Кроме этого оценена мощность вспышек, для которых известны координаты на диске Солнца (всего 4 события), связанных с не гало-КВМ и в те же дни, когда наблюдали гало-КВМ. Оказалось, их средний балл - **C3.35**, т.е. меньше, чем для вспышек, связанных с гало-КВМ, и меньше, чем для вспышек, вообще не связанных с КВМ. Для вспышек, связанных с не гало-КВМ по времени (о связи в пространстве для многих из них ничего неизвестно), средний балл составил ~ **C2.6**, что еще меньше мощности вспышек, связанных с гало-КВМ, и вспышек без КВМ.

Мы также получили для 2014 г. распределение количества всех зарегистрированных вспышек  $N$  в зависимости от балла вспышки  $P$ , на котором отчетливо различимы 2 выборки вспышек. Большая часть вспышек на Солнце относится к первой выборке событий с наибольшим числом вспышек мощностью ~ C1.3. В пределах первой выборки прослеживается выборка вспышек малой мощности с максимумом ~ B3.5. Вспышки с условно высокой мощности ( $P > \text{C9.0}$ ) образовали отдельную выборку событий с максимумом по мощности ~ M1.3, что близко к среднему значению мощности вспышек M3.74, сопровождающих формирование гало-КВМ. Возможно, в настоящее время с учетом накопленных знаний о вспышечной продуктивности, актуально чисто протонные вспышки относить к особому классу вспышечных событий.

#### Литература

J. K. Thalmann, Y. Su, M. Temmer, and A. M. Veronig. The confined X-class flares of solar active region 2192. The Astrophysical Journal Letters, 801:L23 (5pp), 2015.

## Многоволновые пространственно-разрешенные наблюдения эруптивной вспышки с рентгеновскими пульсациями и моделирование динамики ускоренных электронов

Зимовец И.В.<sup>1</sup>, Шарыкин И.Н.<sup>1</sup>, Су Я.<sup>2</sup>, Ли Ж.<sup>2</sup>, Лу Л.<sup>2</sup>, Ган В.<sup>2</sup>, Мроцек  
Т.<sup>3</sup>, Шабалин А.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Обсерватория Пурпурной горы КАН, Нанкин, КНР

<sup>3</sup>Центр космических исследований ПАН, Варшава, Польша

<sup>4</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

[ivanzim@cosmos.ru](mailto:ivanzim@cosmos.ru)

Проблема энерговыделения и ускорения частиц в солнечных вспышках открыта. В частности, нет ответа на вопрос о происхождении квазипериодических пульсаций (КПП), несмотря на ряд предложенных механизмов. Важность этого вопроса обосновывается статистическими исследованиями, показывающими наличие КПП в значительной доле вспышек - десятки процентов по разным данным и методам.

Представлены результаты детального анализа данных многоволновых наблюдений эруптивной вспышки класса M3.4, произошедшей вблизи солнечного лимба 2 сентября 2023 г. и сопровождавшейся КПП жесткого рентгеновского (ЖР,  $>20$  кэВ) излучения с периодом  $P=1.56$  мин. Такой значительный период позволил исследовать динамику источников излучения в разных спектральных диапазонах.

В рентгеновском диапазоне вспышка наблюдалась с двух направлений – с Земли инструментами ASO-S/HXI, GOES/XRS, Fermi/GBM и с противоположной стороны Солнца с помощью Solar Orbiter/STIX. Наблюдения с двух направлений с помощью телескопов-спектрометров ХI и STIX не противоречат друг другу. Более того, наблюдения STIX позволили удостовериться в том, что для наблюдений с Земли ЖР источники не располагались за лимбом, что важно для выводов работы.

Динамика популяций плазмы с разными характерными температурами определялась на основе данных наблюдений в ЭУФ диапазоне, полученных инструментом SDO/AIA. Выполнен анализ дифференциальной меры эмиссии плазмы. С помощью данных этого инструмента исследована динамика УФ источников вспышечных лент.

Выделилось три фазы развития вспышки. Первое плавное увеличение потоков рентгеновского и ЭУФ излучения сопровождалось относительно медленным ( $<100$  км/с) подъемом “языка” разогретой до  $T \approx 7-15$  МК плазмы в корону. Второе наиболее сильное увеличение потоков излучения сопровождалось дополнительным нагревом плазмы до 15-25 МК и ускоренной (до  $\approx 1$  км/с<sup>2</sup>) эruptionей плазменного образования за счет образования плазмойдов. В это время наблюдалась импульсная фаза вспышки, сопровождаемая пульсациями ЖР и микроволнового излучения. Далее следовала фаза спада потоков излучения, когда выброс плазмы достиг

значительных высот около 1.5 солнечных радиусов и выше и наблюдался в белом свете как корональный выброс массы (КВМ) с помощью коронографа SOHO/LASCO (со скоростью  $\approx 1100$  км/с).

Установлено, что источники КПП ЖР излучения располагались в короне над вспышечными рентгеновскими и ЭУФ петлями в области под КВМ. В первой половине импульсной фазы доминировал корональный источник ЖР излучения, тогда как во второй половине импульсной фазы, когда выброс ушел на большую высоту, стали доминировать ЖР источники в подножиях петель. При этом энергетический спектр ЖР излучения стал систематически более жестким. Это также было видно по микроволновым данным Радиополяриметра Нобеямы. Во время КПП наблюдались вариации спектра по типу мягкий-жесткий-мягкий, т.е. антикорреляция показателя спектра и интенсивности ЖР излучения.

ЖР пики коррелировали с пиками УФ излучения из вспышечных лент. Обнаружено систематическое перемещение центров яркости УФ источников вдоль лент со скоростью в диапазоне  $\approx 4\text{--}35$  км/с от пика к пику. На основе оценки размера центров яркости лент сделана оценка возможной величины электрического поля в корональном токовом слое  $E \sim 10^{-4}\text{--}10^{-3}$  В/см, превышающего поле Драйсера  $E_D \sim 10^{-5}\text{--}10^{-4}$  В/см.

Для обоснования наблюдаемых отношений интенсивности ЖР излучения в корональном источнике к хромосферному ( $HXR_{\{LT\}}/HXR_{\{FP\}} \approx 2\text{--}20$ ) произведены численные расчеты функции распределения ускоренных электронов в модели коллапсирующей ловушки с нестационарными распределениями магнитного поля и плазмы в магнитной петле. Показано, что наблюдаемые отношения  $HXR_{\{LT\}}/HXR_{\{FP\}}$  возможны, если электроны, инжектируемые в верхнюю область каспа пересоединившейся магнитной петли, предускорены в токовом слое, в рамках стандартной модели, квазиперечно, с питч-угловым распределением типа  $S(\alpha) = \sin^8(\alpha)$ . Поддержание высоких значений  $HXR_{\{LT\}}/HXR_{\{FP\}}$  обеспечивается последовательной релаксацией вновь образуемых нисходящих магнитных петель.

Результаты анализа наблюдений и моделирования показывают, что 1) ускорение электронов, безусловно, связано с процессом эruptionи, 2) ускорение происходило в области между КВМ и вспышечными петлями, 3) КПП являлись проявлением последовательной инжекции ускоренных в токовом слое электронов, доускоряемых в коллапсирующих ловушках, 4) токовый слой мог быть промодулирован (вдоль тока) волнами или филаментация слоя была связана с изначально имеющимися неоднородностями магнитного поля и плазмы в петельной аркаде.

## Влияние холодных слоёв плазмы в нижней солнечной короне на спектр см-дм излучения активных областей

А. Г. Ступишин, Т. И. Кальтман

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия

[agstup@yandex.ru](mailto:agstup@yandex.ru)

### Введение

Наблюдения в сантиметровом и дециметровом диапазоне являются важным инструментом диагностики солнечных активных областей. Спектр радиоизлучения в этих диапазонах формируется комбинацией нескольких механизмов — в первую очередь циклотронного излучения электронов в магнитном поле и теплового тормозного излучения. Наличие в атмосфере активной области холодных плазменных структур (волокна, динамические вкрапления коронального дождя, локальные конденсации) может заметно влиять на генерацию и прохождение радиоволн. В работе [1] приведены примеры наблюдения депрессий в дециметровом диапазоне, полученные с высоким частотным разрешением на новом спектральном комплексе РАТАН-600.

Цель данной работы — исследовать, как наличие холодного слоя может отражаться на наблюдаемом спектре: при каких условиях возникает провал (депрессия) потока в заданном диапазоне частот, может ли спектр «восстановиться» на более низких частотах. В перспективе встаёт задача диагностики параметров холодного слоя по спектру.

### Основные случаи взаимодействия излучения с холодным слоем

Перечислим ниже некоторые случаи расположения холодного слоя.

Полное закрытие компактного источника: в этом случае излучение проходит через однородный экран, и эффект описывается как чистое свободно-свободное поглощение. Оптическая толщина слоя при этом обратно пропорциональна квадрату частоты.

Частичное закрытие источника: если экран перекрывает только часть источника, то глубина провала в спектре будет зависеть от частоты: по мере изменения видимого размера источника меняется доля закрытой области.

Высотная стратификация: излучение на разных частотах формируется на разных высотах, поэтому холодный слой может оказаться как выше, так и ниже основной области генерации.

При большой оптической толщине (значительно больше единицы) наблюдается собственное излучение холодного плазменного слоя, и яркостная температура в этом случае определяется температурой слоя.

Если частота излучения близка к плазменной частоте холодного слоя, то волны не проходят, и в спектре возникает резкий обрыв.

В данной работе мы сосредотачиваемся на модели, в которой

источником излучения является активная область, где наблюдается комбинация циклотронного излучения в магнитном поле и теплового свободно-свободного излучения. На линии зрения расположен однородный холодный слой плазмы, также находящийся в магнитном поле. Параметры холодного слоя варьируются: толщина, высота расположения относительно источника, температура, электронная плотность.

## Результаты

Холодные плазменные слои в нижней короне могут оказывать заметное влияние на см–дм спектры активных областей, в отдельных случаях проявляясь в виде спектральных депрессий. Наиболее естественным сценарием является их усиление к низким частотам, однако степень и форма эффекта остаются предметом обсуждения.

Для дециметрового диапазона возможности таких эффектов оказываются весьма ограниченными: свободно-свободное поглощение в типичных условиях остаётся оптически толстым, а для циклотронного механизма требуются слишком жёсткие параметры магнитного поля. Для того чтобы циклотронный механизм мог дать заметную депрессию в дециметровом диапазоне, требуется сохранение очень высоких значений магнитного поля на больших высотах и резкие градиенты поля, при которых оптическая толщина становится порядка единицы на соответствующих частотах. В реальных активных областях такие условия маловероятны.

Возможность восстановления спектра после провала может рассматриваться лишь в особых случаях — например, при частичном перекрытии источника или при смещении высоты формирования излучения.

Таким образом, холодные слои плазмы могут играть роль в формировании дм-депрессий, но точное воспроизведение наблюдаемых характеристик, вероятно, потребует более детальной настройки параметров и учёта их более сложного распределения в пространстве активной области.

## Литература

- [1] Лебедев М.К., Богод В.М., Овчинникова Н.Е. Тонкая структура короны по радионаблюдениям с высоким частотным разрешением // Космические исследования. Т. 62. № 6. С. 640–654. 2024

**Временной анализ излучения вспышки SOL2005-10-05.  
Объяснение излучения в линиях кальция и водорода в рамках  
гипотезы усиления нагрева МГД-волнами**

**Ю.А. Купряков<sup>1,2</sup>, К.В. Бычков<sup>1</sup>, В.А. Малютин<sup>3</sup> А.Б. Горшков<sup>1</sup>, О.М.  
Белова<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва,  
Россия*

<sup>2</sup>*Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ondřejov, Czech Republic,  
[kupry@asu.cas.cz](mailto:kupry@asu.cas.cz)*

<sup>3</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический  
факультет, Москва, Россия*

Во вспышке SOL2005-10-05 (класс C1.4, активная область NOAA 10813) нами наблюдались спектральные линии Н и К CaII, а также бальмеровские линии Hα, Hβ, Hε. Активная область имела сложную структуру и содержала несколько ядер. В таблице 1 (в качестве примера), представлена информация об измеренном (из наблюдений) интегральном потоке излучения в эрг/см<sup>2</sup>/с для линий Hα и HCaII, а также относительные потоки в других линиях. Наблюдаемые значения абсолютных потоков приведены в (табл. 1).

С учётом условий в хромосферном газе выполнено теоретическое восстановление параметров плазмы по его излучению в предположении, что нагрев осуществляется джоулевыми потерями МГД-волн. Методика расчетов подробно рассмотрена в работе Купряков и др., 2024.

Анализ показывает, что излучающий газ является неоднородным: для объяснения наблюдаемых относительных потоков потребовалось рассмотреть 2 газовых слоя, ориентированных поперек луча зрения, со своими индивидуальными параметрами: концентрацией, толщиной, температурой и турбулентной скоростью (параметры слоев приведены в табл. 2). Наблюдаемые значения абсолютных потоков по сравнению с теоретическими оказались завышены в 5-10 раз. Это можно объяснить в модели сложения излучения от нескольких облаков, не накладывающихся друг на друга по лучу зрения, причем каждое такое облако является двухслойным с параметрами, указанными в табл. 2. В этой таблице  $N$  (см<sup>-3</sup>) – объемная концентрация;  $L$  (км) – толщина слоя,  $T$  (К) – температура,  $V$  (км/с) – турбулентная скорость; индекс 1 относится к дальнему слою, индекс 2 – к ближнему. При сравнении таблиц видно, что наблюдаемые и теоретические относительные потоки (столбцы Hα/Hβ, Hε/Hβ, HCaII/KCaII) хорошо согласуются. Проинтерпретировать двухслойную природу каждого облака можно так: дальняя его часть представляет собой плотное ( $\sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>), протяженное ( $\sim 1000$  км), разогретое (>6000 K) ядро, которое перекрыто

менее плотной и менее нагретой (5000-6000 К) оболочкой. В дальнем слое формируется основная часть излучения в линиях Н $\epsilon$  и Н $\beta$ , ближний слой вносит определяющий вклад в Н $\alpha$ . В резонансные линии кальция слои вносят сравнимый вклад.

Таким образом, излучение в пяти линиях удается объяснить в рамках джоулевых потерь.

Таблица 1

Time	$F(\text{H}\alpha)$	$F(\text{H CaII})$	$\text{H}\alpha / \text{H}\beta$	$\text{H}\epsilon / \text{H}\beta$	$\text{H CaII/K CaII}$
08:20:57	$2.38 \cdot 10^7$	$1.95 \cdot 10^7$	1.68	0.70	1.13
08:21:20	$2.47 \cdot 10^7$	$1.69 \cdot 10^7$	1.86	0.56	1.10
08:23:09	$1.75 \cdot 10^7$	$1.78 \cdot 10^7$	1.78	0.78	1.11

Также мы проанализировали рентгеновское излучение и излучение в радиодиапазоне. Максимум вспышки соответствует моменту: в рентгене (1.0 - 8.0 Å) 08:10:05 UT, причем поток вырос практически на порядок по сравнению с довспышечным значением; в радио (0.8-2.0 GHz) 08:17:54 UT, при этом, быстрое изменение потока составило ~ 40 единиц SFU; в оптике (3933 – 6564 Å) 08:18:58 UT. Таким образом, развитие вспышки протекало по классическому сценарию.

Таблица 2

Time	08:20:57	08:21:20	08:23:09
$N_1$	$1.70 \cdot 10^{13}$	$1.40 \cdot 10^{13}$	$1.80 \cdot 10^{13}$
$N_2$	$1.65 \cdot 10^{12}$	$1.65 \cdot 10^{12}$	$2.70 \cdot 10^{12}$
$L_1$	1000	1000	1000
$L_2$	50	50	30
$T_1$	6600	6050	6650
$T_2$	5000	5700	6000
$V_1$	12	2	13
$V_2$	24	19	33
$F(\text{H}\alpha)$	$3.25 \cdot 10^6$	$2.39 \cdot 10^6$	$3.50 \cdot 10^6$
$F(\text{H CaII})$	$2.46 \cdot 10^6$	$1.68 \cdot 10^6$	$3.29 \cdot 10^6$
$\text{H}\alpha/\text{H}\beta$	1.69	1.84	1.73
$\text{H}\epsilon/\text{H}\beta$	0.69	0.57	0.73
$\text{H CaII/K CaII}$	1.19	1.16	1.05

### Литература

Купряков Ю.А., Бычков К.В., О. М. Белова и др. Моделирование излучения вспышки 27.04.2012 в спектральных линиях водорода, гелия и кальция // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. Т. 79, № 2. 2024.

## Магнитные поля активных областей по наблюдениям в нескольких спектральных линиях

Куценко А.С.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

[alex.s.kutsenko@gmail.com](mailto:alex.s.kutsenko@gmail.com)

Наблюдения Солнца одновременно в нескольких спектральных линиях позволяют проводить диагностику плазмы и магнитных полей в некотором объеме активной области. Диапазон доступных для анализа высот определяется выбором конкретных спектральных линий. Ядро линии формируется на больших высотах, а крылья – в более низких слоях атмосферы. В общем случае, эквивалентная ширина спектральной линии пропорциональна высоте ее формирования.

В работе для исследования используются наблюдения, полученные на спектрополяриметре телескопа БСТ-1 Крымской астрофизической обсерватории [1]. Инструмент позволяет проводить спектрополяриметрию Солнца вблизи фотосферных спектральных линий Fe I 5247/5250 Å и линии Mg I b2 5173 Å, ядро которой формируется в нижней хромосфере. В общей сложности, рабочий спектральный диапазон прибора составляет более 50 Å, что дает возможность использовать более десятка спектральных линий в анализе. Спектральное разрешение инструмента превышает 70 000, тогда как пространственное ограничено состоянием атмосферы в момент наблюдений.

В докладе будут представлены результаты анализа магнитных полей в ряде активных областей. Магнитные поля определяются методом центра тяжести (продольное магнитное поле) или в приближении слабого поля.

### Литература

Kutsenko A.S. et al. The Spectro-Polarimeter of the Andrei B. Severny Solar Tower Telescope at the Crimean Astrophysical Observatory: Optical Design and Implementation // Solar Physics. V. 299. I. 9. Id. 132. 2024.

## Свойства турбулентности в окрестностях униполярных пятен

Куценко О.К., Абраменко В.И., Куценко А.С.

ФГБУН «КраоРАН», Научный, Россия

[olga.k.kutsenko@yandex.ru](mailto:olga.k.kutsenko@yandex.ru)

Спектры мощности магнитного поля являются удобным инструментом для исследования активных областей на разных стадиях их эволюции [1]. Этот метод позволяет оценить степень турбулизации солнечной фотосферы, а также изменение магнитной энергии в активных областях на разных пространственных масштабах. Важный параметр, характеризующий спектры мощности – показатель спектра. В активных областях он принимает значения 5/3 и более. В спокойной солнечной фотосфере его значение близко к 1. Ранее метод спектров мощности применялся в наших работах для исследования вспышки и затухания активных областей, а также проводился анализ спектров мощности магнитного поля в спокойной фотосфере Солнца. В настоящей работе метод спектров мощности был применен для исследования униполярных активных областей, характеризующихся разной скоростью затухания.

Униполярные активные области (УАО) – активные области, у которых в белом свете наблюдается лишь одно компактное лидирующее пятно. При этом вокруг этого пятна не наблюдается хвостовых пятен или пор. Детальное и обширное исследование униполярных активных областей было проведено Плотниковым А.А. и соавторами [2]. В этой работе были рассчитаны различные параметры затухающих униполярных активных областей. В нашей работе мы исследовали несколько униполярных активных областей, для которых в упомянутой выше работе были посчитаны скорости их затухания.

Таблица 1. Параметры исследуемых активных областей.

Активная область	Скорость затухания, $\times 10^{-19}$ Мкс/ч	Показатель спектра мощности магнитного поля		
		По всей магнитограмме	Отдельно пятно	Периферия пятна
NOAA 11140	1.05	1.35	1.73	1.26
NOAA 11642	0.33	1.09	2.00	1.04

Спектры мощности униполярных активных областей имели схожую форму. Во всех активных областях наблюдался пик на масштабах, которые соответствуют размеру униполярного пятна. Причем практически во всех исследуемых активных областях этот пик находился левее инерционного интервала (2,5 – 10 Мм). В инерционном интервале же наблюдался линейный спектр. Наклон спектра мощности в инерционном интервале был неодинаков для разных активных областей. В некоторых УАО этот наклон был

характерным для спокойного Солнца. В других УАО он был круче, чем обычно наблюдается в спокойном Солнце.

Далее для более детального исследования был проведен сравнительный анализ спектров мощности двух УАО с примерно одинаковым размером униполярного пятна и разной скоростью затухания: АО NOAA 11140 и NOAA 11642. Для этих двух УАО были посчитаны спектры мощности магнитного поля всей активной области, отдельно пятна и его ближайшего окружения, а также периферии активной области за пределами пятна. Полученные результаты и скорости затухания этих УАО представлены в таблице 1. Форма спектров мощности по всей магнитограмме имела пик, соответствующий размеру пятна, и линейный спектр в инерционном интервале. Причем в медленнозатухающей УАО 11642 показатель спектра мощности в инерционном интервале был близок к 1, что характерно для спокойной фотосферы Солнца. В случае быстрозатухающей УАО 11140 показатель спектра был 1.35. Дальнейшее исследование спектров мощности магнитного поля отдельно пятна и его ближайшего окружения показало, что у быстрозатухающей УАО 11140 наблюдается в инерционном интервале линейный спектр с колмогоровским наклоном. Такой спектр характерен для хорошо развитой турбулентности. У медленнозатухающего пятна в инерционном интервале линейность спектра была нарушена. В этом промежутке масштабов наблюдался крутой спектр на более высоких масштабах и пологий спектр на меньших, что свидетельствует о недоразвитой турбулентности вокруг медленнозатухающего пятна. Анализ спектров мощности периферии УАО показал, что в медленнозатухающей активной области показатель спектра близок к 1, что характерно для спокойного Солнца. В быстрозатухающей активной области этот показатель выше, следовательно турбулентное состояние вокруг пятна в этой активной области повышенено.

На основании полученных результатов можно сделать предположение, что высокая степень турбулизации фотосферы вокруг активной области может быть связана с быстрой скоростью затухания УАО. При этом возможны два варианта. Во-первых, высокая степень турбулизации может быть вызвана самой активной областью. Во-вторых, активная область могла исходно оказаться в области повышенной турбулентности, что привело к его более быстрому затуханию.

### 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.
2. Plotnikov A.A., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. Statistical analysis of the total magnetic flux decay rate in solar active regions // *MNRAS*. V. 521. P. 2187-2195. 2023.

## Состояния поляризации солнечного излучения на лимбе по данным SP/Hinode

**Можаровский С.Г.**  
*ИПА РАН, г. Уссурийск, Россия*  
[mozharovskys@mail.ru](mailto:mozharovskys@mail.ru)

Проанализированы наблюдения спектрополяриметра Hinode на лимбе, примерно так же, как это было сделано авторами работы [1]. На лимбе, когда яркость континуума падает до 0.2 яркости центра диска Солнца, линии поглощения Fe I  $\lambda$  6301 и 6302 Å испытывают обращение – становятся эмиссионными. Кроме этого они показывают линейную поляризацию, которая не связана с магнитным полем, а вызвана когерентным рассеянием. Направление поляризации рассеянного света должно быть параллельным касательной к лимбу, однако авторы [1] нашли линейную поляризацию, направленную преимущественно радиально при её измерении для 17-ти сеансов SP/Hinode на участках, расположенных на расстоянии  $0''.3$  выше лимба. Авторам [1] наблюдаемые ими направление и степень поляризации удалось согласовать с модельными расчётами. Для этого они предположили деполяризующее действие эффекта Ханле, вызванное случайно ориентированным полем поперечного направления напряжённостью 2 Гс. В настоящей работе, как и в [1] было проведено объединение профилей Стокса для множества точек, расположенных на заданном расстоянии от лимба. Объединение профилей для сотен точек необходимо для поднятия отношения сигнал/шум. Объединить профили не просто, дело в том, что от скана к скану в процессе наблюдений Hinode нерегулярным образом смещает положение центра Солнца относительно первоначально заданной точки. Это смещение мало, но оно достаточно, чтобы испортить возможность корректно объединять точки на заданном расстоянии от края диска. Поэтому в настоящей работе, точки для объединения профилей отфильтрованы по серии яркостей от 0 до 0.6 с шагом 0.05 средней яркости фотосферы на диске. Результаты измерений показали, что угол линейной поляризации может меняться в зависимости от расстояния до края диска от радиального до тангенциального, а в общем картина углов может быть разной от сеанса к сеансу. Надо отметить, что во всех рассмотренных в нашей работе сеансах амплитуда U-профиля Стокса меньше амплитуды Q-профиля. Возможно, чтобы получить обратное, нужны сеансы Hinode которые бы приходились на области под углом  $45^\circ$  к экватору и меридиану, т.е. нужны наблюдения лимба со стороны NE, NW, SE, SW, но таких сеансов практически нет. Объединённые профили круговой поляризации редко когда сходят до уровня шумовой дорожки, практически всегда некомпенсированные элементы с магнитным полем себя проявляют. Чтобы увидеть поляризацию в одной точке, а не для обширного участка вдоль лимба, можно посмотреть

объединение профилей для сеанса, проведённого с неподвижной щелью, см. рис. 1.

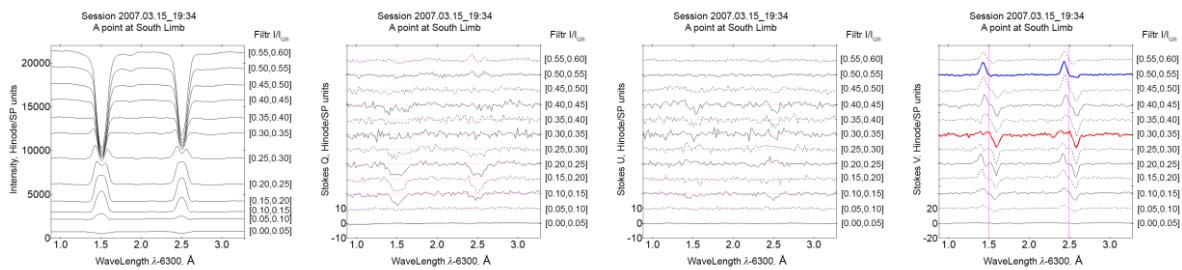


Рис. 1 Профили Стокса сеанса наблюдений SP/Hinode с неподвижной щелью

Из рисунка 1 мы можем видеть, что обращение линий наступает примерно на уровне яркости 0.25 – 0.3 (соответствует 0.2 яркости центра диска Солнца), этот же уровень мы считаем положением лимба. За лимбом (яркость < 0.25) Q-профили Стокса отчётливо показывают наличие когрентно-рассеянного света, поляризованного параллельно экватору (в отличие от результатов работы [1]). На яркости 0.4 – 0.45 мы видим следы Зеемановского расщепления в Q и U-профилях. Для V профилей отношение сигнал/шум значительно лучше, чем для Q и U, поэтому здесь хорошо видно присутствие продольного поля южной полярности. При том, что силовые линии, как и луч зрения, направлены вдоль поверхности. И очень сложно оценить величину поля. Обычно методы определения включают в себя нормирование на эквивалентную ширину, которую проблематично рассчитать для профилей, близких к состоянию инверсии. Из отклонений от антисимметричной картины на уровнях, которые соответствуют яркостям 0.525 и 0.325, т.е. 0.6" и 0.07" от лимба к центру Солнца (профили, отмеченные на рис.1 синим и красным) можно сделать заключение, что здесь мы видим противоположно направленные градиенты лучевой скорости. Возникает аналогия с какой-то стоячей волной, но надо учитывать, что профили усредняют данные, полученные за 3 часа наблюдений.

Таким образом, вариации состояний поляризации в окрестностях солнечного лимба в разные дни говорят о возможности анализа здесь магнитных полей. Это могут быть локальные участки с полем, которые имеют постоянную во времени либо повторяющуюся устойчивую структуру, а также глобально организованные поля, например, для полярных зон. Желательно дальнейшее изучение этого вопроса.

### Литература

Lites, B. W., et al. Scattering Polarization in the Fe I 630 nm Emission Lines at the Extreme Limb of the Sun. // The Astrophysical Journal V. 713 P. 450-457. 2010

## О вкладе корональной вспышечной плазмы в суб-терагерцовое излучение солнечной вспышки 4 мая 2022 года

**Моторина Г.Г.<sup>1,2</sup>, Щап Ю.Т.<sup>3</sup>, Смирнова В.В.<sup>3</sup>, Моргачев А.С.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*

<sup>3</sup>*КраО РАН, п. Научный, Россия*

[g.motorina@yandex.ru](mailto:g.motorina@yandex.ru)

Целью настоящей работы является анализ природы суб-терагерцового (суб-ТГц) излучения, зарегистрированного во время солнечной вспышки SOL2022-05-04T08:45 (M5.7) на частоте 93 ГГц радиотелескопом РТ-7.5 МГТУ им. Н.Э. Баумана. В работе исследуется взаимосвязь суб-ТГц и крайнего ультрафиолетового (КУФ) излучения, включая временные профили температуры и меры эмиссии корональной плазмы, полученные по данным инструментов SDO/AIA и GOES. Результаты показывают, что рост суб-ТГц излучения на пост-импульсной фазе вспышки коррелирует с КУФ излучением, формируемом в умеренно горячей плазме ( $\sim 1$  МК). На основе расчёта дифференциальной меры эмиссии определены параметры плазмы на всех фазах эволюции вспышки. Исходя из меньшей относительной разницы между рассчитанным и наблюдаемым потоками, сделан вывод, что наибольший вклад (около 20%) оптически тонкой корональной плазмы в суб-ТГц излучение приходится на максимум пост-импульсной фазы вспышки.

## **Возможное объяснение для наблюдаемой депрессии солнечных активных областей с волокнами в диапазоне 1.5 ГГц – 1.7 ГГц**

**Нага Варун Е.**

*Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия*

[naga.varuny@gmail.com](mailto:naga.varuny@gmail.com)

Известно, что недавние наблюдения активных областей Солнца с использованием нового спектрополяриметра высокого спектрального разрешения в диапазоне от 1 ГГц до 3 ГГц на РАТАН 600, показали депрессию в радио потоке в диапазоне около 1.5 ГГц – 1,7 ГГц [1]. Эмпирически показано, что это депрессия устойчиво наблюдается именно там, где присутствуют хромосферные волокна, которые находятся над активными областями или в окрестностях [1]. В качестве объяснения для данного явления, предложено, что такое понижение в потоке происходит из-за спектрального молекулярного поглощение от молекул OH, которые могут присутствовать в относительно холодных волокнах. Такое объяснение было ещё теоретически обосновано с использованием данных из базы HiTran [1].

В данной работе, представляются некоторые дефекты предложенного теоретического анализа в работе [1] и в качестве альтернатива и возможного объяснения для наблюдаемой депрессии предлагается механизм.

Хромосферные волокна, находящиеся у активных областей, имеют значительную плотность свободных электронов по сравнению с активными областями. Известно, что если частота электромагнитных волн ниже частоты плазмы, то есть Лангмюровской частоты тогда волны будут сильно поглощены. Также стоит отметить, что показатель преломления волн возрастает до очень больших значений сразу после достижения частоты плазмы и затем падает достаточно резко. Такое поведение показателя преломления может привести к эффекту, который можно назвать как расфокусирующий облачный эффект (Defocusing Cloud Effect or DCE).

Представлен результат моделирования с учётом эффекта DCE и показан, что можно объяснить наблюдаемое явление с помощью предложенного механизма.

### **Литература**

1. Ovchinnikova, Nina. et al. Observation at radio frequencies of the hydroxyl (OH) absorption line in filaments and prominences above active regions of the Sun, Solar-Terrestrial Physics, vol. 10, issue 3, pp. 18-24, DOI:10.12737/stp-103202403

## Конфигурация магнитного поля в месте солнечной вспышки на магнитной аркаде: результаты МГД моделирования

Подгорный А.И.<sup>1</sup>, Подгорный И.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

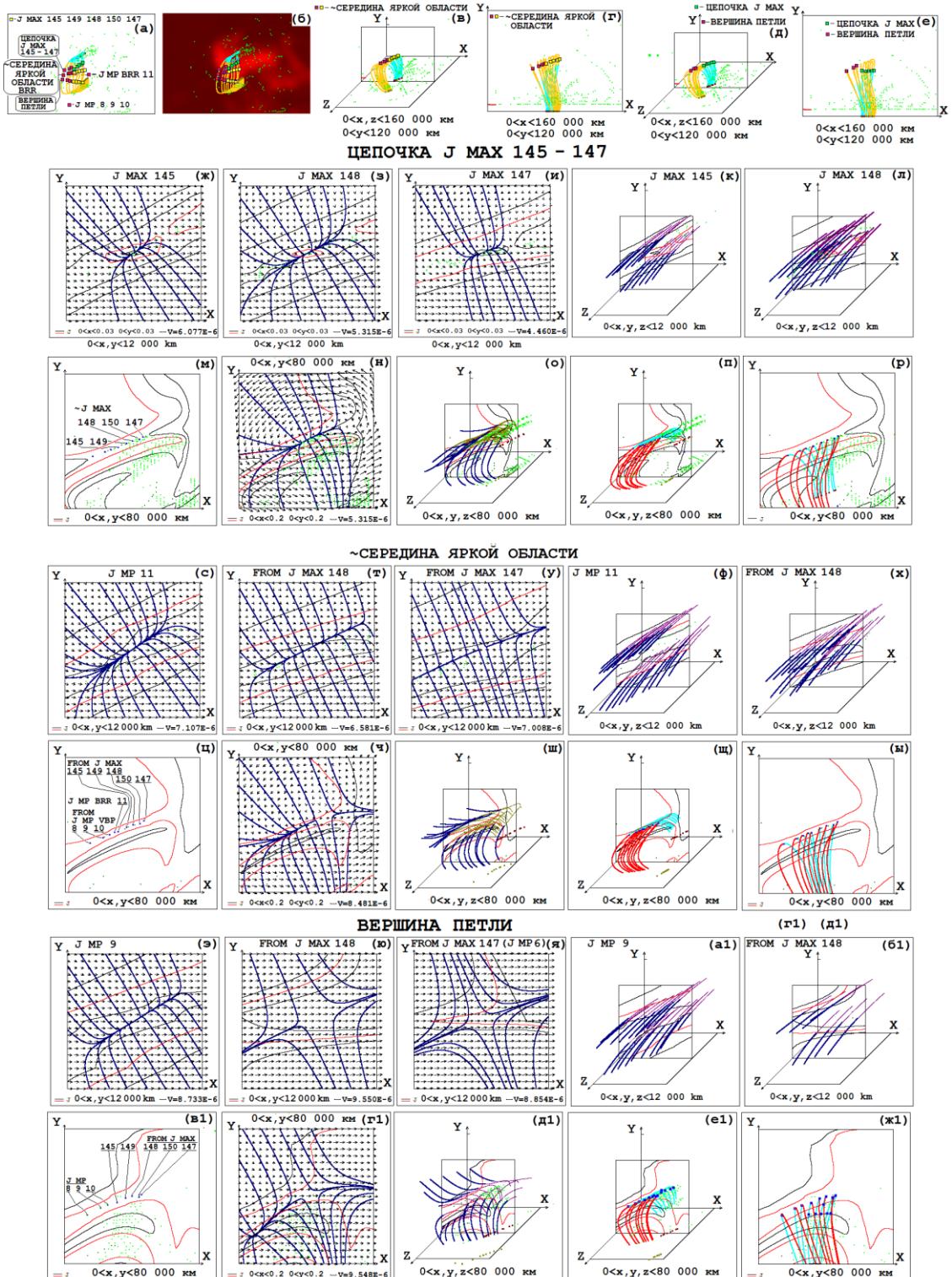
<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

[podgorny@lebedev.ru](mailto:podgorny@lebedev.ru)

Наблюдаемое первичное энерговыделение солнечной вспышки в солнечной короне на высоте 15 000 км - 70 000 км объясняет физический механизм, согласно которому происходит освобождение магнитной энергии токового слоя, который образуется в окрестности особой линии X-типа. Для изучения физического механизма солнечной вспышки, необходимо проводить МГД моделирование в солнечной короне. Найти положения токовых слоёв возможно только с помощью специально разработанной графической системы поиска, основанной на определении положений максимумов плотности тока. Проблема состоит в том, что максимумы возникают, также, вне яркой области вспышечного излучения, а в яркой области таких максимумов не очень много по сравнению с их общим количеством. Чтобы понять физические процессы, происходящие при накоплении магнитной энергии вспышки, подробно изучается конфигурация над активной областью АО 10365 в момент 02:32:05 за три часа перед вспышкой класса M1.9. Проводится сравнение с распределением по солнечному диску наблюдаемого микроволнового излучения на частоте 17 ГГц, полученного на радиогелиографе Нобяма.

Рисунки 1а-е показывают появление цепочки максимумов плотности тока, обозначенных зелёным цветом, с номерами 145, 149, 148, 150 и 147, которая располагается не вблизи середины яркой вспышечной области, а на её границе. Понять ситуацию помогает появление аркады магнитных линий, которые проходят через максимумы образовавшейся цепочки, и анализ конфигураций магнитного поля в областях различного размера (12 Мм и 80 Мм) с центром в точках, расположенных на магнитных линиях аркады (Рис. 1 ж-ж1). В точках на вершине аркады и вблизи центра яркой области предвспышечного излучения возможен вспышечный процесс из-за того, что свойства конфигурации магнитного поля вблизи этих точек способствуют появлению вспышечной неустойчивости. Поиск аркад с полученными свойствами конфигураций магнитного поля после проведения МГД моделирования над активной областью необходим для дальнейшего изучения физического механизма солнечных вспышек, определения положений

вспышек, и в дальнейшем будет использоваться для прогноза солнечных вспышек.



**Рис. 1.** Расположение аркады магнитных линий с повышенной плотностью тока и конфигурации магнитного поля в прямоугольных областях с центрами, расположенными на магнитных линиях аркады

Расширенная версия настоящей аннотации располагается по адресу <https://sites.lebedev.ru/ru/podgorny/file/7167>.

## Радиодиагностика вспышки 14 мая 2024 года на основе данных Сибирского радиогелиографа

**Смирнов Д.А.<sup>1</sup>, Мельников В.Ф.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
[dmitriy.smirnov@unn.ru](mailto:dmitriy.smirnov@unn.ru)

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

Используемый алгоритм проведения радиодиагностики заключается в подгонке рассчитываемых с помощью FastGS Codes [1] значений интенсивности и поляризации ГС-излучения к наблюдаемым. Подробно метод фитирования описан в работе [2].

В результате диагностики были восстановлены значения и динамика в процессе развития вспышки следующих параметров: величины магнитного поля, угла между направлением силовых линий магнитного поля и лучом зрения, концентрации и показателей энергетического спектра электронов, и др. Диагностика проводилась для двух возможных вариантов питч-углового распределения энергичных электронов: а) с учетом возможной анизотропии электронов, б) в предположении изотропности их распределения.

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

### Литература

1. Fleishman G.D., Kuznetsov A.A. Fast gyrosynchrotron codes // Astrophys. J. 2010. Vol. 721, no. 2. P. 1127–1141.
2. Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Микроволновая диагностика вспышечной плазмы методом фитирования по данным Сибирского радиогелиографа // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 3. С. 27–39.

## Восстановление параметров вспышек на основе частотного спектра при учете анизотропного распределения электронов

Смирнов Д.А.<sup>1</sup>, Мельников В.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
Санкт-Петербург, Россия  
[dmitriy.smirnov@unn.ru](mailto:dmitriy.smirnov@unn.ru)

Целью данной работы являлось нахождение возможных погрешностей в оценках магнитного поля и параметров ускоренных электронов, возникающих при фитировании микроволновых спектров излучения из вспышечных областей Солнца в предположении как изотропного, так и анизотропного распределения электронов. Для решения этой задачи производилось восстановление модельных спектров с известными параметрами с использованием алгоритма, подробно описанного в работе [1], и последующие оценки погрешности восстановления этих параметров.

Анализ проводился с использованием двух модельных радиоисточников с разными заданными параметрами, включая параметры, описывающие питч-угловые распределения электронов. Во второй модели, по сравнению с первой, было значительно (в  $\sim 9$  раз) увеличено отношение электронной концентрации плазмы к напряженности магнитного поля для усиления эффекта Резина и оценки его роли при проведении диагностики.

В результате анализа установлено, что диагностика в предположении существования анизотропности потоков электронов обеспечивает более точное восстановление параметров по сравнению с изотропным, особенно при значительной продольной анизотропии, принятой в модели. Также установлен эффект занижения восстановленного (в предположении изотропии) значения магнитного поля при возрастании продольной анизотропии. Это может быть причиной явления уменьшения магнитного поля во время вспышки, обнаруженного в работе [2], в которой диагностика проводилась именно в предположении изотропного источника.

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

### Литература

1. Смирнов Д.А., Мельников В.Ф. Микроволновая диагностика вспышечной плазмы методом фитирования по данным Сибирского радиогелиографа // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 3. С. 27–39.
2. Fleishman G.D. et al. Solar flare accelerates nearly all electrons in a large coronal volume // Nature. 2022, vol. 606, pp. 674–677.

## Солнечные вспышки в белом свете и численное моделирование распространения нелинейных альфеновских волн из короны в фотосферу

Смирнова В.В.<sup>1</sup>, Цап Ю.Т.<sup>1</sup>, Живанович И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Крымская астрофизическая обсерватория, пгт.Научный, Россия*

<sup>2</sup>*Белградская астрономическая обсерватория, Белград, Сербия*

[vvsvid.smirnova@yandex.ru](mailto:vvsvid.smirnova@yandex.ru)

Происхождение “белых” вспышек, наблюдавшихся в оптическом континууме, до сих пор остаётся спорным. В частности, как показали [1], для события 27 января 2012 г. рентгеновского GOES-класса X1.7, наблюдавшегося с помощью солнечного оптического телескопа (SOT/Hinode), континуум генерировался на высотах не более ста километров от уровня фотосферы с  $\tau_{5000} = 1$ . В работе [2] было показано, что в каналах 4504,5 Å и 4305,0 Å излучение также генерируется в спокойной фотосфере на высоте от 0 до 100 км. С другой стороны, согласно [3], температура фотосферы существенно не меняется во время солнечных вспышек. Хотя существует множество других указаний на то, что белые вспышки могут генерироваться в фотосфере [4], механизм нагрева фотосферной плазмы остается до конца не выяснен. В настоящее время предполагается несколько механизмов переноса энергии из короны в фотосферу, ответственных за оптический континуум солнечных вспышек, например, обратный нагрев, тепловые потоки, ускоренные электроны и/или протоны и альфеновские волны [5].

Первые теоретические оценки, предполагающие важную роль альфеновских волн в нагреве слоя температурного минимума, который может быть ответственен за оптический континуум солнечных вспышек, были получены в работе [6]. Позднее, в работе [7], авторы показали, что мелкомасштабные (10–100 км) альфеновские волны с периодами около 1 с могут нагревать плазму в нижних слоях солнечной атмосферы ( $\lesssim 1000$  км). Однако, эти авторы использовали приближение WKB (Wentzel-Kramer-Brillouin) и ограничились одномерными моделями, которые не всегда можно считать адекватными [8].

Солнечная атмосфера представляет собой неоднородную среду, пронизанную тонкими магнитными силовыми трубками с характерной шириной порядка нескольких сотен километров, в которых могут распространяться магнитогидродинамические (МГД) волны разных типов. Плотность плазмы в таких трубках довольно резко меняется с высотой из-за стратификации, особенно на уровнях фотосферы и нижней хромосферы, где характерная шкала высот изменения плотности  $H \approx 200$  км [9]. В результате, описание МГД волн с периодами, превышающими несколько десятков секунд, вызывает большие трудности даже в линейном приближении [10]. В частности, разделение МГД волн на альфеновские, быстрые и медленные, что характерное для однородной плазмы, становится весьма условным, поскольку собственные колебания могут обладать свойствами разных мод.

Поэтому для описания генерации и распространения волн альфвеновского типа большой амплитуды, что предполагает важную роль нелинейных эффектов, необходимо широкое применение методов численного моделирования.

В данной работе мы проанализировали эволюцию потока энергии альфвеновского импульса скорости большой амплитуды из короны в фотосферу на основе 2,5-мерного (2,5-D) численного МГД моделирования. В модели использовалась реалистичная, равновесная магнитная конфигурация (магнитная аркада), погруженная в стратифицированную атмосферу [9], которая возмущалась поперечным импульсом скорости. В результате моделирования было получено, что время распространения максимума альфвеновского потока энергии от короны до фотосферы, составляет  $t \approx 120$  с, что в два раза больше наблюдаемых характерных временных задержек между жестким рентгеновским и оптическим излучением вспышек ( $\sim 1$  мин, [11]). Скорость распространения максимума потока энергии оказалась значительно меньше локальной альфвеновской скорости в короне и хромосфере, что может быть связано с нелинейностью волн и неоднородностью солнечной атмосферы. Показано, что вклад волн альфвеновского типа, генерируемых в короне, в нагрев солнечной фотосферы должен быть незначительным.

#### Литература

1. Watanabe, K., Shimizu, T., Masuda, S., et al. Emission Height and Temperature Distribution of White-light Emission Observed by Hinode/SOT from the 2012 January 27 X-class Solar Flare // ApJ. V. 776. I. 2. 9. pp. 2013.
2. Carlsson, M., Hansteen, V. H., de Pontieu, B., et al. Can High Frequency Acoustic Waves Heat the Quiet Sun Chromosphere? // PASJ. V. 59. SP3. P. 663-668. 2007.
3. Jurčák, J., Kašparová, J., Švanda, M., & Kleint, L. Heating of the solar photosphere during a white-light flare // A&A. V. 620. ID. A183. 9. pp. 2018.
4. Martínez Oliveros, J.-C., Hudson, H. S., Hurford, G. J., et al. The Height of a White-light Flare and Its Hard X-Ray Sources // ApJ. V. 753. Iss. 2. 5. pp. 2012.
5. Živanović, I., Smirnova, V.V., Tsap, Yu.T., Chen, Y. Propagation of coronal large-amplitude Alfvén-type waves to the solar photosphere // A&A. V. 697. id. A221. 6 pp. 2025.
6. Emslie, A. G. & Sturrock, P. A. Temperature minimum heating in solar flares by resistive dissipation of Alfvén waves // Sol. Phys. V. 80. Iss. 1. P. 99-112. 1982.
7. Russell, A. J. B. & Fletcher, L. Propagation of Alfvénic Waves from Corona to Chromosphere and Consequences for Solar Flares // ApJ. V. 765. Iss. 2. 14. pp. 2013.
8. Reep, J. W., Russell, A. J. B., Tarr, L. A., & Leake, J. E. A Hydrodynamic Model of Alfvénic Wave Heating in a Coronal Loop and Its Chromospheric Footpoints // ApJ. V. 853. Iss. 2. 13. pp. 2018.
9. Avrett, E. H. & Loeser, R. Models of the Solar Chromosphere and Transition Region from SUMER and HRTS Observations // ApJS. V. 175. Iss. 1. P. 229-276. 2008.
10. Tsap, Y. & Kopylova, Y. On the Reflection of Torsional Alfvén Waves from the Solar Transition Region // Sol. Phys. V. 296. ID. 5. 2021.
11. Jing, Z., Li, Y., Feng, L., et al. A Statistical Study of Solar White-Light Flares Observed by the White-Light Solar Telescope of the Lyman-Alpha Solar Telescope on the Advanced Space-Based Solar Observatory (ASO-S/LST/WST) at 360 nm // Sol. Phys. V. 299. ID. 11. 2024.

## Бессиловые магнитные жгуты как активные вспышечные элементы

Соловьев А.А.

ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

[solov@gaoran.ru](mailto:solov@gaoran.ru)

В последние годы нами разработаны новые физические модели [1-6] вспышечного энерговыделения в бессиловых магнитных жгутах с различной внутренней структурой токов (показано на Рис.1а,б,в). Механизм вспышки в жгуте не зависит от вида его токовой структуры: с выходом скрученной магнитной петли-жгута в корону внешнее давление, удерживающее её от бокового расширения, неуклонно падает. При критически низком его значении продольное поле стремится к нулю на поверхности смены знака токов, а бессиловой параметр и азимутальный ток вблизи этой поверхности неограниченно растут, приближаясь к разрыву. Это возбуждает в жгуте плазменную ионно-звуковую турбулентность, что и служит триггером вспышки вследствие резкого падения проводимости. Быстрая диссипация поля на аномальном сопротивлении и выравнивание скручивающего момента вдоль оси жгута (эффект Паркера) приводят к колебаниям как энерговыделения, так и поперечного сечения жгута. Расчет специфических колебаний системы с переменной магнитной жесткостью дает не только качественное, но и количественное согласие теоретических расчетов с наблюдениями (Рис. 2 а,б).

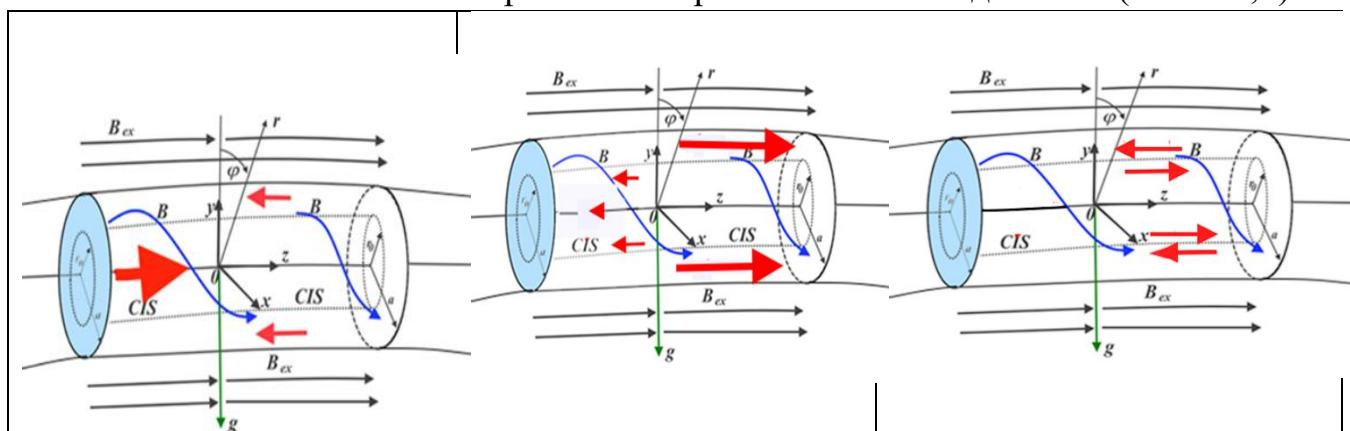
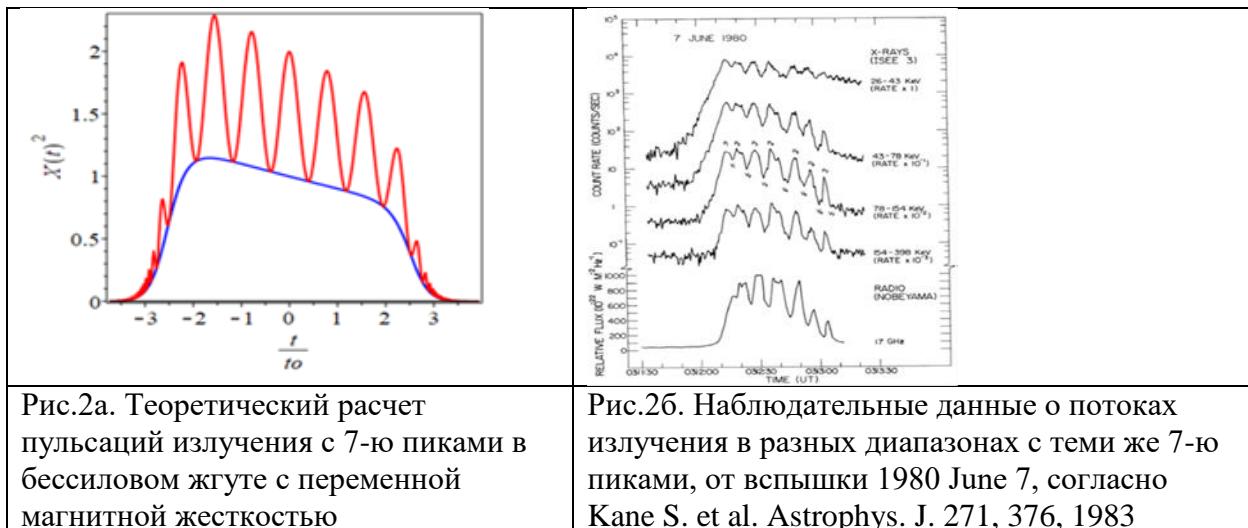


Рис.1а. Отрезок слабоизогнутой магнитной петли (модель Паркера). Поле  $B_{z,ex}$  удерживает жгут от бокового расширения. Ток максимален на оси, меняет знак на поверхности  $kr = kr_0$

Рис.1б. Продольный ток максимален на периферии бессилового жгута, меняет знак на поверхности CIS – current inversion surface  $kr = kr_0$

Рис.1в. В этой модели продольный ток равен нулю на оси и на периферии жгута, он сосредоточен внутри жгута вблизи поверхности смены знака токов.



### Литература

1. Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Force free magnetic flux ropes: inner structure and basic properties. MNRAS, 2021, vol. 505, Issue 3, pp. 4406-4416.
2. Solov'ev A.A. Force free magnetic flux ropes: string confinement of super-strong magnetic fields and flare energy release. MNRAS, 2022. Vol. 515, № 4, pp. 4981-4989.
3. Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Properties of flare energy release in force free magnetic flux ropes. Astronomy Letters, 2023, vol. 49, no. 5, pp. 256-268.
4. Solov'ev A.A. Force Free Magnetic Flux Rope with a High Current Density on the Axis. Astronomy Reports. 2024. Vol. 68, No. 6, pp. 601–609.
5. Соловьев А.А., Киричек Е.А. Магнитные жгуты с токовой оболочкой как вспышечные солнечные структуры. Письма в АЖ. – 2024. – Vol. 50. – № 9. – Pp. 50-58.
6. Соловьев А.А. Квазипериодические пульсации излучения в жгутовых моделях вспышки. Астрономический Журнал. - 2025,- том 102,- №9. - Сс.79-90.

## К природе ярких рентгеновских точек

Степанов А.В.<sup>1,3</sup>, Зайцев В.В.<sup>2</sup>, Овчинникова Е.П.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>3</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

[stepanov@gaoran.ru](mailto:stepanov@gaoran.ru)

Исследуются механизмы формирования и нагрева ярких рентгеновских точек (ЯРТ) на Солнце, с которыми связывают микро- и нано-вспышки в корональных дырах и спокойных областях, нагрев короны, джеты и эruptionи плазмы. Из наблюдений в рентгеновском, радио и ультрафиолетовом диапазонах следует, что ЯРТ состоят из нескольких компактных магнитных петель, которые существенно меньше корональных петель активных областей, но содержат нагретую до температуры (1,5-4,4) МК плазму с плотностью около  $10^9\text{-}10^{10}\text{ см}^{-3}$  и магнитным полем 30-200 Гс. Время жизни ЯРТ от 8 до 30 часов, что порядка времени жизни ячеек солнечной супергрануляции. Число вновь возникающих ЯРТ составляет около 1500 в день и распределены они в основном вблизи экватора ( $\pm 30^\circ$ ). ЯРТ простираются до короны, и видны в радиодиапазоне, поэтому часто их называют «корональные яркие точки».

Образование ЯРТ в большинстве моделей связывают с процессом магнитного пересоединения в короне (см, например, [1]). С другой стороны, в [2,3] появление ЯРТ объяснялось джоулевой диссипацией токов  $I \geq 10^9$  А в корональной части петель ЯРТ. При этом из-за малой величины сопротивления Спитцера было привлечено аномальное сопротивление, вызванное мелкомасштабной ионно-звуковой турбулентностью. Однако для её возникновения требуется высокая филаментация токовых структур в петлях.

В предлагаемой нами модели токонесущие петли ЯРТ формируются за счет увлечения магнитного поля фотосферной конвекцией, а их основания расположены в межгранульном пространстве, где имеются сходящиеся потоки фотосферной плазмы. Исследована стационарная структура петель ЯРТ в предположении, что магнитное поле на оси магнитной трубки много больше поля вне трубы. Показано, что основной нагрев магнитных петель ЯРТ при джоулевой диссипации происходит не в короне, а в хромосфере, где сопротивление Каулинга, обусловленное соударениями ионов с нейтралами, значительно превышает сопротивление Спитцера. На примере ультратонкой ( $\sim 100$  км) магнитной петли [4] показано, что плазма в таких петлях нагревается до температур (2-4) МК за счет диссипации электрических токов,  $I \geq 10^9$  А, генерируемых внутри петель фотосферной конвекцией. Оценена концентрация плазмы в таких петлях,  $n \approx 10^9\text{-}10^{10}\text{ см}^{-3}$ , которая меньше концентрации окружающей хромосферы. Поскольку теплопроводность петли вдоль магнитного поля значительно выше, чем поперёк поля, петля быстро прогревается и на корональном уровне. При этом магнитная петля изотермична если её длина  $L < 3 \times 10^9$  см.

Таким образом, предложенные механизмы формирования и нагрева магнитных петель ЯРТ при повышенной диссипации электрических токов в условиях сопротивления Каулинга способны объяснить основные наблюдаемые параметры ЯРТ при сравнительно небольших величинах электрических токов,  $\sim 10^9$  А, которые существенно меньше по сравнению с токами вспышечно-активных областей (10<sup>11</sup>-10<sup>12</sup> А).

Работа поддержана грантом РНФ 22-12-00308-П.

## Литература

1. Priest E.R., Parnell C.E., Martin S.F. A Converging Flux Model of an X-Ray Bright Point and an Associated Canceling Magnetic Feature // ApJ. V.427. P.459-474. 1994.  
[https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/1994ApJ...427..459P/](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1994ApJ...427..459P/)
2. Santos J.C., Büchner J., Madjarska S., Alves M.V. On the relation between DC current locations and an EUV bright point: A case study // A&A. V.490. P.345–352. 2008.  
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200809975>
3. Adamson E., Büchner J., Otto A. On the role of current dissipation in the energization of coronal bright points // A&A. V. 557. P A118 (1-14). 2013.  
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201321281>
4. Zaitsev V.V. Ultrafine Magnetic Structures in the Chromosphere // Geom. Aeron. V. 55. I. 7. P. 846–849. 2015. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2015Ge&Ae..55..846Z](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2015Ge&Ae..55..846Z)

## К определению параметров солнечной атмосферы над активными областями по радионаблюдениям

Ступишин А. Г., Макоев Г. А., Кальтман Т. И.

Специальная астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия  
[agstup@yandex.ru](mailto:agstup@yandex.ru)

### Введение

Исследование солнечных активных областей и построение полуэмпирических моделей атмосферы над пятнами остаётся одной из ключевых задач солнечной физики. Атмосфера над пятнами имеет сложную структуру: от фотосферы через хромосферу к переходной области и нижней короне параметры плазмы сильно изменяются: температура возрастает от  $\sim 6 \cdot 10^3$  К до  $\sim 10^6$  К, а плотность падает на несколько порядков. Положение переходной области зависит от локальной конфигурации магнитного поля, вследствие чего её высота над тенью и полутенью различается. Это приводит к выраженной вертикальной и горизонтальной неоднородности, усложняющей построение согласованной модели атмосферы. В работе предложен метод реконструкции параметров атмосферы — температуры и частично плотности электронов — на основе радионаблюдений в широком диапазоне частот на РАТАН-600 и реконструированного магнитного поля.

### Методика

Для описания магнитного поля используется трёхмерная реконструкция NLFFF (Non-Linear Force-Free Field), построенная на основе фотосферных данных SDO/HMI. Атмосфера над пятном задаётся набором высотных интервалов, для каждого из которых определено начальное значение электронных температуры и плотности (T,N). Для каждого интервала рассчитывается вклад в полный поток радиоизлучения на нескольких частотах в двух поляризациях. Рассчитанный поток сопоставляется с наблюдаемыми данными. Поскольку искомые (T,N) отличаются от начальных, составляется система линейных уравнений для нахождения коэффициентов коррекции. Решение этой системы является некорректной задачей, и вводятся регуляризирующие уравнения, не позволяющие температурам в соседних интервалах значительно отличаться.

При общем количестве частот, большем количества высотных интервалов, система переопределена и решается методом наименьших квадратов. Далее (T,N) корректируются и алгоритм применяется итерационно к новым значениям (T,N) до достижения согласия между модельным и наблюдаемым спектрами.

В отличие от первоначальной версии алгоритма [1], в данной работе внесён ряд принципиальных усовершенствований. Уточнён механизм регуляризации: к системе уравнений для корректирующих множителей температуры добавляется условие сглаживания профиля в соседних интервалах, что обеспечивает физическую устойчивость получаемого

решения. Метод обобщён на случай неоднородной структуры активной области: отдельно строятся температурно-высотные профили над тенью и над полутенью. Такое разделение позволяет учитывать различие условий в разных частях пятна и восстанавливать более реалистичные распределения температуры. Реализована возможность использования нескольких положений диаграммы направленности при сканировании активной области. Дополнительно исследована чувствительность алгоритма к шуму в наблюдаемых спектрах. Показано, что метод сохраняет устойчивость в корональных слоях, в то время как восстановление параметров переходной области более подвержено влиянию погрешностей. За счёт варьирования параметров у основания короны метод позволяет определять не только температурный профиль, но и оценивать электронную концентрацию в нижнекорональных слоях.

### Результаты и выводы

Метод применен к нескольким активным областям, для которых построены профили электронной температуры, согласованные с реконструированным магнитным полем и радионаблюдениями на РАТАН-600. Определено, что структура атмосферы над пятном носит выраженно неоднородный характер. Переходная область располагается ниже над тенью и выше над полутенью, что приводит к вертикальной и горизонтальной размытости границ. Получено, что температура нижней короны составляет  $2\text{--}2,5 \text{ МК}$ , плотность  $1\text{--}5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , а высота переходной области находится в пределах  $1\text{--}2 \text{ Мм}$ .

Внесённые усовершенствования обеспечили: устойчивость восстановления температурного профиля за счёт регуляризации; возможность раздельного анализа тени и полутени; повышение точности за счёт учёта нескольких точек сканирования.

Результаты хорошо согласуются с современными представлениями о структуре солнечной атмосферы и демонстрируют перспективность метода для последующего применения к данным как одномерных, так и двумерных радионаблюдений.

### Литература

- [1] Stupishin A.G. et al. Determination of the Solar Atmosphere Parameters above Active Regions by Radio Observations // Solar Physics. V. 293. I. 1. P. 13. 2018.

## О развитии наблюдений Солнца на радиотелескопах РТ-32 ИПА РАН

Топчило Н.А.<sup>1</sup>, Рахимов И.А.<sup>2</sup>, Андреева Т.С.<sup>2</sup>,  
Михайлов А.Г.<sup>2</sup>, Петерова Н.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

[topchilona@yandex.ru](mailto:topchilona@yandex.ru)

В исследовании микроволнового излучения Солнца радиотелескопы РТ-32 ИПА РАН принимают участие с 1996 г., почти с момента своего создания. Первоначально участие ограничивалось наблюдениями солнечных затмений, которые к настоящему времени охватывают уже два 11-летних цикла солнечной активности (1999-2022 гг.). Однако солнечные затмения являются редким специфическим видом наблюдений, состоящим из последовательного набора слежений за покрытием/открытием Луной отдельных участков Солнца. И для полноценного исследования Солнца как достаточно протяженного, неоднородного и весьма переменного источника радиоизлучения, необходимо также проводить регулярное картографирование как диска Солнца, так и его корональных областей. Поскольку исходное программное обеспечение центрального управляющего компьютера радиотелескопа не имело такого функционала, в 2024 г. была поставлена задача создания специализированного матобеспечения для наблюдения Солнца. Запланирована реализация двух методов картографирования – растрового для центральных областей диска Солнца и кругового – для прилимбовой зоны. Последнее наиболее перспективно для наблюдений на РТ-32.

На первом этапе работы (апрель 2024 г. – февраль 2025 г.) на РТ-32 (обс. Светлое) был реализован менее эффективный, но более простой в исполнении дискретный вариант кругового сканирования – квазикруговое сканирование, когда телескоп последовательно отслеживает ряд точек, расположенных по кругу относительно центра диска Солнца. На примере 11 наблюдений на 3.5 см было продемонстрировано, что заметная активность наблюдается не только на диске Солнца, но и далеко за его лимбом. Показано, что большинство наблюдаемых вблизи лимба объектов связаны с активными областями и их пятенными источниками на диске Солнца или горячими (вспышечными) петлями над ними, а также холодными протуберанцами. Результаты этих наблюдений представлены на конференциях «ССЗФ-2024» и «КВНО-2025» и приняты к публикации [1, 2].

На втором, текущем этапе работы (с апреля 2025 г. по настоящее время) было реализовано стандартное круговое сканирование, когда диаграмма направленности телескопа движется непрерывно по окружности. Его использование позволило значительно улучшить качество и ускорить процесс картографирования. Была значительно расширена наблюдательная

база (более 30 дней наблюдения), увеличен диапазон регистрируемых высот (с 8 до 16 угловых минут над лимбом Солнца). В большинстве случаев регистрировался полный диск Солнца. Подтверждены и расширены качественные результаты, полученные ранее с помощью квазикругового сканирования. Предварительные результаты наблюдений частично представлены на конференции «ВРК-2025».

В докладе продолжен анализ новых данных, представлены наиболее интересные и эффектные примеры наблюдений (см. рис. 1).

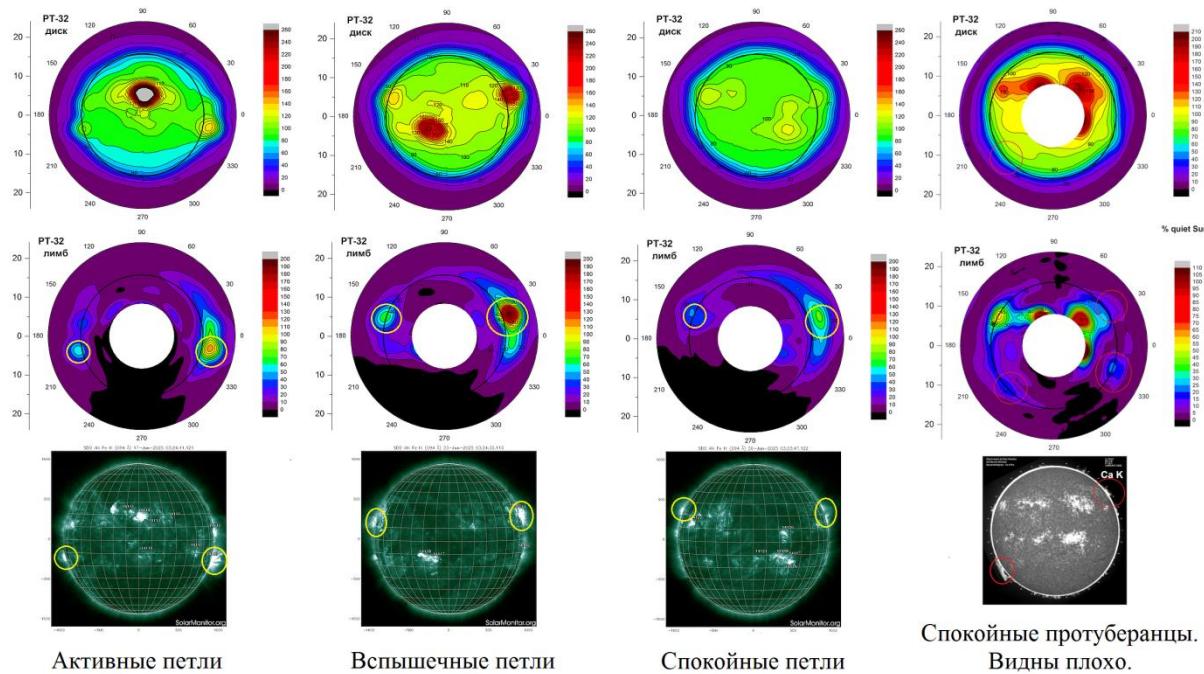


Рис. 1. Примеры наблюдений источников различного типа.

Несмотря на ограниченность выделенного времени, возросшая скорость сканирования во многих случаях позволила получать по 2-3 полные карты в день, а также отслеживать в ограниченной по радиусу прилимбовой зоне изменения источников с более высоким временным разрешением (3.5 минуты на полный скан).

## Литература

1. Рахимов И.А., Андреева Т.С., Михайлов А.Г., Топчило Н.А., Петерова Н.Г. Круговое сканирование прилимбовой зоны Солнца по наблюдениям на радиотелескопе РТ-32 ИПА РАН. Метод и первые результаты // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 73. С. 3–10. (в печати).
2. Н.А. Топчило, И.А. Рахимов, Т.С. Андреева, Н.Г. Петерова. Результаты тестовых наблюдений прилимбовой зоны Солнца на волне 3.5 см на РТ-32 ИПА РАН // Геомагнетизм и Аэрономия. 2025. № 8. (в печати).

## Роль турбулентности вистлеров в формировании распределений нетепловых электронов во вспышечных петлях

Филатов Л.В.<sup>1</sup>, Мельников В.Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия  
[filatovlv@yandex.ru](mailto:filatovlv@yandex.ru)

Известно, что нетепловые электроны, инжектированные во вспышечную петлю, генерируют микроволновое и жесткое рентгеновское излучение [1]. Характеристики этих излучений во многом определяются распределением нетепловых электронов по энергиям и питч-углам в каждой точке петли. Для исследования этих распределений необходимо рассмотреть взаимодействие инжектированных электронов с частицами плазмы петли и волновыми полями в ней [2-3]. Представляется интересным рассмотреть взаимодействие этих электронов с вистлеровскими волнами. Вистлеры, как волновая мода в замагниченной плазме петли, могут генерироваться в нестационарном процессе энерговыделения при вспышке, а также путем трансформации из других волновых мод (БМЗ, ионный звук). При взаимодействии нетепловых электронов с турбулентностью вистлеров, электроны на них могут рассеиваться по питч-углам и доускоряться за счет энергии вистлеров, или наоборот терять энергию при генерации вистлеров. Этим процессам перераспределения инжектированных электронов и динамике турбулентности вистлеров посвящена настоящая работа.

Для решения поставленной задачи использовались модели слабой квазилинейной турбулентности в плазме и резонансного взаимодействия волна-частица. В итоге задача сводится к решению одномерного нестационарного кинетического уравнения Фоккера-Планка при определенных начальных и краевых условиях, а также внешних источниках для электронов и волн турбулентности. Роль вистлеровской турбулентности исследована в трех режимах ее генерации в плазме петли:

- турбулентность стационарна и поддерживается на заданном уровне некоторым неограниченным внешним источником [4].

-согласованное взаимодействие начально-заданной турбулентности с нетепловыми электронами, при котором учитывается не только влияние волн на электроны, но и их влияние на сами волны турбулентности [5].

- турбулентность инжектируется в петлю определенным источником ограниченной мощности, аналогично и совместно с источником нетепловых электронов.

В результате численного моделирования во всех режимах взаимодействия электронов и турбулентности получены распределения нетепловых электронов по энергии, питч-углу, положению в петле и времени. Исследована динамика энергетических спектров электронов (их деформация при ускорении), перераспределения по питч-углам

(изотропизация и высыпание из петли), по положению в петле и временные задержки по отношению к пику инжекции. Рассмотрена также динамика спектров самой турбулентности по энергии, частоте и инкременту ее нарастания/затухания. Полученные результаты могут быть использованы для интерпретации наблюдаемых спектров жесткого рентгеновского и микроволнового излучений и выбора модели турбулентности в петле.

### Литература

1. Зайцев В.В., Степанов А.В. Корональные магнитные арки // УФН. Т. 178. С. 1165-1204. 2008.
2. Веденов А.А., Велихов Е.П., Сагдеев Р.З. Квазилинейная теория плазмы // Ядерный синтез. Т.2. №2. С.465-475. 1962.
3. Kaplan S.A., Tsytovich V.N. Plasma astrophysics. Oxford: Pergamon Press. 1973.
4. Filatov L.V., Melnikov V.F. Influence on whistler turbulence on fast electron distribution and their microwave emission in a flare loop // Ge&Ae. V. 57. № 8. P. 1001-1008. 2017.
5. Melnikov V.F, Filatov L.V. Conditions for Whistler Generation by Nonthermal Electrons in Flare Loops // Ge&Ae. V. 60. № 8. P. 1126-1131. 2020.

## Причины и сценарии развития эрупций солнечных протуберанцев

Филиппов Б.П.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия  
[bfilip@izmiran.ru](mailto:bfilip@izmiran.ru)*

Протуберанцы, облака плотной и относительно холодной плазмы, висящие в течение недель и месяцев в горячей солнечной короне, временами начинают стремительно подниматься, превращаясь в эруптивные протуберанцы, и некоторые становятся ядрами корональных выбросов. Этот процесс связан с нарушением устойчивости и равновесия магнитоплазменной структуры, содержащей протуберанец. Признаки приближения системы к такому моменту можно обнаружить, хотя и не без некоторых трудностей, на основании наблюдений структуры корона и измерений магнитного поля в фотосфере.

Одна из наиболее вероятных магнитных конфигураций, связанных с протуберанцами – магнитный жгут со спиральными силовыми линиями. Магнитный жгут подвержен ряду неустойчивостей, которые могут инициировать его эрупцию. Например, как хорошо известно из физики лабораторной плазмы, длинные жгуты подвержены неустойчивости относительно изгибных/винтовых деформаций (*kink instability*). Однако эта довольно легко возбудимая неустойчивость не может значительно сместить весь жгут целиком и, значит, не может служить основным механизмом настоящих полных эрупций [1].

С другой стороны, равновесие жгута в корональном магнитном поле тоже может потерять устойчивость, и тогда весь жгут внезапно придет в движение. Такой механизм называют катастрофической потерей равновесия или тороидальной неустойчивостью [2, 3]. Решающим фактором при этом является критическое значение так называемого индекса убывания магнитного поля в короне, определяемого вертикальным градиентом поля. Дальнейшая эволюция жгута в короне будет так же в первую очередь определяться взаимодействием жгута с магнитным полем короны. Большое значение имеет структура магнитного поля в короне. Она может оказаться такой, что подъем протуберанца может замедлиться и остановиться на некоторой высоте, так что эрупция окажется незавершенной (*failed eruption*). Движение магнитного жгута контролируется силой Лоренца, которая не обязательно направлена радиально (вверх). В таких случаях происходят «нерадиальные» эрупции, которые усложняют установить соответствие коронального выброса с первоначальным положением протуберанца.

Направление магнитного поля в исходном протуберанце/волокне, обычно близкое к продольной оси, можно установить по ряду признаков. Если это направление сохраняется при дальнейшей эволюции эруптивного протуберанца и коронального выброса, то эта информация будет очень

полезной для оценки возможных геомагнитных возмущений. Однако в ряде случаев ось структуры не сохраняет первоначального направления вследствие взаимодействия со сложной геометрией коронального магнитного поля, а также возможным развитием винтовой неустойчивости [4]. Таким образом, хотя эruptionия протуберанцев/волосков наступает внезапно, в какой-то мере ее можно предугадать по оценке устойчивости их равновесия во внешнем поле. Но даже в таком случае, прогнозирование геоэффективности такой эruptionии требует учета множества факторов, влияющих на эволюцию магнитного жгута в солнечной короне и гелиосфере.

### Литература

1. L. M. Green, T. Török, B. Vršnak, W. Manchester IV, A. Veronig, Space Sci. Revs. 214, 46 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0462-5>
2. T. G. Forbes and P. A. Isenberg, Astrophys. J. 373, 294 (1991). <https://doi.org/10.1086/170051>
3. B. Kliem and T. Török, Phys. Rev. Lett. 96(25), 255002 (2006). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.255002>
4. B. Filippov, Astrophys. J. 977, 259 (2024). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad95fe>

## Крупномасштабный электрический ток: модернизация метода вычисления

Фурсяк Ю.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Республика Крым, Россия  
[yuriy\\_fursyak@mail.ru](mailto:yuriy_fursyak@mail.ru)

Впервые о существовании электрических токов больших масштабов, охватывающих значительную часть активной области (АО) было сказано в конце 80-х годов 20-го века [1]. Поскольку, как предполагается, крупномасштабный ток распределен на большой площади, необходимо применение косвенных методов для его обнаружения. Предлагалось следующее: 1) сопоставляя между собой восстановленное потенциальное и реальное (наблюдаемое) поперечное магнитное поле, выделялась непотенциальная компонента поперечного поля ( $\mathbf{B}_{\perp\perp}$ ), обусловленная присутствием в фотосфере АО электрических токов; 2) АО делилась на две части: в лидирующей части вектор  $\mathbf{B}_{\perp\perp}$  имел одно преобладающее направление закрутки, в хвостовой – противоположное; 3) используя карты распределения вертикального электрического тока в фотосфере далее рассчитывался результирующий электрический ток в каждой из частей АО, который и являлся крупномасштабным (в первых работах – глобальным) электрическим током.

Дальнейшее развитие метода детектирования крупномасштабного электрического тока получил в 2020 году [2]. Использование данных инструмента HMI/SDO [3] с высоким пространственным разрешением показало, что хорошо развитые вихревые структуры вектора  $\mathbf{B}_{\perp\perp}$  локализованы в окрестностях крупных пятен АО. Метод был модернизирован: теперь вокруг солнечного пятна в АО очерчивался контур, внутри которого преобладало одно направление закрутки вектора  $\mathbf{B}_{\perp\perp}$  (по часовой стрелке или против). Результирующий вертикальный электрический ток в таком контуре, величиной порядка  $10^{12} - 10^{13}$  А и является крупномасштабным электрическим током. Было показано, что крупномасштабный электрический ток связан со вспышечными процессами в АО [2], играет определенную роль в процессах стабилизации солнечных пятен на финальных стадиях их эволюции [4], а также в процессах нагрева корональной плазмы [5].

В последние годы появились идеи дальнейшей модернизации метода детектирования крупномасштабного электрического тока. Возникла необходимость полной автоматизации процесса вычисления, обусловленная двумя факторами. Во-первых, изначально контур вокруг пятна выбирался вручную (т.е., присутствует человеческий фактор). И хотя в [2] было показано, что некоторые изменения формы и размеров контура мало влияют на результат, все же это могло обуславливать ошибку порядка 10% от величины крупномасштабного тока. Во-вторых, размеры и форма самого

контура не менялись на всем протяжении времени мониторинга АО (3-5 суток). Однако, логично предположить, что на временных масштабах в несколько суток электрический ток будет эволюционировать, что неизбежно скажется на форме и размерах вихря вектора  $\mathbf{B}_{\perp\perp}$ .

Идея автоматизации процесса детектирования крупномасштабного электрического тока заключалась в предположении, что ток должен быть неким образом распределен внутри магнитной трубы, формирующей солнечное пятно, а вихревая структура вокруг пятна является индикатором его существования. В таком случае можно отказаться от очерчивания контура вокруг пятна и заменить его изогауссой. Большие значения напряженности магнитного поля в качестве пороговых значений не подходят, так как теряется часть информации об электрических токах, и в отдельных случаях – весьма существенная. Было решено в качестве порогового взять значение 575 Гс [6]. Однако с физической точки зрения аргументировать выбор этого или другого значения сложно. Поэтому дальнейшей целью является сопоставление данных о распределении вектора  $\mathbf{B}_{\perp\perp}$  с модельными расчетами структуры и величины поперечного магнитного поля, создаваемого электрическими током, выполненными с использованием закона Био-Савара-Лапласа.

Расчеты показали, что электрический ток величиной порядка  $10^{13}$  А может создавать вихревое магнитное поле величиной в несколько сотен Гаусс на удалении 20-30 Мм от центра пятна. Этот результат хорошо согласуется с данными о величине магнитного поля в окрестности анализируемых пятен, полученными на основе наблюдательных данных.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №25-12-00026.

### Литература

1. Абраменко В.И., Гопасюк С.И. Система электрических токов и структура магнитного поля активной области // Изв. Крымск. Астрофиз. Обс. Т. 76. С. 147-168. 1987.
2. Fursyak Yu.A., Kutsenko A.S., Abramenko V.I. Distributed electric currents in solar active regions // Solar Phys. V. 295. I. 2. Id. 19. 2020.
3. 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.
4. Fursyak Yu.A., Plotnikov A.A. Electric current systems in active regions at a late stage of evolution and their role in the processes of stabilization/destabilization of sunspots // Astrophysics. V. 65. I. 3. P. 384-403. 2022.
5. Fursyak Yu.A. Coronal plasma heating by large-scale electric currents: high-temperature structures in the Sun's corona during quiet temporal intervals before flares and during and after flare events // Geomagn. Aeron. V. 64. I. 7. P. 1189-1196. 2024.
6. Norton A.A. et al. Magnetic flux emergence and decay rates for preceder and follower sunspots observed with HMI // ApJ. V. 842. I. 1. Id.3. 2017.

## Ускорение протонов в солнечных корональных вспышках и кулоновские столкновения

Цап Ю.Т.<sup>1</sup>, Степанов А.В.<sup>2</sup>, Копылова Ю.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный

<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

[yur\\_crao@mail.ru](mailto:yur_crao@mail.ru)

Проблема ускорения заряженных частиц в солнечных корональных вспышках является одной из наиболее актуальных, поскольку ускоренные электроны и ионы всегда сопровождают вспышечные события, а на их долю может приходиться значительная доля энергии. Это следует из наблюдений жесткого рентгеновского и гамма-излучения вспышек, а также детектирования, прежде всего протонов, в межпланетном пространстве. Ускоренные частицы могут привести к увеличению радиационного фона на порядки, что представляет серьезную угрозу не только космическим аппаратам, но и жизни космонавтов.

Согласно современным представлениям, механизмы ускорения протонов в солнечных вспышках должны приводить к формированию потоков ускоренных протонов, достигающих  $10^{33} - 10^{34} \text{ с}^{-1}$ . Это предполагает, что без ускорения частиц квазитепловых скоростей  $V \sim (2 - 3)V_{Tp}$  где  $V_{Tp} = (2k_B T/M)^{1/2}$  – тепловая скорость протонов, не обойтись, поскольку из-за степенного характера спектра их число с ростом энергии быстро убывает. Указанный факт предполагает важную роль кулоновских столкновений, а также механизмов ускорения, которые не накладывают существенных ограничений на минимальную скорость протонов.

В настоящей работе проведен анализ ускорения квазитепловых протонов стохастическими (альфеновские волны) и регулярными механизмами в условиях корональной вспышечной плазмы. В приближении Спитцера (максвелловская фоновая плазма считается невозмущенной) получены оценки потерь энергии пробного протона из-за кулоновских столкновений с полевыми заряженными частицами, свидетельствующие о важной роли протон-электронных столкновений. Показано, что каскадное ускорение не способно обеспечить наблюдаемый спектр протонов из-за особенностей резонансного взаимодействия и перекачки энергии от малых волновых чисел к большим. Детально рассмотрены регулярные механизмы ускорения – бетатронный механизм и ускорение в крупномасштабных электрических полях различной природы. Сделан вывод, что набор энергии протонами вследствие кулоновского взаимодействия может быть эффективным лишь в ограниченном интервале скоростей. Получены аргументы в пользу необходимости предварительного ускорения частиц до энергий в десятки кэВ регулярными механизмами. Рассмотрена проблема инжекции и последующего ускорения быстрых протонов до релятивистских энергий стохастическими механизмами.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Минобрнауки (Цап Ю.Т., №122022400224-7) и гранта РНФ (Степанов А.В., № 22-12-00308-П).

## Магнитные жгуты на стадии предвестников солнечных вспышек

Чариков Ю.Е., Шохин Т.Д., Шабалин А.Н.

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

[Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru](mailto:Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru)

Магнитные жгуты являются резервуарами свободной энергии, которая может высвобождаться в процессе развития солнечных вспышек. Динамика магнитных жгутов на предвспышечной стадии определяет дальнейшую эволюцию конфигурации магнитного поля, приводящую к взрывной фазе вспышек. Однако, причинно-следственная связь явлений на стадии предвестника вспышки в настоящий момент однозначно не выявлена. Концепция магнитных жгутов для ее утверждения требует решения ряда основополагающих проблем, а именно, существует ли магнитный жгут как структура задолго до начала эruptionи, или он формируется непосредственно из более простой конфигурации типа магнитной аркады с широм непосредственно перед вспышкой. Кроме того, остается неясным, что является причиной потери устойчивости магнитного жгута. Проблема усугубляется тем, что из измерений магнитного поля ответить на эти вопросы не удается. Поэтому следует рассматривать проявления жгутовой структуры и ее эволюции в пространственно – временной динамике электромагнитного излучения на предвспышечной стадии.

Нами рассматривались предвспышечные изменения потока в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах на часовом интервале перед рядом солнечных вспышек. Анализировались данные, полученные на КА GOES, RHESSI, Fermi, SDO/AIA, SDO/HMI. Следует заметить, что предвспышечную ситуацию целесообразно анализировать для более мощных вспышек, для которых удается построить пространственные изображения источников электромагнитного излучения. Так, например, для мощной вспышки балла M9 SOL2012-03-09T03:53 на 2-х часовом временном интервале в мягком рентгеновском диапазоне 1.5 - 12 кэВ зарегистрировано 7 предвестников. Причем их рентгеновский поток изменился по шкале GOES от C1 до C8 квазипериодически с периодом 15 с. Такого рода явления могут свидетельствовать в пользу механизма tether-cutting формирования (эволюции) магнитного жгута, как на стадии предвестника, так и самой вспышки. Анализ пространственных изображений, полученных в линиях 94 А и 304 А, позволяет выделить протяженную структуру, скорее всего, трассирующую проекцию магнитного жгута. Построенные по магнитограммам SDO/HMI в приближении нелинейного бессилового магнитного поля распределения магнитного поля на стадии предвестников

также указывают на структуру с магнитным жгутом, состоящим из скрученных магнитных силовых линий с общей осью и системой петель, охватывающих магнитный жгут. Наложенные УФ-изображения на карты распределения магнитного поля позволяют определить локализацию источников излучения по отношению к конфигурации магнитного поля и пространственно-временную динамику как на предвспышечной стадии, так и в момент эruptionи.

## Рентгеновские и радиовсплески в солнечных вспышках

**Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е., Склярова Е.М.**

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

[taoastronomer@gmail.com](mailto:taoastronomer@gmail.com)

Несмотря на активные исследования, механизмы высвобождения энергии и ускорения частиц в солнечных вспышках требуют дальнейшего уточнения. Ключом к их пониманию служит анализ мелкомасштабной временной структуры излучения — субсекундных импульсов (спайков), наблюдаемых в рентгеновском и радиодиапазонах. Их совместное изучение предоставляет ценную информацию о фундаментальных плазменных процессах и открывает новые возможности для диагностики вспышек.

В данной работе представлен комплексный анализ субсекундных всплесков, зарегистрированных на разных стадиях солнечных вспышек. Исследование основано на данных космических обсерваторий (RHESSI, FERMI, BATSE, Yohkoh) и наземных радиокомплексов (NoRH, NoRP). Для выявления спайков применены новые методики, основанные на методе Empirical Mode Decomposition (EMD) и на основе метода кросскореляции сигнала в различных энергетических каналах с учетом временных задержек. Наблюдательные данные сопоставлялись с результатами численного моделирования. В ходе анализа серии солнечных вспышек были детально изучены временные, спектральные и пространственные характеристики спайков. На основе этого анализа предложены новые методы диагностики параметров вспышечной плазмы и ускоренных электронов по наблюдаемой длительности и локализации субсекундных всплесков.

## Статистика корональных выбросов массы солнечных вспышек с гелиосейсмическим откликом

Шарыкин И.Н.<sup>1</sup>, Зимовец И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, Москва, Россия

[ivan.sharykin@phystech.edu](mailto:ivan.sharykin@phystech.edu)

В докладе обсуждаются результаты статистического анализа свойств корональных выбросов массы (КВМ) во вспышках с гелиосейсмическим откликом (с «солнцетрясениями») в сравнении со вспышками без фотосферных возмущений на базе наблюдений солнечной короны в ультрафиолетовом (AIA) и видимом (LASCO) диапазонах. Рассматривались выборки вспышек выше M1.0, M5.0 и M7.0. Также проведен корреляционный анализ между параметрами КВМ и полной энергией солнцетрясений. Дополнительно для вспышек выше M7.0 класса анализировалась информация по наличию радиовсплесков в широком диапазоне длин волн и жесткого рентгеновского излучения. Обнаружено, что выбросы, сопровождающие вспышки с гелиосейсмическим откликом, являются более скоростными в нижней короне по данным AIA по сравнению со вспышками без фотосферных возмущений. Массы КВМ распределены примерно одинаковым образом независимо от наличия солнцетрясений во время вспышек. Анализ свойств диммингов показал, что они более импульсные с точки зрения временной динамики в случае вспышек с солнцетрясениями. Выбросы во вспышках более M7.0 класса с гелиосейсмическим откликом менее скоростные и массивные во внешней короне по данным LASCO. Корреляционный анализ не выявил сильных взаимосвязей между акустической энергией и параметрами КВМ по AIA. В отличие от вспышек с солнцетрясениями, зафиксировано практически полное отсутствие радиовсплесков III-го типа и редкое появление всплесков II-го типа для вспышек более M7.0 класса без фотосферных возмущений. Результаты анализа, проведенного в данной работе, показали, что вспышки с солнцетрясениями, вероятно, обладают свойством эффективной генерации скоростных корональных диммингов и ударных волн на фоне плохо развитых КВМ высоко в короне (в сравнении со вспышками без фотосферных возмущений) и яркими проявлениями нетепловых электронов, уходящих из области ускорения, как в сторону поверхности Солнца, так и от нее. На наш взгляд, это указывает на то, что возможность эруптивной природы солнцетрясений нельзя сбрасывать со счетов. Ускоренные электроны могут быть как первичным, так и вторичным агентом, формирующим фотосферное возмущение.

## Секция 3. Колебания и волны на Солнце

## Эти неуловимые гигантские ячейки

Гетлинг А.В.<sup>1</sup>, Косовичев А.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скobelцына  
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, A.Getling@mail.ru

<sup>2</sup>Технологический институт штата Нью-Джерси, Ньюарк, США  
[A.Getling@mail.ru](mailto:A.Getling@mail.ru)

Исследование строения и динамики конвективных течений в подфотосферной зоне Солнца – задача первостепенной значимости для понимания механизмов солнечной активности. В частности, очень важно знать закономерности изменения масштабов течений в пространстве и времени, особенно в цикле активности. Предметом нашего изучения, наряду с супергранулами, являются самые крупномасштабные структуры поля скоростей – гигантские ячейки. Они, считавшиеся гипотетическими три с половиной десятилетия, лишь в самом конце XX века были обнаружены путем наблюдений [1]. В дальнейшем Хатавэй и др. [2, 3] исследовали гигантские ячейки путем трассирования движения супергранул по доплеровским изображениям. Они нашли, что время жизни этих структур измеряется месяцами.

В наших работах [4, 5], как и в настоящей, рассматривается поле дивергенции найденных гелиосейсмологически горизонтальных скоростей на глубинах до ~ 19 Мм под поверхностью фотосферы. Спектральные разложения по сферическим гармоникам показали, что масштабы супергранул 30–60 Мм доминируют в приповерхностных слоях, а широкополосные структуры с масштабами вокруг 300 Мм – в глубине. Первые слабее в периоды высокой активности, особенно на ~ 4 Мм, вторые усилены.

Согласно работе [3], низкоширотные гигантские ячейки округлы и живут порядка месяца, а высокоширотные вытянуты, закручены в спирали с центром на полюсе и живут несколько месяцев. С другой стороны, наряду с теоретическими соображениями и данными гидродинамических экспериментов, наш спектральный анализ показал, что гигантские ячейки должны быть вытянутыми вдоль меридианов, бананообразными [4, 5].

Здесь мы исследуем временные вариации характерной длины волны конвективных течений, найденной по спектрам поля дивергенции, и ее распределение по глубине. Как видно из рис. 1, супергрануляционный масштаб ясно выражен в верхнем слое конвективной зоны толщиной ~ 4 Мм, тогда как масштаб гигантских ячеек проявляется ниже ~ 8 Мм; на промежуточных глубинах диаграмма отражает суперпозицию этих двух масштабов. Масштаб супергрануляции стабилен, масштаб гигантских ячеек варьирует с числом пятен, увеличиваясь с усилением солнечной активности.

Трассирование полей дивергенции скорости (рис. 2) дает прямое, визуально воспринимаемое указание на существование структур, похожих на

конвективные ячейки гигантских масштабов (рис. 3). В отличие от авторов работ [2, 3], мы опираемся на поля скоростей, измеренных не на поверхности фотосферы, а на разных глубинах.

Картина конвекции гигантских масштабов может быть затемнена присутствием глобальных инерциальные волновых мод. Различить те и другие – задача дальнейших исследований.

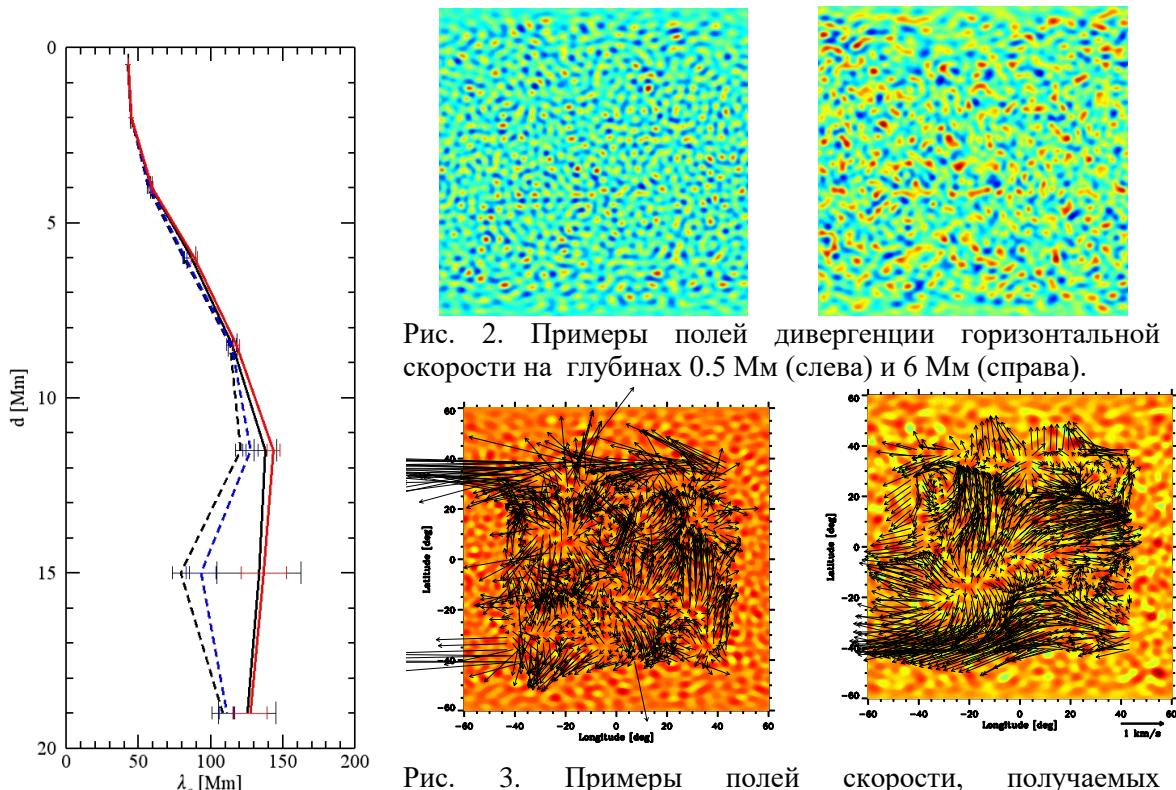


Рис. 2. Примеры полей дивергенции горизонтальной скорости на глубинах 0.5 Мм (слева) и 6 Мм (справа).

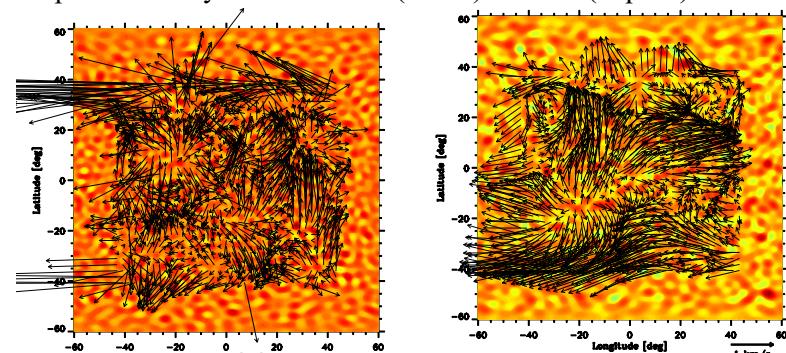


Рис. 3. Примеры полей скорости, получаемых трассированием супергранул на тех же глубинах.

Рис. 1 (слева). Усредненная за 360 суток характерная длина волн течений  $\lambda_c$  как функция глубины  $d$ . Сплошные линии – годы высокой активности, штриховые – низкой.

### Литература

1. 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.
2. Hathaway D.H., Upton L., Colegrove O. Giant convection cells found on the Sun // *Science*. V. 342. Pp. 1217–1219. 2013.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

## Диагностика магнитных полей в горячих корональных петлях с помощью медленных магнитоакустических волн

Завершинский Д.И.<sup>1,2</sup>, Агапова Д.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет, Самара, Россия

<sup>2</sup>Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия

[agapova.dv@ssau.ru](mailto:agapova.dv@ssau.ru)

Медленные магнитоакустические (МА) волны в корональных петлях являются мощным инструментом для диагностики параметров плазмы и процессов в солнечной атмосфере, с помощью методов корональной сейсмологии. В данной работе исследуется совокупное влияние различных дисперсионных процессов, способных оказывать заметное влияние на свойства медленных МА волн. В качестве основных источников дисперсии были рассмотрены теплопроводность, эффект теплового дисбаланса и геометрия волновода.

В ходе исследования был введен характерный временной/пространственный масштаб, определяющий переход фазовой скорости от адиабатической скорости звука к изотермической скорости звука из-за теплопроводности. Была изучена его зависимость от температуры и плотности корональной плазмы. Показано, что в горячих и разреженных корональных петлях эффект дисперсии, вызванный теплопроводностью может объяснить, наблюдаемые отклонения фазовой скорости от адиабатической скорости звука.

С помощью решения дисперсионного уравнения, учитывающего три вышеупомянутых источника дисперсии, было показано, что в условиях конечной плазменной беты, фазовая скорость в адиабатическом пределе не обычно не достигает скорости звука, и трубочная скорость в этом пределе является более адекватной оценкой.

Рассмотрен ряд наблюдений медленных магнитоакустических волн в корональной плазме с температурой  $\sim 10$  МК и концентрацией электронов  $\sim 10^9$  см<sup>-3</sup>. С помощью решения дисперсионного уравнения проведена диагностика напряженности магнитного поля. Оцененное значение напряженной  $\sim 10$  Гс, при этом в хорошем соответствии с теорией находятся не только периоды волн, но и времена затухания. Наши результаты подчеркивают важность интеграции нескольких механизмов дисперсии для более точной диагностики плазмы солнечной короны.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FMR-2024-0017).

## О течениях в окрестностях активной области NOAA 11158 на различных глубинах подфотосферной зоны

Коновалихин А.М., Гетлинг А.В.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скobel'цына  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
[konovalikhin.a21@physics.msu.ru](mailto:konovalikhin.a21@physics.msu.ru); [A.Getling@mail.ru](mailto:A.Getling@mail.ru)

Сделана попытка реконструировать трёхмерную структуру течений на Солнце на основе гелиосейсмологических данных и данных оптических наблюдений и попутно составить представление о надежности измерений скорости. Для этого использованы найденные гелиосейсмологическими методами скорости вещества на различных глубинах конвективной зоны, вертикальные скорости в фотосфере, определенные прямыми доплеровскими измерениями и горизонтальные скорости в фотосфере, найденные методом локального корреляционного трассирования (ЛКТ).

Представлены результаты анализа времененного и высотного изменения коэффициента корреляции между вертикальными скоростями  $V_z$  и дивергенцией горизонтальных скоростей  $\text{div}V_{xy}$  в конвективной зоне. Рассмотрены глубины от 0.5 Мм до 19 Мм в разные моменты развития активной области NOAA 11158 (с 09.02.2011 до 18.02.2011). Выделены три промежутка времени: до конца 12.02.2011 область находилась в спокойном состоянии; затем она стала активной, началось формирование восходящих потоков, что сопровождалось плавным изменением коэффициентов корреляций в течение примерно суток; после этого с начала 14.02.2011 восходящие потоки окончательно установились (рис. 1). Поведение временных зависимостей коэффициента корреляции позволяет установить наличие переходного периода, закончившегося стабилизацией течений.

Обнаружено различие характера изменения со временем коэффициента корреляции на разных глубинах: уменьшение на уровнях 2 и 4 Мм и увеличение на более глубоких уровнях. Также отмечено, что распределение коэффициента корреляции по глубинам в установленный активный период (14.02–16.02) отличается от распределения в спокойный период (11.02–12.02) — корреляция на уровнях 2 и 4 Мм становится меньше, чем на других уровнях. Обнаружено, что  $V_z$  на уровнях 2 и 4 Мм в границах восходящего потока имеют большие положительные значения, а  $\text{div}V_{xy}$  положительна лишь в кольцеобразных структурах, которые опоясывают области с отрицательными значениями (рис. 2). Имеются основания для предположения, что на уровнях 2 и 4 Мм в период активности данной области характер распределения  $V_z$  в восходящем потоке отличается от того, что показывают  $V_z$ , определённые гелиосейсмологическими методами. С этим связано падение коэффициента корреляции на этих уровнях. На уровнях

более глубоких, чем 4 Мм, кольцеобразные структуры в поле скоростей пропадают. И  $V_z$ , и  $\text{div}\mathbf{V}_{xy}$  в восходящем потоке приобретают большие положительные значения. Оказывается, что на таких глубинах в восходящем потоке, который занимает существенную часть рассматриваемой площадки, упорядоченность становится выше, чем в невозбуждённых условиях.

Был также проведен анализ связи горизонтальных скоростей в фотосфере, полученных методом ЛКТ, со скоростями на уровне 0.5 Мм, полученных гелиосейсмологическими методами (ломаные линии с точками на рис. 1). Независимость от времени корреляции между этими величинами свидетельствует о том, что применённый вариант метода ЛКТ в целом адекватно воспроизводит скорости в фотосфере, которые оказались согласующимися со скоростями в нижележащем слое.

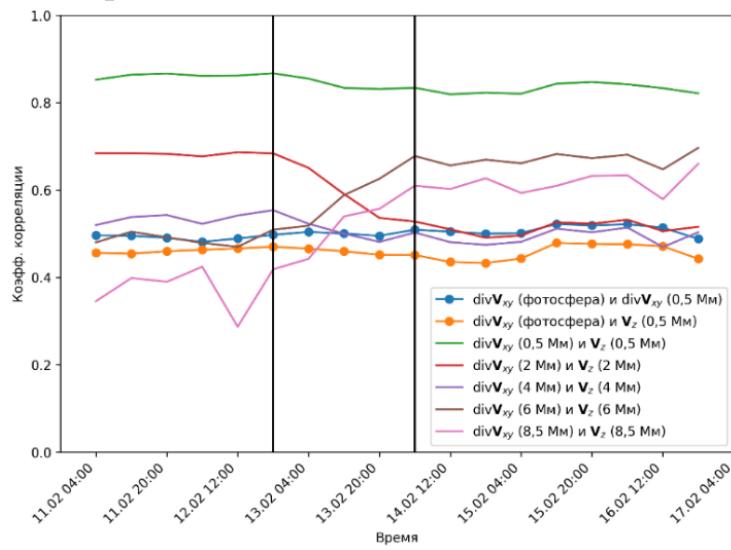


Рис. 1: Линии с точками: временной ход коэффициента корреляции между  $\text{div}\mathbf{V}_{xy}$ , рассчитанной по горизонтальным скоростям в фотосфере и гелиосейсмологически для уровня 0.5 Мм, и между  $\text{div}\mathbf{V}_{xy}$  в фотосфере и  $V_z$  на уровне 0.5 Мм. Остальные линии: временной ход коэффициента корреляции между  $V_z$  и  $\text{div}\mathbf{V}_{xy}$  на уровнях 0.5, 2, 4, 6 и 8.5 Мм. Вертикальные прямые: моменты начала и окончания формирования восходящих потоков.

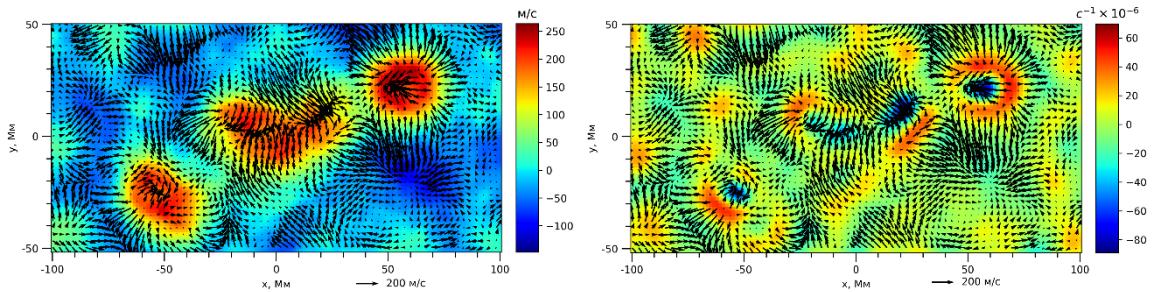


Рис. 2: Карты течений на уровне 2 Мм. Все величины усреднены в промежутке времени 15.02.2011 15:59:38 — 15.02.2011 23:59:38. Цветом слева показаны вертикальные скорости, справа — дивергенция горизонтальных скоростей. Стрелками — горизонтальные скорости.

## Вопрос о природе глобальных пульсаций Солнца

Котов В.А.

Крымская астрофизическая обсерватория, п. Научный, Крым 298409, Россия  
[vkotov@craocriemea.ru](mailto:vkotov@craocriemea.ru)

По данным Бирмингемского университета [1], в 1980–1985 гг. Солнце не пульсировало с периодом  $P_0$  около 1/9 сут: в спектре мощности лучевой скорости фотосфера обнаруживался лишь “земной” артефакт – 9-я суточная гармоника. Нами показано, что в те годы и в крымских данных отсутствовал сигнал  $P_0$ , что обусловлено переменностью амплитуды колебания. По данным КрАО [2], период пульсаций в 1974–2018 гг. составлял 0.1111184(2) сут.

Для объяснения явления рассмотрена переменность других объектов Космоса. Показано, в частности, что периоды пульсаций звёзд типа Дельта Щита статистически стремятся к соизмеримости с периодом 0.110(3) сут, согласующимся в пределах ошибки как с типичным периодом, 0.111 сут, этих звёзд, так и с “солнечным” значением  $P_0$ . Это открывает новый подход к пониманию звёздных пульсаций и механизму их возбуждения. Показано также, что сверх-быстрые экзопланеты стремятся обращаться вокруг “родительских” звёзд с периодаами, кратными  $P_0$  и/или  $2P_0/\pi$ , – со значимостью эффекта 4 $\sigma$  для орбитальных периодов менее двух суток. Приведены аргументы в пользу космического происхождения особой, “элитной” временной шкалы  $P_0$ , природа которой не установлена. Впечатляют и другие корреляции, – равенства, выполняющиеся с точностью до 0.1%:

$$P_S/P_D \approx 2P_Y/P_S \approx 3P_D/P_0 \approx 3^3,$$

где  $P_S = 27.027(4)$  сут – *синодический* период вращения Солнца, а  $P_Y$  и  $P_D$  – годовой и суточный периоды Земли соответственно. Выдвинута гипотеза, что  $P_S$ ,  $P_Y$ ,  $P_D$  и  $P_0$  – особые, “элитные” шкалы времени, фундаментальные для Солнца и Земли и характеризующие, по Шрёдингеру [3], “тенденцию движений к по-рядку”, к повторению и возобновлению.

## Литература

1. Elsworth Y. P. et al. The 160 minute solar oscillation: an artifact? ApJ. V. 338. P. 557-562. 1989.
2. Kotov V., Haneychuk V. Sixfold enhancement of solar pulsations: 1974-2018. Acta Astrophys. Taurica. V. 4. I. 2. P. 1-5. 2023.
3. Schrödinger E. What is life? The Physical Aspect of the Living Cell. Dublin Inst. Adv. Studies, Dublin. 1955.

## Динамика ленгмюровских волн и пучков быстрых электронов с учетом индуцированного рассеяния волн на ионах солнечной плазмы

**Кудрявцев И.В., Ватагин П.В.**  
*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*  
*[Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru](mailto:Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru)*

Радиоизлучение солнечной плазмы, как известно, несет информацию о физических процессах происходящих на Солнце. По своей природе это излучение может быть как нетепловым [1], так и тепловым излучением плазмы [2]. Одним из нетепловых механизмов генерации радиоизлучения в плазме является слияние ленгмюровских волн с образованием электромагнитных волн [2-5]. Генерируемое последним механизмом радиоизлучение регистрируется с помощью радиотелескопов в виде радиовсплесков и во время солнечных вспышек. Спектр и угловое распределение этих радиоволн отражает спектр и угловое распределение ленгмюровских волн [6-8].

Ленгмюровские волны могут генерироваться ускоренными в плазме потоками быстрых электронов. При этом индуцированное рассеяние ленгмюровских волн на тепловых частицах плазмы может определять спектр и угловое распределение этих волн [9-11]. Таким образом, детальное изучение процесса генерации радиоизлучения во время активных процессов на солнце и сравнение с результатами измерений может позволить диагностировать плазменные процессы на Солнце [8].

В докладе приводятся результаты численного моделирования задачи о распространении пучков электронов в солнечной плазме с учетом взаимодействия с плазменными волнами. При этом учитывается индуцированное рассеяние ленгмюровских волн на ионах плазмы. Характерным для этого рассеяния является «перекачка» плазменных волн в область малых волновых чисел [9] и изменение направления волнового вектора (см. например [10]). Изменение этих параметров может изменять характер взаимодействия быстрых электронов с плазменными волнами, а также влиять на характеристики радиоизлучения.

### Литература

- Гинзбург В.Л., Железняков В.В., О возможном механизме спорадического радиоизлучения Солнца (Излучение в изотропной плазме) // Астрономических журнал. Т.35. № 5. С. 694-712. 1958.
- Zhelezniakov V.V., Radiation n Astrophysical Plasmas. Kluwer, Dordrecht 1996.
- Железняков В.В., Зайцев В.В. К теории всплесков солнечного радиоизлучения III типа. II // Астрономический Журнал. Т. 47. № 2. С. 308-321. 1970.
- Цытович В.Н. Теория турбулентной плазмы. М.: Атомиздат. 424 с. 1971.
- Каплан СА, Цытович В.Н. Плазменная Астрофизика. М.: Наука. 440 с. 1972.

6. Kudryavtsev I.V. and Kaltman T.I. Influence of the angular distribution of Langmuir waves on the directivity of radio emission at double plasma frequency // Geomagnetism and Aeronomy. V. 60. № 8. P. 1122–1125. 2020.
7. Kudryavtsev I.V. and Kaltman T.I. On the influence of Langmuir wave spectra on the spectra of electromagnetic waves generated in solar plasma with double plasma frequency // MNRAS. V. 503. P. 5740–5745. 2021.
8. Kudryavtsev I.V., Kaltman T.I. and Karlicky. Diagnostics of the dynamics of the Langmuir spectrum based on radio emission during the 12 March 2015 solar radio burst //A&A 665, A98 (2022)
9. Липеровский В.А., Цытович В.Н. О спектрах ленгмюровской турбулентности плазмы // Журнал экспериментальной и теоретической физики. Т. 57. № 4(10). С. 1252-1262. 1969.
10. Железняков В.В., Зайцев В.В. К теории всплесков солнечного радиоизлучения III типа // Астрономический Журнал. Т. 47. № 1. С.60-75. 1970.
11. Kudryavtsev I.V. and Vatagin P.V. The Dynamic features of langmuir turbulence upon induced scattering of langmuir waves by thermal ions of solar plasma//Geomagnetism and Aeronomy, V. 62, No. 8, pp.1054–1058. 2022.

## О влиянии продольного потока вещества на изгибные колебания солнечных магнитных трубок с эллиптическим сечением

Лопин И.П.

Институт Прикладной Астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия  
[lopin78@mail.ru](mailto:lopin78@mail.ru)

Исследуется влияние продольного потока вещества на изгибные колебания в тонких солнечных магнитных силовых трубках с эллиптическим сечением. Теория изгибных колебаний в беспотоковых эллиптических трубках была развита в работах [1] и [2]. Было найдено, что эллиптичность поперечного сечения является причиной существования двух типов колебаний, поляризованных соответственно вдоль большой (М-мода) и малой (м-мода) осей эллипса. В данной работе показано, что при наличии продольного потока плазмы, его влияние на обе моды изгибных колебаний различно. Так, М-мода изгибных колебаний более стабильна относительно неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, поскольку требует большего порогового значения числа Маха. В целом, магнитные трубы со значительной эллиптичностью поперечного сечения более стабильны относительно данной неустойчивости чем трубы с круглым сечением. Кроме того, в данном исследование изучалось влияние продольного потока на собственные частоты квазистоячих волн. Найдено, что частоты обеих мод уменьшаются, а отношение частоты м-моды к частоте М-моды растет с ростом скорости потока. Полученные результаты применены для интерпретации колебательных явлений в спикулах. В частности, наблюдаемые поперечные колебания осей спикул с периодами 180 с и 90 с интерпретированы в терминах квазистоячих волн М- и м-мод соответственно, а наблюдаемые характерные спиральные осциллирующие движения осей спикул как следствие суперпозиции ортогональных М- и м-мод.

### Литература

- [1] Ruderman, M.S. // Astronomy and Astrophysics, 2003, v. 409, p.287.
- [2] Erdelyi, R., Morton, R. J. // Astronomy and Astrophysics, 2009, v. 494, p. 295.

## Динамика источника активной области Солнца

**Мерзляков В.Л., Старкова Л.И.**

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пуцкова,  
РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия  
[mvl@izmiran.ru](mailto:mvl@izmiran.ru)

Авторы установили, что источник активной области (АО) Солнца является непростой токовой структурой [1]. В связи с этим возникает вопрос об её структурных особенностях и динамики перемещения её составляющих. Для решения этого вопроса проведем исследование долгоживущей АО, которая имела явно сложный токовый источник, проявляющийся на фотосфере переменностью дипольного магнитного момента. И этот источник представляем системой двух соленоидов, которые позволяют объяснить магнитную переменность изучаемой АО [2].

Чтобы понять динамику составляющих источника соленоидов [2], рассчитаем скорости их долготного перемещения. За три периода наблюдения изучаемой АО получаем временные зависимости средней скорости между моментами наблюдений. Эти моменты иногда составляли менее суток. Результаты показаны на рис. 1 – рис. 3, относящиеся к последовательным временам наблюдения АО.

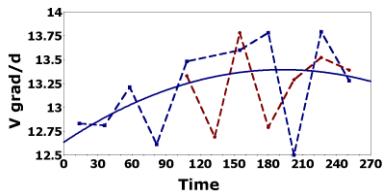


Рис.1

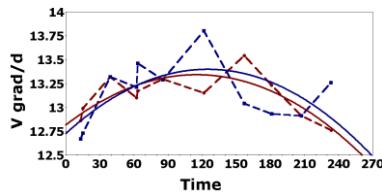


Рис.2

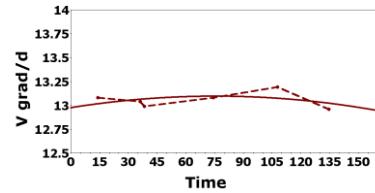


Рис.3

На приведенных рисунках скорости даны в °/сут, а время отмечает часы относительно первого момента наблюдения изучаемой АО. Данные отмечены квадратами для соленоида типичной магнитной ориентации, а кружки относятся к случаю соленоида противоположной ориентации. Эти наблюдательные данные соединяются пунктирными линиями, которые показывают переменность скорости перемещения источника АО. На рис. 1 – рис. 3 сплошными кривыми показаны тенденции изменения величины скорости. Как видно на приведенных рисунках тенденции демонстрируют экстремум величины.

Согласно исследованиям [1] источник АО перемещается от уровня  $0.90 R_s$  до  $0.98 R_s$  радиусов Солнца от его центра. В указанных пределах скорость вращения подфотосферных слоев существенно меняется [3]. В таком случае наблюдаемая переменность скорости (рис. 1 – рис. 3) долготного перемещения источника АО отражает именно вариацию скорости вращения солнечных слоев. И в этой вариации скорости вращения обнаружились два экстремума. Положения этих экстремумов указывают на уровни  $\approx 0.92 R_s$  и

0.95 – 0.97  $R_s$ . Наличие двух экстремумов скорости вращения для эпохи низкой солнечной активности в приэкваториальной зоне показывают и расчеты гелиосейсмологии по данным MDI [3]. Экстремальные скорости по данным на рис. 1 и рис. 2 оцениваются величиной 465 нГц, что несколько отличается от гелиосейсмологических расчетов [3]. Однако следует учесть влияние силы Кориолиса на движущийся в радиальном направлении источник. Эффект этой силы наглядно проявляется в период перемещения источника от фотосферы, который иллюстрирует рис. 3. В случае обратного его движения сила Кориолиса направлена против вращения, что должно уменьшить скорость долготного перемещения источника. И это наглядно видно из сравнения рис. 3 с рис. 1, где движение источника направлено к фотосфере.

Наблюдаемые мелкомасштабные по времени вариации скорости, демонстрируемые пунктирными линиями на рис. 1 – рис. 3, вероятно, означают колебания источника в долготном направлении. Следует отметить, что эти колебания не являются синхронными для двух составляющих источник соленоидов (рис. 2). Между тем имеют место быть синхронность по тенденции изменения скорости, что демонстрируют сплошные аппроксимационные кривые на рис. 2. К тому же, отмечается близость этих кривых, что указывает на компактность источника АО. По крайней мере, по радиальному размеру.

## 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. Мерзляков В.Л., Старкова Л.И. Изменение ориентации дипольного момента активной области Солнца // Труды Всероссийской конференции “Солнечная и солнечно-земная физика – 2024”, С-Пб, ГАО РАН. С. 221-224. 2024.
3. Schou J., Howe R., Basu S. et al. A comparison of Solar p-mode parameters from the Michelson Doppler imager and the global oscillation network group: splitting coefficients and rotation inversions // Astrophys. J. V. 567. P. 1234–1249. 2002.

## Волны сжатия в солнечной короне: временные сигналы

**Сапралиев М.Е., Дертеев С.Б., Михаляев О.Н., Михаляев Б.Б.**

*Калмыцкий государственный университет им. Б. Б. Городовикова. Элиста, Россия*  
[m\\_sapraliev@mail.ru](mailto:m_sapraliev@mail.ru)

Наблюдаемые в короне волны сжатия часто демонстрируют колебания с характерными периодами 20-30 минут, причем эти периоды могут нерегулярно меняться в течение нескольких часов. Такая изменчивость ставит под сомнение общепринятую точку зрения, согласно которой эти явления являются классическими волнами сжатия [1,2]. В работе [3] выдвигается гипотеза, что наблюдаемая картина может быть объяснена как результат суперпозиции акустических волн, образующихся в виде локализованных импульсов.

Для проверки этой идеи были использованы наблюдения, проведенные инструментом AIA на борту космической обсерватории SDO. Этот инструмент предоставляет детальные изображения Солнца в крайнем ультрафиолетовом диапазоне с высоким пространственным и временными разрешением. В исследовании анализировались данные, полученные 1 февраля 2025 года в спектральном канале 171Å. После процедуры предварительной обработки данных, включавшей коррекцию вращения Солнца и калибровку, для анализа была выбрана конкретная активная область и линия вдоль нее, где регистрировались распространяющиеся возмущения.

Проведенный вейвлет-анализ и автокорреляция временных рядов показали очень слабую корреляцию между последовательными событиями, что свидетельствует против модели непрерывных квазипериодических колебаний. Вместо этого результаты указывают на то, что наблюдаемые возмущения представляют собой последовательность отдельных, слабо связанных между собой акустических импульсов. Эти импульсы генерируются в основании короны в результате мелкомасштабных нестационарных процессов в нижних слоях атмосферы Солнца.

### Литература

1. Derteev S.B. et al. Damping and Dispersion of Non-Adiabatic Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma: A Radiative-Loss Function // Physics. Vol. 5. P. 215-228. 2023.
2. Mikhalyaev B.B. et al. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma II. Damping and Instability // SP. Vol. 298. 102. 2023.
3. Derteev S.B. et al. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma III. Two-Periodic Disturbances // SP. Vol. 299. 141. 2024.

## Влияние филаментации электрических токов на эффективность энерговыделения в корональных магнитных петлях

Симонова Т.В., Зайцев В.В.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

[simonovat@ipfran.ru](mailto:simonovat@ipfran.ru)

Корональные магнитные петли являются важной структурной составляющей солнечной короны, поскольку существуют как в спокойных, так и в активных областях Солнца. Исследования их структуры ведутся с 1940 года [1]. В последнее время важным направлением в исследованиях является анализ тонкой структуры магнитных петель, поскольку ее присутствие может существенно влиять на нагрев плазмы и ускорение частиц.

Ранее невидимую тонкую структуру петель в виде отдельных нитей (филаментов) удалось разрешить во время успешного запуска зонда Hi-C с ракетного полигона Уайт-Сэндс (США), произошедшего 29 мая 2018 года [2]. При помощи зонда были получены данные высокого разрешения активной области AR 12712. Примеры такой структуры показаны на Рис.1. Характерная толщина филаментов варьируется в пределах 200 – 1000 км с наиболее вероятным значением около 350 км и вероятным числом филаментов в петле в пределах 5-10.

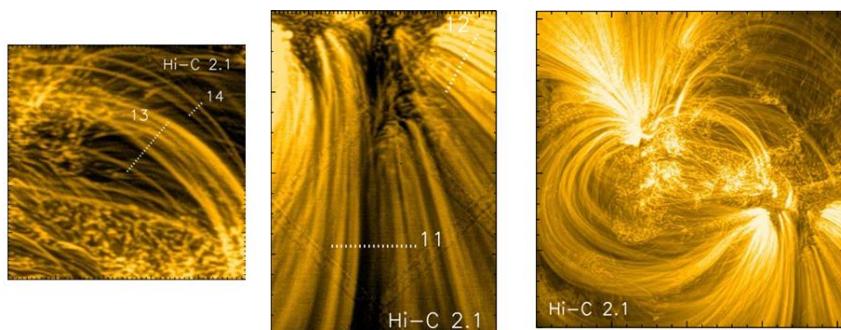


Рис.1 Изображения активных областей Солнца, полученные с помощью зонда Hi-C и иллюстрирующие филаментированную структуру корональных магнитных петель [2].

В данной работе проведено сравнение значений энерговыделения при наличии филаментации и при ее отсутствии. Исследованы условия возникновения филаментации в корональных магнитных петлях, с характерными значениями электрического тока  $10^9 - 10^{11}$  А, в которых возможны проявления пинч-эффекта. Показано, что для характерных параметров корональных магнитных петель с площадью поперечного сечения  $S \approx 10^{17}$  см<sup>2</sup>, температурой  $T \approx 3 \times 10^6$  К и концентрацией плазмы

$n \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ , филаментация возникает при токах  $I \geq 4 \times 10^9 \text{ А}$ . Определены характерная толщина филаментов и их общее количество для приведенных значений параметров. Суммарная площадь поперечных сечений филаментов меньше общей площади петли без филаментации. По этой причине энерговыделение из системы филаментов при том же полном токе выше, чем энерговыделение однородной петли.

При характерном количестве филаментов, полученных из экспериментальных данных ( $N_f \approx 5 \div 10$ ), общее энерговыделение из петли увеличивается приблизительно на порядок. Указанный эффект пропадает при достаточно большом количестве филаментов, поскольку в этом случае суммарная площадь их поперечных сечений практически совпадает с площадью поперечного сечения петли.

Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (проект 24–1–1–97–1).

## Литература

1. Bray, R. J., Cram, L. E., Durrant, C., & Loughhead, R. E. 1991, Plasma Loops in the Solar Corona (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
2. Williams, Thomas et al. Is the High-Resolution Coronal Imager Resolving Coronal Strands? Results from AR 12712 2020-04 The Astrophysical Journal, Vol. 892, No. 2 American Astronomical Society p. 134

## Секция 4. Солнечный ветер и космическая погода

## Долгопериодные вариации скорости солнечного ветра и данные о корональных дырах

Березин И.А.<sup>1,2</sup>, Тлатов А.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

<sup>2</sup>КалмГУ, Элиста, Россия

[iberalex@ya.ru](mailto:iberalex@ya.ru)

Проведён анализ долгопериодных вариаций скорости солнечного ветра в окрестностях Земли за последние 50 лет. Для интерпретации выполнено моделирование параметров корональных дыр (КД), являющихся основным источником высокоскоростных потоков солнечного ветра. Реконструкция площадей корональных дыр проводилась на основе данных Wilcox Solar Observatory за продолжительный период, а также по данным магнитографа СТОП, начиная с 2014 года, с применением Potential Field Source Surface (PFSS) модели.

Сравнительный анализ показал, что сглаженные ряды данных, характеризующие изменение общей площади корональных дыр, демонстрируют более тесную корреляцию с долгопериодными вариациями скорости солнечного ветра, по сравнению с прогнозами, основанными на модели Wang-Sheeley-Arge. Показано, что непосредственные измерения площадей КД по УФ-наблюдениям (SOHO/EIT; SDO/AIA) обеспечивают лучшую корреляцию со скоростью солнечного ветра, чем оценки, полученные по PFSS модели.

## Первые и последние возрастания интенсивности солнечных протонов в 23-25 циклах

**Григорьева И.Ю.<sup>1</sup>, Струминский А.Б.<sup>2</sup>, Ожередов В.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. С.-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

[irina.2014.irina@mail.ru](mailto:irina.2014.irina@mail.ru)

В работе [1] был разработан метод обнаружения превышения сигнала протонного детектора в канале 25-53 МэВ SOHO/EPHIN [2] фоновых значений. Также в [1] введено понятие «конгломератов протонных возрастаний» – односвязных временных интервалов, на которых зарегистрированы такие превышения фона. Этот метод позволил обнаружить слабые возрастания интенсивности солнечных протонов (СП), возможно первые и последние в серии солнечных протонных событий в циклах, которые не отражены в каталогах НИИЯФ МГУ ([https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep\\_events\\_cat/](https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/)).

По нашему мнению, существует проблема обнаружения таких возрастаний, которые происходят при очень низкой фоновой солнечной активности (СА). Они указывают на ускорение заряженных частиц при взаимодействии (пересоединении) магнитных полей различной полярности и могут свидетельствовать о начале и конце периодов преобладания в цикле СА той или другой полярности.

Первые и последние возрастания потока СП наблюдались в 23-ем цикле СА 13 августа 1996 года и 19 мая 2007 года, в 24-ом – 22 декабря 2009 года и 20-21 апреля 2019 года, соответственно. Значительно раньше первых и позднее последних протонных событий, отмеченных в каталогах НИИЯФ МГУ. В 25-ом цикле СА первое возрастание интенсивности СП было 16 октября 2020 года, а по каталогу НИИЯФ МГУ – 30 ноября 2020 года. Последнее возрастание интенсивности СП в 25-ом цикле СА еще предстоит увидеть, возможно, между 2028-2030 годами. Первое возрастание интенсивности СП в 26-ом цикле СА, по-видимому, произойдет в 2031 году.

Нами введен индекс NON – число дней без солнечных протонных возрастаний вблизи Земли, характеризующий отсутствие протонной активности Солнца [3]. Максимальные значения NON 943 и 543 дня (найденные нами по данным SOHO/EPHIN) предшествуют первым возрастаниям потока СП в 24-ом и 25-ом циклах. Перед последним возрастанием потока СП в 24-ом цикле 20-21 апреля 2019 года NON был 431 дня, что практически уравнивает NON в минимумах перед 24-ым и 25-ым циклами СА.

Неожиданно оказалось, что найденный нами максимальный индекс NON близок к максимально допустимой продолжительности космического полета астронавта (Permissible Mission Duration – PMD) 917 дней с ошибкой в  $\pm 234/230$  дней, оцененной в [4] для 25-го цикла на основании последнего

принятого в НАСА допустимого предела облучения астронавта (Permissible Exposure Limit – PEL). Отметим также, что приводимая ошибка PMD также близка к нашему индексу NON (272 и 270 дней) перед последними наземными возрастаниями интенсивности КЛ (Ground Level Enhancement – GLE) в 23-ем и 24-ом циклах – GLE70 13 декабря 2006 года и GLE72 10 сентября 2017 года, соответственно. Протонная активность декабря 2006 года и сентября 2017 года не была предсказана, существовавшими тогда методами прогноза. Таким образом, PMD в 25-ом цикле СА не может быть определена до последнего GLE события.

### Литература

3. Ожередов В.А., Струминский А.Б., Григорьева И.Ю. Соотношение между максимальными потоками солнечных протонов и электронов: ускорение и/или распространение? // Космические исследования. 2025. принята к публикации
4. Müller-Mellin R., Kunow H., Fleißner V. et al. COSTEP – Comprehensive suprathermal and energetic particle analyse // Solar Physics. 1995. V. 162. P. 483.
5. Григорьева И.Ю., Ожередов В.А., Струминский А.Б., Модуляция галактических космических лучей малых энергий по данным SOHO/EPHIN с января 1996 по май 2025 // Космические исследования. 2025. на рецензии
6. Rahmanifard F., MacLeod M.L., de Wet W.C., Jordan A.P., Wilson J.K., Spence H.E., Schwadron N.A., Proceeding toward the maximum of solar cycle 25 with aradiation environment similar to the previous cycle // Adv. in Space Res. 2024. V. 74. P. 6183–6193. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.044>

## Большие магнитные бури в фазе максимума 25 цикла солнечной активности и их солнечные источники

Громова Л.И.<sup>1</sup>, Ишков В. Н.<sup>1</sup>, Клейменова Н. Г.<sup>2</sup>, Громов С.В.<sup>1</sup>,  
Малышева Л.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.

Пушкина РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

[gromova@izmiran.ru](mailto:gromova@izmiran.ru)

Рассмотрены глобальные характеристики больших магнитных бурь ( $Dst < -200$  нТл), неожиданно произошедших в 2024 г., в фазе максимума 25-го цикла солнечной активности (СА): 10-11 мая ( $Dst = -412$  нТл), 11-12 августа ( $Dst = -233$  нТл), 10-11 октября ( $Dst = -335$  нТл), 31 декабря -1 января 2025 г. ( $Dst = -213$  нТл). Можно предположить, что в современную эпоху пониженной солнечной активности снижается и геомагнитная активность. Например, в предыдущем, 24 цикле СА, большая магнитная буря была только одна.

Был выполнен анализ вспышечных ситуаций на Солнце во время рассматриваемых больших магнитных бурь и их геоэффективность. Было установлено, что причиной каждой из них являлись корональные выбросы масс (КВМ), сопровождавшие вспышечные события на Солнце, число и мощность которых в фазе максимума 25-го цикла СА резко увеличилось из-за значительного возрастания числа вспышечно активных областей. и было зарегистрировано пять вспышечных событий класса  $X \geq 5$ , 45 - класса  $X1-X4.9$ , три солнечных протонных события класса  $S4$  и 17 - класса  $S3$ .

Источники магнитных бурь 10-11 мая и 11-12 августа были схожими. Так, буря 10-11 мая была вызвана последовательностью больших солнечных вспышек 08/0509 X1.0; 08/1109 M4.1; 08/1753 M7.9, 08/1836 M2.9, 08/2236 X1.0, 09/0913, X2.2/3B. Такая плотная концентрация больших КВМ, последовательно уходящих из Солнца с различными скоростями (не менее 5 КВМ со скоростями 500-1280 км/с), привело к их слиянию с изменениями плотности (так называемый «каннибализм» КВМ), что и вызвало эту экстремальную бурю S3.

Наиболее вероятным источником начала бури 11-12 августа была вспышка класса X1.3/2B 8 августа. Однако следующая длительная двойная вспышка сформировала умеренно быстрый КВМ ( $V = 638$  км/с). Всего за период с 7 по 10 августа Солнце выбросило не менее 5 КВМ. При моделировании их распространения в межпланетном пространстве 11 августа их осталось всего 3, т.е., возможно, это также случай каннибализма КВМ.

Симпатические вспышки, т.е. вспышки, случившиеся одновременно (с интервалом не более 30 мин) в двух различных активных областях Солнца, X1.5 в северном полушарии и X1.1 в южном, послужили причиной большой бури, начавшейся 31 декабря. Подобная, довольно редкая, ситуация

наблюдалась и для не такой сильной бури от 23-24 марта, ( $Dst = -128$  нТл). Начало этой магнитной бури связывается со вспышкой M7.4/3B 20 марта, в ее максимальное значение стало следствием продолжительной симпатической вспышки X1.1 23 марта сразу в двух активных областях Солнца. Суммарный поток от вспышек практически одинаковой интенсивности достиг уровня X1.1. Это событие длилось более 5 ч и сопровождалось очень мощным и быстрым асимметричным КВМ (1470 км/с) со сложной структурой, поскольку обе вспышки породили свои КВМ, взаимодействие которых началось еще в солнечной короне.

Наиболее вероятным источником магнитной бури 10-11 октября, стала крупная вспышка класса X1.3/2B из центра видимого диска Солнца с очень быстрым КВМ ( $V = 1450$  км/с), продолжавшая почти 5 ч.

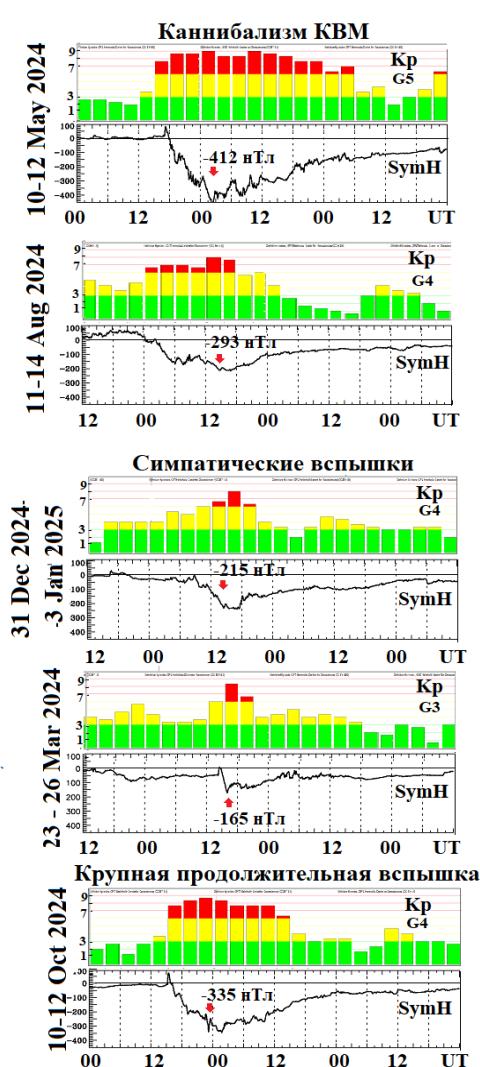


Рис. 1. Возможные солнечные источники исследуемых бурь и их геомагнитные характеристики.

Анализ данных о межпланетном магнитном поле (ММП) и солнечном ветре показал, что наиболее продолжительные среди бурь с похожими солнечными источниками были обусловлены быстрыми и сложными КВМ, а также увеличением динамического давления солнечного ветра, связанного со скачками его плотности, и большими значениями  $B_z$ -компоненты ММП. Интенсивность кольцевого тока, выражаемая индексом  $SymH$  (минутного аналога  $Dst$ ), у бурь с похожими солнечными источниками (10-11 мая и 12-14 августа, 31 декабря и 23-26 марта) отличалась почти в 2 раза (см. рис. 1). Развитие интенсивного кольцевого тока в буре 10-11 октября схоже с его развитием 10-11 мая, что может быть связано с близкими значениями наиболее геоэффективных параметром ММП и солнечного ветра.

Вопрос о том, чем непосредственно обусловлены различия в развитии магнитных бурь, драйверами которых являются сходные солнечные источники, требует дальнейших серьезных исследований.

## Вариации параметров ММП, геомагнитных и ионосферных индексов при каскаде бурь в октябре 2024г

Гуляева Т.Л.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

[gulyaeva@izmiran.ru](mailto:gulyaeva@izmiran.ru)

Супер–бури категории G4 по критериям NOAA ( $K_p = 8.7$ ) наблюдалась 10–11 октября 2024г в результате выброса корональной массы Солнца (СМЕ), достигшего Земли 10.10.2024г со скоростью 1200 км/с. Выброс СМЕ мог быть вызван солнечной вспышкой класса X1.8, исходившей из активной области AR3848 9го октября. Хотя к настоящему времени появились публикации по данной супер–бури [1-5], до сих пор не было отмечено, что этой супер–буре предшествовала интенсивная магнитная буря категории G3 ( $K_p = 7.0$ ), наблюдавшаяся 8.10.2024г после вспышки класса X2.1 7 октября 2024г с выбросом СМЕ со скоростью выше 1000 км/с. В данной работе мы восполним этот пробел, рассматривая эффекты в ММП, геомагнитном поле и ионосферной возмущенности в связке двух бурь за период с 6 по 14 октября 2024г.

В работе используются данные параметров ММП, предоставленные OMNI, геомагнитные индексы Центров данных в Потсдаме и Киото, карты полного электронного содержания JPL GIM-TEC, и индексы ионосферной возмущенности, представленные на сайте ИЗМИРАН.

На рисунке приведены изменения рассмотренных параметров с 6 по 14 октября 2024г: (а) глобальный индекс WU положительного ионосферного возмущения (приток полного электронного содержания TEC), отрицательный WL индекс (понижение TEC по сравнению со спокойным уровнем), их разность WE = WU-WL; (б) планетарный ионосферный Wp индекс; (в) геомагнитный Dst индекс кольцевого тока; (г) скорость солнечного ветра Vsw; (д) электрическое поле солнечного ветра Em; (д) 1ч планетарный геомагнитный Аро индекс (эквивалент 3ч Ar и Kp индексам). Первая буря на этом графике отмечена сначала ускорением солнечного ветра Vsw, затем усилением Em и постепенным увеличением геомагнитных и ионосферных эффектов вплоть до максимума 8го октября. Проявление супер–бури 10го октября отличается резким скачком межпланетных, геомагнитных и ионосферных параметров в момент внезапного начала бури. Подробный анализ обоих событий обсуждается в докладе.

Показано, что оценки ионосферной возмущенности при выборе спокойного уровня в день, предшествующий буре, не пригодны ко второму событию, если две бури наблюдаются в связке. Проверена возможность прогнозирования интенсивности геомагнитной бури по интенсивности электрического поля солнечного ветра и диапазона ионосферной возмущенности. Проблема прогноза вероятности второй бури при каскаде

бурь не решена до настоящего времени и остается актуальной на ближайшие годы.

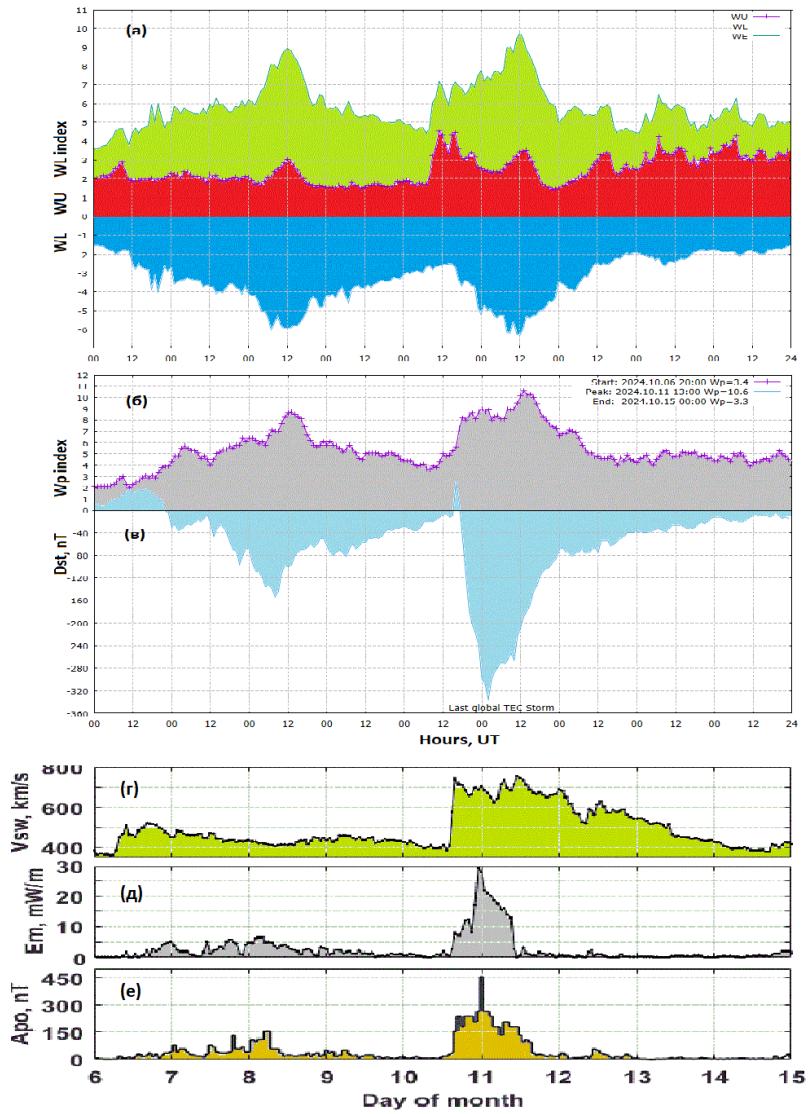


Рисунок.

### Литература

1. Paul, K.S. et al. (2025) Effects of the October 2024 Storm over the Global Ionosphere. *Remote Sens.*, 17, 2329. <https://doi.org/10.3390/rs17132329>
2. Oliveira D.M., Zesta, E., and Nandy, D. (2025) The 10 October 2024 geomagnetic storm may have caused the premature reentry of a Starlink satellite. *Front. Astron. Space Sci.* 11:1522139. <https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1522139>
3. Singh, R. et al. (2025) Ionospheric Responses to an Extreme (G5-Level) Geomagnetic Storm Using Multi-Instrument Measurements at the Jicamarca Radio Observatory on 10–11 October 2024. *J. Geophys. Res. Space Phys.* <https://doi.org/10.1029/2024JA033642>
4. Zakharenkova, I. et al. (2025) On Detection of Super Equatorial Plasma Bubbles in the American Sector During the 10–11 October 2024 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* <https://doi.org/10.1029/2025JA033709>
5. Aa, E. et al. (2025) Super Equatorial Plasma Bubbles and Strong Longitudinal Variability During the 10–11 October 2024 Geomagnetic Storm. *J. Geophys. Res. Space Phys.* <https://doi.org/10.1029/2025JA034224>

**Эффекты гистерезиса в зависимостях геомагнитных порогов  
космических лучей от солнечно-земных параметров во время  
магнитной бури в марте 2023 года**

**О.А. Данилова**

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и  
распространения радиоволн РАН (СПбФ ИЗМИРАН), Санкт Петербург, Россия  
[md1555@mail.ru;](mailto:md1555@mail.ru)*

Данная работа является продолжением ряда работ по открытому нами несколько лет тому назад явлению гистерезиса для геомагнитных порогов космических лучей во время сильных магнитных бурь [1–2 и ссылки там] 23 и 24 циклов солнечной активности. Большинство рассмотренных бурь было зафиксировано на фазах спада и в минимуме циклов. В данной работе для дальнейшего расширения нашего архива данных рассмотрена сильная буря в марте 2023 г. вблизи максимума 25 цикла, вызванная специфическим скрытым корональным выбросом массы. Знание зависимостей  $\Delta R$  от параметров солнечного ветра (СВ) и магнитосферы может прояснить важные черты взаимодействия СВ с магнитосферой и сопутствующие этому взаимодействию геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений. Для этой бури получены изменения геомагнитных порогов, рассчитанных траекторным методом в модельном магнитном поле магнитосферы Ts01 [3] ( $\Delta R$ ). Расчеты проведены для девяти разноширотных станций космических лучей. Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали основную область пороговых жесткостей  $R_c$ , подверженных влиянию геомагнитного поля. Показано, что значения  $\Delta R$  в зависимости от исследуемых параметров во время главной фазы не совпадают с траекторией в восстановительной фазе, что является признаком гистерезиса. Так же проведено исследование вариаций геомагнитной активности  $Dst$ , связанных с изменением параметров гелиосферы во время возмущения магнитосферы и показано, что получаются петли гистерезиса, аналогичные петлям у геомагнитных порогов. За формирование петель гистерезиса ответственна неоднозначная зависимость  $\Delta R$  и  $Dst$  от исследуемых параметров, которые изменяются циклически при развитии магнитосферных токовых систем и последующей их релаксации. Исследованы особенности петель гистерезиса для связи  $\Delta R$  и  $Dst$  с геомагнитными индексами, динамическими и магнитными параметрами СВ для данного возмущения и проведено их сравнение (рис. 1). На рис. 1 представлены кривые зависимости  $\Delta R$  и  $Dst$  от некоторых параметров для станции Москва. Для других станций принципиальной разницы с данными кривыми не наблюдается.

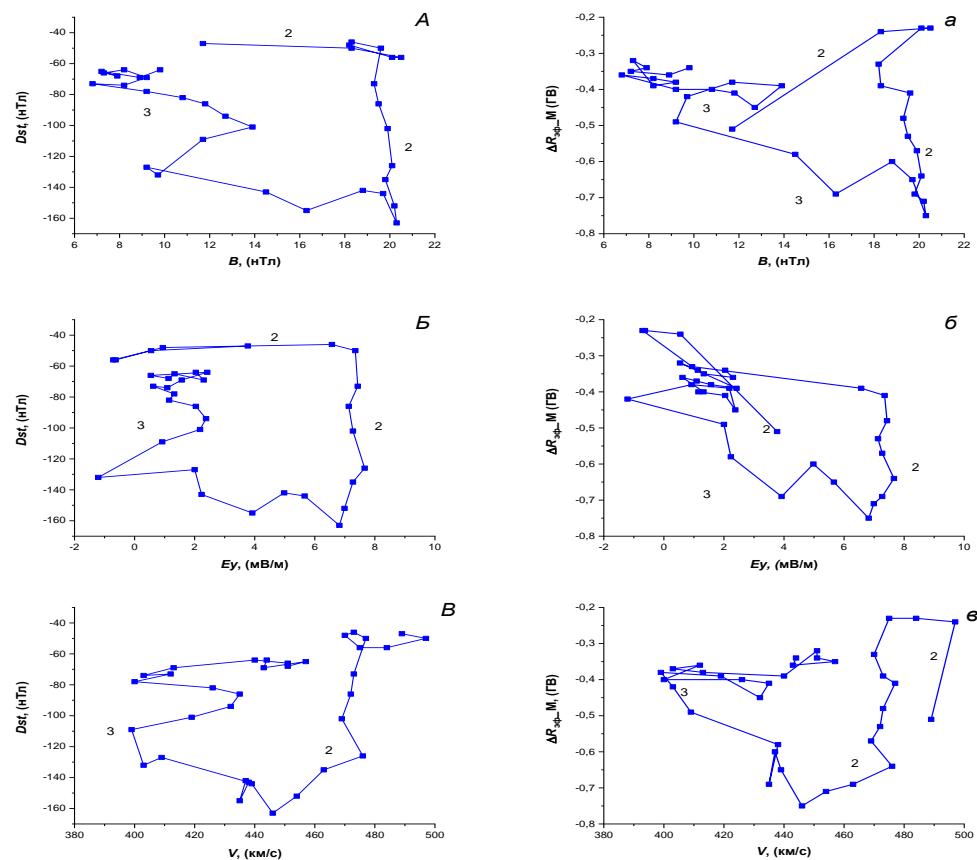


Рисунок 1. Кривые зависимости  $\Delta R$  и  $Dst$  от электромагнитных параметров.

Таким образом получено, что для данной бури петли гистерезиса наблюдаются для зависимости  $\Delta R$  и  $Dst$  почти от всех параметров, хотя и имеют разную площадь. Картина гистерезиса меняется от бури к буре, причины чего требуют дальнейшего исследования.

### Литература

- Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь. //Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 569–577. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0016794019050092>
- Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е. Явления гистерезиса в отклике геомагнитной активности и параметров космических лучей на вариации межпланетной среды во время магнитной бури. //Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, № 3. С. 70–78. <https://doi.org/10.12737/szf-103202408>
- Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. A5. P. 1209. <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>.

## Среднестатистические значения средней энергии потока электронов в полуночном секторе аврорального овала

Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е

*ФГБНУ Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*  
[zhanna@pgia.ru](mailto:zhanna@pgia.ru)

Визуальным свидетельством влияния солнечного ветра на ионосферу Земли являются полярные сияния, которые возникают при проникновении в ионосферу высокозэнергичных частиц. Высыпающиеся частицы инициируют комплекс физико-химических взаимодействий между составляющими ионосферы, что приводит к появлению мелкомасштабных неоднородностей на высотах E и F областей ионосферы, являющихся причиной сбоя средств связи и неполадок в энергосистемах. Поэтому контроль космической погоды может быть проведен в том числе и путем мониторинга и исследования ионосферы наземными и космическими средствами во время авроральных событий. В настоящее время одним из основных экспериментальных средств являются наземные наблюдения с помощью радиофизической и спектрофотометрической аппаратуры.

К основным параметрам потока высыпающихся электронов относятся форма его энергетического спектра, средняя энергия потока и питч-угловое распределение. От данных параметров зависит локализация области высот, в которой протекают процессы, инициированные авроральными электронами. Для определения этой области могут быть использованы высотные профили объемной интенсивности эмиссий, возбуждаемых только за счет прямого удара первичными электронами и электронами ионизационного каскада, рожденными в ионосфере. К таким эмиссиям, регистрируемым в полярных сияниях, относятся полосы Первой отрицательной системы иона молекулярного азота  $1\text{NG N}_2^+$ , наиболее интенсивными из которых являются полосы  $\lambda 391.4$  нм и  $\lambda 427.8$  нм. Высота максимума высотных профилей интенсивностей данных эмиссий соответствует области, в которой происходит максимальная диссиpация энергии потока высыпающихся электронов.

В статье [1] на основе большого материала наблюдений, включающего в себя 57907 событий, было получено статистическое распределение  $h_{\max}$  – высоты максимума объемной интенсивности эмиссии  $\lambda 427.8$  нм в полуночном секторе авроральной зоны. Исследование зависимости  $h_{\max}$  от средней энергии высыпающихся электронов было проведено в рамках нестационарной физико-химической модели авроральной ионосферы [2]. Было показано, что  $h_{\max}$  слабо зависит от формы энергетического спектра и питч-углового распределения электронного потока и определяется в основном средней энергией потока высыпающихся электронов. Используя смоделированную зависимость  $h_{\max}$  от  $E_{\text{ср}}$ , была построено статистическое распределение средней энергии потоков высыпающихся электронов  $E_{\text{ср}}$ ,

ответственных за полярные сияния в ночном секторе авроральной зоны (рис.1). Получено, что максимум среднестатистического распределения средней энергии потоков авроральных электронов, ответственных за полярные сияния в полуночном секторе авроральной зоны локализован в области средних энергий  $E_{cp}$  от 3 до 4.5 кэВ.

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

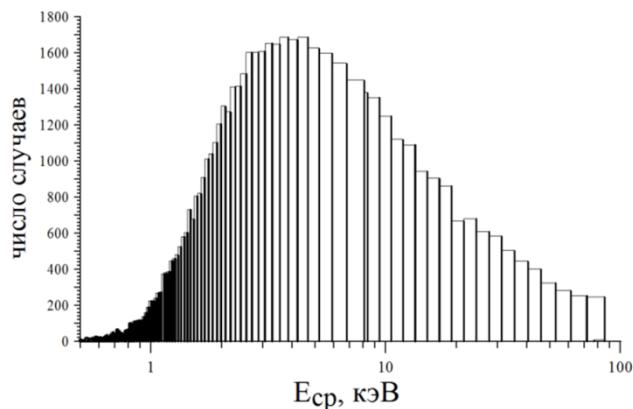


Рис.1. Статистические распределения смоделированной средней энергии потоков высыпающихся электронов, инициирующих полярные сияния в ночном секторе аврорального овала.

## Литература

1. Whiter D.K., Partamies N., Gustavsson B., Kauristie K. The altitude of green OI 557.7 nm and blue N<sub>2</sub><sup>+</sup> 427.8 nm aurora //Ann. Geophys. V. 41. № 1. Р. 1-12. 2023. DOI: 10.5194/angeo-41-1-2023
2. Дацкевич Ж.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И., Козелов Б.В. Физико-химическая модель авроральной ионосферы // Космические исслед. Т. 55. № 2. С. 94–106. 2017. DOI: 10.7868/S0023420617020029.

## Геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ) во время экстремальных явлений космической погоды в 2024 году

Дэспирак И.В.<sup>1</sup>, Сецко П.В.<sup>1</sup>, Любич А.А.<sup>1</sup>, Сахаров Я.А.<sup>1</sup>,  
Селиванов В.Н.<sup>2</sup>

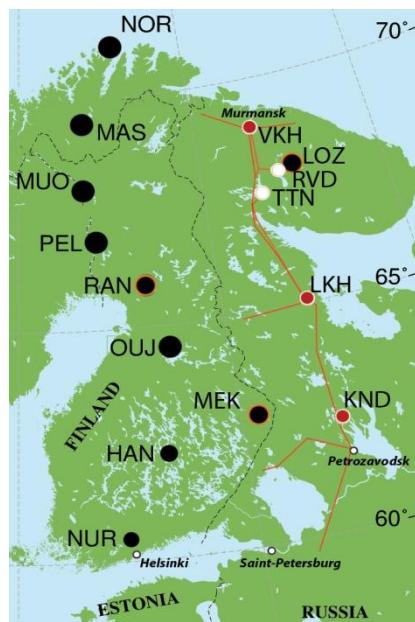
<sup>1</sup>ПГИ, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

[despirak@gmail.com](mailto:despirak@gmail.com)

Известно, что усиление геоиндуцированных токов в электрических сетях и иных технологических системах связано с индукционным возбуждением геоэлектрического поля на земной поверхности при развитии геомагнитных возмущений. ГИТ возникают, когда происходят сильные магнитосферные возмущения, которые связаны с быстрыми изменениями магнитного поля ( $dB/dt$ ) [1]. Причиной ГИТ может быть практически любой ток, возникающий при развитии магнитосферного возмущения, как при развитии импульса внезапного начала бури (SC), резком усилении кольцевого тока, усилении аврорального электроджета, генерации низкочастотных пульсаций. С 2011 года на Кольском полуострове и в Карелии работает система непрерывной регистрации ГИТ на ряде трансформаторных подстанций Карело-Кольской ЛЭП (<http://eurisgic.ru/>), где используется метод регистрации тока в глухозаземленной нейтрали силового трансформатора [2]. В систему регистрации ГИТ входят пять станций: «Выходной», «Ревда», «Титан» (Мурманская область), «Лоухи» и «Кондопога» (Республика Карелия). На рис. 1 представлена подробная схема расположения устройств регистрации ГИТ и магнитных обсерваторий части меридиональной цепочки PPN-NAL сети IMAGE, расположенной на географических (геомагнитных) широтах от  $\sim 51.4^\circ$  до  $\sim 78.9^\circ$  N (от  $\sim 47.1^\circ$  до  $\sim 75.25^\circ$  MLAT). Развитие сильных возмущений в магнитном поле ( $dB/dt$ ) контролировалось по данным сетей магнитометров IMAGE и SuperMAG, планетарное распределение ионосферных электроджетов и продольных электрических токов было исследовано по данным наблюдений на спутниках проекта AMPERE, данные по солнечному ветру и ММП были взяты из базы данных OMNI.

Проведен детальный анализ появления интенсивных ГИТ на Северо-Западе России во время двух экстремальных явлений космической погоды 10-12 мая и 7-12 октября 2024 года. Анализ проводился на основе прямых измерений ГИТ на трёх станциях (Выходной, Лоухи и Кондопога), расположенных на широтах авроральной зоны от  $62^\circ$  до  $69^\circ$  GLAT°.



**Рис. 1.** Схема расположения измерительных устройств: магнитные обсерватории IMAGE отмечены аббревиатурой и черным кружком; пункты регистрации ГИТ показаны аббревиатурой и красным или белым кружком, что означает наличие или отсутствие данных в этот период времени; красный ободок вокруг черного кружка указывает магнитную станцию, ближайшую к станции регистрации ГИТ. Тонкие красные линии схематично показывают расположение Карело-Кольской ЛЭП.

Подтверждено распределение источников ГИТ по секторам MLT: источниками интенсивных ГИТ ( $\sim 15\text{--}30$  А) в вечернем и ночном секторах были суббури и суперсуббури, а источниками ГИТ ( $\sim 15\text{--}30$  А) в утреннем секторе – геомагнитные пульсации Pc5/Pi3. Кроме того, наблюдалось несколько интенсивнейших пиков ГИТ  $\sim 50\text{--}62$  А. Эти пики были обусловлены суперпозицией этих источников и локальных магнитных возмущений, которые были связаны с характерными особенностями соответствующих межпланетных корональных выбросов массы: структурами повышенной плотности, сильными скачками динамического давления, межпланетными ударными волнами и быстрой прямой волной, разворотами Bz-компоненты ММП к северу, переворотами By-компоненты ММП от отрицательных значений к положительным [3].

## Литература

1. Oliveira D.M., Ngwira C.M., Geomagnetically induced currents: Principles. // Braz. J. Phys., V. 47, P. 552–560. 2017.
2. Selivanov V.N. et al., Database of geomagnetically induced currents in the main transmission line “Northern transit” // Solar-Terr. Phys., V. 9, P. 93101, 2023.
3. Desprak et al., Geomagnetically induced currents (GICs) during strong geomagnetic storm on 1-12 May 2024 // Adv. Space Res. 2025.

## Воздействие солнечных вспышек на электромагнитные процессы в системе атмосфера-ионосфера и на сейсмическую активность

Зинкин Д.В., Пилипенко В.А., Сурков В.В.

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

[zinkin.deniz@yandex.ru](mailto:zinkin.deniz@yandex.ru)

Важным аспектом солнечно-земных связей является комплекс явлений, связанных с воздействием ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений солнечных вспышек (СВ) на ионосферу Земли [1]. Эти излучения захватывают все слои ионосферы, и даже стратосферу. Настоящая работа направлена на всесторонний анализ воздействия СВ на параметры нижней и верхней ионосферы, отражающегося на свойствах радиоволн в волноводе Земля-ионосфера. Всплески потоков рентгеновского излучения проявляются в спектральной структуре глобальных шумановских резонансов (ШР). Изменение амплитудно-фазовых характеристик сигналов на сверхдлинноволновых радиотрассах и частот ШР является чувствительным индикатором изменения состояния ионосферы [2]. Для интерпретации отклика нижней ионосферы на СВ нами разработана полуаналитическая модель, которая дает качественное описание явлений, согласующееся с наблюдениями и более сложными численными моделями.

Так же в геофизической литературе активно обсуждается возможность триггерного воздействия солнечной активности и связанных с ней возмущений космической погоды на сейсмичность Земли [3,4]. Нами предпринята попытка проверить идею о СВ и межпланетных ударных волнах как триггере планетарной сейсмической активности. Методом наложенных эпох, с учетом специфики возмущений, рассмотрена статистика землетрясений разных классов на освещенной стороне Земли до и после СВ и межпланетных ударных волн 2010–2020 гг. Физически корректный анализ не показывает статистически значимых изменений сейсмичности. Работа поддержана грантом РНФ № 25-47-01004.

### Литература

1. Лысенко А.Л. и др. Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 8. – С. 878-894.
2. Surkov V.V. The effect of X-ray radiation from a solar flare on the frequencies of Schumann resonances //J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2025. C. 106537.
3. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана, Вулканология и Сейсмология // 1999. №4-5. С. 152-160.
4. Новиков В.А., Сорокин В.М. Электромагнитные триггерные эффекты в системе "ионосфера-атмосфера-литосфера" и их возможное использование для краткосрочного прогноза землетрясений // Физика Земли. 2024. №5. С. 97-112.

## 2D транспортное уравнение галактических космических лучей как следствие 3D уравнения

Калинин М.С., Крайнев М.Б.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия  
[kalininms@lebedev.ru](mailto:kalininms@lebedev.ru)

В докладе приводятся результаты анализа 3D транспортного уравнения галактических космических лучей (ГКЛ) в рамках общепринятых современных моделей гелиосферы. Путём представления 3D решения в виде суммы  $\mathcal{U} = U(r, \theta, p, t) + u(r, \theta, \phi, p, t)$ , где  $\mathcal{U}$  – решение полного трёхмерного по пространственным координатам уравнения,  $U$  – его среднее по долготе значение,  $u$  – трёхмерная добавка к осесимметричному значению, сформулировано в общем виде 2D уравнение. Показывается, что в простейшем случае квазистационарного уравнения, обычно применяемого для описания интенсивности галактических космических лучей вблизи минимумов солнечной активности, когда от долготы зависит только дрейфовый коэффициент, полученное осесимметричное уравнение не сводится к априорному 2D уравнению, в котором долготная составляющая скорости дрейфа заряженных частиц выпадает из рассмотрения. Результат редукции приводит к 2D уравнению, в котором дрейфовый коэффициент приобретает множитель  $F$ ,  $-1 \leq F \leq 1$ , имеющий смысл среднего по долготе значения знаковой функции, и зависящий от широты. Кроме того, в уравнении появляется дополнительное слагаемое, учитывающее вклад трёхмерности исходного уравнения и имеющий форму источника.

Использование условий баланса диффузационно – дрейфовых потоков на гелиосферном токовом слое (ГТС) и локальной симметрии градиентов функции распределения (ФР) на ГТС, позволяет замкнуть 2D уравнение, выразив средние по секторам значения  $\nabla u$  через  $\nabla U$ .

Методика решения задачи позволяет в секторной зоне в явном виде выразить градиенты решения 3D уравнения через градиенты осесимметричного решения  $\nabla U$ . При этом предельные значения выражений

$$f_\theta^- = (1/\pi) \int_{\phi_1}^{\phi_2} \nabla_\theta u d\phi, \quad f_\theta^+ = (1/\pi) \int_{\phi_2}^{\phi_3 = 2\pi + \phi_1} \nabla_\theta u d\phi \quad (1)$$

– средних по долготе значений компоненты градиента, играющего ключевую роль в редуцированном 2D уравнении, конечны, – как на границах секторной зоны (на «горбах» ГТС), так и на гелиоэкваторе.

Трёхмерная вариация  $u(r, \theta, \phi)$  в рамках данного подхода не может быть получена аналитически (но может быть получена численным решением),

однако свёртки по секторам с разным знаком ГМП могут быть выражены через известные функции  $f_\theta^+$  и  $f_\theta^-$ .

Доклад является развитием результатов работы [1], в которой авторы придерживались трактовки работы [2] (скорость дрейфа сингулярна на ГТС), а численные расчёты в 3D модели, для сравнения с 2D подходом, делались согласно, например, работы [3] (скорость дрейфа вдоль ГТС конечна и распределена в слое  $\pm 2R_L$  вблизи ГТС,  $R_L$  – ларморовский радиус).

### Литература

- [1] Калинин М.С., Крайнев М.Б. 3D и 2D транспортные уравнения галактических космических лучей в современных моделях гелиосферы // Космические исследования. Т.?. Вып. 6. 2025.
- [2] Kóta J. and Jokipii J. R. Effects of drift on the transport of cosmic rays VI. A three-dimensional model including diffusion // ApJ. 1983. V. 265. P. 573-581.
- [3] Burger R.A. Modeling drift along the heliospheric wavy neutral sheet // ApJ. 2012. 760:60 (5pp). doi:[10.1088/0004-637X/760/1/60](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/60)

## Моделирование эффекта мощного неуниполярного электрического поля в высокоширотной гелиосфере

Кислов Р.А., Кузнецов В.Д.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкина РАН (ИЗМИРАН), Троицк, Москва, Россия  
[kr-rk@bk.ru](mailto:kr-rk@bk.ru)

Прямые измерения электрического поля в солнечном ветре сопряжены со значительными трудностями и поэтому его часто определяют из уравнения вмороженности  $\mathbf{E} = -c^{-1}[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$ , что в тех случаях, когда проверка была возможна, согласовывалось с прямыми измерениями [1]. Поскольку в полярной гелиосфере скорость солнечного ветра больше, чем на низких гелиоширотах, величина высокоширотного электрического поля часто оказывается больше, чем низкоширотного, что давно известно. В то же время, сильное электрическое поле может приводить к большой разности потенциалов между различными частями полярной гелиосферы. Поскольку в случае вмороженности линии магнитного поля электрически эквипотенциальны, соответствующие разности потенциалов между линиями магнитного поля должны поддерживаться вблизи Солнца. На низких гелиоширотах электрический потенциал вблизи Солнца поддерживается за счёт униполярного эффекта, вызванного вращением Солнца. Однако, как было показано в работе [2], униполярный эффект недостаточен для объяснения следующих из наблюдений аппарата Ulysses оценок высокоширотного крупномасштабного электрического поля. Таким образом была поставлена задача поиска источников мощного полярного крупномасштабного электрического поля в гелиосфере и, в случае сохранения приближения вмороженности, механизмов поддержания электрического потенциала вблизи Солнца.

В данной работе предложено возможное частичное решение данной задачи. Для этого предложено разбить солнечную атмосферу на две зоны. В первой солнечный ветер ещё не сформировался и преобладает азимутальное движение плазмы (зона в пределах поверхности источника). Во второй зоне солнечный ветер уже сформировался и имеет сверхзвуковую и сферхальфвеновскую скорость (соответствует большим расстояниям от Солнца). Данный подход сам по себе не нов, но обычно в первой зоне магнитное поле считается полоидальным. В настоящей работе учтено возможное малое ненулевое азимутальное магнитное поле вблизи Солнца (1-10% от полоидального по величине), выписаны условия непрерывности плотности тока между двумя областями. Показано, что при выполнении этих условий полярное электрическое поле имеет другую асимптотику по синусу полярного угла по сравнению с общезвестным случаем униполярного эффекта, в котором Солнце рассматривается как вращающаяся сфера без учёта наличия солнечного ветра вдали от неё и без азимутальной компоненты

магнитного поля. В результате электрическое поле в полярной гелиосфере оказывается в несколько раз сильнее, чем в предыдущих моделях и по величине согласуется с оценками по наблюдениям *Ulysses*.

Отдельно рассмотрен случай, в котором проводимости гелиосферы и солнечной атмосферы конечны и отличаются друг от друга. Вычислены поправки к электрическому полю, связанные с конечной проводимостью. Показано, что с их помощью также можно объяснить усиление полярного электрического поля в гелиосфере, однако эффект ненулевого азимутального магнитного поля вблизи Солнца оказывается более существенным для решения поставленной задачи.

### Литература

1. Kellogg, P.J.; Bale, S.; Mozer, F.S.; Horbury, T.S.; Reme, H. *Solar Wind Electric Fields in the Ion Cyclotron Frequency Range* // The Astrophysical Journal Letters. 2006. V. 645. pp. 704–710.
2. Kislov, R.A. *The Stationary Electric Field in the Heliosphere and Its Possible Relation to Current Sheets* // Universe. 2022. V. 8. issue 3. <https://doi.org/10.3390/universe8030152>

## Об интерпретации долготного распределения интенсивности ГКЛ в коротирующих областях взаимодействия разноскоростных потоков солнечного ветра

Крайнев М.Б.<sup>1</sup>, Luo X.<sup>2</sup>, Калинин М.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физический институт РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China*  
[mkrainev46@mail.ru](mailto:mkrainev46@mail.ru)

Основываясь на результатах МГД-моделирования коротирующих областей взаимодействия (КОВ/CIR) разноскоростных потоков солнечного ветра, различные научные группы регулярно проводят моделирование методом стохастических дифференциальных уравнений (СДУ/SDE) долготного распределения интенсивности ГКЛ для различных типов частиц, их энергии, заряда, положения в гелиосфере и коэффициентов диффузии. Однако причины существенной зависимости долготного распределения расчётной интенсивности ГКЛ от перечисленных характеристик до сих пор поняты плохо.

В докладе будут представлены и проанализированы результаты расчетов СДУ для дипольной модели КОВ для кэррингтоновского оборота КО2066 (01-02.2008) с реальной общей полярностью гелиосферного магнитного поля для этого периода ( $A < 0$ ) и противоположной полярностью ( $A > 0$ ). Для некоторых долгот, помимо определения интенсивности, были сохранены и проанализированы траектории псевдочастиц в 4D-пространстве ( $r, \theta, \phi$  и импульс  $p$ ) от их проникновения в гелиосферу до орбиты Земли. Предполагается, что детальное изучение структуры КОВ и траектории псевдочастиц ГКЛ может прояснить причины зависимости интенсивности протонов ГКЛ от долготы, а также различие этой зависимости для других случаев.

## Глобальная гибридная модель магнитосферы Земли: ускорение Ферми

Кропотина Ю. А., Быков А. М.  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия  
[juliett.k@gmail.com](mailto:juliett.k@gmail.com)

С помощью гибридного кинетического кода «Maximus» [1] исследована динамика надтепловых ионов вблизи головной ударной волны Земли. В гибридных кодах на пространственной сетке решается задача о движении бесстолкновительной плазмы в электромагнитном поле. При этом движение ионов рассчитывается кинетически, а движение электронов — в приближении безмассовой нейтрализующей жидкости. Одним из важных аспектов физики бесстолкновительных ударных волн является ускорение Ферми. [2] Согласно работе [3], ускорение Ферми эффективнее всего протекает на квазипротодольных ударных волнах, где угол наклона магнитного поля к нормали менее 45 градусов. Однако этот процесс ранее не моделировался в рамках глобальных кинетических моделей с искривленным фронтом, где частицы могут свободно перемещаться между участками с различным наклоном магнитного поля к нормали.

Задавая в качестве начальных условий обтекание магнитного диполя потоком плазмы с альвеновским числом Маха  $M_a=6$ , мы построили глобальную полноразмерную модель магнитосферы в двумерной геометрии [4]. Моделирование показало формирование ударного фронта с формой, близкой к параболической и размерами, соответствующими характерным размерам головной ударной волны Земли (рис. 1). Локальный угол наклона магнитного поля к нормали к фронту варьировался в зависимости от широты.

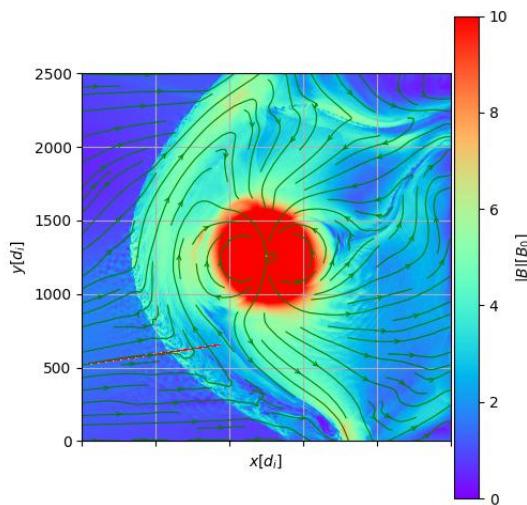


Рис. 1. Смоделированная карта магнитного поля с нанесенными линиями магнитного поля. Красный отрезок показывает линию, вдоль которой строились профили на рис. 2.

В случае криволинейного фронта ионы эффективно ускоряются в областях, где ударная волна локально квазипродольна. Ускоренные частицы диффундируют в область предфронта и формируют предвестник ударной волны, заполненный электромагнитными волнами. Диффузионный характер распространения и ускорения ионов подтверждается их экспоненциальным пространственным распределением за и перед фронтом ударной волны (рис. 2).

Важной особенностью криволинейного фронта является то, что ускоренные ионы распространяются вдоль фронта ударной волны и могут наблюдаться вне области ускорения, т.е. в областях, где ударная волна квазипоперечна. Также инжекция ионов в процесс ускорения может происходить на локально квазипоперечных участках, откуда они затем дрейфуют в область ускорения, приобретая необходимую для инжекции энергию в попутном электрическом поле.

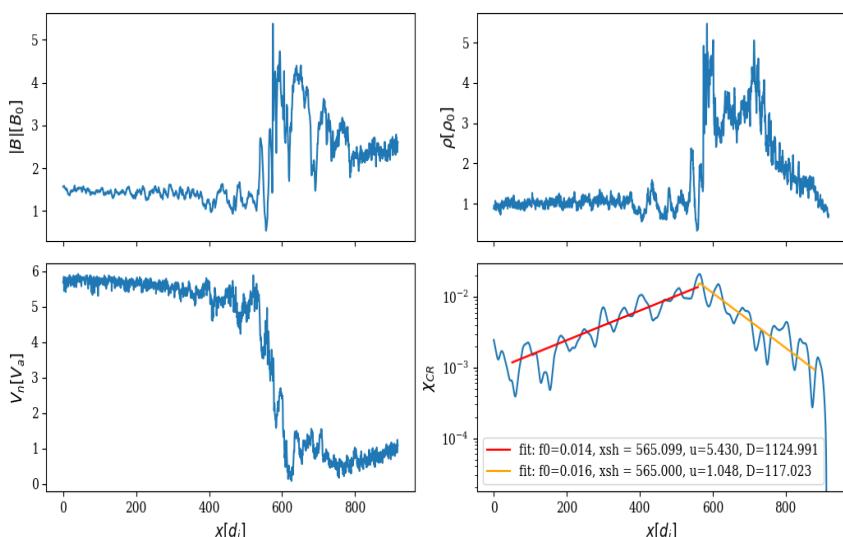


Рис. 2. Изменение вдоль отрезка, отмеченного красным цветом на рис. 1.: магнитного поля (вверху слева), плотности (вверху справа), скорости вдоль нормали к фронту (внизу слева) и концентрации надтепловых частиц (внизу справа). Концентрация надтепловых частиц аппроксимирована экспоненциальными функциями перед и за фронтом ударной волны.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РНФ 25-72-20007). Моделирование осуществлялось с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.*

## Литература

1. Kropotina J. et al. Maximus: a Hybrid Particle-in-Cell Code for Microscopic Modeling of Collisionless Plasmas // Communications in Computer and Information Science. № 965, p. 242–253. 2019.
2. Крымский Г. Ф. Регулярный механизм ускорения заряженных частиц на фронте ударной волны // Докл. АН СССР Т. 234(6) С. 1306-1308. 1977.
3. Caprioli D., Spitkovsky A. Simulations of ion acceleration at non-relativistic shocks: I) acceleration efficiency // Astrophys. J. V. 794. I 1. P. 47
4. N. Omidi, X. et al. Dipolar magnetospheres and their characterization as a function of magnetic moment// Adv. Space Res. V. 33. P.1996. 2004.

## Межпланетные возмущения и высокоэнергичные магнитосферные электроны

Крякунова О.Н.<sup>1</sup>, Сейфуллина Б.Б.<sup>1</sup>, Белов А.В.<sup>2</sup>, Абунин А.А.<sup>2</sup>, Абунина  
М.А.<sup>2</sup>, Шлык Н.С.<sup>2</sup>, Цепакина И.Л.<sup>1</sup>, Николаевский Н.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкина, г. Москва, г. Троицк, Россия

[krolganik@yandex.ru](mailto:krolganik@yandex.ru)

По данным за 35 лет (1987-2021 гг.) измерений потоков магнитосферных электронов с энергией  $>2$  МэВ на геостационарных орбитах, скорости солнечного ветра и геомагнитной активности составлен каталог электронных возрастаний, в которых флюенс электронов превышает  $10^8$  частиц·см $^{-2}$ ·стэр $^{-1}$ ·день $^{-1}$ . Для событий этого каталога рассчитаны средние характеристики электронных возрастаний и параметров межпланетной и околоземной среды: среднее значение флюенса во время электронных возрастаний, средний суммарный флюенс в событиях, средняя продолжительность электронных возрастаний. Максимальные значения суточного флюенса электронов и общего флюенса за весь период возрастания наблюдались во время события 28 июля – 5 августа 2004 г. Средняя продолжительность электронного возрастания составляет 5 дней, а максимальное по длительности возрастание продолжалось 24 дня. По рассчитанным средним значениям флюенса электронов, скорости солнечного ветра и Ар-индекса геомагнитной активности в день электронного возрастания и в предыдущие дни получено типичное поведение этих параметров во время электронного возрастания и перед ним. Рассчитаны средние характеристики электронных возрастаний и параметров межпланетной и околоземной среды перед большими электронными возрастаниями, когда флюенс превышает  $3 \cdot 10^8$ ,  $5 \cdot 10^8$  и  $10^9$  частиц·см $^{-2}$ ·стэр $^{-1}$ ·день $^{-1}$ . Перед большими возрастаниями магнитосферных электронов наблюдаются значительные межпланетные и магнитосферные возмущения, и их мощность растет с увеличением порога флюенса.

Рассчитаны коэффициенты корреляции между суточным флюенсом электронов, скоростью солнечного ветра и Ар-индексом геомагнитной активности с различными временами запаздывания, а также между флюенсами электронов, рассчитанными в соседние дни. В поведении флюенса высокоэнергичных магнитосферных электронов существует значительная инерционность. Получено, что флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов слабо связан с уровнем геомагнитной активности в тот же день, но коррелирует с Ар-индексом геомагнитной активности, наблюдавшимся на 2-3 дня ранее. Суточный флюенс высокоэнергичных магнитосферных электронов достаточно тесно связан со скоростью солнечного ветра, особенно со скоростью, измеренной на 2 дня ранее. Расчеты коэффициентов корреляции показывают, что в целом в 22-24 циклах солнечной активности более высокие коэффициенты корреляции

сугубого флюенса электронов со скоростью солнечного ветра и Ар-индексом геомагнитной активности наблюдаются на фазах спада и минимума солнечной активности. [1,2].

Для событий каталога электронных возрастаний определены возмущения межпланетного пространства, после которых начинаются возрастания высокоэнергичных электронов. Для этих межпланетных возмущений определены их солнечные источники. Получено, что более, чем в половине событий электронных возрастаний солнечным источником межпланетных возмущений перед возрастаниями электронов являются высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр. В 97.2% событий высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр являлись одним из солнечных источников возмущений, в формировании которых также участвовали корональные выбросы масс после солнечных вспышек и исчезновений волокон. Получено усредненное поведение потока электронов, скорости солнечного ветра и геомагнитной активности для событий, связанных с приходом к Земле высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр. [3].

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

### Литература

1. Kryakunova O.N. et al. Average characteristics of high-energy magnetospheric electron flux enhancements and the parameters of near-Earth and interplanetary medium in 1987-2021 // MNRAS. V. 516. I. 4. P. 4782-4791. 2022
2. Kryakunova O.N. et al. A statistical relationship between the fluence of magnetospheric relativistic electrons and interplanetary and geomagnetic characteristics // Adv. in Space Res. V. 72, I. 12. P. 5391-5398. 2023
3. Kryakunova O.N. et al. On solar sources of interplanetary disturbances leading to high-energy magnetospheric electron enhancements in geostationary orbit // MNRAS. V. 541. I. 2. P. 911-918. 2025

## Анализ вариаций потока космических лучей в периоды геомагнитных бурь 2022-2025 гг.

Мандрикова Б.С.<sup>1</sup>, Мандрикова О.В.<sup>1</sup>, Сулейманова Р.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИКИР ДВО РАН, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, Россия

<sup>2</sup>КрАО РАН, пгт. Научный, Республика Крым, Россия

[555bs5@mail.ru](mailto:555bs5@mail.ru)

Изучение вариаций космических лучей представляет интерес, как для исследования астрофизических явлений и процессов, так и для задач космической погоды. Космические лучи являются неотъемлемой частью совокупности процессов, которые происходят в верхних слоях атмосферы и в космическом пространстве рядом с Землей. Известно, анализ вариаций потока космических лучей позволяет прогнозировать магнитные бури, полярные сияния, исследовать взаимосвязи между явлениями космической погоды, геомагнитным полем и атмосферой Земли [1]. Ввиду развития информационно-телекоммуникационных технологий, задачи создания прикладных средств, выполняющих анализ вариаций космических лучей в близком к реальному времени режиме и с приемлемой точностью, являются актуальными [2]. Их успешное решение закладывает основы для возможностей прогноза космической погоды и предотвращения последствий её негативного влияния на современную инфраструктуру [2, 3].

В докладе представлены результаты применения разработанного авторами метода анализа вариаций потока космических лучей и обнаружения аномальных изменений. Метод позволяет подавить коррелированный шум (при отношении сигнал/шум $\geq 1.2$ ) и получить наилучший ответ, согласно принятым критериям, в темпе поступления данных в систему обработки [4]. Метод основан на построенных когнитивных правилах, являющихся синтезом теории рисков и вейвлет-преобразования. В работе использовались данные высокоширотных наземных нейтронных мониторов [nmdb.eu], выполнен анализ периодов геомагнитных бурь 13 марта 2022 г., 23 марта 2023 г., 23 апреля 2023 г., 10 мая 2024 г., 12 августа 2024 г., 28 августа 2024 г., 1 января 2025 г. и 1 июня 2025 г. Применение метода позволило за несколько часов до регистрации Форбуш-понижений и геомагнитных бурь [kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov] обнаружить аномальные изменения в вариациях потока космических лучей и оценить их интенсивность. Полученные характеристики интенсивности потока космических лучей имели сильную корреляцию с данными геомагнитной активности, как накануне, так и во время развития анализируемых магнитных бурь.

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

### Литература

1. Дорман Л.И. Вариации космических лучей и космическая погода // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 519.

2. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. 2014. № 3 (6). С. 3-13.
3. Козлов В.И. Прогноз экстремальных событий космической погоды по флуктуациям космических лучей // Космические исследования. 2022. Т. 60. № 2. С. 105-115.
4. Mandrikova O.V., Mandrikova B.S., Stepanenko A.A. Analysis of data on cosmic ray variations during periods of interplanetary disturbances and geomagnetic storms // Acta Astrophysica Taurica. 2025. Т. 6. № 1. С. 35-39.

## Какие регионы РФ могут быть подвержены воздействию экстремальных магнитных бурь?

Пилипенко В.А.<sup>1,2</sup>, Савельева Н.В.<sup>1,2</sup>, Ягодкина О.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли РАН, Москва, РФ

<sup>2</sup> Геофизический Центр РАН, Москва, РФ

<sup>3</sup> Полярный Геофизический Институт, Анадырь, РФ

[pilipenko\\_va@mail.ru](mailto:pilipenko_va@mail.ru)

Если рассматривать авроральный овал как индикатор положения электроджета, то информация о положении экваториальной границы овала позволяет предсказать, на каких широтах будут наблюдаться наиболее интенсивные вариации геомагнитного поля и где возникнет высокий уровень ионосферной турбулентности, приводящий к сбоям в работе глобальных навигационных спутниковых систем. Эти вариации геомагнитного поля являются источником геоиндуцированных токов (ГИТ), представляющих угрозу стабильной работе электроэнергетических систем [1]. Поэтому космическое сообщество прикладывает немало усилий для построения моделей, позволяющих предсказать положение овала при заданном уровне геомагнитной возмущенности.

Для оценки возможной минимальной широты овала широко используются модели Старкова-93 (C93), Auroral Precipitation Model (APM), и Ovation-prime (OP) [2]. Однако базы данных, на основании которых строились эти модели, не включали редкие экстремальные магнитные бури ( $|Dst| > 400$  нТл). В качестве источника информации о широтах сияний во время экстремальных бурь в работе [3] (L2025) изучены опубликованные свидетельства наблюдателей во время экстремальных событий и на основе этих визуальных наблюдений построена статистическая модель минимальной широты экваториальной границы дискретных сияний. Несмотря на очевидную ограниченность такой модели, она является единственной попыткой построить количественную модель положения овала при экстремальных бурях. Экстраполяция зависимости широты экваториальной границы овала от интенсивности бури моделей C93 и APM при экстремальных бурях ( $|Dst| > 400$  нТл) расходятся с предсказаниями модели L2025.

Для верификации модели OP, управляемой параметрами межпланетной среды, рассмотрена динамика аврорального овала во время магнитной бури 10-11 мая 2024 г. Поскольку наибольшие возмущения геомагнитного поля и смещение аврорального овала и электроджета к югу во время бури связаны со спонтанно возникающими суббурями, возникновение которых модель OP предсказать не может, то эта модель дает сильно усредненное положение овала и заметно недооценивает его возможное смещение к югу.

Для оценки возможных рисков от ГИТ мы по моделям C93, APM, APM\_GEO построили карты для территории РФ положения экваториальных границ овала при различной геомагнитной активности, характеризуемой Dst и AL индексами. Поскольку интенсивные суббури во время бурь приводят к значительному экваториальному смещению границы овала, то с учетом суммарного эффекта бурь и суббурь все крупные энергетические сети РФ могут быть подвержены влиянию ГИТ не только при экстремальных, но и при сильных магнитных бурях. Работа поддержана грантом РНФ [21-77-30010-П](#).

### Литература

1. Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Belakhovsky V.B., Sakharov Ya.A., Selivanov V.V., What should we know to predict geomagnetically induced currents in power transmission lines? // Russian Journal of Earth Sciences, 2024, 24, ES6006, <https://doi.org/10.2205/2024es000954>
2. Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmospheric Solar-Terr. Physics. 2013. Vol. 102. P. 157–171. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.007.
3. Love J.J. Mann I.R., Qvick T., Mursula K. What is the lowest latitude of discrete aurorae during superstorms? // Space Weather. 2025. 23, e2024SW004286. <https://doi.org/10.1029/2024SW004286>.

## Модель переноса энергии МГД волн через ионосферу к земной поверхности

Позднякова Д.Д.<sup>1,2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>1</sup>, Федоров Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

[d\\_pozdnyakova@live.ru](mailto:d_pozdnyakova@live.ru)

Кратковременные квазипериодические пульсации  $Pi2$  диапазона (периоды ~1–3 мин) являются индикаторами взрывного высвобождения энергии во время начала суббури и сопровождают многие динамические процессы в ночной магнитосфере [1]. Но одинаков ли физический механизм возбуждения  $Pi2$  пульсаций на для различных широт? Для ответа на этот вопрос нами исследованы сигналы, зарегистрированные одновременно низкоорбитальными спутниками сети *SWARM* и магнитометрами сети *MAGDAS*, расположенными вдоль единого геомагнитного меридиана на Дальнем Востоке как на приэкваториальных, так и на высокоширотных станциях.

На авроральных широтах  $Pi2$  пульсации появляются синхронно с резким началом магнитной бухты и уярчением полярных сияний, что свидетельствует о связи механизма их возбуждения с усилением продольных токов между ночной магнитосферой и ионосферой. Наземный отклик на высоких широтах наиболее интенсивный и предположительно обусловлен распространением возмущений альвеновского типа из дальнего хвоста в магнитосферу. При этом наблюдается пространственная структура с кажущимся распространением от низких широт к высоким. Это обусловлено характерной особенностью распространения волнового альвеновского пучка – рефракцией, то есть искажением фронта возмущения по мере распространения. Вдоль более коротких силовых линий возмущение доходит до ионосферы быстрее, чем вдоль более длинных на более высоких широтах. Сравнение спутниковых и наземных наблюдений для высоких широт может показать, что всплеск плотности продольных токов совпадет в пространстве с максимумом широтного распределения мощности  $Pi2$  колебаний.

На низких же широтах отклик на динамические явления в ночной магнитосфере часто связывают с резонансным возбуждением объемных магнитозвуковых колебаний плазмосферы или виртуальным плазмосферным резонансом [2, 3]. В данном случае  $Pi2$  пульсации в верхней ионосфере и на Земле практически идентичны по амплитуде и фазе, и предполагается, что они обусловлены распространением быстрой магнитозвуковой (БМЗ) моды, которая представляет собой движение сжатия магнитного поля и плазмы. Широтное распределение амплитуды БМЗ волны в магнитосфере определяется ее дифракцией на сфере с плотной плазмой (внутренняя плазмосфера).

Для теоретического исследования была построена модель прохождения альвеновской и БМЗ мод через ионосферу к земной поверхности, основанная на громоздких аналитических соотношениях, описывающих взаимодействие магнитогидродинамических (МГД) волн с плоскослоистой системой: верхняя ионосфера – «тонкая» ионосфера – атмосфера – Земля [1]. Модель позволяет выделить влияние отдельных факторов на взаимодействие двух типов волн с ионосферой, а также получить более наглядное представление о физике процесса путем расчета пространственной структуры магнитного поля, образующегося в верхней ионосфере, и наземного отклика.

Сравнение результатов наблюдений с моделью взаимодействия МГД волн с ионосферой подтверждает, что механизмы низкоширотных и высокоширотных сигналов  $Pi2$  различны.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10012.

### Литература

1. Alperovich L.S., Fedorov E.N. *Hydromagnetic Waves in the Magnetosphere and the Ionosphere*. Dordrecht: Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-1-4020-6637-5.
2. Yeoman T., Orr D. Phase and spectral power of mid-latitude  $Pi2$  pulsations: evidence for a plasmaspheric cavity resonance // *Planetary and Space Science*. V. 37. I. 11. P. 1367-1383. 1989. DOI: 10.1016/0032-0633(89)90107-4.
3. Hertinger M.D., Zou S., Takahashi K. et al. Nightside  $Pi2$  wave properties during an extended period with stable plasmapause location and variable geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. DOI: 10.1002/2017JA024708.

## Восстановление спектра галактических космических лучей по данным нейтронных мониторов в приближении силового поля и методами машинного обучения

Сирук С.А.<sup>1</sup>, Алексеев В.В.<sup>2</sup>, Кузьминов В.А.<sup>1</sup>, Майоров А.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия

[sstepana001@mail.ru](mailto:sstepana001@mail.ru)

Проходя через гелиосферу, галактические космические лучи (ГКЛ) взаимодействуют с магнитными полями и плазмой солнечно ветра, характеристики которых меняются с течением времени, в результате чего наблюдаемый в окрестности Земли дифференциальный энергетический спектр ГКЛ испытывает вариации на разных временных масштабах. Измерения потоков ГКЛ в окрестности Земли обычно осуществляются с помощью спутниковых и наземных установок. Современные космические эксперименты, такие как ПАМЕЛА и AMS-02 позволяют напрямую измерить спектр ГКЛ, однако результаты измерений становятся доступны лишь спустя длительное время. В свою очередь, наземные детекторы, типичными представителями которых являются нейтронные мониторы (НМ), предоставляют данные практически в реальном времени, но измеряют лишь интегральный поток вторичных частиц, рожденных в результате взаимодействия ГКЛ с атмосферой.

В настоящее время исследование вариаций потока ГКЛ по данным нейтронных мониторов зачастую ведется с использованием концепций функции отклика [1] и функции связи [2] НМ. Недостатки этих подходов заключаются в том, что они ограничены заранее выбранной параметризацией энергетического спектра ГКЛ или вариаций их потока, а также требуют точного знания самих функций отклика/связи детекторов, в которые, в силу неидеальности детекторов, приходится вводить эмпирические поправочные коэффициенты. Выходом в данной ситуации может быть восстановление дифференциального энергетического спектра ГКЛ в каждый момент времени методами машинного обучения.

Работа посвящена восстановлению суточных энергетических спектров галактических протонов и ядер гелия по данным мировой НМ с помощью функции отклика и искусственных нейронных сетей, а также сравнению полученных результатов между собой и с результатами прямых измерений.

В первом подходе использовалась модель функции отклика, представленная в работе [1], а для параметризации спектра ГКЛ применялось приближение силового поля (FFA) [3]. В рамках второго подхода применялись полносвязная нейронная сеть (MLP) и сверточная нейронная сеть (CNN), обученные на суточных потоках частиц, измеренных в эксперименте AMS-02 в 2011–2019 гг. Показано, что на данном отрезке точность восстановления спектра методами машинного обучения

оказывается примерно на порядок выше таковой для метода, основанного на использовании приближения силового поля.

Описанные подходы были использованы для восстановление суточных спектров ГКЛ в 2006–2011 гг. и 2019–2022 гг., для которых доступны данные PAMELA и AMS-02 с временным разрешением порядка одного месяца. Результаты представлены на рис. 1. Значения, предсказанные нейронными сетями, практически всегда лежат в пределах погрешности результатов прямых измерений. Можно заключить, что методы машинного обучения позволяют добиться лучшей, по сравнению с более традиционными подходами, точности восстановления потока ГКЛ по данным НМ.

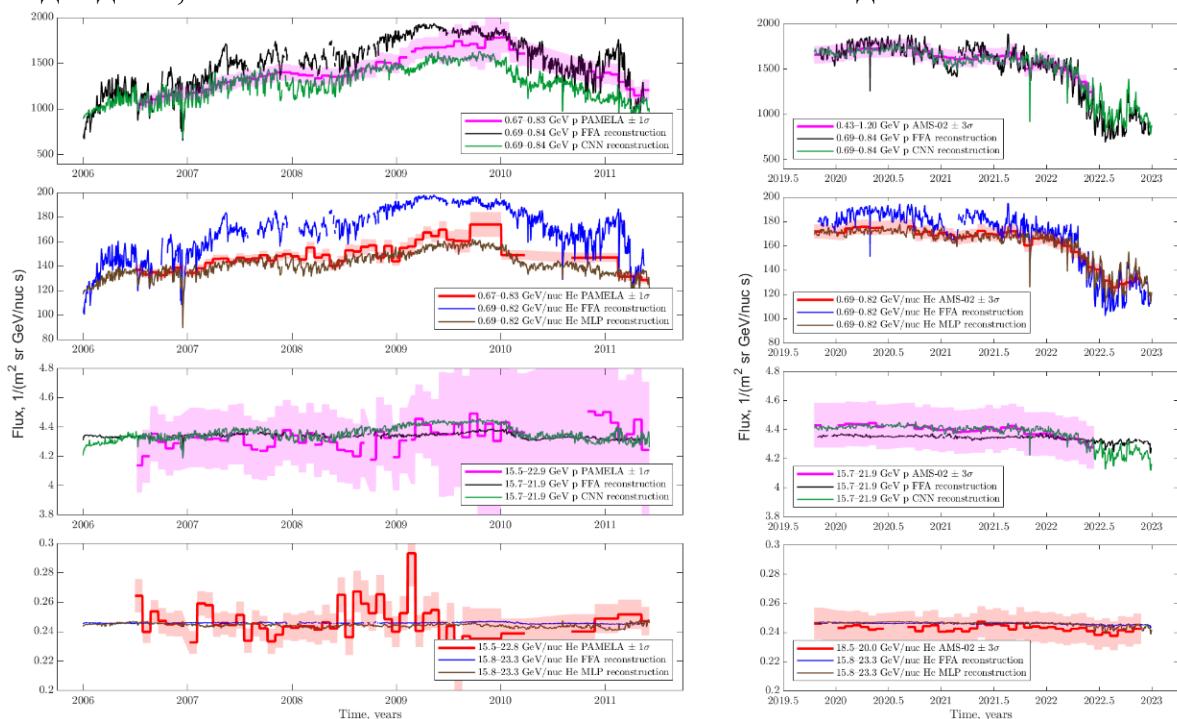


Рис.1 Сравнение временных рядов потоков ГКЛ, восстановленных по данным нейтронных мониторов, с результатами прямых измерений в спутниковых экспериментах.

### Литература

1. Mishev A.L. et al. Updated Neutron-Monitor Yield Function: Bridging Between In Situ and Ground-Based Cosmic Ray Measurements // Journal of Geophysical Research (Space Physics). V. 125. I. 2. e27433. 2020.
2. Belov A.V. et al. Global Survey Method for the World Network of Neutron Monitors // Geomagnetism and Aeronomy. V. 58. I. 3. P. 356–372. 2018.
3. Gleeson L.J., Axford W.I. Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays // The Astrophysical Journal. V. 154. P. 1011. 1968.

## Существует ли единый признак активных областей, вызвавших геомагнитные штормы?

Сулейманова Р.А.<sup>1</sup>, Мандрикова Б.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КРАО РАН, Научный, Россия

<sup>2</sup>ИКИР ДВО РАН, Паратунка, Россия

[bictr97@gmail.com](mailto:bictr97@gmail.com)

Считается общепринятым, что геомагнитные штормы возникают вследствие прихода высокоскоростного потока частиц солнечного ветра, связанного со вспышкой и последующим корональным выбросом масс (КВМ). В свою очередь, вспышки, как правило, связаны с магнитными полями активных областей (АО) на Солнце. Так как геомагнитные штормы обладают некоторым влиянием на магнитное поле Земли, и, как следствие, на жизнь человека, интерес к космической погоде растет.

Нами были рассмотрены шесть геоштормов и связанные с ними АО. Так, мы постарались ответить на вопрос, существует ли особая характеристика, прослеживающаяся в активных областях, вызвавших геомагнитные штормы.

Были рассмотрены шесть геомагнитных штормов:

1. 13.03.2022
2. 23.03.2023
3. 23.04.2023
4. 10.05.2024
5. 12.08.2024
6. 28.08.2024

Для каждого случая была определена АО, связанная со вспышкой, породившей шторм. Для поиска были использованы данные сайта ИЗМИРАН (FEID, <https://tools.izmiran.ru/w/feid>) и данные The Space Weather Database Of Notifications, Knowledge, Information (DONKI, <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/>), которая является частью Community Coordinated Modeling Center (CCMC, <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/>).

Для каждой найденой АО был совершен поиск предшествующей и/или последующей АО через просмотр предыдущего и/или последующего оборота Солнца. В результате было найдено еще одно событие 22.07.2023. Для всех АО был найден вспышечный индекс, FI [1], определен магнитоморфологический класс, ММК [2,3], а также количество вызванных КВМ по данным DONKI. Для АО, связанных с геоштормами, были определены дата и класс вспышки по данным FEID и DONKI, вследствие которой произошел геомагнитный шторм, а также Dst-индекс по данным WDC Kyoto ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html)).

Из полученных результатов следует:

- Рекуррентность активной области наблюдалась в 5 случаях из 6.

- Геомагнитные штормы возникали как на первом обороте (3 случая), так и на втором обороте (4 случая).
- Изначальной АО для рекуррентных случаев была АО ММК класса В2 или В3, для нерекуррентного случая – АО класса А1.
- Источником геоштормов были вспышки классов С, М, Х.
- АО-источники геоштормов, были как компактными (4 случая), так и являлись остатками АО (3 случая).
- АО, которые были источником геошторма, принадлежали ММК классу А1 (2); В1 (1); В2 (1); В3 (3).
- Связи Dst-индекса и вспышечного индекса не обнаружено (см. Таблицу 1).
- Возможна некоторая связь между Dst-индексом и классом ММК (см. Таблицу 1).

Таблица 1. Сводная таблица с параметрами Dst-индекса геомагнитного шторма, а также ММК класса и вспышечного индекса АО-источника.

Дата геошторма	Dst-индекс	ММК	FI
13.03.2022	-85	A1	37.8
27.02.2023	-132	B2	25.2
23.03.2023	-163	B1	0.33
23.04.2023	-209	B3	1.7
10.05.2024	-409	B3	273.6
12.08.2024	-188	B3	23.9
28.08.2024	-75	A1	0.62

Таким образом, можно сделать вывод, что нет единого признака, присущего всем активным областям, вызвавших геомагнитные штормы. Интересно, тем не менее, отметить, что группы классов В2 и В3 способны создать очень сложную долгоживущую структуру поля в короне с потенциалом для запуска геоэффективного КВМ на следующих оборотах, даже на фоне слабого распадающегося поля в фотосфере. Кроме того, возможно существование некоторой связи между Dst-индексом, характеризующего интенсивность геошторма, и ММК классом АО на момент вспышки: чем сложнее магнитная структура АО, тем выше абсолютная величина Dst-индекса.

### Литература

1. Abramenko V.I. Relationship between magnetic power spectrum and flare productivity in solar active regions // ApJ. V. 629. P. 1141-1149. 2005
2. Abramenko V.I. Signature of the turbulent component of the solar dynamo on active region scales and its association with flaring activity// MNRAS. V. 507. I.3. P. 3698-3706. 2021
3. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. Contributions from different-type active regions into the total solar unsigned magnetic flux// G&A. V. 58. P. 1159–1169. 2018

## Проблема открытого магнитного потока Солнца и квант магнитного потока

Струминский А.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия

[astrum@cosmos.ru](mailto:astrum@cosmos.ru)

Магнитный поток  $\Phi$  квантован. Так как, если бы  $\Phi/2\pi$  не было бы целым, то нельзя было бы однозначно определить волновую функцию электрона и корректно сформулировать квантовую задачу [1]. Квант магнитного потока равен  $\Phi_0 = hc/e = 4 \cdot 10^{-7}$  Гс·см<sup>2</sup> (при электронной проводимости), тогда  $\Phi = \Phi_0 \cdot N = \Phi_0 \cdot n_s \cdot S = B \cdot S$ , где  $n_s$  — поверхностная плотность квантов магнитного потока,  $S$  — площадь, а  $B$  — магнитное поле. Зная магнитный поток на поверхности предполагаемого источника солнечного ветра (СВ) можно делать оценки необходимых величин  $n_s$ ,  $S$ , и  $B$  или наоборот, по наблюдаемым  $n_s$  и  $B$  в гелиосфере на расстоянии  $R$  от предполагаемого источника, оценить  $\Phi$  при  $S = 4\pi R^2$ . В докладе предполагается сравнить оценки магнитного потока, выносимого СВ, сделанные по наблюдаемым величинам  $n_s$  и  $B_R$ :  $\Phi_n = \Phi_0 \cdot n_s \cdot S$  и  $\Phi_B = B_R \cdot S$ .

Таким образом, понятие кванта магнитного потока будет применяться для анализа проблемы «открытого магнитного потока» Солнца (OSF – open solar flux), которая сводится к тому, что типичные наблюдательные карты магнитного поля недооценивают магнитный поток Солнца или значительная доля магнитного потока  $\Phi_B = B_R \cdot S$ , наблюдаемого в СВ, должна рождаться вне корональных дыр (областей пониженной яркости в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах) [2]. Также, часть магнитного потока  $\Phi_B$  может быть связана с замкнутыми магнитными структурами СВ различного пространственного масштаба.

Физический механизм, который нагревает СВ и управляет им в источнике, согласно [3] представляет собой магнитное пересоединение, видимое как мелкомасштабные джеты. Дискретная природа этих джетов приводит к прерывистым потокам вещества из короны, которые по мере распространения от Солнца становятся однородными и формируют СВ. Возможные варианты геометрии магнитного пересоединения, которые могут приводить к уменьшению OSF в гелиосфере обсуждаются в [4].

Радиальная эволюция плотности и магнитного поля в гелиосфере на расстояниях менее 1 а.е. является объектом интенсивных исследований не один десяток лет. Авторы работы [5] разработали модель радиальной плотности и магнитного поля вблизи плоскости эклиптики над спокойными экваториальными областями. При этом магнитное поле представлялось как суперпозиция дипольного и квадрупольного магнитного поля спокойного Солнца, спадающих как  $R^2$  и также гелиосферного токового слоя, т.е. без учета возможного пересоединения и образования замкнутых структур СВ.

### Литература

7. Смилга А.В. Квантовая теория поля на обед // Изд. МЦНМО. Москва: 2019. - 432 стр.
8. Linker J. A., Caplan R. M., Downs C., et al., (2017), The Open Flux Problem, *Astrophys. J.*, 848:70 (11pp), 2017 October 10 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8a70>
9. Raouafi N.E., Stenborg G., Seaton D. B. et al. (2023) Magnetic Reconnection as the Driver of the Solar Wind, *Astrophys. J.* 945:28 (9pp), 2023 March 1 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/acaf6>
10. Lockwood, M., M. J. Owens, S. M. Imber, et al., (2017), Coronal and heliospheric magnetic flux circulation and its relation to open solar flux evolution, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 122, 5870–5894, doi:10.1002/2016JA023644
11. Mann G., Warmuth A., Vocks C., and Rouillard A. P. (2023) A heliospheric density and magnetic field model, *A&A*, 679, A64 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245050>

## Низкоширотные корональные дыры и скорость солнечного ветра

Тлатов А.Г.<sup>1,2</sup>, Березин И.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

<sup>2</sup>КалмГУ, Элиста, Россия

[tlatov@mail.ru](mailto:tlatov@mail.ru)

Представлен новый ряд данных корональных дыр (КД), полученный при обработке ежедневных наблюдений SOHO/EIT в линии FeXII 195Å за период 1996-2024 гг. Для выделения КД на изображениях Солнца в рентгеновском диапазоне применена процедура нормализации интенсивности. Для этого используются информации об уровне интенсивности “спокойного” Солнца и интенсивности короны над солнечным лимбом. Далее данные интенсивности переводятся в логарифмическую шкалу. Для выделения КД применен метод “выращивания” из зародышей минимальной интенсивности. Контуры КД накладывались на карты магнитных полей.

Основным критерием достоверности ряда для нас являлось соответствие индекса площади корональных дыр со скоростью солнечного ветра. Выполнен сравнительный анализ существующих рядов КД для сопоставления с вариациями скорости солнечного ветра вблизи Земли. Показано, что ряды данных КД, созданные на Кисловодской Горной астрономической станции, имеют наилучшее соответствие со скоростью солнечного ветра.

## Особенности радиоизлучения ударных фронтов в короне и межпланетном пространстве

Чернов Г.П.

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

В проблеме продолжения корональных всплесков II типа в межпланетное пространство остается еще много неясного. Почему даже в самых сильных явлениях (Х 9-20) не наблюдались всплески II типа с числами Маха 3-5? Почему обычно взрывной ударный фронт догоняет КВМ (а не наоборот), после взаимодействия с которым всплеск II типа не проходит в межпланетное пространство. Скорость ударного фронта не зависит от мощности вспышки. На примере мощного геоэффективного явления (вспышке Бастиилии (14.07.2000, балл вспышки Х 5.7), показанном на Рис. 1, можно видеть, что начала четырех всплесков II типа не совпадали как с моментом максимального энерговыделения, так и по месту источников, судя по разбросанности по спектру места зарождения фронтов. А в межпланетное пространство продолжился только один диффузный (сс).

Одно из самых загадочных явлений 3.11.2003 было связано с крупной вспышкой класса GOES X3.9, третьей в одной активной области NOAA AR 10488 (N08W77). На спектре ИЗМИРАН (Рис. 2) можно видеть сложные структуры, включая несколько полос всплесков II типа. Для нашей задачи интересны полосы в диапазоне 90–28 МГц в интервале 10:00–10:08 UT, перешедшие в декаметровый диапазон в 10:05 UT (верхний спектр Wind/Wave). Ударная волна двигалась со скоростью 2200 км/с, обогнав КВМ, скорость которого была 1419.6 км/с. Скорее всего ударная волна была взрывной. Момент обгона: ~ 09:57 на расстоянии около 2.3  $R_s$ . Число М было 1.33, а критическое 1.15. Ранее, 1 ноября 2003 г., в соседней области NOAA 10486 (S12W60) была умеренная вспышка рентгеновского класса M3.2, которая привела к генерации радио всплеска II типа в метровом диапазоне и наблюдавшегося на WIND до частот около 10 МГц. Поршневая ударная волна ушла вперед в IP со скоростью 900 км/с. Скорость СМЕ была 878 км/с. Если сравнивать с явлением 3.11.2003 (GOES X3.9 и скорость УВ ~ 2200 км/с) можно сказать, что процесс прохождения УВ в межпланетное пространство не зависит от мощности вспышки. Главные выводы по явлению 3.11.2003: был обгон ударной волной КВМ, в 09:27 UT  $V_{sh} \sim 2200$  км/с,  $V_{KVM} \sim 1420$  км/с. Обгон детально описан в [1]. Излучение II типа на основной частоте после клочковатой структуры совсем прекратилось в 10:57 UT на частотах ~ 1.5 МГц (вероятно, нарушилось условие строгой перпендикулярности фронта волны к магнитному полю).

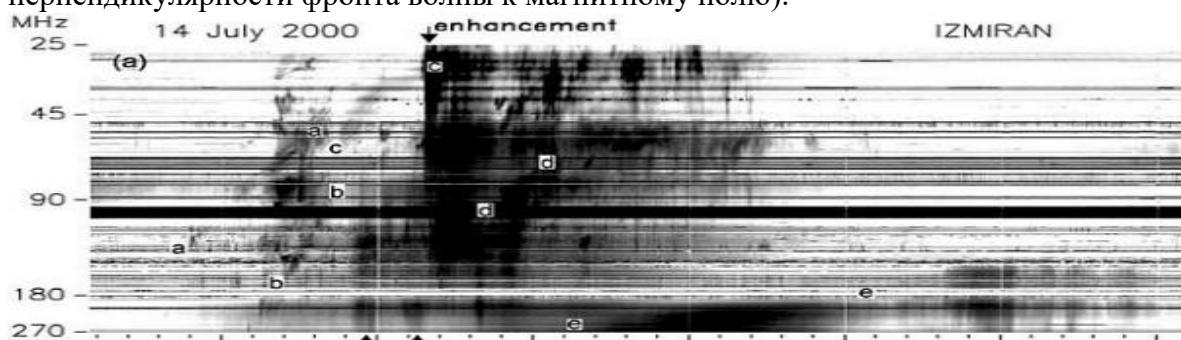


Рис. 1. Несколько полос всплесков II типа и медленно-дрейфующего континуума отмечены обозначениями (aa)–(dd) и (ee) (архив спектров, <https://www.izmiran.ru/stp/lars/>)

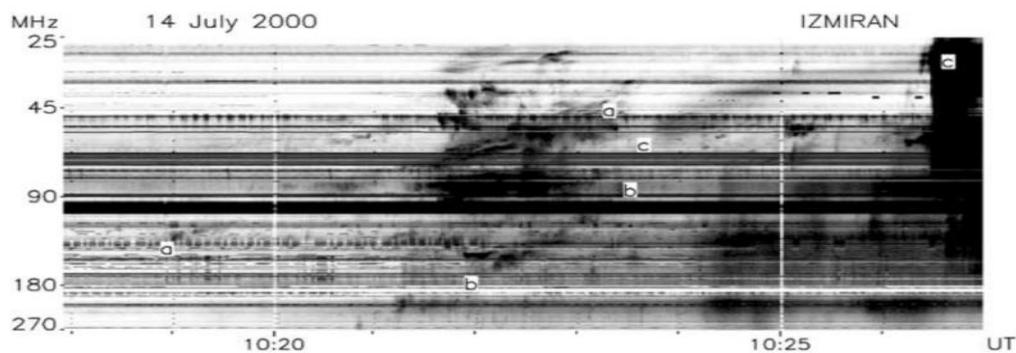


Рис.2. Увеличенный динамический спектр начальной фазы явления с полосами всплесков II типа (aa)–(cc) и некоторых других тонкоструктурных элементов. В конце полосы (cc) частотный дрейф уменьшился (возможно замедление). (<https://www.izmiran.ru/stp/lars/> ).

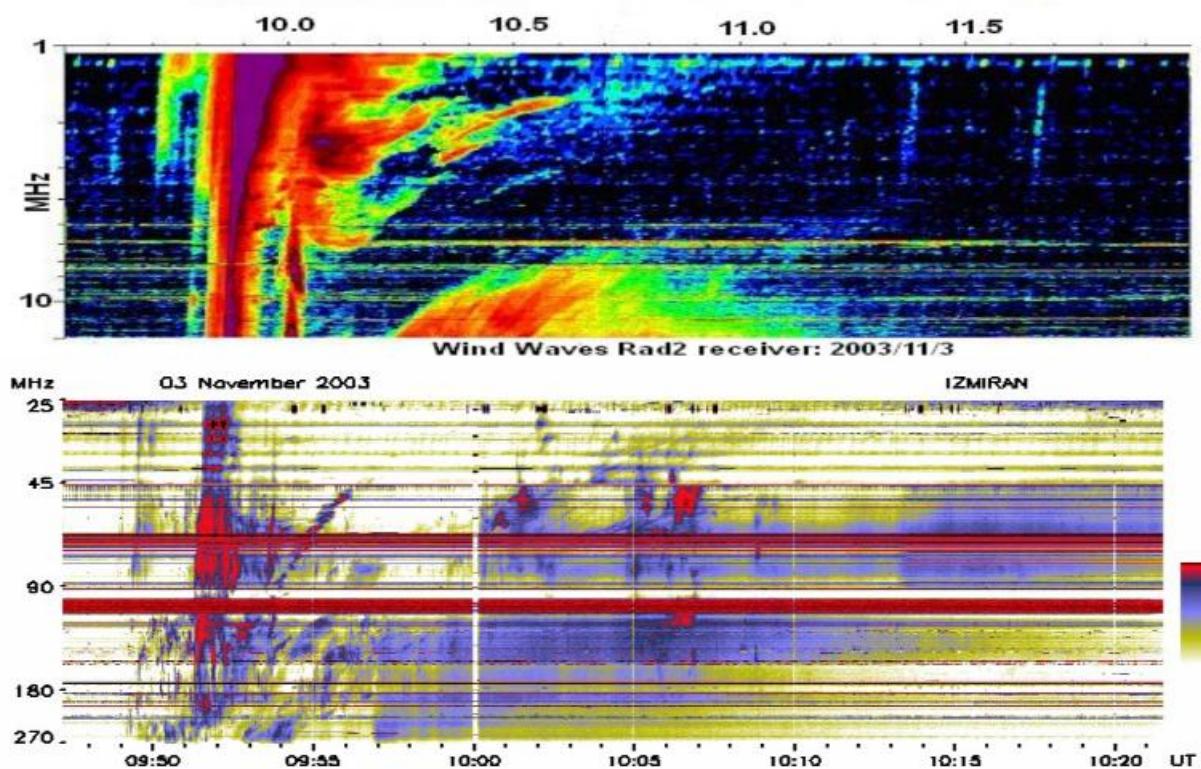


Рис. 3. Динамические спектры радиовсплесков 3.11.2003 в метровом диапазоне (ИЗМИРАН) <https://www.izmiran.ru/stp/lars/> (архив спектров) и с KA WIND/WAVE [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make\\_javamovie.php?date=19971103&img1=lasc2rdf&img2=wwaves](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?date=19971103&img1=lasc2rdf&img2=wwaves)

#### Литература

*Vršnak, B., Warmuth, A., Temmer, M., et al.* Multi-wavelength study of coronal waves associated with the CME-flare event of 3 November 2003 // 2006, A&A, 448, 739 –752.  
<https://DOI:10.1051/0004-6361:20053740>

## Низкотемпературные периоды в солнечном ветре

Шлык Н.С., Абунина М.А., Белов А.В.

ИЗМИРАН, Москва, Россия

[nshlyk@izmiran.ru](mailto:nshlyk@izmiran.ru)

На основе обширного материала с 1995 по 2024 гг., собранного в базе данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (<https://tools.izmiran.ru/feid>), исследуется, насколько часто в солнечном ветре (СВ) наблюдаются особые низкотемпературные периоды (НТП) – определяемые по рассчитываемому температурному индексу [1]. Обсуждается, чем кроме низкой температуры НТП отличаются от остальных периодов, как они связаны с различными типами солнечных источников и другими наблюдаемыми структурами солнечного ветра, Форбуш-эффектами и периодами повышенной геомагнитной активности.

Установлено, что с ростом длительности НТП доля событий, связанных с корональными выбросами массы, растет, а доля рекуррентных событий, уменьшается. Обнаружена умеренная и значительная корреляция параметров НТП с параметрами анизотропии космических лучей, а также скоростью солнечного ветра и индукцией межпланетного магнитного поля [2].

### Литература

1. Мелкумян А.А., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Поведение скорости и температуры солнечного ветра в межпланетных возмущениях, создающих Форбуш-понижения // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60. – № 5. – С. 547–556.
2. Мелкумян А.А., Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Низкотемпературные периоды в солнечном ветре и Форбуш-понижения: Статистическое сравнение // Геомагнетизм и аэрономия. – 2024. – Т. 64. – № 5. – С. 608–623.

## Секция 5.

### Космический климат и климат Земли

## Слабое влияние солнечной радиации на климат усиливается многократно механизмами обратной связи

Абдусаматов Х.И.  
ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия  
[abduss@gaoran.ru](mailto:abduss@gaoran.ru)

На протяжении последних 800 тысяч лет, когда не существовало техногенных воздействий на природу, тысячевековые и двухвековые (по крайней мере в период голоцен) циклические вариации солнечной постоянной (СП –  $S_{\odot}$ ) оказывали определяющее влияние на энергетический дисбаланс между Землей и космосом (ЭДЗ). Изменения СП диктовали соответствующие вариации климата с некоторым запаздыванием. Однако проведенные моделирования климата показывают, что влияние СП квазидвухвекового цикла (ДВЦ) имеет слабый климатический эффект, а тысячевековые колебания формы земной орбиты в циклах Миланковича с соответствующими весьма незначительными вариациями СП ведут к перепаду температуры всего на  $\approx 1.5$  К вместо наблюдаемых изменений примерно на 10 К. Исследование этих противоречий представляет собой чрезвычайно важную фундаментальную и прикладную проблему, требующей тщательного изучения вклада долговременного влияния последующей длинной цепочки вторичных нелинейных причинно-следственных механизмов обратной связи в климатических вариациях. Поэтому все аспекты последующего непрямого воздействия Солнца на климат должны быть тщательно исследованы для оценки истинной роли циклических вариаций СП в изменениях климата в различных временных масштабах. ЭДЗ ( $E$ ) определяется разностью между долей СП, поглощенной планетой на площади ее поперечного сечения  $\pi R^2$ , и энергии собственного теплового излучения Земли, уходящей в космос со всей ее площади  $4\pi R^2$ :

$$E = \frac{(S_{\odot} + \Delta S_{\odot})}{4} - \frac{(A_{BE} + \Delta A_{BE})(S_{\odot} + \Delta S_{\odot})}{4} - \varepsilon\sigma(T_p + \Delta T_p)^4, \quad (1)$$

где АВЕ – альбедо Бонда Земли,  $\varepsilon$  – степень черноты системы поверхность-атмосфера,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Тр – термодинамическая температура (поверхности и атмосферы). Дефицит доли СП, поглощаемой Землей во время фазы спада ДВЦ, не будет компенсирован сокращением ее тепловой энергии, излучаемой в космос, благодаря значительной теплоемкости и тепловой инерции Земли и она будет излучать в космос больше тепла, чем поглощает. При этом даже в период практической стабилизации СП ( $\Delta S_{\odot} \approx 0$ ) во время фазы минимума (и даже максимума) ДВЦ изменение ЭДЗ по-прежнему будет продолжать действовать, благодаря термической инерции Мирового океана и непрерывно самоусиливающимся механизмам обратной связи:

$$E(\Delta S_{\odot} \approx 0) = \frac{S_{\odot}(1 - A_{BE} - \Delta A_{BE})}{4} - \varepsilon\sigma(T_p + \Delta T_p)^4. \quad (2)$$

Незначительный естественный перепад температуры Земли (всего на  $\Delta T \approx 0.25^{\circ}\text{C}$  в отсутствии мощных повторяющихся явлений Эль-Ниньо и подводных извержений вулканов типа Хунга-Тонга – Хунга-Хаапай (15 января 2022 г.)), вызванный только долгосрочным прямым влиянием квазидвухвековой вариации СП (без учета влияния всех других факторов), ведет к соответствующим изменениям физических, оптических и радиационных параметров поверхности и атмосферы, а также влагосодержания атмосферы и концентрации парниковых газов в глобальном масштабе в соответствии с законом Генри и соотношением Клаузиуса–Клапейрона. Оптические параметры включают альбедо Бонда подстилающей поверхности и атмосферы, площади «темной» поверхности морей и океанов с изменением их береговой линии, а к радиационным относятся степень их черноты и пропускание атмосферой доли теплового излучения поверхности в космос без поглощения и многократного переизлучения через окна прозрачности. Эти самоусиливающиеся непрерывно эффекты обратной связи будут действовать как реакция на воздействие СП, вызывая сильное усиление ее первоначального прямого влияния на соответствующие изменения температуры. Это приведет к соответствующим дополнительным изменениям поглощенной планетой доли СП и влияния парникового эффекта, а также доли теплового излучения поверхности, выходящей в космос через прозрачные окна атмосферы. Они дополнительно усиливают изменение температуры Земли, что в свою очередь порождает следующий виток такого изменения и формирование длинной цепочки таких циклов. Длинная цепочка непрерывно повторяющихся механизмов обратной связи, действующая в фазах роста и спада ДВЦ продолжится в период фаз максимума и минимума, а также в течение около 30 лет начала фазы роста и снижения ДВЦ, которые приводят к соответствующим значительным дополнительным изменениям поглощения планетой доли СП, влияния парникового эффекта и ЭДЗ. Такие самоусиления вариаций теплового режима нашей планеты многократно увеличивает амплитуду температурных вариаций, вызванных прямым воздействием вариаций СП ДВЦ. Это усиливает наступившее незначительное изменение температуры в несколько раз.

Итак, незначительное приращение температуры, вызванные прямым воздействием СП ДВЦ, служит триггером длинной цепочки вторичных причинно-следственных эффектов обратной связи, инициирующим изменение процессов фазового перехода в системе океан – атмосфера, в том числе изменение криосферы, содержания влаги в атмосфере и концентрации других парниковых газов в глобальном масштабе, которые приведут к усилию первичной незначительной вариации температуры в несколько раз.

## Солнечный цикл Хейла: проявление в геофизических характеристиках и возможный вклад в формирование бидекадных колебаний климата

**Веретененко С.В.<sup>1</sup>, Дмитриев П.Б.<sup>1</sup>, Обридко В.Н.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*ИЗМИРАН, Москва, Россия*

[s.veretenenko@mail.ioffe.ru](mailto:s.veretenenko@mail.ioffe.ru)

Исследуются проявления солнечного магнитного цикла Хейла в различных геофизических характеристиках. Показано, что ~22-летние вариации, связанные с циклом Хейла, наблюдаются в интенсивности потока галактических космических лучей, приходящих в атмосферу Земли, геоэффективных параметрах солнечного ветра и показателях геомагнитной активности (годовой повторяемости магнитных бурь и геомагнитном *aa*-индексе). Наибольшие различия во временном ходе исследуемых характеристик в четных и нечетных солнечных циклах имеют место, как правило, на фазе спада и в минимуме. Предположено, что вариации геофизических характеристик, связанные с циклом Хейла, могут способствовать формированию бидекадных колебаний в климате Земли. Возможный физический механизм включает изменения химического состава и температурного режима высокосиротной атмосферы, обусловленные изменениями скорости ионизации в связи с вариациями прихода энергичных заряженных частиц – галактических космических лучей и авроральных электронов, высывающихся в атмосферу в ходе геомагнитных возмущений.

## Влияние солнечной радиации и солнечной активности на изменчивость климата после окончания последнего оледенения

Дергачев В.А.<sup>1</sup>, Арсланов Х.А.<sup>2</sup>, Кудрявцев И.В.<sup>1</sup>, Кузьмин Я.В.<sup>3</sup>,  
Максимов Ф.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, Россия

[v.dergachev@mail.ioffe.ru](mailto:v.dergachev@mail.ioffe.ru)

Согласно результатам палеоклиматических исследований, современный этап истории климата Земли охватывает самый короткий четвертичный геологический период, который начался 2,588 миллионов лет назад. Возникает вопрос о будущих изменениях климата после наблюдаемого в настоящее время потепления. Среди ученых до сих пор нет единого мнения, объясняющего процессы, происходящие в настоящее время с климатом на Земле.

Для понимания тенденции изменения климата в статье анализируются изменения климатических характеристик в образцах, отобранных из разрезов верховых болот Никольско-Лютинское, Ширинский Мх и Самбальское на Северо-Западе России, охватывающих временной интервал после окончания последнего оледенения и межледниковые Голоцен [1,2]. Более точное определение возраста радиоуглеродным методом короткопериодных изменений климата в Голоцене требует учета короткопериодных изменений концентрации  $^{14}\text{C}$  в атмосфере. Был установлен корректированный (смоделированный) возраст всей серии радиоуглеродных датировок образцов, отобранных из указанных разрезов болот. В итоге был определен моделированный возраст, наиболее приближенный к календарному возрасту и соответствующим значениям изменений температуры ( $\Delta T$ ) всей серии датированных образцов. Определена хронология короткопериодных изменений климата в голоцене, которая демонстрирует синхронность короткопериодных изменений климата в окрестностях изученных разрезов болотных отложений. Данная хронология в большинстве случаев согласуется с хронологией, полученной при изучении природных объектов (озерные, болотные и морские отложения, полярные ледники) во многих регионах мира, а также с хронологией наступления горных ледников.

Хронология короткопериодных изменений климата сопоставлена с хронологией изменений солнечной активности, установленной путем определения концентрации космогенных изотопов  $^{14}\text{C}$  в древесных кольцах известного возраста и  $^{10}\text{Be}$  в полярных ледниках. Установлена синхронность короткопериодных изменений климата и изменений солнечной активности в голоцене, которая демонстрирует, что изменения солнечной активности являются одной из основных причин короткопериодных изменений климата в

голоцене. Показательным примером служит синхронность этапов похолодания в периоды минимумов солнечной активности (Маундера, Шпёрера, Вольфа и Оорта) в последнее тысячелетие и в более ранние периоды.

### Литература

1. Arslanov Kh.A. et al. New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene // Radiocarbon. V. 43. No. 2B. P.581–594. 2001.
2. Арсланов Х.А. и др. Хронология короткопериодных вариаций климата в Голоцене на северо-западе России и корреляция с вариациями солнечной активности // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. Т. 164. кн.1. С.135–165. 2022.

## Влияние изменений солнечной активности на структуру атмосферных термических приливов

Диденко К.А.<sup>1,2</sup>, Коваль А.В.<sup>1</sup>, Гаврилов Н.М.<sup>1</sup>, Ермакова Т.С.<sup>1</sup>, Соколов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт Земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В.

Пушкиова РАН, Троицк, Москва, Россия

[didenko@izmiran.ru](mailto:didenko@izmiran.ru)

Солнечные термические приливы – это колебания глобального масштаба с периодами солнечных суток (24 ч) и его гармоник (12, 8 и 6 ч), оказывающие существенное влияние на глобальную атмосферную динамику [2]. Атмосферные приливы делятся на мигрирующие и немигрирующие в зависимости от их источников, направления распространения и комбинации период – зональное волновое число. Условия генерации и распространения приливов, а, следовательно, и определяемая ими циркуляция, зависят от вариаций прямого солнечного воздействия, например, в рамках 11-летнего солнечного цикла. В частности, изменения солнечной активности (СА) влияют на температуру и циркуляционные потоки, изменяя условия распространения планетарных волн (ПВ) и приливов в верхних слоях атмосферы [2]. В свою очередь изменение структур ПВ и приливов за счет обмена импульсом влияет на зональную циркуляцию, а диссиpация волн способствует также ускорению меридиональной циркуляции и нагреву атмосферных слоев [3]. Таким образом, возникает сложная причинно-следственная связь между волновыми возмущениями и средним потоком, модулируемая СА.

В данном исследовании с помощью модели средней и верхней атмосферы МСВА изучается влияние изменений СА на пространственно-временную структуру атмосферных термических мигрирующих и немигрирующих приливов, включая распространение потоков волновой активности (поток Элиассена-Палма (ЭП)). МСВА позволяет учитывать зависимость солнечной радиации от СА в радиационном блоке модели и также хорошо воспроизводит структуры глобальных атмосферных волн, включая приливы, стационарные ПВ, нормальные атмосферные моды [4]. Были рассмотрены два ансамбля модельных расчетов МСВА глобальной атмосферной циркуляции для января, состоящие их 16 реализаций каждый, соответствующие высокой и низкой СА.

Результаты численных экспериментов показали, что суточный мигрирующий прилив ослабляется в диапазоне высот 100-150 км при увеличении СА, и усиливается – на больших высотах. Это отражает различные атмосферные механизмы способствующие распространению прилива. Изменения потоков ЭП суточного мигрирующего прилива демонстрируют корреляцию между изменением распространения волновой

активности в вертикальном направлении и изменением амплитуды прилива. Полусуточный мигрирующий прилив ослабляется в средне- и высокоширотной термосфере при высокой СА до уровня 140 км в Южном полушарии и 190 км в Северном. Это сопровождается преимущественно ослаблением восходящих потоков ЭП. В тропической области на этих высотах амплитуда прилива при высокой СА увеличивается, при этом в летнем полушарии это усиление проявляется сильнее, чем в зимнем.

Структуры суточного и полусуточного немигрирующих приливов схожи со структурами соответствующих мигрирующих приливов, что объясняется основным механизмом их генерации за счет нелинейного взаимодействия этих первичных приливов со стационарной ПВ. На высоте 120-150 км немигрирующий суточный прилив уменьшается при высокой СА, в слое ослабления мигрирующего суточного прилива, а его усиление в Северном полушарии примерно совпадает с областью усиления стационарной ПВ. Выше 150 км в термосфере амплитуда стационарной ПВ при высокой СА уменьшается, а амплитуда мигрирующих приливов увеличивается. В совокупности это приводит к сложной структуре приращений амплитуд немигрирующих приливов.

В дальнейшем планируется провести более детальный анализ большого количества гармоник немигрирующих приливов, включая изучение механизмов их генерации посредством нелинейных взаимодействий с ПВ.

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

### Литература

1. Vitharana A., Du J., Zhu X., Oberheide J., Ward W.E. Numerical prediction of the migrating diurnal tide total variability in the mesosphere and lower thermosphere // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 126(11). e2021JA029588. 2021.
2. Laštovicka J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 68(3). P. 479–497. 2006.
3. Teng C.-K.-M., Gu S.-Y., Qin Y., Dou X. Impact of Solar Activity on Global Atmospheric Circulation Based on SD-WACCM-X Simulations from 2002 to 2019 // Atmosphere. 12. 1526. 2021.
4. Koval A.V., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Shevchuk N.O. Reactions of the middle atmosphere circulation and stationary planetary waves on the solar activity effects in the thermosphere // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 124. P. 10645–10658. 2019.

## Вращение Земли и факторы климата последних десятилетий

Зотов Л.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ГАИШ МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>МИЭМ НИУ ВШЭ, Москва, Россия

[lzотов@hse.ru](mailto:lzотов@hse.ru)

В последние годы ряд параметров вращения Земли проявил аномалии. Скорость вращения Земли, начав возрастать в декадном цикле с 2016 года, достигла в 2024 году рекордного за 80 лет максимума (рис. 1). Длительность суток (LOD) уменьшилась на -1.6 миллисекунды (мс) [1]. С 2010-х годов начала уменьшаться амплитуда 430-суточного Чандлеровского движения полюса (ЧДП), составив в 2017-2020 гг. менее 20 мс дуги [2]. С 2021 г. ЧДП возобновилось, по всей видимости, сменив фазу на 180° (рис 1, пунктиром). Остаточные поправки к теории прецессии и нутации содержат сигнал свободной нутации ядра (СНЯ), амплитудой менее 0.2 мс дуги. Это колебание также практически исчезло с 2020 года, что требует изучения.

Тема изменений климата не сходит со страниц научных и научно-популярных изданий последних десятилетий [3]. Потепление отражается на перераспределении масс планеты (тают ледники, растет уровень моря), меняя циркуляцию атмосферы и океана (смещаются течения, усиливается перенос, растет влагозапас атмосферы). Ряд исследователей задумывается о влиянии этих процессов на вращение Земли [4].

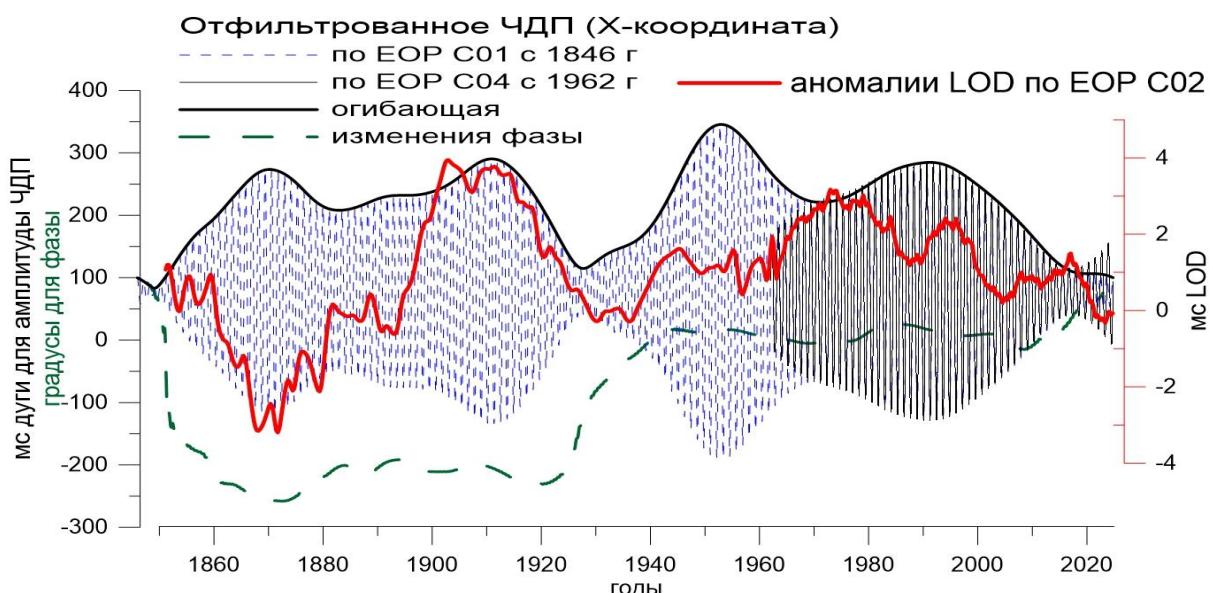


Рис 1. Изменения ЧДП и LOD по данным бюллетеней ЕОР С01, С04 и С02.

Вращение планеты описывается уравнениями Эйлера-Лиувилля. Момент сил, действующих со стороны Луны и Солнца, вызывает нутацию и прецессию Земной оси. На угловую скорость (величину и направление оси) вращения влияют изменения тензора инерции Земли (перераспределения масс в оболочках) и относительные движения масс (течения, ветер, потоки в

мантии и др.) Ясно, что вызванные потеплением процессы должны сказываться и на вращении Земли. Вопрос в том, как их измерить и выяснить, могут ли, к примеру, аномалии во вращении Земли быть обусловлены изменениями климата.

Мониторинг планеты, проводимый наземными и космическими средствами, способствует ответу на поставленный вопрос. Так, спутники GRACE и GRACE-FO следят за изменением гравитационного поля Земли с 2002 года. От них не ускользают изменения сжатия, асимметрии в распределении масс, тенденции, обусловленные таянием ледников, увеличением массы океана, гидрологическими и литосферными процессами. Однако вычисления показывают, что только дрейф полюса хорошо согласуется с наблюдаемым перераспределением масс. Изменения скорости вращения Земли (энергия, требующаяся для уменьшения LOD на 1 мс, имеет порядок  $10^{21}$  Дж) слишком велики, чтобы быть обусловленными таянием ледников (их вклад порядка 0.1 мс). Наблюдения за океаном и атмосферой, ассилируемые глобальными моделями циркуляции, показывают, что декадные аномалии LOD также не могут быть объяснены процессами в этих оболочках. Остаются движения в недрах Земли, наблюдения за которыми пока осуществимы лишь косвенно (по магнитному полю, сейсмическими методами и др.).

Таким образом, на стыке геодезии, геофизики и климатологии назрела необходимость исследования взаимных влияний глобального потепления, изменений гравитационного поля Земли и её вращения [4]. Усовершенствовать теорию на основе многочисленных наблюдений за оболочками планеты пока удается лишь немногим. Интересно то, что исчезновение ЧДП в 1930-е и 2020-е годы произошло одновременно с уменьшением LOD (рис. 1) и потеплением на  $\sim 0.2^\circ$  в цикле Атлантической многолетней осцилляции (АМО). Встает вопрос: могут ли причины названных явлений быть не антропогенными, а космическими, вызванными изменениями лунно-солнечных приливов и космической погоды [5].

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

#### Литература

1. Earth Is Spinning Faster and Days Are Getting Shorter, for Now, The New York Times, 11/7/2025
2. Zotov L., N. Sidorenkov, Ch. Bizouard, Anomalies of the Chandler Wobble in 2010s, Moscow University Physics Bulletin, Vol. 77, N. 3, pp.55-58, 2022, DOI:10.3103/S0027134922030134
3. Callahan, C.W., Mankin, J.S. National attribution of historical climate damages. Climatic Change 172, 40 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03387-y>
4. Зотов Л.В. Вращение Земли и климатические процессы, М., МИЭМ, 2022
5. Zotov L., N. Sidorenkov, Ch. Bizouard, Earth rotation variations and the Moon apsidal-nodal effects, A.Kosterov et al.(eds.), Problems of Geocosmos, Springer, 2025, in press, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-92928-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-92928-1_21)

## Расчет эквивалентной дозы излучения в широком диапазоне высот

Маурчев Е.А., Диденко К.А.

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

Пушкиова, Россия

[maurchev@izmiran.ru](mailto:maurchev@izmiran.ru)

В работе рассматривается методика расчета эквивалентной дозы для широкого диапазона высот при помощи собственного программного кода, разработанного с использованием SDK GEANT4 [1]. Она включает в себя моделирование прохождения космических лучей (КЛ), включая галактические КЛ (ГКЛ) и солнечные КЛ (СКЛ), через атмосферу Земли и оценку количества поглощенной энергии. Хорошо известно, что при взаимодействии с атмосферой Земли частицы теряют свою энергию как в процессе образования каскадов, так и в процессе ионизации. Для описания таких взаимодействий в нашей работе использовалась параметризация геометрии при помощи модели NRLMSISE-00 [2], стандартные модели взаимодействия элементарных частиц, реализованные в GEANT4, а также пользовательские (собственные) классы детекторов и генератора первичных частиц. Как один из результатов мы получаем высотные профили (обычно от 0 до 100 км), где измеряемая величина может быть представлена в единицах потока ( $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ), скорости ионизации ( $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ) [3], а также в единицах эквивалентной дозы (Зв). Последнее позволяет количественно оценивать воздействие излучения на человека и техногенные объекты, находящиеся в атмосфере Земли. В докладе по материалам этой работы представлены частные примеры расчета эквивалентной дозы как для условий, соответствующих присутствию в спектре первичных частиц (протонов) только ГКЛ, так и с добавлением СКЛ. Предложенный подход является перспективным в реализации комплексной оценки радиационной безопасности для широкого диапазона высот и широт и может быть расширен на задачи прогнозирования воздействия КЛ на атмосферу Земли и объекты в ней в условиях повышенной солнечной активности.

### Литература

1. Allison J. et al. Recent developments in Geant4 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. V. 835. P. 186–225. 2016.
2. Picone J.M. et al. NRLMSISE00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. I. A12. P. 1468. 2002.
3. Маурчев Е. А. и др. Модельный комплекс для исследования космических лучей // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 4. С. 3-8. 2016.

## Квазивековая вариация в климате земли и её возможная связь с солнечным циклом Глайссбера

Огурцов М.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-Технический институт им. А.Ф. Иоффе, Россия

[maxim.ogurtsov@email.ioffe.ru](mailto:maxim.ogurtsov@email.ioffe.ru)

Квазивековые – период 80-130 лет – вариации в климате различных регионов Земли давно известны. В работе [1] был обнаружен и квазивековой ритм в средней температуре Северного полушария. Поскольку период этих вариаций близок к соответствующему периоду цикла Глайссбера в солнечной активности (СА) возникает вопрос об их возможной связи. В работе [1] он был исследован с помощью имеющихся к тому времени длительных палеореконструкций температуры Северного полушария и СА. Заметной корреляции между вековыми вариациями в СА и температуре обнаружить не удалось, вследствие чего был сделан вывод о том, что квазивековые колебания климата имеют естественную природу и не связаны с солнечным циклом Глайссбера. В данной работе продолжено исследование возможной связи квазивековых вариаций температуры Земли и СА с использованием новейших палеореконструкций температуры [2-9] и активности Солнца [10-15], охватывающих последние 1-2 тысячу лет. Коэффициенты корреляции между вековыми вариациями, имеющимися в температуре и СА, приведены в Таблице 1.

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции между реконструкциями температуры и солнечной активности, вэйвлетно фильтрованными в полосе частот, соответствующих периодам 63.1-122.8 лет.

	Moberg et al. [2]	Loehle [3]	Christiansen and Ljungqvist [4]	Schneider et al. [5]	Wilson et al. [6]	Büntgen et al. [7]	Pages2k [8]	Guillet et al. [9]
Usoskin et al. [10]	0.03	0.08	0.22	-0.10	-0.02	0.04	0.06	0.07
Muscheler et al. [11]	0.34	0.36	0.26	-0.11	0.04	0.09	0.12	0.18
Horiuchi et al. [12]	<b>-0.50</b>	-0.36	-0.23	-0.02	0.03	0.13	0.05	-0.04
Steinhilber et al.[13]	0.15	<b>0.31</b>	<b>0.37</b>	0.19	0.31	0.24	<b>0.36</b>	0.26
Usoskin et al [14]	0.26	0.33	0.16	-0.17	-0.10	-0.08	-0.17	0.09
Egorova et al. [15]	0.10	0.30	<b>0.33</b>	0.01	0.17	0.18	0.25	0.12

В Таблице жирным шрифтом показаны коэффициенты корреляции со значимостью  $p < 0.05$ , крупным жирным шрифтом –  $p < 0.01$ . Как следует из

Таблицы 1, хотя значимая корреляция между вековыми периодичностями в температуре и СА как правило отсутствует, в отдельных случаях она наблюдается. Это может свидетельствовать о том, что квазивековые вариации солнечной природы в температуре Земли всё же присутствуют, но искажаются мощными естественно-природными колебаниями климатической системы.

## Литература

1. Ogurtsov M et al. 2007. A potential century-scale rhythm in six major paleoclimatic records in the Northern Hemisphere. *Geografiska Annaler*. V. 89A, N. 2 pp., 129-136.
2. Moberg et al. 2005. High variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*. 433(7026): 613-617.
3. Loehle CA .2007. 2000-year global temperature reconstruction based on non-treering proxies. *Energy Environ*. 18(7-8): 1049-1058.
4. Christiansen B, Ljungqvist FC. 2012. The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: reconstructions of low-frequency variability. *Climate of the Past* 8: 765–786.
5. Schneider L et al. 2015. Revising midlatitude summer temperatures back to A.D. 600 based on a wood density network. *Geophys Res Lett* 42: 4556–4562.
6. Wilson R et al. 2016. Last millennium northern hemisphere summer temperatures from tree rings: Part I: The long-term context. *Quat Sci Rev* 134: 1–18.
7. Büntgen U, Allen K, Anchukaitis KJ, Arseneault D, Boucher E, Chatterjee S. 2021. The influence of decision-making in tree ring-based climate reconstructions. *Nat Commun*. 12: 3411.
8. PAGES 2k Consortium. 2019. Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nat Geosci* 12: 643–649.
9. Guillet S et al. 2020. Climatic and societal impacts of a “forgotten” cluster of volcanic eruptions in 1108-1110 CE. *Sci Rep* 10: 6715.
10. Usoskin et al. 2014. Evidence for distinct modes of solar activity. *Astron Astrophys* 562: L10.
11. Muscheler R et al. 2007. Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records *Quat Sci Rev* 26: 82-97.
12. Horiuchi K et al. 2008. Ice core record of 10Be over the past millennium from Dome Fuji, Antarctica: A new proxy record of past solar activity and a powerful tool for stratigraphic dating. *Quate Geochron* 3(3): 253-261.
13. Steinhilber F et al. 2012. 9,400 Years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 109. 5967-71. 10.1073/pnas.1118965109.
14. Usoskin I et al. 2021. Solar cyclic activity over the last millennium reconstructed from annual <sup>14</sup>C data. *Astron Astrophys* 649: A141.
15. Egorova T et al. 2018. Revised historical solar irradiance forcing. *Astron Astrophys* 615: A85.

## Космический климат и круговорот вирусов и бактерий в атмосфере

Рагульская М. В.

ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкина, Москва, Россия  
[ra\\_mary@mail.ru](mailto:ra_mary@mail.ru)

Рассматривается воздействие космического климата и солнечной активности на раннюю биосферу Земли [1] и современные эпидемиологические процессы [2,3]. Обсуждается горизонтальный (до 2,5 тысяч километров) и вертикальный (до 7- 20 км высоты) перенос вирусов и бактерий с пылью и аэропланктоном в атмосфере, и возможные процессы их мутации при воздействии космических лучей и коротковолнового излучения Солнца.

В работе [4] приведены экспериментальные данные о переносе бактерий, спор и грибов на высоты до 7 км, и расстояния до 2,5 тысяч км. В работе [5] проведено численное моделирование усиленной концентрации влаги и ускоренного образования дождевых облаков на дрожжевых фракциях и бактериальных спорах в атмосфере. Для объяснения возникновения вирусных эпидемий в периоды минимумов солнечной активности и одновременной неэффективности локдаунов при вирусных пандемиях, предложена гипотеза, соединяющая обе эти работы: изначального аэродинамического подъема и дальнейших мутаций локальных колоний вирусов в атмосфере, на высотах до 20 км от поверхности Земли, под действием не ослабленных атмосферой космических лучей и коротковолнового излучения Солнца, и дальнейшего выпадения мутировавших вирусов с дождями [6]. Усиленное формирование оседания влаги на вирусной и бактериальной пыли при образовании облаков способствует последующему выпадению осадков, несущих смутировавшие на высоте колонии вирусов и бактерий обратно в приповерхностную атмосферу, почву и в водоемы. Перемещения вирусов с пылью и воздушными массами, на крыльях самолетов, и с аэропланктом, а также возможность существования атмосферных локализаций вирусов и динамические параметры таких локализаций, зависящих от солнечной активности, времени года, геомагнитного поля и аeronомических свойств атмосферы на разных высотах, могут стать новым интересным направлением исследований.

Изучение динамики вирусной и бактериальной биосферы Земли под воздействием факторов космической погоды и геомагнитного поля, её взаимодействие с различными слоями атмосферы имеет большие перспективы, и представляет особую ценность при моделировании возможных биосфер экзопланет.

Автор выражает глубокую благодарность В. Н. Снытникову за интересные обсуждения возможных атмосферных биосфер планет и спутников Солнечной системы.

### Литература

1. Обридко В. Н., Рагульская М.В., Храмова Е.Г.. Раннее Солнце, физические условия на ранней Земле и происхождение жизни// Геомагнетизм и аэрономия. Т.58. №7, С. 871. 2018.
2. Рагульская М.В. Циклы солнечной активности и парадоксы пандемии Covid-19// Геомагнетизм и аэрономия, т 63, №7, с 122, 2023 DOI: 10.1134/S0016793223070198
3. Ragulskaya M.V, Obridko V.N. Heliogeophysical Features and Viral Epidemics of the 21st Century//GA, Vol. 64, No. 8, pp. 86–92, 2024, DOI: 10.1134/S0016793224700397
4. Андреева Н. С. и др. Спорообразующие бактерии во время переноса воздушных масс// Вестник НВГУ, н.3, стр 123, 2018
5. Sesartic, U. Lohmann, T. Storelvmo. Modelling the impact of fungal spore ice nuclei on clouds and precipitation// Environ. Res. Lett. 8 014029, 2013 DOI:10.1088/1748-9326/8/1/014029
6. Рагульская М. В. Космофизические и аэрономические аспекты вирусных пандемий// 2-я научная конференция «Проблемы космофизики», Дубна, стр.103, июнь 2025

## Э/м засорение околоземного пространства излучением ЛЭП

Савельева Н.В.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>1,2</sup>, Мазур Н.Г.<sup>1</sup>, Федоров Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

[nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)

Технологический прогресс подразумевает рост потребления энергии. Современные технологии основаны на использовании электроэнергии, потребление которой растет с каждым годом, вслед за развитием промышленного производства и информационных технологий. Сети ЛЭП покрывают все населенные части суши.

Излучение ЛЭП в КНЧ диапазоне регистрируется как на земле, так и в околоземном пространстве. К примеру, в ходе эксперимента FENICS, проведенного в ПГИ РАН, Мурманск, выведенные из эксплуатации ЛЭП были использованы в качестве КНЧ излучателей, сигналы которых регистрировались как близлежащими станциями (Ловозеро, Выходной), но даже на Шпицбергене и в Ярославской области, за тысячи км от источника. На полученных спектrogramмах, помимо сигналов FENICS, хорошо видны линии излучения на частотах шумановского резонанса (примерно 8 и 13 Гц), а также сигналы обычных магистральных ЛЭП на частотах 50 и 100 Гц и передатчика ЗЕВС на 82 Гц. При этом сигналы искусственного происхождения существенно превышают по амплитуде и мощности естественные излучения планеты.

Несмотря на то, что для КНЧ излучений ионосфера является почти идеальным зеркалом, с коэффициентом отражения 95%, небольшое количество КНЧ излучения просачивается в околоземное космическое пространство. В ИФЗ РАН разработаны модели, описывающей структуру волнового поля в верхней ионосфере, создаваемого линейным заземленным током конечной длины, с учетом горизонтально-слоистой структуры нижележащих слоев ионосферы. Предсказания модели, были проверены в эксперименте, в ходе которого были проанализированы результаты измерений переменного электрического и магнитного поля приборами китайского спутника CSES-01 (кит. ZH-1), работающего на солнечно-синхронной орбите высотой ~500 км с наклонением ~97°. На спектrogramмах обнаружены отчетливые сигналы передатчика ЗЕВС на частоте 82 Гц и магистральных ЛЭП России и Канады на частотах 50/60 Гц и 150/180 Гц. Измеренные амплитуды сигналов хорошо согласуются с теоретическими расчетами. При этом, попытки обнаружить стабильный, постоянно присутствующий, глобальный сигнал на частотах шумановского резонанса не увенчались успехом. Наиболее вероятно, что сигнал слишком слабый и лежит ниже порога чувствительности приборов спутника.

Таким образом, на орбите, как и на земле, амплитуды сигналов от техногенных источников существенно превышают амплитуды естественного

электромагнитного излучения на частотах альфеновского и шумановского резонанса. Можно сделать вывод, что на данный момент электромагнитное окружение планеты в КНЧ диапазоне претерпевает качественные изменения. Формируется особый техногенный электромагнитный КНЧ-фон, как в поверхностно-ионосферном канале (до 100 км по высоте), так и в околоземном пространстве, эффекты воздействия которого на живые системы еще предстоит познать и оценить.

## Солярные реперы нижней границы голоцена

Федоров В.М., Федорова Е.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия  
[fedorov.msu@mail.ru](mailto:fedorov.msu@mail.ru)

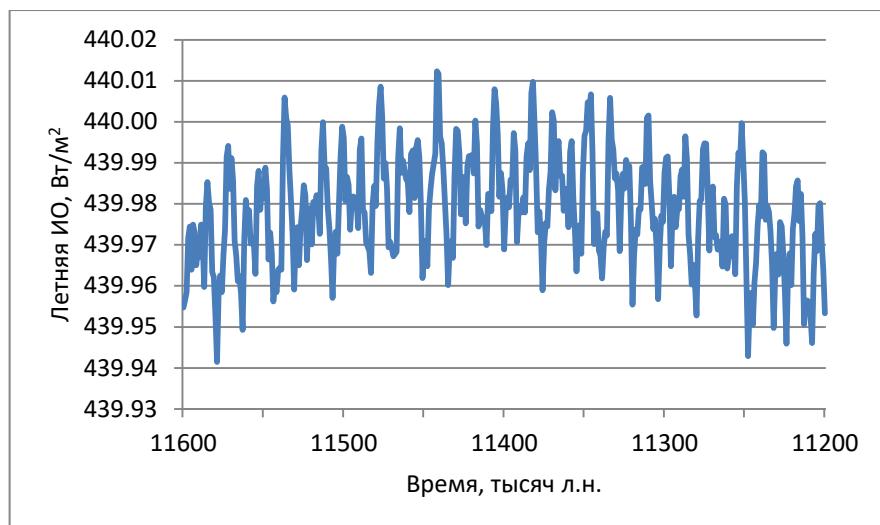
Согласно решению стратиграфической комиссии INQUA, нижняя граница голоцена приходится на начало интенсивного потепления, наступившего около 11700 календарных лет назад. Геохимический репер нижней границы голоцена определяется на основе изотопно-кислородного анализа ледового керна Гренландии NGRIP2. За нижнюю границу голоцена принимается возраст слоя, в котором отмечается сдвиг к более «тяжелым» значениям  $\delta^{18}\text{O}$  [6].

Нами проведена оценка чувствительности изотопно-кислородного состава льда Гренландии и Элсмира к изменениям радиационного и температурного режима. По [5] исследовались данные 12-ти скважин Гренландии и о. Элсмир. Керны скважин охватывают период времени от 1899 г. до н.э. до 1977 г. н.э.

Корреляционный анализ показал отсутствие заметной связи  $\delta^{18}\text{O}$  ледовых кернов Гренландии и Элсмира с изменением характеристик интенсивности облучения (ИО) и переноса радиационного тепла (среднее по модулю значение коэффициента корреляции составляет 0,087). Не выявлена заметная связь  $\delta^{18}\text{O}$  ледовых кернов между отдельными скважинами Гренландии и Элсмира (среднее по модулю значение коэффициента попарной корреляции равно 0,201). Не обнаружена заметная связь в изотопно-кислородном составе ледовых кернов с аномалией приповерхностной (годовой, летней и зимней) температуры воздуха в Северном полушарии (среднее по модулю значение коэффициента корреляции составляет 0,105). Анализируемые изотопные профили ледовых кернов с островов Гренландии и Элсмира в рассматриваемом диапазоне времени не обладают чувствительностью к изменениям радиационного и теплового режима Северного полушария. Таким образом, выявленные для современного льда эффекты изотопного фракционирования [3] и связи показателя  $\delta^{18}\text{O}$  с температурой в ледовых кернах (разрезе) не сохраняются, что ограничивает возможности использования метода для палеоклиматических и палеотемпературных реконструкций. В связи с этим геохимический репер нижней границы голоцена не представляется физически обоснованным и состоятельным.

Ранее нами выполнены расчеты облучения Земли с высоким пространственным и временным разрешением на период 12 000 лет в прошлое от 2000 г. [2, 4]. На основе расчетов для этого периода были получены значения характеристик солнечного климата для Северного полушария: интенсивности летнего облучения (ИО) и инсоляционной

сезонности (ИС). Максимумы летней ИО (максимум теплой фазы климатической прецессии) и ИС приходятся на время около 11450 лет назад (на рис. 1 представлен максимум летней ИО в Северном полушарии).



Известно, что летнее облучение Северного полушария имеет основное значение в изменении термических условий климата [1]. В связи с этим использование солярных характеристик (летней ИО и ИС) в качестве геохронологического и климатостратиграфического репера нижней границы голоцена представляется физически обоснованным и объективным. Хронологические различия геохимического и солярного реперов невелики (около 250 лет), однако солярные реперы, в отличие от геохимического показателя  $\delta^{18}\text{O}$  имеют надежную физическую, астрономическую и климатическую аргументацию.

### Литература

1. Воейков А.И. Метеорология. СПб, Издание картографического заведения А. Ильина, 1903, 737 с.
2. Федоров В.М. и др. Роль радиационного фактора в глобальных климатических событиях позднего голоцена // Геофизические процессы и биосфера, 2021. Т. 20. № 3. С. 5–19. DOI: 10.21455/GPB2021.3-1.
3. Dansgaard W. et al. Stable isotope glaciology // Meddeleser om Grenland, 1973. Bd. 197. N 2. P. 1–53 p.
4. Fedorov V.M., Kostin A.A. The Calculation of the Earth's insolation for the 3000 BC - AD 2999 / Springer Geology, 2020. V. I. P. 181–192. DOI:10.1007/978-3-030-38177-6\_20.
5. <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore.html>
6. Walker et al. Subdividing the Holocene Series/Epoch: formalization of stages/ages and subseries/subepochs, and designation of GSSPs and auxiliary stratotypes // Journal Quaternary Science, 2019. V. 34. N 3. P. 173–186. <https://doi.org/10.1002/jqs.3097>

## Парадокс слабого молодого Солнца для Земли и Марса – возможно ли общее решение?

Храмова Е. Г.

ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкина, Москва, Россия

[sinop@yandex.ru](mailto:sinop@yandex.ru)

Парадокс слабого молодого Солнца, сформулированный Карлом Саганом и Джоржем Малленом в 1972 году [1], заключается в противоречии между палеоклиматическими данными и астрофизическими моделями эволюции Солнца. Как следует из звездного моделирования, солнечная светимость 4 млрд лет назад составляла примерно 75% от современной, что должно было бы привести к замерзанию планеты. Однако существует множество убедительных свидетельств наличия обширных водоемов жидкой воды, к тому же, по данным палеонтологов средняя температура земной поверхности в тот период составляла от 40 °С до 70 °С. Это несоответствие легло в основу общепринятого представления о парадоксе слабого молодого Солнца.

Возможные варианты решения парадокса:

- 1) некорректно посчитанная солнечная постоянная молодого Солнца,
- 2) значительно меньшее альбедо молодой Земли,
- 3) неучтенные дополнительные источники энергии,
- 4) более мощный парниковый эффект,
- 5) меньшие радиусы планетарных орбит в молодой солнечной системе в связи с локальным хаббловским расширением.

Из всех предложенных решений парадокса слабого молодого Солнца, вероятнее всего, именно парниковый эффект способен с избытком компенсировать недостаток солнечной светимости. Этот вариант был предложен еще Саганом и Малленом, но оказалось, что высокое содержание парниковых газов противоречит данным минералогии [2].

В докладе предлагается новая гипотеза органических пленок, являющихся неучтенным климатообразующим фактором и способных снять противоречие между высоким содержанием парниковых газов и данными минералогии.

За последние годы накоплено достаточное количество данных о наличии жидкой воды на Марсе в период 4,1 – 3,7 млрд лет назад, чтобы говорить о парадоксе слабого молодого Солнца для Марса. Недавно вышедший обзор по гидросфере Марса [3] подтверждает то, что в прошлом на планете длительное время сохранялась жидккая вода. Особый интерес представляет для нас рассмотренная в этом обзоре гипотеза существования марсианского океана, которая снимает вопросы о возможно локальных и кратковременных условиях, обеспечивавших наличие жидкой воды на молодом Марсе. Именно поэтому хотелось бы обратить внимание на две работы, содержащие новые доказательства существования марсианского океана [4, 5].

Исходя из данных палеонтологии о высоких поверхностных температурах молодой Земли [6] и информации о наличии жидкой воды на молодом Марсе, автором предлагается новое определение парадокса. **Парадокс слабого молодого Солнца заключается в том, что при равномерно нарастающей солнечной светимости наблюдается последовательное понижение поверхностных температур Земли и Марса.**

Возможно ли найти единый фактор влияния на планеты, падающий с расстоянием от Солнца и со временем жизни Солнечной системы? Из солнечных характеристик на эту роль подходит солнечная активность. Вспышки на раннем Солнце происходили гораздо чаще и достигали энергий на 3–4 порядка больших, чем сегодня. Соответственно, коротковолновое излучение, радиоизлучение, корональные выбросы массы и потоки солнечных космических лучей были на 2–3 порядка выше современных [7]. Влияние какого-либо из этих факторов солнечной активности (возможно, нескольких факторов сразу) на атмосферы планет, в первую очередь за счет интенсификации образования парниковых газов, вполне могло бы объяснить все сложности парадокса.

А вот решение через солнечную постоянную представляется маловероятным, так как при её повышении, достаточном для разогрева поверхности Марса, солнечная постоянная для Земли повышается настолько, что должна была вызвать перегрев Земли.

Автор выражает глубокую благодарность В. Н. Обридко, М. В. Рагульской, М. Б. Симакову и Ю. В. Думину за обсуждение различных аспектов и вариантов решения парадокса слабого молодого Солнца.

## Литература

1. Sagan C. and Mullen G. Science // 177:52-56, 1972.
2. Rosing M. T., Bird D. K. et al. // Nature 464, 744-747, 2010.
3. Gopalchetty B. Martian hydrosphere: A brief overview of water on Mars // New Astron. Rev. 100, 101714. 2025.
4. Li J., et al. Ancient ocean coastal deposits imaged on Mars // PNAS 122(9), e2422213122. 2025.
5. Cardenas B. T. et al. Paleogeographic Reconstructions of an Ocean Margin on Mars Based on Deltaic Sedimentology at Aeolis Dorsa // JGR Planets. 127(10). 2022.
6. Ragulskaya M. V., Obrikko V. N., Khramova E.G. Early solar system, paleomagnetic field and the biosphere: current issues. // 11th International Conference and school «Problems of Geocosmos», p.167-168. 2016.
7. Katsova, M.M. and Livshits, M.A., Activity of the young Sun, in Kosmicheskie faktory evolyutsii biosfery i geosfery (Cosmic Factors of the Evolution of the Biosphere and Geosphere) // St. Petersburg: VVM, pp. 67–81. 2014.

## «Пятиминутные колебания» атмосферного и артериального давления человека как следствие флюктуаций солнечного излучения UVB-UVA

Шаповалов С.Н.<sup>1</sup>, Чернышева М.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт", Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия

[shapovalov@aari.ru](mailto:shapovalov@aari.ru)

Рассматривается связь колебаний приземного атмосферного давления (hPa) на ст.Новолазаревская (Антарктида) с флюктуациями солнечного излучения на участке 297-330 nm (UVB-UVA). В анализе использовались данные наблюдений на спектрометре AvaSpec-2048 и метеостанции «Новолазаревская» в дни солнцестояний 21.12.2008 г. и 21.12.2018 г. Корреляции частотного диапазона между временными рядами hPa и int.297-330 nm показали максимальные значения квадрата спектра когерентности относительно колебаний 3-10 мин. Подобные колебания наблюдались в измерениях артериального давления человека, проводившихся на арх.Северная Земля с 20.01.2017 г. по 18.04.2017 г. в интервале кульминации Солнца. Отмечалось сопряжение максимальной амплитуды акрофазы hPa и некоторого снижения амплитуды «пятиминутных колебаний» систолического давления (BPs), которую следует связать с локальным ростом сосудорасширяющих эффектов активных кислородных метаболитов, синтез которых в стенках сосудов обусловлен интенсивностью UVB(280-315 nm)-UVA(315-400 nm). Выявлен эффект максимума BPs в момент прохождения Солнца через меридиан (истинная кульминация). По нашему предположению эффект BPs может вызываться солнечным термическим приливом, сопровождаемый нагревом озона и парами воды в стратосфере и, соответственно, в тропосфере через поглощение фотонов UVB. Сделаны выводы, что группа «пятиминутных колебаний» во временных рядах hPa и BPs является следствием влияния механизма солнечных осцилляций на мощность излучения UVB-UVA, действующее на приземное температурное поле, формирующее, в свою очередь, приповерхностное барическое поле. С последним связано состояние артериального давления человека.

## Циклические колебания общего содержания озона в Антарктиде под воздействием солнечной активности и вращения солнечной атмосферы

Шаповалов С.Н., Прахов А.Н.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,  
Санкт-Петербург,  
Россия  
[shapovalov@aari.ru](mailto:shapovalov@aari.ru)

Изменения общего содержания озона (ОСО) в Антарктиде обусловлены различными глобальными факторами, в т.ч. вариациями солнечного излучения UVB-UVA в 11-летнем цикле СА.

Представлены результаты анализа спутниковых данных SORCE по мощности излучения на линиях  $\lambda$ 300 nm (UVB) и  $\lambda$ 326 nm (UVA), а также композитному индексу Mg II ( $\lambda$ 280 nm), имеющему наилучшую корреляцию среди индексов СА с набором данных Solar Spectral Irradiance (SSI) за период с 1979 г. по 2019 г. Линии  $\lambda$ 300 nm и  $\lambda$ 326 nm соответствуют длинам волн пропускания светофильтров в озонометрах М-124, используемых в сети наблюдений общего содержания озона в Антарктиде. Данные выбирались на сайтах <https://lasp.colorado.edu/sorce> и <https://www.iup.uni-bremen.de/deu>. В результате построения рядов по среднегодовым значениям W/m<sup>2</sup>/nm и их сопоставления с ходом Mg II ( $\lambda$ 280 nm) в интервале 21-24 СА выявлена тождественность временных распределений  $\lambda$ 300 и Mg II, и расхождение  $\lambda$ 326 с Mg II. Значения корреляции составили  $r=0.8$  и  $r=0.33$ , соответственно.

В наземных спектральных наблюдениях UVB–UVA, выполняемых в Антарктиде на ст. Новолазаревская с помощью спектрометра AvaSpec-2048, в сезон озоновой дыры проявляются вариации, сходственные с вращением солнечной атмосферы (~27 сут). С началом восстановления стратосферного озона до климатической нормы ~220 ед.Д. вариации исчезают.

Полученные результаты свидетельствуют о зависимости ОСО от мощности излучения UVB в 11-летнем цикле СА и обусловленности вариаций ОСО в сезон озоновой дыры вращением солнечной атмосферы.

## Секция 6.

# Прогнозирование солнечной активности и её геоэффективных проявлений

## Прогнозирование суточных потоков релятивистских электронов > 2 МэВ на геостационарной орбите на основе нейронных сетей

Азра-Горская К.Ж.<sup>1,2</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,2</sup>, Власова Н.А.<sup>1</sup>, Беляков Н.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Центр ИИ Сколтеха, Москва, Россия

[azragorskayaCG@my.msu.ru](mailto:azragorskayaCG@my.msu.ru)

Разработана модель для прогнозирования суточных флюенсов (интегральных потоков) релятивистских электронов с энергиями выше 2 МэВ на геостационарной орбите до трех дней вперед. В качестве входных параметров использованы параметры солнечного ветра (скорость -  $V_{sw}$ , плотность -  $P$ , температура ионов -  $Ion\ T$ ) и межпланетного магнитного поля (индукция –  $B_t$  и североюжная компонента –  $B_z$ ), индекс геомагнитных возмущений -  $K_p$ , параметры солнечного ветра ( $V_{sw}$ ,  $P$ ,  $B_z$ ,  $B_t$  и  $Ion\ T$ ), параметры, характеризующие состояние магнитосферы (расстояние до подсолнечной точки -  $R_{ss}$  и величина радиальной компоненты магнитного поля на геостационарной орбите -  $H_e$ ), а также потоки электронов на геостационарной орбите ( $E > 0.8$  МэВ и  $E > 2$  МэВ). Экспериментальные данные по потокам электронов и параметру  $H_e$  получены из измерений на космическом аппарате GOES-15. Каждый параметр при загрузке имеет часовое разрешение, которое пересчитывается в суточное разрешение путем расчета дневного интегрального потока. Использован шестилетний набор экспериментальных данных, с начала 2014 г. до начала 2020 г., с разделением на обучающую, валидационную и тестовую выборки в пропорциях 0.7/0.15/0.15. Модель состоит из комбинации слоев LSTM и GRU. Эффективность предсказания построенной модели для первого, второго и третьего дня составляет 0.88, 0.69 и 0.51, соответственно.

## Статистическая оценка связи амплитуды геомагнитно-индуцированных токов и $dB/dt$ с параметрами межпланетной среды, индексами геомагнитной активности

Белаховский В.Б.<sup>1</sup>, Пилипенко В.А.<sup>2</sup>, Сахаров Я.А.<sup>1</sup>, Селиванов В.Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия

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

[belakhov@mail.ru](mailto:belakhov@mail.ru)

Создана база данных экстремальных значений геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередач (ЛЭП) на Кольском полуострове и в Карелии за 11 лет наблюдений (2012-2022 г.г.). Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом и Центром физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН и включает в себя 5 станций. При анализе событий рассматривались данные по регистрации ГИТ с авроральной станции Выходной (VKH) и субавроральной станции Кондопога (KND). База данных включает 95 событий по данным станции VKH ( $|GIC| > 20$  Ампер), 45 событий по данным станции KND ( $|GIC| > 5$  Ампер). Для регистрации вариаций геомагнитного поля использованы данные обсерватории ПГИ “Ловозеро” (LOZ) и данные станции Mekrijärvi (MEK), входящую в сеть IMAGE.

Анализ показывает, что как для станции VKH, так и для станции KND в основном экстремальные события ГИТ вызваны суббурями ( $>80\%$  случаев), которые примерно с равной вероятностью наблюдаются в послеполуночном и в вечернем секторах MLT. Дневные и утренние события ГИТ вызваны положительными магнитными бухтами, Рс5 геомагнитными пульсациями, SSC импульсом. Во время СМЕ магнитной бури наибольшее число экстремальных событий ГИТ происходит во время главной фазы магнитной бури.

Показано, что связь ГИТ и  $dB/dt$  с параметрами солнечного ветра, межпланетного магнитного поля ( $V$ ,  $Bz$ ,  $Es$ ,  $\epsilon$ ), индексами геомагнитного активности (SYM-H, AE, IE) имеет очень нелинейный характер. Это говорит о сложности прогноза ГИТ на основании этих параметров, поскольку амплитуда ГИТ определяется в целом не глобальными характеристиками магнитосферы, а локальными ионосферными токами [1].

При этом в среднем амплитуда ГИТ растет с ростом интенсивности магнитной бури ( $|SYM-H|$ ), ростом  $dB/dt$ , ростом IE индекса. Связь амплитуды ГИТ с  $dB/dt$  также имеет нелинейный характер, то есть большему значению  $dB/dt$  может соответствовать меньшее значение ГИТ и наоборот. Из всех рассмотренных параметров наиболее высокая корреляция ГИТ

наблюдается с максимальным значением IE индекса в период рассматриваемого возмущения.

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

### Литература

Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Ya. and Selivanov V. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. 9. A18. 2019

## Состояние текущего прогноза солнечной активности на основе динамо модели, управляющей нейронной сетью

Клиорин<sup>1,3,2</sup> Н.И., Кузанян<sup>2,3</sup> К.М., Обридко<sup>2,3</sup> В.Н., Поршнев<sup>4</sup> С.В.,  
Рогачевский<sup>1,5</sup> И.В., Сафиуллин<sup>4</sup> Н.Т.

<sup>1</sup>*Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel*

[nat@bgu.ac.il](mailto:nat@bgu.ac.il)

<sup>2</sup>*ИМНС, г. Пермь, Россия*

<sup>3</sup>*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

<sup>4</sup>*Уральский Федеральный Университет им. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

<sup>5</sup>*KTH, Stockholm, Sweden*

Рассмотрено состояние текущего прогноза числа солнечных пятен в 25 цикле солнечной активности с помощь модели состоящей 1) из осесимметричной упрощённой динамо модели среднего солнечного магнитного поля и 2) управляемой это моделью нейронной сети. Этот метод прогноза был разработан в результате совместной работы Университета и м. Бен-Гуриона в Негеве, г. Беэр – Шева, Израиль и УРФУ им. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия в 2013-17 годах. В 2017 году начались ежемесячные прогнозы числа солнечных пятен, усреднённых скользящим 13-месячным окном. С целью улучшения прогноза будет построена серия моделей среднего магнитного поля Солнца, основанных на теории нелинейного динамо среднего поля. На то, что это возможно, указывает результат работы [1]. В этой работе впервые на основе теории спирального динамо и неустойчивости, связанной с эффектом отрицательного магнитного давления, рассчитан с приемлемой точностью весь ряд Вольфа (1745 – 2016) См Рис. 1(коэффициент корреляции между рассчитанным рядом и наблюдаемым порядка 70%).

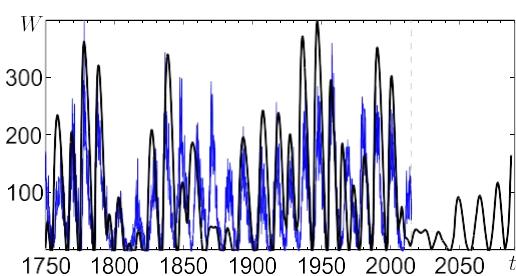


Рис. 1 Чёрная кривая, - расчётный ряд числа солнечных пятен по модели работы [1], синяя кривая ряд Вольфа.

Дальнейшие исследования, приведённые в работах [2,3] позволили превратить теоретическое знание в реальный практический прогноз солнечной активности (Рис. 2).

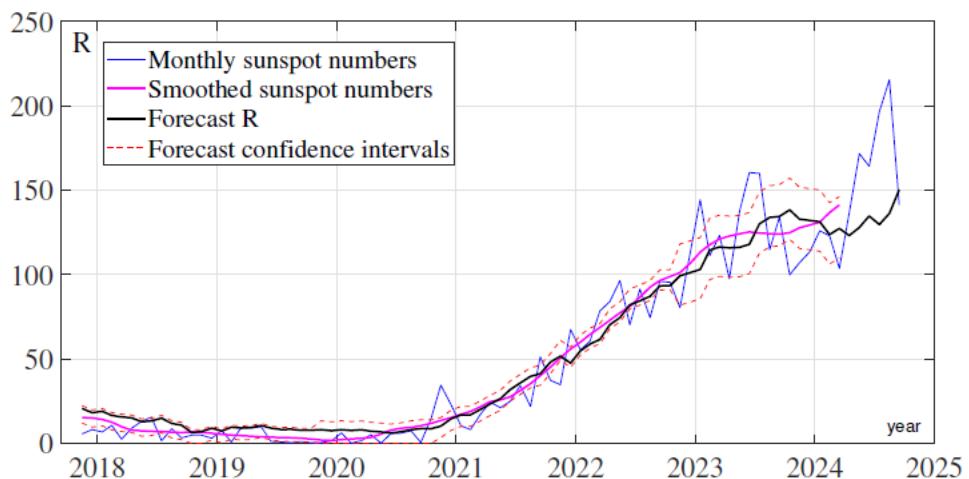


Рис. 2 Кривые, - числа солнечных пятен по модели работ [2-3].

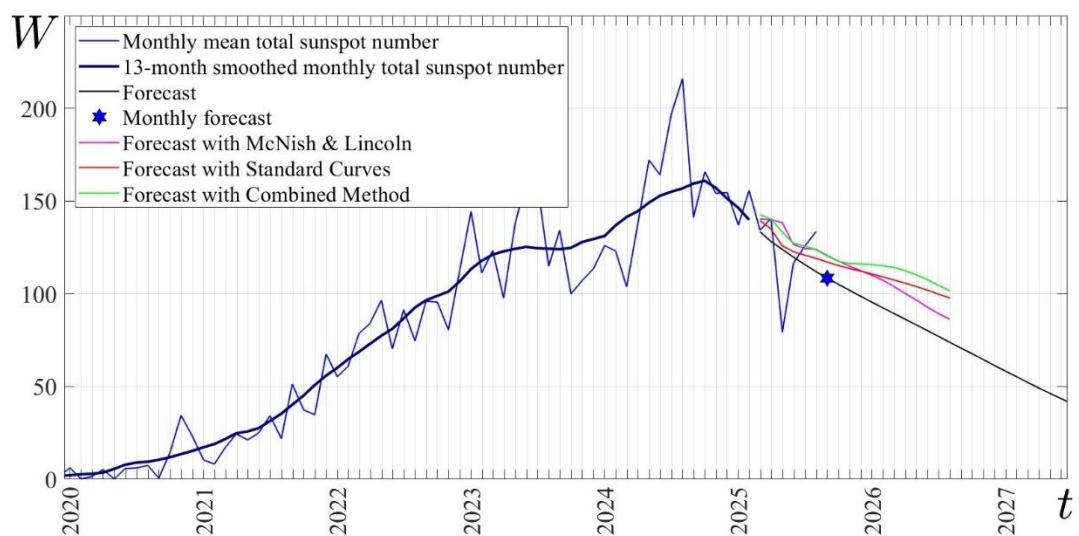


Рис. 3 Кривые, - числа солнечных пятен по модели работ [2-3], а также альтернативные модели.

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

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

## Алгоритм построения байесовских сетей для прогнозирования солнечных протонных событий

Ожередов В.А.<sup>1</sup>, Струминский А.Б.<sup>1</sup>, Григорьева И.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

[ozheredov2016@gmail.com](mailto:ozheredov2016@gmail.com)

Один из популярных подходов в прогнозировании солнечных протонных событий – регрессионный. На его основе вычисляются вероятности возрастания и ожидаемая величина максимального потока в разных диапазонах энергий (см., например, [1]). Однако, в работе [2] предлагается прогнозировать протонные события как результат процесса, поэтапно развивающегося во времени. Цепочка компонентов процесса (далее, для краткости будем называть их просто *событиями*) включает в себя рентгеновскую вспышку, радио-всплески в двух диапазонах 15400-1415 и 610-245МГц, и КВМ. Вероятность каждого события цепочки зависит от характеристик предыдущих событий, поэтому в качестве инструмента прогнозирования здесь напрашивается байесовская сеть. Она позволяет, во-первых, уточнять прогноз в режиме реального времени. Во-вторых, в отличие от регрессионных моделей, в основе которых лежат функции фиксированного числа переменных, сетевые методы прогноза позволяют ориентироваться только на имеющиеся в наличии данные.

С точки зрения прогноза протонных возрастаний, солнечные события условно делятся на предикторы и отклики. События-предикторы – это прямые или косвенные признаки работы ускорителя частиц, такие как нагрев плазмы (температура), интенсивное свечение плазмы в мягком рентгене (мера эмиссии), работа плазменного (610-245МГц) и гироシンхротронного (15400-1415МГц) источника радиоизлучения, а также появление КВМ в поле зрения телескопа LASCO. События-отклики это, собственно, сами протонные возрастания. Конечный алгоритм прогноза помнит (внутри некоторого временного окна, называемого *краткосрочной памятью*) все моменты начала событий-предикторов. В режиме реального времени он вычисляет вероятность появления протонного возрастания как функцию таких характеристик предикторов, как длительность радиоизлучения, скорость КВМ, временная задержка между максимумом температуры и мерой эмиссии в горячей ( $T > 12\text{МК}$ ) фазе вспышки и т.д. Эта функция, по сути – условная вероятность  $P(S/X)$  наступления события-отклика (протонного возрастания  $S$ ) при наблюдаемых значениях характеристик  $X$  событий-признаков, находящихся в краткосрочной памяти алгоритма. Эта вероятность вычисляется на основе статистической модели, представляющей собой направленный граф, в котором узлы это характеристики (параметры) событий, а ребра – наличие влияния параметров друг на друга. Задачей

машинного обучения в данном случае является оптимизация топологии этого графа.

Алгоритм тестировался на обучающей выборке, собранной из событий в каталоге НИИЯФ МГУ [3] и протонных возрастаний, выявленных в результате обработки сигнала SRG [4] методом пересечения скользящих средних (Exponential Moving Average Crossover, EMAC). Выборка охватывает диапазон с 2020 по 2025 год.

### Литература

1. Шлык Н.С. и др. Прогноз вероятности и величины солнечных протонных событий на основе данных о вспышках и выбросах // Геомагнетизм и аэрономия. - 2025. - Т. 65. - №3. - С. 314-323. doi: 10.31857/S0016794025030028
2. Струминский А.Б. и др. Критерии для предсказания протонных событий по солнечным наблюдениям в реальном времени // Геомагнетизм и аэрономия. - 2024. - Т. 64. - №2. - С. 163-174. doi: 10.31857/S0016794024020019
3. [https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep\\_events\\_cat/index.php?gcm=3&lang=en](https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=3&lang=en)
4. <https://monitor.srg.cosmos.ru/?days=all>

## О природе $\Delta^{14}\text{C}$ -всплесков в атмосфере Земли

**Остряков В.М.<sup>1</sup>, Иванов И.А.<sup>1</sup>, Константинов А.Н.<sup>1</sup>, Павлов А.К.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*СПбПУ Петра Великого, С.-Петербург, Россия*

<sup>2</sup>*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия*

[Valery.Ostryakov@mail.ioffe.ru](mailto:Valery.Ostryakov@mail.ioffe.ru)

Предлагается модель переноса радиоуглерода на Земле, способная объяснить резкие возрастания  $\Delta^{14}\text{C}(t)$  в атмосфере, известные как события Мияке. Модель содержит изменяющиеся под действием внешних факторов времена перехода между стратосферой и тропосферой и обратно,  $\tau_{\text{ST}}$  и  $\tau_{\text{TS}}$ . Такими внешними факторами могут быть увеличение средних потоков частиц и/или излучения, падающих на атмосферу Земли. Кроме того, изменения этих параметров могут быть вызваны и внутренними геофизическими (например, климатическими) причинами. Физической основой предлагаемых вариаций величин  $\tau_{\text{ST}}$  и  $\tau_{\text{TS}}$  является возможность нарушения обмена воздушными массами между тропосферой и стратосферой под воздействием внешних (внутренних) факторов. В рамках предлагаемой модели естественным образом объясняются депрессии величины  $\Delta^{14}\text{C}(t)$  непосредственно перед “событием”, на которые ранее не обращалось внимание в известной нам литературе, а само это (внешнее) событие имело отличную от  $\Delta^{14}\text{C}$  временную привязку.

## Прогноз солнечных циклов техникой рекуррентной топологии

Рыбинцев А.С., Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г.

ГАО РАН, С-Петербург, Россия

[ribas591@gmail.com](mailto:ribas591@gmail.com)

Временные ряды чисел Вольфа считаются традиционными индикаторами режимов Солнечной Активности (СА). Оригинальный временной ряд наблюдается с 1849 года и демонстрирует рекуррентное поведение. Оно представлено 25-ю неидентичными циклами; их морфологию описывают некоторыми эмпирическими правилами, достоверность которых трудно проверить по столь малой выборки. Мы не знаем, во-первых, что ряд Вольфа можно вообще «объяснить» какой-либо детерминированной моделью и во-вторых, индексы ряда не являются первичными [1] (фазовыми) переменными и поэтому его роль в будущей модели СА не ясна. Популярность ряда вызвана ранними результатами Фурье-анализа, которые дали большой набор гармоник, от квази-двухлеток до вековых и сверхвековых циклов [1]. Спектральная техника исключает вопрос об источнике сигнала а значимость найденных периодов трудно оценить. Тем не менее, эти результаты широко используется для обнаружения солнечного сигнала в осцилляторных рядах климатических и биофизических процессов: в силу принципа трансверсальности, такие ряды почти всегда коррелируют – этот эффект был назван Уитни Юлом *нонсенс-корреляцией*. Климатические шкалы обычно превышают инструментальный ряд Вольфа. Но полученные реконструкции палеоклимата обязаны космогенным изотопам, содержание которых в атмосфере определяется, в том числе, и состоянием СА. Поэтому возникли и реконструкции СА в прошлое. Однако, убедиться в их качестве невозможно без анализа прогностических свойств ряда чисел Вольфа. В линейных моделях эти свойства называют *объяснимостью* данных по Калману для которого имеется и нелинейное обобщение. В нашем случае, это означало бы возможность получить предсказание цикла ( $N-1$ ) по циклу  $N$ . Но, обратимость ряда чисел Вольфа для *postdiction* вообще не исследована, поэтому анализировать его память можно лишь при *forecasting*. Предложенных схем чрезвычайно много, включая недавние, экзотические [2,3]. Однако типичным для прогноза временных рядов является нелинейный контекст [4]. В нем временной ряд рассматривают, как *детерминированно-порожденную наблюдаемую* в смысле Таксенса, т.е. как типичную проекцию фазовых точек траектории аттрактора. Восстановление геометрии топологическим вложением временного ряда приводит к нелинейной AR схеме [4], реализованной на ИНС. Основой является идея рекуррентности *что было то и будет*, приводящая к *аналогам* в истории ряда. Ими служат фрагменты ряда из его прошлого, «похожие», в  $L_p$  – метрике, на современный интервал. Длина фрагмента и степень похожести, являются свободными параметрами. Сам прогноз определяется как взвешенное среднее по продолжениям фрагментов, в прошлом. Оценки алгоритмической

сложности и современный вариант спектра для рядов Вольфа, с одной превалентной модой, не противоречат идеям детерминированного хаоса в СА [5]. Однако, формальное подтверждение этой идеи пока отсутствует; устойчивых результатов предсказания циклов тоже нет. В отличие от известных вариантов, в нашей работе для прогноза используются не *метрические*, а *топологические* аналоги. Они были предложены в [6], как локальные окрестности в текстуре известного графика рекуррентности (RP). Клеточную топологию окрестностей RP можно переписать в символические последовательности, используя технику масштабной сегментации текстур [6]. Такой способ аналогичен выделению паттернов рекуррентности в символической динамике [7]. Тестовый прогноз для временных рядов аттрактора Рёссlera дал хорошие результаты [6]. Мы использовали для СА стандартный ряд индексов Вольфа SSN2, сглаженных по 13 точкам. В докладе приводятся примеры прогнозов, включая последний цикл. В целом, полученные результаты указывают на *отсутствие* персистентных топологических аналогов. Возможно, это связано с природой самих данных, не объяснимых по Калману, либо комбинаторная динамика по ряду имеет сложную рекуррентную структуру, которая требует дополнительного анализа.

#### Литература

1. Витинский Ю. И., Копецкий М., Кукин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. 1986.
2. Kumar A., Kumar V. Hybrid-Ensemble Deep-Learning Models to Enhance the Sunspot Prediction and Forecasting of Solar Cycle 26 //Solar Physics. – 2025. – v. 300. – №. 7. – C. 1-42.
3. Flández E., Muñoz V. A Prediction of Solar Cycle Maxima Using Visibility Graphs //The Astrophys. J. 2025. V. 990. №. 1. P. 21.
4. Макаренко Н.Г. Эмбедология и нейропрогноз // Лекции по нейроинформатике, Нейроинформатика-2003, М.:2003. С. 86–148
5. Makarenko N. G., Volobuev D. M., Rybintsev A. S. Testing the Deterministic Component of the Time Series of Wolf Numbers by Methods of Algorithmic Complexity //Geomagnetism and Aeronomy. 2024. v. 64. №. 8. P. 1318-1327.
6. Chomiak T., Hu B. Time-series forecasting through recurrent topology //Communications Engineering. 2024. v. 3. №. 1. C. 9.
7. Graben P. B., Hutt A. Detecting recurrence domains of dynamical systems by symbolic dynamics //Phys. Rev.Lett. 2013. v.110. №. 15. P. 154101.

## Форбуш-эффект 1-10 июня 2025 года: комплексный анализ по данным нейтронного монитора и космических наблюдений

Сейфуллина Б.Б.<sup>1,2</sup>, Крякунова О.Н.<sup>1</sup>, Цепакина И.Л.<sup>1</sup>,  
Николаевский Н.Ф.<sup>1</sup>, Койчубаев Р.Е.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан,

<sup>2</sup>Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан

[botanaika.93@gmail.com](mailto:botanaika.93@gmail.com)

В данной работе проведён анализ события, зарегистрированного в период 1-10 июня 2025 г. нейтронным монитором ААТВ (Алматы, Казахстан; 3340 м над уровнем моря; жесткость геомагнитного обрезания  $R = 5.9$  ГВ). Амплитуда снижения интенсивности космических лучей, зарегистрированная нейтронным монитором, составила около 12%, что позволяет классифицировать данное событие как большой Форбуш-эффект. [1]. Активная область AR 14100 стала источником возмущений, породив серию вспышек классов M3.4 и M8.1 (30-31 мая 2025 г.), сопровождавшихся быстрыми корональными выбросами массы (КВМ) типа гало со скоростями до 1700 км/с. Сопоставление данных нейтронного монитора с межпланетными параметрами показало классическую структуру межпланетного КВМ, включающую межпланетную ударную волну 1 июня, 05:45 UT, область возмущенной сжатой плазмы и область коронального выброса до 2 июня, 01:10 UT [2,3]. Событие сопровождалось развитием интенсивной геомагнитной бури, максимальная фаза которой наблюдалась 2 июня. Результаты демонстрируют тесную взаимосвязь между солнечной активностью, динамикой межпланетного КВМ и модуляцией потоков галактических космических лучей ГКЛ, подчёркивая значимость комплексного подхода к диагностике и прогнозированию космической погоды.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23489700 «Анализ событий космической погоды вблизи максимума 25 цикла солнечной активности и разработка модернизированной системы предупреждения о повышении радиационной обстановки»)

### Литература

1. Belov A. V. et al. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Advances in Space Research. Vol. 27, pp. 625-630, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3)
2. Belov A. V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Universal Heliosophysical Processes, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Vol. 257, pp. 439–450. (2009)
3. Webb D. F., Howard T. A. Coronal mass ejections: observations // Living Reviews in Solar Physics, 9 (3), (2012). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>

## Технологии мониторинга начала циклов солнечной активности в ФГБУ ИПГ

Тертышников А.В.  
ФГБУ «ИПГ», Москва, Россия,  
[atert@mail.ru](mailto:atert@mail.ru)

Данные о характеристиках солнечной активности поступают в Росгидромет в соответствие с действующим Постановлением Совета Министров СССР от 12.11.1973 г. № 836-277 [1], преимущественно с Горной астрономической станции (ГАС) Главной (Пулковской) астрономической обсерватории (ГАО) [2].

Рекомендации по прогнозированию динамики цикла солнечной активности даны в [3] на основе полиномов для данных измерений интенсивности коротковолнового излучения Солнца и наблюдений солнечного диска с учетом характеристик предыдущих циклов. При этом нужны данные о начале цикла солнечной активности.

Для определения начала «одиннадцатилетних» циклов солнечной активности в России обычно ориентировались на источники зарубежной информации с Бельгийской королевской обсерватории и из США [2], так как не было соответствующих методик [2, 4, 5]. Зарубежные эксперты для прогноза начала очередного цикла диагностировали локальный среднегодовой минимум мощности коротковолнового излучения Солнца в данных инструментальных измерений солнечной активности. Активно использовались графические методы [2, 5, 6].

Сомнения руководства ГАО РАН в необходимости продолжения наблюдений на ГАС ГАО РАН, борьба с интеллектуальным потенциалом и ее филиалом в Кисловодске обусловили поиск в Институте прикладной геофизики имени Академика Е.К. Федорова (ФГБУ ИПГ) альтернативных источников информации о солнечной активности для гелиогеофизического обеспечения страны. В том числе о начале циклов. Для этого были использованы данные инструментальных измерений о состоянии ионосферы и верхней атмосферы, которые зависят от уровня коротковолнового солнечного излучения.

По расчетам специалистов ФГБУ ИПГ с учетом закона Шпёйера и закона Швабе–Вольфа [2, 5, 6], имеющихся данных наблюдений солнечной цикличности, минимум 24 «одиннадцатилетнего» цикла солнечной активности был пройден весной 2019 года, после чего с осени 2019 г. начался очередной 25-й «одиннадцатилетний» цикл солнечной активности. Полученная оценка соответствовала мнению экспертов по гелиогеофизике NASA и NOAA, которые определяли начало цикла на декабрь 2019 года.

Предложены критерии для определения начала «11-летнего» цикла солнечной активности по измерениям сетевыми приборами ФГБУ ИПГ.

Разработанные технологии обеспечили информационную независимость национального гелиогеофизического обеспечения в решении задачи определения начала цикла солнечной активности.

### Литература

1. Постановление Совета Министров СССР от 12.11.1973 г. № 836-277 “О развитии работ по изучению и прогнозированию радиационной обстановки в космическом пространстве, состоянии ионосферы и магнитного поля Земли и обеспечении радиационной безопасности экипажей космических кораблей”.
2. Tertyshnikov A.V. The Beginning of the 25th Cycle of Solar Activity in Variations of the Oxygen Ion Density in the Orbit of the Meteor Spacecraft//Cosmic Res. 63, 276–283 (2025). <https://doi.org/10.1134/S0010952525601380>.
3. Расчеты баллистические искусственных спутников Земли. Методика расчета индексов солнечной активности. ГОСТ 25345.302-83.
4. Solar Cycle Progression Updated Prediction (Experimental): Validation Document MARK MIESCH CIRES/University of Colorado, NOAA Space Weather Prediction Center Last updated: November 8, 2023. [https://testbed.swpc.noaa.gov/sites/default/files/2023-11/solar\\_cycle\\_experimental\\_prediction\\_validation.pdf](https://testbed.swpc.noaa.gov/sites/default/files/2023-11/solar_cycle_experimental_prediction_validation.pdf).
5. Тертышников А.В. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент. Заявка: 2023135791, 27.12.2023. Дата регистрации: 23.07.2024. Бюл. № 21.
6. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза. - Санкт-Петербург: ВВМ, 2017. 466 с.

## Углы наклона низкоширотных биполей в 15-24x циклах активности

Тлатов А.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Кисловодск, Россия

<sup>2</sup>КалмГУ, Элиста, Россия

[tlatov@mail.ru](mailto:tlatov@mail.ru)

Выполнен анализ изменения углов наклона биполей в 15-24x циклах активности. Мы использовали данные измерений магнитных полей ядрах солнечных пятен в период 1918-2019 гг. обсерватории Маунт Вилсон (MNTWMF), а также активных областей в “белом” свете обсерваторий Кодайканал (KK) и Маунт Вилсон (MWO) в 15-21м циклах активности. Рассмотрены долговременные изменения средних углов наклона биполей  $\langle\gamma\rangle$  и коэффициента  $\mu$  и широтой  $\theta$  в зависимости  $\gamma \sim \mu \theta$ . Найдено, что наибольшая корреляция параметров  $\langle\gamma\rangle$  и  $\mu$  с амплитудой следующего цикла солнечной активности характерна для биполей приэкваториальной зоны с  $\theta < 14.2^\circ$  для данных магнитных полей и  $\theta < 10^\circ$  для данных белого света.

## Прогнозирование полного электронного содержания ионосферы на основе периодической модели коэффициентов сферического разложения

Трофимов Д.А.<sup>1</sup>, Петров С.Д.<sup>1</sup>, Серов Ю.А.<sup>2</sup>, Чекунов И.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва,

Россия

[d.trofimov@spbu.ru](mailto:d.trofimov@spbu.ru)

В настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) стали одним из важнейших источников научной информации в геофизике, изучении процессов в недрах Земли и в атмосфере. Одним из важных направлений исследований, выполняемых с помощью ГНСС является изучение переменных процессов в ионосфере. При прохождении навигационного радиосигнала через ионосферу, изменяется время его прохождения, причем это изменение зависит от частоты сигнала и полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Передача сигнала на двух частотах позволяет почти полностью учесть эффект от задержки в ионосфере, не обладая никакой априорной информацией о её состоянии. Однако, основной массив пользовательской наземной аппаратуры ГНСС составляют одночастотные приемники, возникает проблема учета ионосферной задержки в одночастотных наблюдениях. Она решается либо за счет использования специальных моделей ионосферы, параметры которых передаются в составе навигационного сообщения, либо с помощью карт ионосферы, в которых содержится информация о ПЭС в зависимости от времени и координат. Данные модели обладают разной эффективностью [1], в случае сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением такая модель отсутствует. Карты ионосферы представляются службами по обработке ГНСС данных и могут использоваться при обработке ГНСС-измерений в камеральном режиме.

В ходе работы по созданию модели ионосферы для сигналов ГЛОНАСС с частотным разделением было проведено разложение массива глобальных ионосферных карт, предоставляемых CODE (Center for Orbit Determination in Europe) за 1999-2023 годы, были получены ряды коэффициентов сферического разложения ПЭС по 15 степень и 15 порядок включительно. Для коэффициентов с небольшими степенями и порядками прослеживается зависимость от индексов солнечной активности, прежде всего  $F_{10.7}$  [2]. Предполагается построение модели для коэффициентов сферического разложения на основе тригонометрических полиномов.

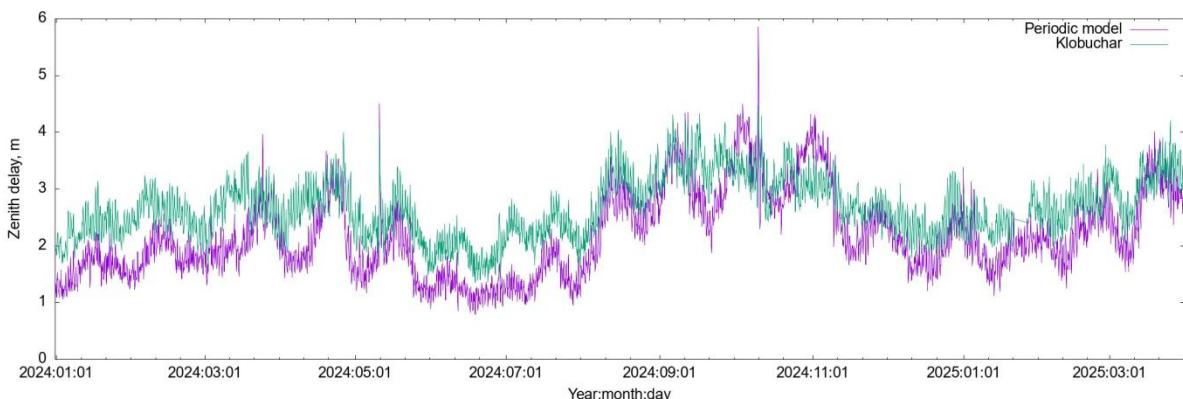


Рис.1 Сравнение СКО карт, построенных на основе модели ПЭС ионосферы на основе тригонометрических полиномов от карт, на основе наблюдений с СКО карт, построенных на основе модели Клобушара от карт, на основе наблюдений

Была построена периодическая модель ПЭС, которая отображает основные циклы, такие как 11-летний цикл солнечной активности, сезонные и суточные вариации, позволяющая осуществлять прогноз состояния ионосферы на уровне модели Клобушара, используемой в GPS. На рис. 1 представлено среднеквадратичное отклонение карты, построенной на основе модели от карты, построенной на основе наблюдений на глобальной сети ГНСС станций, в сравнении, со среднеквадратичным отклонением карты, построенной на основе модели Клобушара. Данная модель позволяет проводить прогноз зная только время, на которое необходимо получить информацию. Предполагается дальнейшее развитие модели.

### Литература

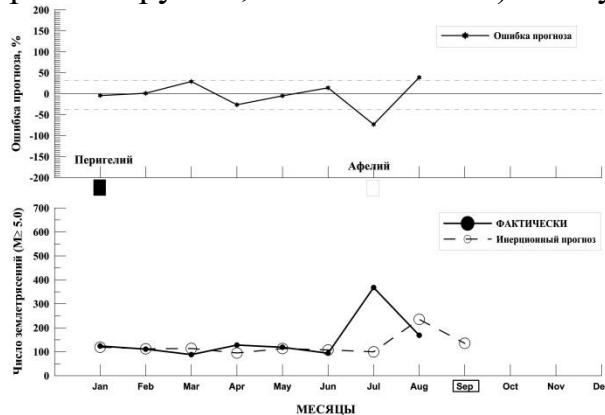
1. Ярюкевич Ю. В., Ярюкевич А. С., Затолокин Д. А. Оценка эффективности моделей ионосферы в целях коррекции одночастотных координатных измерений ГНСС // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике — 2022. Труды XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2022. С. 345–347.
2. Трофимов Д. А., Петров С. Д., Чекунов И. В., Щербакова Н. В. Динамика земной ионосферы в сферических функциях // Журнал технической физики. 2024. Т. 94, № 12. С. 2083–2087.

## Сезонные вариации глобальной сейсмической активности Земли и её ежемесячный эмпирический прогноз в 2025 г.

Хегай В.В., Легенька А.Д.  
ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия  
[hegai@izmiran.ru](mailto:hegai@izmiran.ru)

Проведено сравнение оценки ежемесячной интенсивности глобальной сейсмической активности Земли (САЗ) в 2025 г. (полученной на основе метода наложения эпох [1]), с фактическим ходом САЗ. С интервалом в один месяц показаны два временных ряда: первый ряд характеризует фактически наблюдавшуюся САЗ, а второй – прогнозируемую на месяц вперед САЗ. В качестве исходной меры глобальной интенсивности САЗ при ее анализе было выбрано суммарное число сильных (магнитуда  $M \geq 5.0$ ) коровых (глубина гипоцентра  $0 \leq h \leq 60$  км) землетрясений по всему миру, взятое по каталогу USGS [2] за период с 1973 г. по 2025 г. для каждого из индивидуальных месяцев по отдельности. Также представлена оценка ошибки прогноза.

Приведенный ниже рисунок отображает временной ход ошибки прогноза (в процентах, верхняя панель), ход фактически имевшей место САЗ (сплошная линия, черные кружки, нижняя панель) и ход прогнозной кривой (штриховая линия, открытые кружки, нижняя панель) в текущем году.



Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ ГАН Исследование солнечной активности и физических процессов в системе "Солнце-Земля" (рег. № 1021100714181-3)

### Литература

1. Дещеревский А. В., Идармачев Ш. Г. Адаптация метода наложенных эпох для сигналов с нерегулярным графиком наблюдений // Сейсмические приборы. Т. 60. № 1. С. 5–24. 2024. DOI: 10.21455/si2024.1-1
2. <https://www.usgs.gov/>

**Секция 7.**  
**Солнечно-звёздные аналогии, звёздные**  
**циклы активности**

## Распределение и время жизни пятен у М карликов в системе GJ 669 AB

Бондарь Н.И., Антонюк К.А., Пить Н.В.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

[otbn@mail.ru](mailto:otbn@mail.ru)

Астрометрическую систему GJ 669 AB образуют две сравнительно яркие звезды, разделенные на  $16''.7$  и отличающиеся по блеску примерно на  $1^m.6$ . Согласно данным SIMBAD V647 Her (GJ 669 A) - красный карлик спектрального класса M3.5Ve,  $M=0.37M_{\odot}$  имеет блеск в полосе  $V=11^m.34 - 11^m.42$ , а менее яркая звезда V639 Her (GJ 669 B), блеск которой составляет  $12.98 - 13^m.02$ , является более холодным и менее массивным красным карликом (M4.5Ve,  $M=0.31M_{\odot}$ ). Имеющееся различие по массе указывает на различие внутреннего строения звезд [1]: у V647 Her имеется радиативное ядро и конвективная зона, V639 Her является полностью конвективной звездой. У обеих звезд зарегистрированы вспышки, проявления активности звезд в разных диапазонах длин волн рассмотрено в [2], где отмечено, что в радиодиапазоне активность наблюдается только у V639 Her.

В настоящей работе мы выполнили сравнительный анализ фотосферной активности звезд по фотометрическим наблюдениям, полученным в Крымской астрофизической обсерватории на 1.25 м телескопе в 2019, 2022, 2024 гг., и рядам  $V$ - величин, представленным в базах данных ASAS (2003-2009), SuperWASP (2004), APASS (2012). В работах [3,4] показано, что малоамплитудные изменения блеска звезд обусловлены наличием фотосферных пятен. Распределение пятен мы рассмотрели для каждого года наблюдений по фазовым кривым блеска, построенным с периодом вращения 20.69 сут для V647 Her и 1.4576 сут для V639 Her. Мы определили параметры вращательной модуляции блеска – амплитуду  $A_{\text{mod}}$  относительно локального максимума блеска и фазу минимума для начальной эпохи  $T_0=2453128.5104$ , а также временной интервал  $\Delta t$ , на котором сохраняется стабильность этих параметров, т.е. поверхностное распределение пятен. Для V647 Her время жизни не превышает 100-120 сут, что соответствует ~5-6 оборотам звезды, среднее значение  $\Delta t \sim 75$  сут, у V639 Her картина запятненности фотосфера сохраняется около 60 дней, в некоторые эпохи до 100 дней, или до 70 оборотов. Пятна образуются на обоих полушариях на долготах, отстоящих на 0.5-0.6 по фазе, в отдельные эпохи наблюдаются пятна на фазе 0.5. Амплитуда модуляции у V647 Her составляет  $0^m.05 - 0^m.10$ , у V639 Her  $A_{\text{mod}} < 0^m.07$ .

Найденные характеристики вращательной модуляции свидетельствуют о более устойчивом и значительном запятнении поверхности у V647 Her по сравнению с более холодным и менее массивным красным карликом V639 Her.

### Литература

1. Chabrier G., Baraffe I. Structure and evolution of low-mass stars // Astron. Astrophys. V. 327. P. 1039-1053. 1997.
2. Quiroga-Nuñez L.H., Intema H.T., Callingham J. R., et al. Differences in radio emission from similar M dwarfs in the binary system Ross 867-8 // Astron. Astrophys. V.633. id. A130. 9 pp. 2020.
3. Bondar' N.I., Antonyuk K.A., Pit' N.V. Periodic variations in the brightness of the red dwarf V647 Her // Astrophysics. V. 65. P. 483-493. 2022.
4. Бондарь Н.И., Антонюк К.А., Пить Н.В. Фотометрическая активность быстровращающейся dM4.5e звезды V639 Her // Геомагнетизм и Аэрономия. 2025 (в печати).

## Генерация энергичных электронов в альфвеновских крыльях Ганимеда и Европы

**Зайцев В.В., Шапошников В.Е., Симонова Т.В., Кузнецов А.А.**

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

[za130@appl.sci-nnov.ru](mailto:za130@appl.sci-nnov.ru)

Взаимодействие спутников Ганимеда и Европы с быстровращающейся магнитосферной плазмой Юпитера приводит к возникновению электродинамической системы, создающий авроральный след в ионосфере Юпитера в ультрафиолетовом и декаметровом диапазонах. Предлагаемая работа посвящена исследованию механизма ускорения частиц, возникающего в такой системе и способного обеспечить необходимую для генерации наблюдаемого аврорального излучения энергию ускоренных частиц. Измерения потоков энергичных электронов, выполненные на КА Juno, показали, что в альфвеновских трубках (или альфвеновских крыльях), проходящих через спутники Ганимед и Европа, и в их следе в ионосфере Юпитера электроны имеют широкий энергетический спектр в диапазоне от нескольких десятков электронвольт до нескольких десятков килоэлектронвольт [1]. Ганимед и Европа, двигаясь как проводящие объекты в магнитном поле Юпитера, индуцируют электрическое поле, зависящее от скорости спутников относительно плазмы, увлекаемой магнитным полем планеты, а также от величины магнитного поля на орбитах соответствующих спутников. Индуцированное электрическое поле приводит к возникновению электродвижущей силы и к генерации электрических токов, переносимых альфвеновскими волнами вдоль альфвеновских крыльев спутников и замыкающихся в ионосфере Юпитера. Величина токов составляет  $\approx 470$  кА и  $\approx 490$  кА для Ганимеда и Европы, соответственно [2,3].

В настоящее время ускорение электронов электрическим полем альфвеновских волн, возбуждаемых спутниками Юпитера, является широко обсуждаемым механизмом ускорения для объяснения наблюдаемого аврорального излучения. Однако вопрос об эффективности этого механизма до настоящего времени остается открытым. Мы исследовали эффективность ускорения в ситуации, когда альфвеновские волны достигают ионосферы Юпитера. Были рассмотрены два возможных механизма: ускорение нелинейными альфвеновскими волнами и ускорение линейными инерциальными альфвеновскими волнами. Первый механизм реализуется, когда давление азимутальной компоненты магнитного поля в альфвеновской волне превышает газокинетическое давление. В этом случае ускоряющее электрическое поле пропорционально кубу электрического тока в альфвеновской волне. При ускорении линейными инерциальными волнами ускоряющее электрическое поле обусловлено инерцией электронов в альфвеновской волне (см., в этой связи [4]). Проведенные оценки показывают, что в условиях ионосферы Юпитера ускорение электронов до

энергий, достаточных для генерации ультрафиолетового и декаметрового излучений в основаниях альфвеновских крыльев Ганимеда и Европы, с наибольшей вероятностью возможно в нелинейных альфвеновских волнах. При этом величина ускорения на масштабе альфвеновской волны составляет  $400 \text{ эВ} \div 1,3 \text{ кэВ}$  - в случае Ганимеда и  $1,3 \text{ кэВ} \div 4,9 \text{ кэВ}$  - в случае Европы. Энергии быстрых электронов, инициированных Ганимедом, достаточны для генерации ультрафиолетового излучения, но могут оказаться недостаточно большими для реализации механизма электронного циклотронного мазера, с которым обычно связывают происхождение всплесков декаметрового радиоизлучения Юпитера. Электронный циклотронный механизм не эффективен при энергиях излучающих электронов  $< 0,5 \text{ кэВ}$  [5]. В этом случае более эффективным может оказаться плазменный механизм радиоизлучения, который менее критичен к энергии быстрых электронов. При ускорении инерциальными альфвеновскими волнами величина ускорения на масштабе волны не достигает одного электронвольта и, по всей вероятности, этот механизм не может обеспечить энергию электронов, достаточную, для генерации как ультрафиолетового, так и радиоизлучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 25-22-00238).

### Литература

1. Rabia J. et al. Properties of electrons accelerated by the Ganymede-magnetosphere interaction: Survey of Juno high-latitude observations. // JGR. V. 129. id. e2024JA032604. 2023
2. Lavrukhan A. S. and Alexeev I. I. Aurora at high latitudes of Ganymede // Astronomy Letters. V. 41. P. 687. 2015
3. Blöcker A., Saur J., and Roth L. Europa's plasma interaction with an inhomogeneous atmosphere: Development of Alfvén winglets within the Alfvén wings // JGR. V. 121, P. 9794. 2016
4. Lysak R. L., and Song Y. Kinetic theory of the Alfvén wave acceleration of auroral electrons // JGR. V. 108. P. 8005 2003
5. Wong H.K., Krauss-Verban D., and Wu C.S. On the role of the energy of suprathermal electrons in the generation of auroral kilometric radiation // JGR V. 94. P. 5327. 1989

## Индукрованный звездный ветер в рентгеновских тесных двойных системах

Бескровная Н.Г.<sup>1</sup>, Ихсанов Н.Р.<sup>1</sup>, Ким В.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АФИФ, Алматы, Казахстан

[beskrovnaya@yahoo.com](mailto:beskrovnaya@yahoo.com)

Магнито-вспышечная активность, горячая корона и магнитный звездный ветер на скоростях от нескольких сотен до тысячи километров в секунду являются неотъемлемыми характеристиками звезд позднего спектрального класса. Выделенный характер этих объектов обычно ассоциируется с их внутренней структурой, включающей в себя конвективную зону, расположенную под фотосферой звезды. Конвективные движения среды в этой зоне в совокупности с дифференциальным вращением звезды создают благоприятные условия для генерации магнитного поля, составляющего основу активности, наблюданной в ее атмосфере. Большинство моделей внутреннего строения звезд раннего спектрального класса (O-B) не предполагают существования конвективной зоны в их подфотосферной области. Звездный ветер этих объектов имеет, как правило, радиационную природу (обусловленную относительно большим числом ультрафиолетовых квантов, испускаемых с их поверхности) и отличается высокими значениями терминальной скорости, превышающими тысячу километров в секунду. Исключением из этого правила оказываются, однако, тесные двойные системы. Возмущения, создаваемые одним из компонентов системы в атмосфере другого, в наиболее тесных парах оказываются достаточными для возникновения благоприятных условий генерации магнитных полей в области фотосферы. В результате, ветер звезд ранних спектральных классов, истекающий в плоскости орбиты таких систем, по своим основным характеристикам оказывается подобен ветру звезд солнечного типа [1]. В своем докладе мы приводим параметры тесных двойных систем и характеристики звездного ветра их компонентов, наиболее полно изученных к настоящему времени. Мы обращаем внимание, что по ряду своих параметров такие системы могут рассматриваться как естественные лаборатории по исследованию индуцированного магнитного звездного ветра.

### Литература

Beskrovnaya, Ihsanov and Kim 2025, Galaxies 13, Issue 2, id.37 doi:  
[10.3390/galaxies13020037](https://doi.org/10.3390/galaxies13020037)

## Природа необычной спектральной активности звезд типа FK Com

Козлова О.В.<sup>1</sup>, Алексеев И.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>КРАО РАН, Научный, Крым, РФ

[oles\\_kozlova@mail.ru](mailto:oles_kozlova@mail.ru)

Звезды типа FK Com образуют небольшую группу одиночных быстровращающихся гигантов спектральных классов G-K. Их отличает вращение, близкое к критическому, и необычные широкие 2-х компонентные эмиссионные профили бальмеровских линий. В то же время фотометрическая активность этих звезд совершенно обычна и ничем не отличается от других запятненных звезд близких масс.

Необычная спектральная активность самой FK Com сегодня активно обсуждается, но традиционно трактуется в рамках классической хромосферной активности (см. [1-2]), в которой никак не учитывается ее аномально быстрое вращение.

В представленной работе анализируется спектральная активность нескольких звезд этой группы - самой FK Com, IN Com, HD 199178, а также звезды, близкой по своим спектральным характеристикам к звездам типа FK Com - KU Peg. Все спектры были получены в Крымской астрофизической обсерватории ( $R=20000$ ) в области линий H $\alpha$ , резонансного дублета Na I D и гелия He I 5876. Показано, что все звезды, за исключением KU Peg, окружены компактными, твердотельно вращающимися горячими околозвездными газовыми дисками, которые и обуславливают наблюдаемые у них необычные профили эмиссионных линий H $\alpha$  и гелия He I 5876. Параметры этих дисков меняются вместе с циклом активности звезды. Звезда KU Peg, чья скорость составляет только 30% от критической, является по своим свойствам переходным звеном между звездами типа FK Com и звездами типа RS CVn.

Именно аномально быстрое вращение звезд типа FK Com является тем механизмом, который запускает процесс формирования околозвездных газовых дисков, окружающих эти объекты. Исследователи запятненных звезд предпочитают в их отношении использовать термин «протуберанцы», оставаясь в рамках классического подхода звездной хромосферной активности [1]. Мы полагаем, что термин «диск» лучше передает суть происходящих у звезд типа FK Com процессов (см. работу [3]). Полученные нами результаты позволяют говорить о звездах этого типа, как о холодных аналогах хорошо известной группы Be звезд.

## Литература

1. Vida K., Korhonen H. et al. Study of FK Comae Berenices VII. Correlating photospheric and chromospheric activity // A&A. V.580. P. 64-78. 2015.
2. Ayres T.R. et al. FK Comae Berenices, king of spin: the cocoa-puffs project // AJSS. V.223. P. 5-38. 2016.
3. Kozlova O.V., Alekseev I.Yu. The stellar wind as a key to the understanding of the spectral activity of IN Com // Bull. of the Crimean Astrophys. Obs. V.110. N. 1. P. 37-44. 2014.

## Границные условия гармонического магнитного поля в солнечном и звездном динамо

Пипин В.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
[pip@iszf.irk.ru](mailto:pip@iszf.irk.ru)

Наблюдения указывают на ненулевое тороидальное магнитное поле на фотосфере Солнца и других звезд и рост амплитуды поля с увеличением скорости вращения звезды, [2,3]. Результаты прямого численного моделирования, [4], указывают на возможное влияние звездной короны на свойства крупномасштабного динамо внутри конвективной оболочки. В этой работе, используя граничные условия гармонического магнитного поля, [1], мы рассматриваем влияние диффузионных свойств звездной короны на устойчивость динамо внутри конвективной зоны Солнца. Решение задачи на собственные значения показывает, что эффект вакуумных граничных условий может быть восстановлен, если мы введем скачок на несколько порядков величины турбулентной диффузии коронального магнитного поля по сравнению с его типичным значением на поверхности динамо. Параметры этого скачка определяют критический порог неустойчивости  $\alpha$  эффекта и период цикла в  $\alpha^2 \Omega$  динамо, см Рис.1.

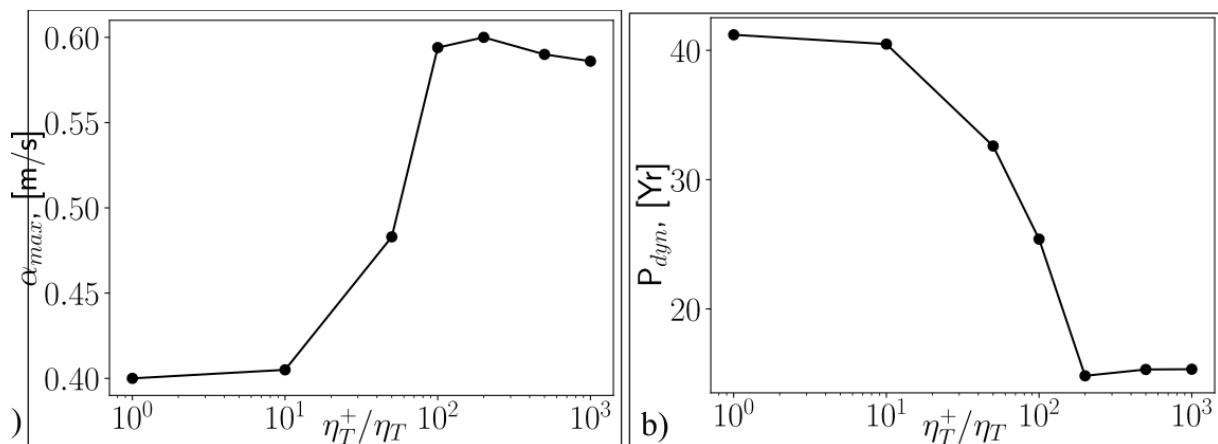


Рис.1. а)Критическая амплитуда  $\alpha$  эффекта в конвективной оболочке Солнца, зависимости от скачка коэффициента диффузии на поверхности,  $\eta_T^+$  - коэффициент диффузии в короне;  
б) Тоже что и а) для периода динамо цикла.

Кроме того, используя нелинейную модель динамо, [5], мы оценили амплитуду тороидального магнитного поля на поверхности,  $B_\phi^{surf}$ , свободную магнитную энергию короны,  $E^{free} = E^M - E^{pot}$ , где  $E^M$  - полная магнитная энергия короны, а  $E^{pot}$  - энергия потенциального магнитного поля короны, см Рис.2.

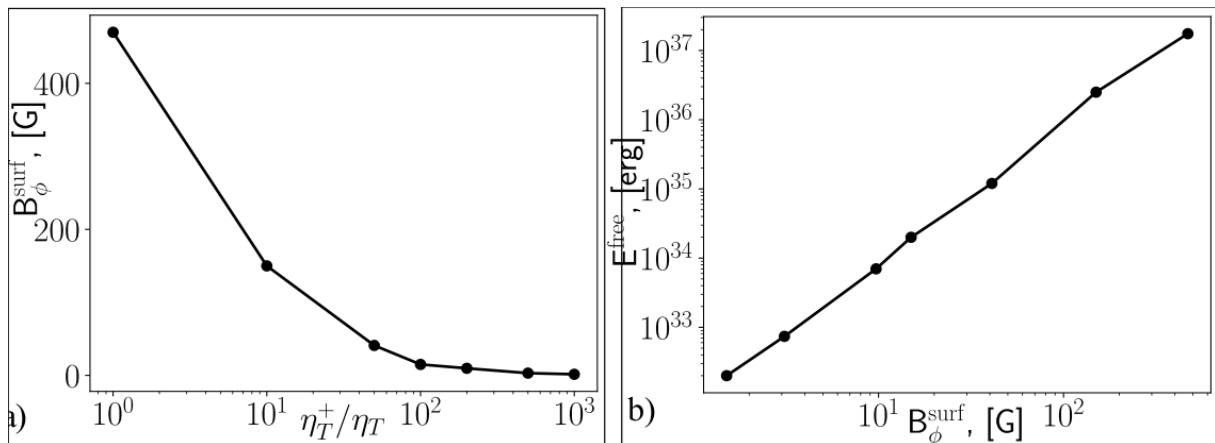


Рис.2. а) Зависимость амплитуды тороидального магнитного поля на поверхности,  $B_\phi^{surf}$ , от скачка  $\eta_T^+/\eta_T$ , б) Зависимость свободной энергии короны от  $B_\phi^{surf}$ .

Результаты Рис.2 показывают, что наблюдаемая на Солнце амплитуда фотосферного тороидального поля в несколько Гаусс, [2], соответствует скачку  $\eta_T^+/\eta_T=1000$ . При этом свободная энергия магнитного поля составляет  $E^{free} \approx 4 \times 10^{32}$  erg, что на порядок меньше оценки свободной энергии магнитных полей активных областей, [6]. Расчеты показывают, что для солнечно-подобной звезды с таким же параметром  $\eta_T^+/\eta_T$  и периодом вращения 20 и 16 дней, амплитуда тороидального магнитного поля на поверхности этих звезд может достигать нескольких десятков Гаусс, а свободная энергия крупномасштабного магнитного поля короны может составлять  $10^{34}$  и  $10^{35}$  erg, для периода вращения 20 и 16 дней, соответственно. Этого должно быть достаточно для энергии супер-вспышки, особенно, если учесть дополнительную свободную энергию магнитных полей активных областей.

### Литература

1. Bonanno A. Stellar Dynamo Models with Prominent Surface Toroidal Fields// *Astrophys. J. Lett.*, 833, L22, 2016.
2. Duvall Jr., T. L. et al. Average photospheric poloidal and toroidal magnetic field components near solar minimum // *Solar Phys.*, 61, 233, 1979.
3. See, V. et al. // The connection between stellar activity cycles and magnetic field topology// *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 462, 4442, 2016.
4. Jakab P. et al The effect of a dynamo-generated field on the Parker wind // *A&A*, 647, A18, 2021.
5. Pipin V.V. et al. On the Origin of Solar Torsional Oscillations and Extended Solar Cycle // *Astrophys.J.*, 887, 215, 2019.
6. Yeates A. The Sun's Non-Potential Corona over Solar Cycle 24 // *Solar Phys.*, 83, 299, 2024.

## Исследование вспышечной активности рентгеновского излучения звезд типа $\gamma$ Cas и звезд ранних спектральных классов

Рыспаева Е. Б.<sup>1</sup>, Холтыгин А. Ф.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

[e.ryspaeva@yandex.ru](mailto:e.ryspaeva@yandex.ru)

К загадочному подклассу звезд типа  $\gamma$  Cas (аналогов  $\gamma$  Cas, [1]) относятся одиночные или двойные Ве-звезды с маломассивным спутником с необычно жестким рентгеновским излучением. У этих объектов рентгеновская светимость выше, чем у типичных Ве-звезд, но ниже, чем у рентгеновских двойных систем с Ве-компонентами, а в предположении о полностью тепловой природе рентгеновского излучения звезд типа  $\gamma$  Cas, температура излучающей плазмы должна достигать 10-20 кэВ и даже более. Многие авторы объясняют формирование рентгеновского излучения загадочных звезд пересоединением силовых линий локального магнитного поля звезды и магнитного поля декреционного диска. Такое рентгеновское излучение должно состоять из большого числа коротких вспышек (вспышечно-подобных событий, быстрых вспышек). В статье [2] для проверки гипотезы были проанализированы рентгеновского кривые блеска звезды типа  $\gamma$  Cas BZ Cru (HD 110432, B0.5IVpe) и обнаружены 1615 вспышечно-подобных событий длительностью до полутора минут. Цель настоящей работы — исследование, являются ли быстрые рентгеновские вспышки свойственными только аналогам  $\gamma$  Cas, либо присутствуют и на других звездах ранних спектральных классов. Усовершенствован метод поиска быстрых вспышек [2] и проведен поиск в кривых блеска 9 звезд типа  $\gamma$  Cas, 7 типичных Ве звезд и 15 ОВ звезд, извлеченных из архивных наблюдений на спутнике «XMM-Newton». Выполнены: поиск вспышек на разных диапазонах энергий, анализ профилей вспышек, оценка интегральных мощностей вспышек. Показано, что в кривых блеска звезд всех трех рассмотренных типов имеют место быстрые вспышки, и медленно меняющийся уровень без вспышек. У рассмотренных Ве и ОВ звезд выявлено намного меньше быстрых вспышек, чем на аналогах  $\gamma$  Cas, а вспышки у этих объектов преобладают на энергиях до 1 кэВ и имеют «колоколообразные» профили. Такие вспышки могут быть подобны солнечным нановспышкам, приводящим к нагреву короны (Cargill & Klimchuk, 1997). На звездах типа  $\gamma$  Cas быстрые вспышки не имеют единой формы профиля и регистрируются как на энергиях до 1 кэВ, так и на

энергиях 1-4 кэВ. Вспышки на энергиях выше 1 кэВ связаны предположительно с акрецией на компактный компонент (предположительно магнитный белый карлик). Быстрые вспышки на одиночных звездах типа  $\gamma$  Cas, по-видимому, генерируются на малых энергиях до 1-2 кэВ в результате событий пересоединения силовых линий локальных магнитных полей.

### Литература

1. Smith, M. A. et al., The X-ray emission of the  $\gamma$  Cassiopeiae stars, // AdSpR, vol. 58, no. 5, pp. 782–808, 2016
2. Smith, M. A. et al. Characterization of the X-Ray Light Curve of the  $\gamma$  Cas-like B1e Star HD 110432// The ApJ, vol. 755, no. 1, Art. no. 64
3. Cargill, P. J. and Klimchuk, J. A., A Nanoflare Explanation for the Heating of Coronal Loops Observed by Yohko// The ApJ, vol. 478, no. 2, pp. 799–806, 1997

## Возможный тип поздних спектральных классов – нерегулярные инверсии магнитного поля

Соколов Д.Д.<sup>1</sup>, Коробейников Д.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГУ и ИЗМИРАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>ИИФЗ РАН и МФТИ(НИУ), Москва, Россия

[Sokoloff.dd@gmail.com](mailto:Sokoloff.dd@gmail.com), [korobeinikov.dv@phystech.edu](mailto:korobeinikov.dv@phystech.edu)

В изучении циклов звездной активности в аспекте солнечно-звездных аналогий особую роль играют результаты долговременного мониторинга активности звезд поздних спектральных классов и, прежде всего, Н-К проекта. В рамках этих результатов обнаруживается значительная группа звезд, активность которых похожа на солнечную активность. В частности, выявляется цикл активности с длительностью, сопоставимой с солнечным циклом. Именно эти результаты и привлекали наибольшее внимание. Однако эти звезды не исчерпывают весь список изученных звезд и даже далеко не составляют большинство этих звезд. Активность остальных звезд несколько характеризуется различным образом, но в целом речь идет о звездах с нециклической магнитной активностью. Природа этой активности по нашему мнению тоже требует объяснения.

В докладе мы предлагаем гипотезу, объясняющую эту активность в рамках примерно тех же физических процессов, какими объясняется циклическая активность, однако действующих при несколько других значениях управляющих параметров. Мы предлагаем связать эту активность с действием того же звездного динамо, основанного на совместном действии дифференциального вращения и зеркально асимметричной конвекции. Предлагаемая идея отталкивается от того факта, что подобное нециклическое поведение хорошо известно по данным палеомагнитологии для одного из двух небесных тел, магнитная история которого нам хорошо известна – а именно, Земли (другим примером, конечно, является Солнце).

Разумеется, мы осознаем, что физические условия во внешнем ядре Земли, где генерируется магнитное поле Земли, сильно отличаются от условий в конвективной зоне Солнца. Однако в нем естественно предполагать наличие обоих факторов, поддерживающих солнечное динамо, т.е. дифференциального вращения и зеркальной асимметрии.

Мы опираемся также на простую и неоднократно исследованную в другом контексте модель сферического динамо, идейно восходящую к исходной модели Паркера. Эта модель в одной области параметрического пространства обнаруживает поведение солнечного типа, а в другой – последовательность нерегулярных инверсий магнитного поля.

Временные шкалы вариаций магнитного поля обоих режимах, выраженные в безразмерных единицах, сопоставимы. Однако при переходе в размерные единицы, естественные для Земли и Солнца соответственно, сильно различаются. В итоге, на звездах, сходных с Солнцем, но не

обнаруживающих циклической активности, мы ожидаем, что их магнитных момент меняет знак нерегулярно, раз в десяток или несколько десятков лет, а само время инверсии на несколько порядков меньше и может быть сопоставимо с месяцем.

Вопрос о регулярных способах идентификации обоих режимов поведения магнитного поля по данным наблюдений и численных симуляций, а также выяснение того, насколько резким является переход от одного режима к другому в параметрическом пространстве, также представляют, по нашему мнению, несомненный интерес.

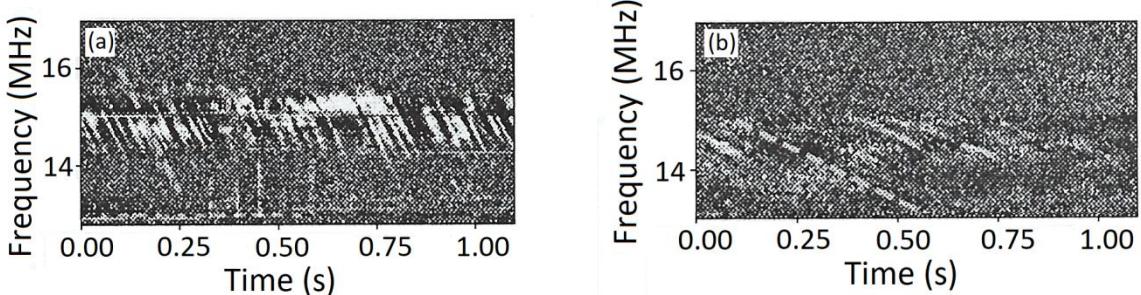
Мы обсуждаем возможные наблюдательные тесты, которые могли бы подтвердить или опровергнуть предлагаемую гипотезу.

## Индукционное Ганимедом квазипериодическое декаметровое радиоизлучение Юпитера

Шапошников В.Е., Зайцев В.В.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия  
[sh130@appl.sci-nnov.ru](mailto:sh130@appl.sci-nnov.ru)

В работе обсуждается возможность реализации плазменного механизма генерации в источнике декаметрового радиоизлучения, связанного с Ганимедом, и объяснение на основе этого механизма формирования квазипериодических последовательностей всплесков этого излучения. На Рисунках (а) и (б) представлены фрагменты динамических спектров квазипериодических последовательностей импульсов декаметрового радиоизлучения Юпитера, инициированного Ганимедом (адаптирован из Рис. 4b в работе [1]). Основное отличие этих последова-



тельностей является существенно разная величина скорости частотного дрейфа импульсов излучения – 17 МГц/сек (а) и – 3,4 МГц/сек (б).

Наиболее широко обсуждаемым механизмом генерации декаметрового радиоизлучения Юпитера, в том числе квазипериодических последовательностей импульсов излучения, является электронно-циклотронный мазер (ЭЦМ), обусловленный электронами с энергиями порядка нескольких десятков кэВ и неравновесной функцией распределения по скоростям. В рамках данной модели отрицательный частотный связывают с дрейфом излучающих электронов или всей области генерации вдоль силовых линий магнитного поля планеты, а появление квазипериодических последовательностей всплесков обусловлено существованием в ионосфере Юпитера альфвеновского резонатора, в котором приходящей от спутника альфвеновской волной возбуждаются колебания, электрическое поле которых ускоряет электроны [1,2]. Однако такой подход к объяснению возникновения квазипериодических отрицательно дрейфующих по частоте импульсов излучения сталкивается с определенными трудностями. В частности, ЭЦМ является неэффективным источником излучения при энергиях неравновесных электронов, которые необходимы для возникновения медленного частотного дрейфа, например, как на рисунке (б). Кроме того, в рамках ускорительного механизма, связанного с альфвеновским резонатором трудно реализовать цуги импульсов с большим количеством импульсов, например, как на рисунке (а).

В предлагаемой работе на примере всплесков, представленных на рисунках (а) и (б), предложен другой подход к решению проблемы возникновения квазипериодических отрицательно дрейфующих последовательностей всплесков декаметровом радиоизлучении, связанных с Ганимедом, который свободен от выше указанных недостатков ЭЦМ модели. Согласно предлагаемой модели, источником излучения являются неравновесные электроны, генерирующие плазменный волны на частоте верхнего гибридного резонанса. Эти волны в результате рассеяния на потоках надтепловых ионов конвертируются в электромагнитные волны необыкновенного типа с малым показателем преломления  $n_e \ll 1$ . Квазипериодические последовательности импульсов излучения являются следствием реализации в источнике пульсирующего режима конверсии плазменных волн в необыкновенные электромагнитные. Отрицательный частотный дрейф излучения обусловлен групповым запаздыванием волн с малым показателем преломления и дисперсией среды. Оценки показывают, что наблюдаемые скорости частотного дрейфа реализуются при концентрации равновесной плазмы в ионосфере  $N \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Причем более низкие по абсолютной величине скорости дрейфа реализуются в источнике с меньшей концентрацией плазмы:  $N \approx 10^5 \text{ см}^{-3}$  соответствует скорости дрейфа  $-17 \text{ МГц/сек}$ , а концентрация  $N \approx 5 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$  соответствует дрейфу со скоростью  $-3,4 \text{ МГц/сек}$ . Период пульсаций излучения зависит от параметров основной плазмы в источнике, температуры  $T$  и концентрации  $N$ , а также от концентрации энергичных неравновесных электронов  $N_e$ . Для  $T = 1500 K$  и  $N = (0,5 - 1) \times 10^5 \text{ см}^{-3}$  энергичные электроны с концентрацией  $N_e \approx 10^2 \text{ см}^{-3}$  обеспечивают наблюдаемые периоды повторения импульсов излучения. Полученные оценки параметров плазмы в области генерации находятся в согласии с данными спутниковых измерений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 25-22-00238).

### Литература

1. Mauduit E. et al. Drifting discrete Jovian radio bursts reveal acceleration processes related to Ganymede and the main aurora // Nature Communications. V. 14. id. 5981. 2023
2. Ergun R.E. et al. S bursts and the Jupiter ionospheric Alfvén resonator // JGR. V. 111 id. A06212. 2006