

**Основная часть отчета по НИР**  
**«Физика Солнца и плазменная астрофизика»**  
**за период 1 января - 31 декабря 2022 г**  
**Номер договора: госзадание ГАИШ 4.1**  
**Номер ЦИТИС: АААА-А20-120012990066-6**

- Руководитель НИР: [Сомов Б.В.](#)
- Участники НИР: [Безродных С.И.](#), [Верещагин Ф.В.](#), [Грицык П.А.](#), [Думин Ю.В.](#), [Думин-Барковская О.В.](#), [Леденцов Л.С.](#), [Якунина Г.В.](#)

В рамках работы над темой был исследован ряд вопросов плазменной астрофизики, большинство из которых имеют непосредственное применение в физике Солнца. По теме исследований в 2021 году опубликовано 10 статей: 6 в журналах WoS (из них 1 в Top-25), 4 в сборниках конференций. Результаты работы доложены в 15 устных и 4 стендовых докладах. Основные результаты следующие.

1) Топологическая количественная оценка "анемонных" (ветвящихся) солнечных вспышек

Так называемые «анемонные» солнечные вспышки представляют собой интересный тип космических плазменных явлений, в котором множественные нулевые точки магнитного поля соединяются друг с другом и с магнитными источниками через сепараторы, тем самым создавая сложные разветвленные конфигурации. Используя методы динамических систем и теорию Морса-Смейла, мы выводим несколько универсальных топологических соотношений между числом источников магнитного поля (эффективных «магнитных зарядов») и числом нулевых точек различных типов (положительных и отрицательных). Эти соотношения представляют собой ценный инструмент для анализа структуры сложных магнитных полей, в частности, в солнечных «анемонных» вспышках. С одной стороны, эти формулы основаны на чисто топологическом рассмотрении и, следовательно, не задают никаких соотношений между положением магнитных зарядов и нулевых точек. С другой стороны, наши соотношения более общие, чем известные ранее, поскольку применимы к произвольному числу зарядов. В частности, мы приводим конфигурации зарядов и нулевых точек заданного типа, для которых не существует сепараторов. Важной предпосылкой применения неравенств Морса—Смейла является требование положительной (или отрицательной) неуравновешенности группы магнитных зарядов. Конечно, это сужает область применимости вышеупомянутых неравенств к конкретным конфигурациям солнечных магнитных полей. Однако, «анемонные» микровспышки часто развиваются в районах с несбалансированной магнитной полярностью. Таким образом, применимость ограничений Морса—Смейла к этим случаям вполне оправдана.

Evgeny V. Zhuzhoma, Vladislav S. Medvedev, Yurii V. Dumin, Boris V. Somov, Topological Quantification of the "Anemone" (Branching) Solar Flares // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. — 2022. — Vol. 436. — P. 133320.

- DOI: [10.1016/j.physd.2022.133320](https://doi.org/10.1016/j.physd.2022.133320)

2) Релаксация электронной температуры в кластеризованной ультрахолодной плазме

Ультрахолодная плазма является перспективным кандидатом для создания сильно связанных кулоновских систем. К сожалению, фактически достигаемые после фотоионизации нейтральных атомов значения параметра связи остаются относительно малыми из-за значительного собственного разогрева электронов. Возможным способом обойти это препятствие может быть

использование спонтанной ионизации ультрахолодного ридберговского газа, где начальная кинетическая энергия может быть намного меньше. Однако спонтанная лавинная ионизация может привести к очень неоднородному распределению (кластеризации) ионов, что существенно изменит эффективность релаксации электронов вблизи таких кластеров. Мы проверили эту гипотезу с помощью обширного набора численных моделей. В результате, несмотря на меньшую начальную кинетическую энергию, последующая релаксация скоростей электронов в кластеризованной плазме протекает гораздо бурнее, чем в случае статистически однородного ионного распределения. Температура электронов, во-первых, испытывает резкий начальный скачок (предположительно, вызванный «вириализацией» энергий заряженных частиц), а во-вторых, имеет последующий постепенный рост (предположительно, связанный с многочастичной рекомбинацией электронов в ионные кластеры). В качестве возможного инструмента снижения аномального повышения температуры мы также рассмотрели двухступенчатое плазмообразование с участием заблокированных ридберговских состояний. Это приводит к подавлению кластеризации за счет квазирегулярного распределения ионов. В таком случае, согласно численному моделированию, последующая эволюция электронной температуры протекает более плавно, примерно с той же скоростью, что и при статистически однородном ионном распределении.

*Dumin Y. V., Lukashenko A. T. Electron temperature relaxation in the clusterized ultracold plasmas // Physics of Plasmas. — 2022. — Vol. 29, no. 11. — P. 113506.*

- DOI: [10.1063/5.0093840](https://doi.org/10.1063/5.0093840)

### 3) Метод поиска нановспышек и пространственное распределение нановспышек в короне Солнца

Солнечные нановспышки — мелкомасштабные события, которые могут играть значительную роль в нагреве короны. Из-за слабой величины сигнала поиск и исследование нановспышек представляет собой непростую задачу, которая по-разному решается разными авторами. Мы представляем собственный метод регистрации нановспышек, который, по нашему мнению, позволяет эффективно измерять темп формирования нановспышек, а также их пространственное распределение на изображениях Солнца в вакуумном УФ диапазоне спектра. Мы исследовали серию из 300 изображений Солнца, полученных телескопом SDO/AIA в канале 171 Å в период низкой активности Солнца (с 12:00 UT по 13:00 UT 20 мая 2019 г.) и определили темп формирования нановспышек:  $P \approx 4.23 \times 10^{(-21)} \text{ см}^{(-2)} \text{ с}^{(-1)}$ , который оказался в согласии с результатами других авторов, а также исследовали зависимость  $P$  от гелиографической широты и яркости короны Солнца. Согласно нашим результатам, темп формирования нановспышек не зависит от гелиошироты, что отличается от поведения обычных вспышек, формирующихся в узких поясах активности. Также обнаружена связь между величиной  $P$  [пикс<sup>(-1)</sup> ч<sup>(-1)</sup>] и светимостью короны  $I$  [отсчеты]:  $\lg P = -2.27 + 0.00327 I$ . Мы оцениваем наши результаты как благоприятные для теории нагрева короны нановспышками. Прежде всего, если НВ равномерно присутствуют в значительном диапазоне широт, их полная энергия, проинтегрированная по поверхности Солнца, будет выше, чем если бы они находились только в узких поясах активности. Кроме того, механизм нагрева короны по определению должен быть почти однородным в пространстве и протекать почти равномерно по времени. В противном случае можно было бы ожидать значительных изменений температуры короны, которые не наблюдаются.

*Д. И. Завершинский, С. А. Богачёв, С. А. Белов, Л. С. Леденцов. Метод поиска нановспышек и их пространственное распределение в короне Солнца // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. — 2022. — Т. 48, № 9. — С. 665–675.*

- DOI: [10.31857/S0320010822090091](https://doi.org/10.31857/S0320010822090091)

#### 4) Современные аналитические модели ускорения и распространения электронов в солнечных вспышках

Представлен обзор современного состояния кинетической теории ускорения и распространения энергичных (тепловых и нетепловых) электронов во время солнечных вспышек. Подробно рассмотрены классические модели толстой мишени и их дальнейшее развитие — модели, учитывающие эффект обратного тока и ускорение электронов в коллапсирующих магнитных ловушках. Найдены аналитические решения соответствующих кинетических уравнений. На основе этих решений рассчитаны характеристики генерируемого энергичными электронами тормозного жесткого рентгеновского излучения. Полученные результаты сравниваются с современными данными высокоточных спутниковых наблюдений вспышек. Рассчитана степень поляризации излучения, и обсуждаются возможности ее измерения в будущих космических экспериментах. Представленные в работе кинетические модели вспышки, включающие в себя процессы вторичного ускорения и распространения в атмосфере Солнца заряженных частиц, соответствуют современному состоянию теории и наблюдений, вполне подходят для расчетов характеристик тормозного рентгеновского излучения. Однако следует отметить возможные направления их дальнейшего развития с учетом будущих экспериментов. Прежде всего необходимы проверки моделей дополнительного ускорения электронов в корональных магнитных ловушках на большом количестве вспышечных событий, для которых угловое разрешение рентгеновских наблюдений не превышает  $1'$ , а временное разрешение составляет  $\sim 1$  с. По-прежнему остается открытым вопрос о начальном угловом распределении инжектируемых энергичных электронов, которое непосредственно влияет на величину измеряемой поляризации излучения. Наконец, современные разработки наземных оптических наблюдений обещают получение томографических разрезов активных областей и вспышек, что позволило бы регистрировать поля скоростей на разных уровнях в атмосфере Солнца.

*Грицык П. А., Сомов Б. В. Современные аналитические модели ускорения и распространения электронов в солнечных вспышках // Успехи физических наук. — принята в печать.*

- DOI: [10.3367/ufne.2021.08.039048](https://doi.org/10.3367/ufne.2021.08.039048)

#### 5) Солнечные вспышки в КУФ и рентгеновском диапазонах по спутниковым данным SDO и TIMED

Мы проанализировали потоки в белом свете и их вариации в 23 и 24 солнечных циклах по данным спутников Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) и Solar TERrestrial RElations Observatory (STEREO). Нами представлен обзор скоростей коронального вещества в плоскости изображения по результатам наблюдений, опубликованным в научных журналах и онлайн ресурсах. На расстояниях 2–6 радиусов Солнца ( $R_{\odot}$ ) обнаружены плазменные сгустки, движущиеся как к Солнцу, так и от его поверхности со скоростями от десятков до сотен  $\text{km s}^{-1}$ . Нами изучены профили корональных линий, полученных во время полных солнечных затмений, содержащих информацию о физических параметрах солнечной короны. Наблюдения, сделанные во время полных солнечных затмений, дают убедительные доказательства существования движения масс в короне. Мы рассмотрели наблюдательные данные, полученные на коронографах SOHO/LASCO и STEREO, а также результаты наблюдений со спутников PSP и SoLO. Многочисленные структуры (уплотнения и петли), движущиеся от Солнца и к Солнцу, предполагают постоянный обмен плазмой и магнитным потоком между областями замкнутого и открытого полей. Атмосфера тихого Солнца оказалась чрезвычайно динамичной. Эти результаты могут помочь лучше понять динамику короны, а также происхождение и ускорение солнечного ветра. Изучение этих явлений может привести к лучшему пониманию магнитного пересоединения и его роли в короне и солнечном ветре.

*Yakunina G. V. Flows of matter in the solar corona according to observations in white light // Geomagnetism and Aeronomy. — 2022. — Vol. 62, no. 7. — P. 882–887.*

- DOI: [10.1134/S0016793222070209](https://doi.org/10.1134/S0016793222070209)

#### б) Обработка и визуализация серии монохроматических изображений областей Солнца

Для обработки и визуализации монохроматических изображений областей Солнца, полученных с помощью многоканального ПЗС-спектрогелиографа, были выбраны и затем доработаны свободно распространяемые программы ImageJ и ParaView. Многоканальный ПЗС-спектрогелиограф используется в отделе физики Солнца на башенном телескопе АТБ-1 для изучения нестационарных явлений в хромосфере Солнца. При работе этого прибора изображение участка Солнца передается на входную щель спектрографа через сканирующую призму для получения серии спектральных профилей. Необходимо было разработать программное обеспечение для изучения полученных трехмерных ( $x, y, \lambda$ ) наборов данных. Возможность использования ImageJ в качестве библиотеки обработки изображений, возможность визуальной настройки параметров отображения изображения в ParaView не только позволили обработать и визуализировать полученные трехмерные ( $x, y, \lambda$ ) наборы данных, но и уменьшили время, необходимое для разработки программного обеспечения обработки и визуализации данных для многоканального ПЗС-спектрогелиографа, а также облегчило внесение в него дальнейших исправлений и дополнений.

*Vereshchagin F. V. Processing and visualisation of a series of monochromatic images of regions of the sun // Open Astronomy. — 2022. — Vol. 31, no. 1. — P. 20–21.*

- DOI: [10.1515/astro-2022-0004](https://doi.org/10.1515/astro-2022-0004)

Кроме того, в 2022 г. Леденцов Л.С. и Сомов Б.В. читали спецкурс «Плазменная астрофизика» (весенний и осенний семестры). В издательство МГУ направлена книга Леденцов Л.С., Сомов Б.В. «Лекции по плазменной астрофизике», подписан договор, сроки издания не определены.