

**Основная часть отчета по НИР
«Физика Солнца и плазменная астрофизика»
за период 1 января - 31 декабря 2023 г
Номер договора: госзадание ГАИШ 4.1
Номер ЦИТИС: АААА-А20-120012990066-6**

- Руководитель НИР: [Леденцов Л.С.](#)
- Участники НИР: [Верещагин Ф.В.](#), [Грицык П.А.](#), [Думин Ю.В.](#), [Думин-Барковская О.В.](#), [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 2023 году опубликовано 6 статей (5 в журналах WoS, 1 в сборниках конференций) и 1 учебник Леденцов Л.С., Сомов Б.В. «Лекции по плазменной астрофизике: классические основы теории». Результаты работы доложены в 8 устных и 1 стендовом докладах. Основные результаты следующие.

1) 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.

Грицык П. А., Сомов Б. В. Современные аналитические модели ускорения и распространения электронов в солнечных вспышках // Успехи физических наук. — 2023. — Т. 193, № 5. — С. 465–490.

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

2) О возможной интерпретации антикорреляции между температурой протонов и плотностью солнечного ветра

Антикоррелированный характер распределения температуры и плотности протонов является хорошо известным свойством солнечного ветра. Однако вплоть до настоящего времени остается неясным, лежит ли в основе этого явления какой-либо универсальный физический механизм? К сожалению, простое рассмотрение, основанное на сопоставлении характерных времен релаксации температуры и плотности, с одной стороны, и давления, с другой стороны, сталкивается с проблемой неприменимости гидродинамического подхода в условиях, когда длина свободного пробега протонов значительно превышает пространственный размер анализируемых структур. Для разрешения этого противоречия обычно привлекаются те или иные виды МГД турбулентности, уменьшающие эффективные длины свободного пробега. В настоящей статье

рассматривается альтернативный подход, основанный на электростатической (ленгмюровской) турбулентности, описываемой математическим формализмом спиновых гамильтонианов, который активно обсуждается в последнее время в литературе по статистической физике. Как вытекает из соответствующих расчетов, формирование антикоррелированных распределений температуры и плотности является универсальным свойством сильно-неравновесных плазменных состояний, описываемых гамильтонианами спинового типа, в процессе их приближения к состоянию термодинамического равновесия; и именно этот феномен мог бы лежать в основе антикорреляций, наблюдаемых в солнечном ветре.

Думин Ю. В., Лукашенко А. Т., Свирская Л. М. О возможной интерпретации антикорреляции между температурой протонов и плотностью солнечного ветра // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* — 2023. — Т. 78, № 3. — С. 2330803.

- DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2330803](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2330803)

3) Униполярные солнечные вспышки как проявление «топологического» магнитного пересоединения

Солнечные вспышки, являющиеся наиболее ярким элементом солнечной активности, обычно имеют вид одной или нескольких светящихся дуг (трубок магнитного поля), уходящих основаниями в области противоположной полярности на фотосфере. Однако тщательный анализ архивных данных спутника Hinode иногда выявляет необычные случаи вспыхивающих дуг, основания которых принадлежат областям одной полярности или областям без сколько-нибудь заметного магнитного поля. Несмотря на противоречивость этого явления, его можно разумно интерпретировать в рамках так называемой «топологической модели» магнитного пересоединения, где магнитная нулевая точка формируется за счет специфической суперпозиции влияний удаленных источников, а не локального тока системы. В результате энергосодержание распространяется не вдоль неподвижной силовой линии магнитного поля, а вдоль сепаратора переворачивающейся двухкупольной структуры. Следовательно, светящуюся дугу больше не нужно напрямую связывать с источниками магнитного поля. Мы сообщаем об обоих наблюдательных случаях вышеупомянутого типа, а также приводим их теоретическую модель и численное моделирование.

Dumin Y. V., Somov B. V. Unipolar solar flares as a manifestation of 'topological' magnetic reconnection // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters.* — 2024. — Vol. 528, no. 1. — P. L15–L19. [принято к печати в 2024 году]

- DOI: [10.1093/mnrasl/slad162](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slad162)

4) Лекции по плазменной астрофизике: классические основы теории

Книга содержит изложение курса лекций по классическим основам плазменной астрофизики — фундаментальной науки, которая изучает преимущественно электромагнитные процессы и явления в космической плазме. В лекциях всюду демонстрируются общие черты и фундаментальные различия свойств плазмы, обусловленные электромагнитными и гравитационными взаимодействиями. Нет и не может быть простой единой модели плазмы в безграничном многообразии астрономических условий. Идея данного курса лекций нетипична для большинства учебников по плазменной астрофизике. Она состоит в последовательном рассмотрении физических принципов, начиная с наиболее общих, наиболее точных и упрощающих предположений, которые позволяют найти простые способы описания плазмы в астрофизических условиях. На этом пути — от общего к частному — в данном учебнике всюду

специально очерчиваются границы области применимости очередного, более простого приближения с физической точки зрения и с точки зрения его возможных приложений.

Леденцов Л. С., Сомов Б. В. Лекции по плазменной астрофизике: классические основы теории. — *Издательство Московского университета Москва*, 2023. — 424 с.

- ISBN: 978-5-19-011830-8

5) Метод оценки пространственного периода энергосвечения в солнечных вспышках

С целью анализа современных спутниковых наблюдений аркад вспышечных корональных петель предложен метод оценки пространственного периода энергосвечения в солнечных вспышках. Метод основывается на применении анализа Фурье к разностным изображениям вспышечных аркад в далеком ультрафиолетовом диапазоне. Работа метода продемонстрирована на примере наблюдения Бастильской вспышки с космического аппарата TRACE в канале 171 Å. Среднее значение пространственного периода энергосвечения в Бастильской вспышке, определенное предложенным методом, составляет 5–8 Мм, что хорошо согласуется со сценарием развития тепловой неустойчивости предвспышечного токового слоя в солнечных вспышках.

Леденцов Л. С. Метод оценки пространственного периода энергосвечения в солнечных вспышках // *Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика*. — 2023. — Т. 49, № 11. [принято к печати]

- DOI: [10.31857/S0320010823110062](https://doi.org/10.31857/S0320010823110062)

6) Темп формирования солнечных нановспышек в различных спектральных диапазонах

Частота и темп формирования солнечных нановспышек (НВ) измерены в 6 корональных спектральных диапазонах (094 Å, 131 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 335 Å) и одном, относящимся к переходному слою (304 Å). Были использованы данные SDO/AIA, полученные в минимуме солнечной активности в мае 2019 г. Мы проанализировали одну и ту же область Солнца размером 360'' × 720'' во всех каналах на протяжении интервала времени 1 час. Для поиска НВ во всех спектральных диапазонах мы применили одинаковый алгоритм, основанный на анализе амплитуды быстрых уярчений на изображениях. Частота и темп НВ, как можно ожидать, существенно различаются в различных диапазонах. Для порога 5σ наибольшая частота НВ, 207 с⁻¹, измерена в канале 171 Å. Далее следуют спектральные диапазоны 193 Å (85% от канала 171 Å), 211 Å (74%) и 131 Å (63%). Мы не смогли достоверно измерить частоту в каналах 094 Å и 335 Å, но установили, что она составляет менее 15% от частоты в канале 171 Å. В канале 304 Å мы обнаружили большое число уярчений, которые не имеют соответствия в короне. Тем не менее около 40% корональных НВ имеют соответствие в линии 304 Å, с порогом выше 5σ.

Завершинский Д. И., Богачёв С. А., Белов С. А., Леденцов Л. С. Темп формирования солнечных нановспышек в различных спектральных диапазонах // *Астрономический журнал*. — 2023. — Т. 100, № 12. [принято к печати]

- DOI: [10.31857/S0004629923120010](https://doi.org/10.31857/S0004629923120010)

7) Дисковые аналоги спикул II типа на Солнце

Роль спикул II типа в короне в последние годы стала предметом многочисленных исследований и дискуссий. Дополнительный интерес вызвало обнаружение быстрых хромосферных событий, видимых на солнечном диске, которые по своим свойствам можно рассматривать как аналоги

спикул II типа. Дискровые аналоги спикул II типа были обнаружены в крыльях линий поглощения: быстрое синее смещение (RBE) и быстрое красное смещение (RRE). Представлен краткий обзор результатов наблюдений за дискровыми аналогами спикул II типа. Использовались данные, полученные с помощью наземных и космических телескопов.

Yakunina G. V. Disk Counterparts of Type II Spicules on the Sun // Geomagnetism and Aeronomy. — 2023. — Vol. 63, no. 7. — P. 231–238. [принято к печати]

- DOI: [10.1134/S0016793223070289](https://doi.org/10.1134/S0016793223070289)

Кроме того, в 2023 г. Леденцов Л.С. читал спецкурс «Плазменная астрофизика» (весенний и осенний семестры 4 курса), подготовил и прочел факультативный курс «Физика Солнца» (весенний семестр 1 курса), а также прочитал несколько научно-популярных лекций в Московском планетарии.