

**Отчет по НИР**  
**«Физика Солнца и плазменная астрофизика»**  
**за период 1 января - 31 декабря 2021 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 12 статей: 8 в журналах WoS, 1 в журнале РИНЦ, 3 в сборниках конференций. Результаты работы доложены в 10 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 нулевых точек и источников магнитного поля произвольного расположения в вышеупомянутых структурах. Такие соотношения могут быть ценным инструментом как для количественной оценки уже наблюдаемых анемонных вспышек, так и для предсказания новых в сложных конфигурациях магнитного поля.

Evgeny V. Zhuzhoma, Vladislav S. Medvedev, Yurii V. Dumin, Boris V. Somov, Topological Quantification of the "Anemone" (Branching) Solar Flares // arXiv:2111.06730  
<https://arxiv.org/abs/2111.06730>

2) Асимптотика проблемы Римана-Гильберта для модели Сомова магнитного пересоединения в случае длинных ударных волн

Рассмотрена задача Римана-Гильберта в сложной области, являющейся внешностью системы разрезов, с условием роста решения на бесконечности. Такая задача возникает в модели Б.В. Сомова эффекта магнитного пересоединения в физике плазмы, а решение имеет физический смысл магнитного поля. Найдена асимптотика решения при бесконечном вытягивании четырех разрезов из указанной системы, имеющих смысл ударных волн, так что в пределе исходная область распадается на четыре не связанные друг с другом компоненты. Показано, что если при этом согласованно уменьшается коэффициент в условии роста магнитного поля на бесконечности, то в пределе оно составляет поле, совпадающее в основных чертах с полем, возникающим в модели Г. Петчека эффекта магнитного пересоединения.

*Bezrodnykh S. I., Vlasov V. I. Asymptotic of the riemann-hilbert problem for somov's model of magnetic reconnection in the case of long shock-waves // Mathematical Notes. — 2021. — Vol. 110, no. 6.*

- DOI: [10.1134/S0001434621110225](https://doi.org/10.1134/S0001434621110225)

### 3) Тепловой триггер солнечных вспышек

Рассмотрено влияние джоулева и вязкого нагрева, теплопроводности и радиационного охлаждения на структурную устойчивость предвспышечного токового слоя. Решена задача о малых возмущениях в кусочно-однородной МГД-модели токового слоя. Решение допускает образование неустойчивости теплового характера. Модель позволяет получить точные аналитические выражения для инкремента и пространственного масштаба неустойчивости, а также их простые приближения в условиях солнечной короны. В линейной фазе время нарастания неустойчивости пропорционально характерному времени радиационного охлаждения плазмы и зависит от логарифмических производных функции радиационного охлаждения по параметрам плазмы. Неустойчивость приводит к поперечной фрагментации токового слоя с пространственным периодом 1-10 Мм в широком диапазоне параметров корональной плазмы. Показано, что наличие слабого продольного поля не меняет пространственный период тепловой неустойчивости в наиболее ожидаемом диапазоне параметров предвспышечного токового слоя и, кроме того, способствует формированию неустойчивости. С другой стороны, сильное продольное магнитное поле ведет к пространственной стабилизации токового слоя. Кроме того показано, что фрагментация поперек тока является естественной особенностью модели. Наклон фрагментации не превышает нескольких градусов для реалистичных предвспышечных параметров корональной плазмы. Как следствие, наклонная фрагментация не оказывает сильного влияния на результаты моделирования, однако экстремальные изменения могут достигать порядка величины. Таким образом, наклонная фрагментация может привести к уменьшению оценки пространственного периода элементарного энерговыделения в солнечных вспышках до 0.1-1 Мм. Рассмотренная неустойчивость может быть ответственна за запуск первичного энерговыделения в солнечных вспышках.

*Ledentsov L. S., Thermal trigger for solar flares I: Fragmentation of the preflare current layer // Solar Physics. — 2021. — Vol. 296. — P. 74.*

- DOI: [10.1007/s11207-021-01817-1](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01817-1)

*Ledentsov L. S., Thermal trigger for solar flares II: Effect of the guide magnetic field // Solar Physics. — 2021. — Vol. 296. — P. 93.*

- DOI: [10.1007/s11207-021-01840-2](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01840-2)

*Ledentsov L. S., Thermal trigger for solar flares III: Effect of the oblique layer fragmentation // Solar Physics. — 2021. — Vol. 296. — P. 117.*

- DOI: [10.1007/s11207-021-01862-w](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01862-w)

### 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.

*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) Об одном из возможных механизмов образования спикул в спокойных областях на Солнце

В качестве источника энергии для образования спикул в хромосфере Солнца рассмотрена гравитационная энергия падающего из короны вещества. Показано, что в спокойном переходном слое между хромосферой и короной направленный вниз поток вещества может порождать ударную волну, которая движется вверх. При этом часть энергии падающего вещества возвращается в корону и дает вклад в ее нагрев. Рассчитаны необходимые для этого скорости падающего вещества. Соответствующий диапазон скоростей хорошо согласуется с современными наблюдениями.

*Дунин-Барковская О. В., Сомов Б. В.* Об одном из возможных механизмов образования спикул в спокойных областях на Солнце // *Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика.* — 2021. — Т. 47, № 10. — С. 728–732.

- DOI: [10.31857/S032001082110003X](https://doi.org/10.31857/S032001082110003X)

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

Исследованы потоки во вспышках в рентгеновском (SXR) и в коротковолновом УФ–излучении (КУФ) по данным спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), SDO (Solar Dynamics Observatory) и TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics). Проанализированы потоки в спектральных линиях серии Лаймана (Ly $\alpha$ , Ly $\beta$ , Ly $\gamma$  и Ly $\delta$ ) и их вариации в 23 и 24 солнечных циклах. Одновременный анализ пяти вспышек (X-класс) по данным наблюдений GOES-15 и SDO/EVE в 24-м цикле солнечной активности (2011–2012 гг.) показал разность моментов начала вспышек и их максимумов в коротковолновом УФ излучении и мягком рентгене.

*Якунина Г. В., Бруевич Е. А.* Солнечные вспышки в КУФ и рентгеновском диапазонах по спутниковым данным SDO и TIMED // *Геомагнетизм и аэрономия.* — 2021. — Т. 61, № 8

- DOI: [10.1134/S0016793221080223](https://doi.org/10.1134/S0016793221080223)

## 7) Магнитное пересоединение и День взятия Бастилии

Опубликована научно-популярная статья, раскрывающая на простых примерах топологию магнитных полей в процессе их пересоединения в солнечной атмосфере. Журнал Земля и Вселенная является одним из ведущих научно-популярных изданий на русском языке и индексируется в РИНЦ. Солнечные вспышки в настоящее время стали эталоном для изучения вспышечных процессов электромагнитной природы в современной астрофизике, в частности, в рентгеновской и гамма-астрономии. В отличие от вспышек на других звездах и аналогичных явлений во Вселенной солнечные вспышки представляют возможность для всестороннего изучения процесса магнитного пересоединения в высокотемпературной сильно замагниченной плазме короны, а также в низкотемпературной слабоионизированной плазме фотосферы.

*Леденцов Л. С., Сомов Б. В.* Магнитное пересоединение и День взятия Бастилии // *Земля и вселенная.* — 2021. — № 4. — С. 8–23.

- DOI: [10.7868/s0044394821040010](https://doi.org/10.7868/s0044394821040010)

Кроме того, в 2021 г. Леденцов Л.С. и Сомов Б.В. читали спецкурс «Плазменная астрофизика» (весенний семестр 38 часов, осенний семестр 36 часов).