

## Аннотация

(цикл работ)

### 1. Авторы

Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., Струминский А.Б. (ИКИ РАН, отд. 54, лаб. 542)

[ivanzim@iki.rssi.ru](mailto:ivanzim@iki.rssi.ru)

8-916-517-50-20

### 2. Название

*Исследование магнитной структуры источников рентгеновских пульсаций солнечных вспышек*

### 3. Ссылки на публикации

- [1] Kuznetsov S.A., **Zimovets I.V.**, Morgachev A.S., Struminsky A.B. *Spatio-temporal Dynamics of Sources of Hard X-Ray Pulsations in Solar Flares* // Solar Physics, Volume 291, Issue 11, pp.3385-3426 (11/2016). DOI: 10.1007/s11207-016-0981-3. Impact Factor (JCR2017) 2.580.  
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11207-016-0981-3>
- [2] Kuznetsov S.A., **Zimovets I.V.**, Melnikov V.F., Wang R. *Spatio-temporal Evolution of Sources of Microwave and Hard X-ray Pulsations of the Solar Flare using the NoRH, RHESSI, and AIA/SDO Observation data* // Geomagnetism and Aeronomy, Volume 57, Issue 8, pp. 1067-1072 (12/2017). DOI:10.1134/S001679321708014X. Impact Factor (JCR2017) 0.482.  
<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS001679321708014X>
- [3] **Zimovets I.V.**, Wang R., Liu Y.D., Wang C., Kuznetsov S.A., Sharykin I.N., Struminsky A.B., Nakariakov V.M. *Magnetic structure of solar flare regions producing hard X-ray pulsations* // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 174, p. 17-27 (09/2018). DOI: 10.1016/j.jastp.2018.04.017. Impact Factor (JCR2017) 1.492.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682618300348?via%3Dihub>

### 4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Солнечные вспышки являются наиболее мощными источниками выделения энергии в Солнечной системе. Подобные явления происходят на других звездах и в магнитосферах планет. Во время вспышек происходит ускорение частиц до высоких энергий – генерация солнечных космических лучей (СКЛ). Вспышки и связанные с ними корональные выбросы массы (КВМ) являются одними из основных факторов космической погоды. Полное понимание механизмов вспышечного энерговыделения и КВМ пока не достигнуто. Цель данного цикла работ – продвинуться в решении данной проблемы.

## **5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение**

Мощные солнечные вспышки сопровождаются ускорением электронов до релятивистских энергий и, как следствие, генерацией жесткого рентгеновского (ЖР) излучения. Выделение энергии во вспышках – нестационарный процесс. Интенсивность вспышечного ЖР излучения сильно переменчива. Многие вспышки сопровождаются сериями ЖР всплесков/пульсаций. Наша задача – установить возможную причину вспышечных ЖР пульсаций. Решение этой задачи позволяет лучше понять физические процессы, происходящие во вспышечных областях, и их связь с КВМ.

## **6. Используемый подход, его новизна и оригинальность**

Основной источник энергии солнечных вспышек – магнитное поле. Геометрия магнитного поля и ее эволюция определяют процесс вспышечного энерговыделения. Во время вспышки запасенная свободная магнитная энергия трансформируется в другие виды энергии, в частности, в кинетическую энергию ускоренных электронов. Ускоренные электроны замагничены и распространяются вдоль силовых линий магнитного поля. Наблюдаемые вспышечные ЖР источники в основном располагаются в хромосферных подножиях вспышечных петель, куда высыпаются ускоренные электроны. Определение положения источников ЖР пульсаций относительно конфигурации магнитного поля родительской активной области позволяет исследовать пространственно-временную эволюцию вспышечного энерговыделения.

Для определения положения источников ЖР пульсаций использованы данные солнечного рентгеновского телескопа-спектрометра RHESSI в диапазоне энергий 25-100 кэВ с угловым разрешением до 2.3'' и временным разрешением до 4 с. Для определения магнитного поля на фотосфере использованы данные космических магнитографов MDI/SOHO и HMI/SDO с угловым разрешением до 1''. Дополнительно использованы данные наблюдений инструмента AIA/SDO в ЭУФ диапазоне, а также радиогелиографа обсерватории Нобяема (NoRH) в микроволновом диапазоне. Поскольку измерения магнитного поля в короне недоступны, для определения магнитной структуры вспышечных областей использована реконструкция магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении на основе оптимизационного метода, дающего наиболее точные результаты в настоящее время.

Новизна работы определяется: 1) во-первых, разработанной оригинальной методикой выделения ЖР пульсаций, определения их пространственного положения и динамики, а также определения и визуализации магнитной конфигурации вспышечных областей; 2) во-вторых, систематичностью подхода, при котором исследуется не одна конкретная вспышка (case study), а большой набор вспышек, отобранных на основе объективных критериев. Это позволяет сделать обобщающие выводы. Оригинальность работы определяется нетрадиционным подходом к проблеме вспышечных пульсаций, при котором пульсации не рассматриваются как следствие осцилляторно-волновых процессов в солнечной короне.

Идея и методика предложены сотрудниками ИКИ РАН (Зимовец И.В., Струминский А.Б., Шарыкин И.Н.). Реализация осуществлялась под руководством и при непосредственном участии сотрудников ИКИ РАН совместно с коллегами из других организаций, в частности, молодым коллегой С.А. Кузнецовым (ГАО РАН) в рамках проекта РФФИ по поддержке мобильности молодых ученых (мол-нр).

В работе [1] впервые проведен систематический анализ пространственно-временной эволюции источников ЖР пульсаций на выборке солнечных вспышек, наблюдавшихся

RHESSI в 2002-2015 гг. В работе [2] на основе детального анализа одной из вспышек, исследованных в [1], установлено хорошее соответствие между пространственно-временной эволюцией источников ЖР и микроволновых пульсаций, что указывает на единство механизма их генерации. Также в работе [2] проведена реконструкция магнитного поля в короне в области исследованной вспышки и показано, что пульсации микроволнового/ЖР излучения испускаются из вершин/подножий различных петель, окружающий эруптивный магнитный жгут в виде арки. В работе [3] выполнена систематическая реконструкция магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении для 7 вспышечных областей из работы [1], для которых доступны векторные фотосферные магнитограммы. Посредством применения разработанной нами методики определена магнитная структура вспышечных областей и источников пульсаций.

## 7. Полученные результаты и их значимость

- a) На основе систематического анализа положения источников ЖР излучения ( $E > 25$  кэВ) 29 солнечных вспышек, наблюдавшихся КА RHESSI в 2002-2015 гг., установлено, что ЖР пульсации испускаются не из одной вспышечной магнитной петли, а из различных участков вспышечной области (работа [1]).
- b) На основе реконструкции магнитного поля в нелинейном бессиловом приближении и данных наблюдений установлено, что в исследованных активных областях до начала вспышки присутствует скрученная магнитная структура – магнитный жгут, вытянутый вдоль линии инверсии магнитной полярности (работа [3]).
- c) Продемонстрировано, что ЖР пульсации являются результатом последовательных эпизодов выделения энергии и ускорения электронов либо в отдельных волокнах магнитного жгута, либо в отдельных магнитных петлях, нависающих аркой над жгутом (работа [3]).
- d) Полноценная эрупция жгута не обязательна для генерации пульсаций (работа [3]).
- e) Показано, что модели вспышечных пульсаций, основанные на осцилляциях одиночных магнитных петель, не удовлетворяют наблюдательным результатам (работы [1-3]).

Полученные результаты подтверждают, обобщают и развивают выводы кандидатской диссертации Зимовца И.В. Результаты позволяют продвинуться в понимании процессов вспышечного энерговыделения и их связи с КВМ. Результаты указывают на важность скрученных магнитных структур (жгутов) и необходимость продолжения их всестороннего изучения. Это важно не только с точки зрения фундаментальной физики, но и имеет прикладное значение – предсказание эффектов космической погоды.



**Рис. 1.** Образная иллюстрация полученных результатов. Магнитный жгут обозначен в виде вареной сосиски, пронизанной/опутанной спагетти, обозначающими магнитные волокна/петли, родительская активная область, поставляющая энергию для вспышки – кухонная плита.