

1) Шарыкин И.Н.

2) Цикл работ "Исследование энерговыделения солнечных вспышек в окрестности нейтральной линии магнитного поля"

3) Опубликованные статьи в рамках цикла:

- Sharykin I.N., Kosovichev A.G., Sadykov, V.M., Vargas-Dominguez S., Zimovets I.V. Flare Energy Release in the Lower Solar Atmosphere near the Magnetic Field Polarity Inversion Line // The Astrophysical Journal, Vol. 840, 13 pp, 2017.

- Sharykin I.N., Kosovichev A.G., Sadykov, V.M., Zimovets, I.V., Myshaykov, I.I. Investigation of Relationship Between High-energy X-Ray Sources and Photospheric and Helioseismic Impacts of X1.8 Solar Flare of 2012 October 23 // The Astrophysical Journal, Vol. 843, 8 pp, 2017.

4) **Общая проблема: проблема накопления и выделения энергии солнечных вспышек.**

Солнечные вспышки являются наиболее мощными факторами космической погоды. На сегодняшний день накоплен огромный массив данных многоволновых наблюдений вспышечного процесса и проведено большое количество теоретических исследований солнечных вспышек. Тем не менее, до сих пор нет четкого понимания триггеров солнечных вспышек и того, где развивается первоначальное энерговыделение, приводящее к нагреву плазмы и ускорению заряженных частиц. Недостаточное понимание физики первоначального энерговыделения солнечных вспышек мешает построить эффективный прогноз космической погоды.

5) **Конкретная решаемая задача и ее значение: Главной целью работы является исследование энерговыделения солнечных вспышек в окрестности НЛ на основе многоволновых наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением.**

Значимость исследования процессов энерговыделения вблизи НЛ определяется тем фактом, что наиболее сильные электрические токи, горизонтальные магнитные поля и предвспышечные уярчения концентрируются вблизи НЛ. Кроме этого именно вблизи НЛ обычно расположен эруптивный скрученный магнитный жгут и замечают наиболее сильные изменения магнитного поля в процессе развития солнечной вспышки. Поэтому анализ процессов энерговыделения вблизи НЛ необходим для определения триггеров и прекурсоров солнечных вспышек.

В цикле работ рассматриваются две задачи, которым посвящены опубликованные работы:

- Исследование мелкомасштабных процессов вблизи НЛ в нижних слоях солнечной атмосферы на основе оптических наблюдений телескопа NST/BBSO с высоким пространственным разрешением.

- Исследование связи сильных фотосферных возмущений вблизи НЛ с динамикой ускоренных электронов. Оценка плотности ускоренных электронов вблизи НЛ.

6) **Методы:**

Для решения обоих поставленных задач были отобраны соответствующие солнечные вспышки. В первом случае было отобрано событие, для которого были доступны данные наблюдений NST/BBSO. Для решения второй задачи было найдено событие с сильным фотосферным свечением, гелиосейсмическим откликом вблизи НЛ и наличием данных наблюдений RHESSI по рентгеновскому излучению.

- Для решения первой задачи использовались данные оптических наблюдений телескопа NST/BBSO. Изображения, получаемые данным инструментом, обладают очень высоким пространственным разрешением ~100 км. Используя данные изображения, исследовались мелкомасштабные процессы вблизи НЛ в области сильных магнитных полей. Для того чтобы объяснить динамику наблюдаемых структур в оптическом диапазоне анализировались векторные магнитограммы HMI/SDO и результаты NLFFF экстраполяции магнитного поля. Также рассчитывались распределения течений по лучу зрения, электрических токов и оценивались изменения трех компонент магнитного поля вблизи НЛ до и после

вспышки. Силовые линии магнитного поля вблизи НЛ восстанавливались с целью определения топологии магнитного поля и объяснения появления характерных структур на уровне фотосферы.

- Для решения второй задачи использовались следующие подходы. Для анализа фотосферных возмущений вблизи НЛ с высоким пространственным и временным разрешением использовались фильтрограммы HMI/SDO ( $dt \sim 1.8$  с). Была разработана новая методика анализа таких данных. Для определения месторасположения гелиосейсмического возмущения использовался метод акустической голографии. Области фотосферного свечения, видимые на фильтрограммах HMI/SDO, а также восстановленные гелиосейсмические источники сравнивались с источниками жесткого рентгеновского излучения. Сравнивались временные профили жесткого рентгеновского излучения и фотосферного свечения из разных областей вблизи НЛ. Определялись временные задержки между данными типами излучений. Оценка плотности ускоренных электронов вблизи НЛ осуществлялась на основе анализа спектров рентгеновского излучения и оценки площади высыпания частиц в плотные слои солнечной атмосферы. Для оценки площади использовались данные оптических наблюдений SOT/Hinode с высоким пространственным разрешением. Для объяснения наблюдаемого фотосферного свечения и течений плазмы в области генерации гелиосейсмических волн использовались результаты численного моделирования радиационного газовой динамики, полученные с помощью кода RADYN.

## **7) Полученные результаты и их значимость:**

**I.** В работе анализировалась солнечная вспышка 12 июня 2014 г. рентгеновского класса M1.2. Выявлено, что начальное энерговыделение развивалось в локальной области вблизи НЛ. В данной области оптические изображения NST выявили небольшую аркаду мелкомасштабных магнитных петель. NLFFF экстраполяция магнитного поля показала, что данная аркада находится под областью, где перекрещиваются крупные магнитные петли. Показано, что со вспышкой связаны изменения магнитного поля, электрического тока и фотосферных течений плазмы вблизи наблюдаемой фотосферной аркады. *Основным выводом всей работы является то, что начальное вспышечное энерговыделение развивалось именно в локальной области вблизи НЛ, а появление крупномасштабных источников излучения является вторичным процессом и связано с некоторым переносом энергии из локальной области начального энерговыделения в окрестности НЛ.*

Большое количество методик прогноза солнечных вспышек основаны на анализе интегральных характеристик магнитного поля в активной области: длина нейтральной линии, полный электрический ток и т.д. Однако полученный результат показывает то, что локальные процессы вблизи НЛ могут быть ответственны за крупномасштабное энерговыделение солнечных вспышек. В связи с этим возникает задача (автоматизированного) поиска таких локальных триггеров с целью предсказания солнечных вспышек.

**II.** Во время солнечной вспышки X класса 23 октября 2012 г. наблюдалось фотосферное излучение и было зарегистрировано сильное гелиосейсмическое возмущение ("солнцетрясение") вблизи НЛ, что указывает на мощное энерговыделение в фотосфере. Целью работы является исследование фотосферного возмущения вблизи НЛ с высоким временным разрешением. Разработана методика работы с фильтрограммами HMI, полученные в результате сканирования линии Fe I (673,1 нм) с временным разрешением  $\sim 3.6$  секунды и пространственным разрешением  $\sim 0.5$  угл. сек. на пиксель. Показано, что вспышечное фотосферное возмущение вблизи НЛ совпадает с источниками жесткого рентгеновского излучения, наблюдаемыми с помощью RHESSI. Оценивалась задержка между данными типами излучения. Ее величина составляет менее 4 секунд. Такая малая задержка находится в согласии с результатами численного моделирования радиационной газовой динамики, выполненного с помощью кода RADYN, в котором рассматривается плотность потока ускоренных электронов  $10^{11}$  эрг/с/см<sup>2</sup>. Однако модель не объясняет величины вариации доплеровской скорости и фотосферного излучения, наблюдаемой HMI. *Наблюдения показывают, что фотосферное возмущение и гелиосейсмическая волна вблизи НЛ могли быть сгенерированы ускоренными электронами, высыпаящимися в плотные слои солнечной атмосферы, со значительно большей плотностью потока энергии по сравнению с ранее рассматриваемыми значениями.*