

УДК 523.98

## Тонкая структура солнечных пятен и эволюция активной области NOAA AR 12192

Ю.Т. Цап<sup>1,2</sup>, А.Н. Коваль<sup>1</sup>, А.Н. Бабин<sup>1</sup>, А.В. Борисенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409  
*babin@craocrimea.ru*

<sup>2</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 16 ноября 2017 г.

**Аннотация.** На основе магнитограмм продольного магнитного поля SDO/HMI анализируются особенности магнитной аномалии – небольшого участка обратной полярности – в ядре пятна активной области NOAA 12192, наблюдавшейся 21–26 октября 2014 г. Получены свидетельства, что это образование не является продуктом инструментального/алгоритмического артефакта, связанным со спецификой работы SDO/HMI и обработки данных, а представляет собой реальный выход нового магнитного потока в области противоположной полярности.

FINE STRUCTURE OF SUNSPOTS AND EVOLUTION OF ACTIVE REGION NOAA 12192, by Yu.T. Tsap, A.N. Koval, A.N. Babin, A.V. Borisenko. Based on the SDO/HMI magnetograms the peculiarities of the magnetic anomaly (a small area in the sunspot umbra with reversal magnetic polarity) observed in October 21–26, 2014 are analyzed. The obtained results suggest that this feature is not the product of instrumental/algorithmic artifacts related to the SDO/HMI operation and data processing. This is a real new magnetic flux emergence in the region of opposite polarity.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечная активность, магнитные поля солнечных пятен

---

### 1 Введение

Известно, что все явления, происходящие на Солнце, определяются взаимодействием солнечной плазмы с магнитным полем, а их особенности – структурой и динамикой как крупномасштабных, так и тонкоструктурных магнитных полей. В первую очередь магнитные поля определяют солнечную активность и ее воздействие на околоземное пространство. Отсутствие подробных данных о тонкой структуре полей является одной из причин недостаточного понимания физики многих нестационарных процессов. Поэтому исследование мелкомасштабных магнитных полей в сложных активных областях приобретает все большую актуальность. Особый интерес представляют “магнитные транзиенты” или “магнитные аномалии” – появление на магнитограммах продольного поля тени пятна небольшой области противоположной полярности. Многие транзиенты наблюдаются на протяжении короткого времени во время импульсной фазы сильных вспышек и носят обратимый характер (Патерсон и Зирин, 1981; Киу и Гари, 2003; Мауриа и др., 2012; Харкер и Певцов, 2013), но некоторые “аномалии” обнаруживаются и в медленно эволюционирующей тени солнечных пятен (Северный, 1959). Интерпретация этих явлений до настоящего времени остается неоднозначной. Их

появление может быть связано как с инструментальными эффектами, так и с изменением физических условий в солнечной атмосфере, приводящих к изменению профиля линии. Однако не следует исключать, что они могут представлять и реальные изменения магнитных полей.

С 17 по 30 октября 2014 г. по диску Солнца проходила одна из самых мощных активных областей (АО) 24-го цикла солнечной активности – NOAA 12192. Она имела сложную магнитную структуру ( $\beta\gamma\delta$ ), но особый интерес представляла “магнитная аномалия” – небольшая область противоположной полярности в тени хвостового пятна на магнитограммах продольного магнитного поля SDO/HMI. Поскольку реальность появления небольшой области противоположной полярности в тени пятна с напряженностью, которая по визуальным спектральным наблюдениям КрАО РАН достигала в ядре 3500 Гс, вызывает большие сомнения, то этот вопрос требует детального рассмотрения.

Цель настоящей работы – провести на основе наблюдений SDO/HMI и SDO/AIA с привлечением наземных данных, полученных на SOLIS/VSM, Башенном солнечном телескопе БСТ-2 и Большом коронографе КГ-2 КрАО РАН, подробный анализ структуры и эволюции “магнитной аномалии”, обнаруженной в тени хвостового пятна АО NOAA 12192, изучить связь с нестационарными процессами в АО. Исследовать влияние инструментальных эффектов, методики обработки данных и изменений профиля линии на результаты измерений. Исходя из полученных результатов анализа, предложить возможные механизмы, ответственные за исследуемое явление.

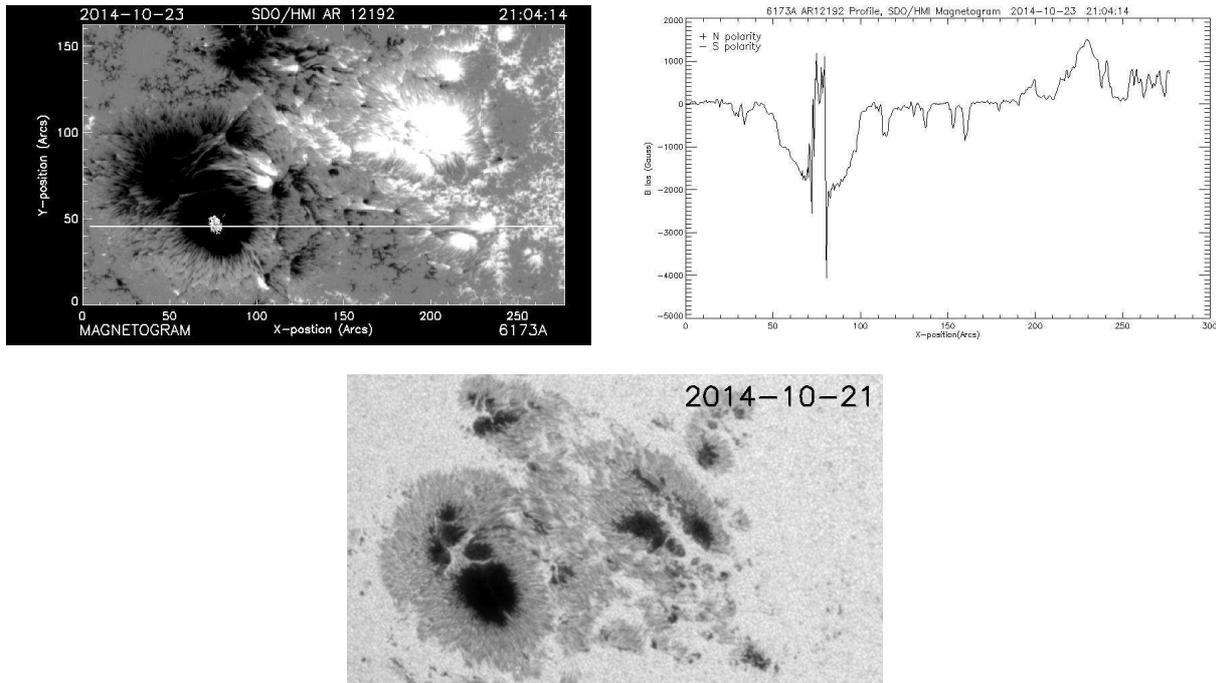
## 2 Активная область NOAA 12192

Подробный анализ развития АО показал, что мощный мультиполярный центр сформировался на протяжении нескольких дней вследствие бурного массового выхода нового магнитного потока во многих местах АО и в непосредственной близости от нее. Таким образом образовался активный центр, состоящий из нескольких биполей на разных стадиях развития. Отметим две особенности выхода нового магнитного потока. Первая – это его тонкоструктурность, связанная с появлением большого количества мелких пор, что предполагает концентрацию выходящего потока в малых дискретных элементах. Вторая – это выход нового магнитного потока в области сильного магнитного поля хвостового пятна. Причем магнитные связи между магнитными центрами были очень сложные – силовые линии часто замыкались не на ближайшие, а на удаленные полюса противоположной полярности.

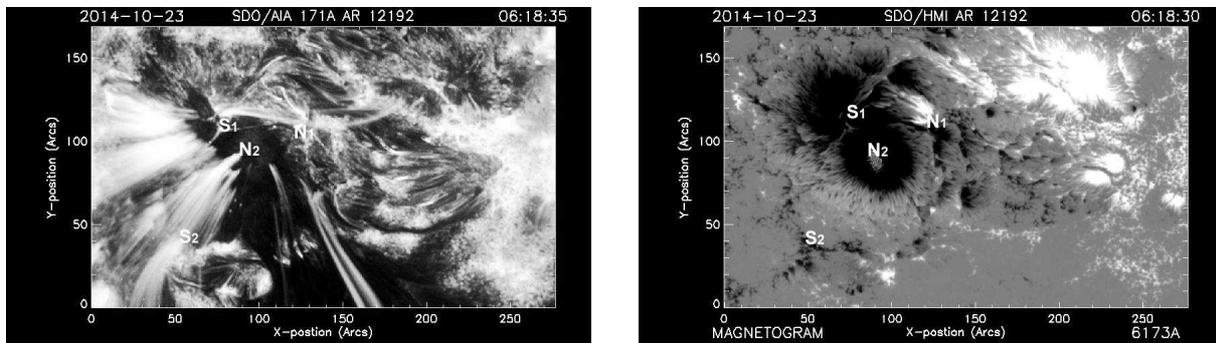
## 3 Аномалия: эволюция, структура и связи с другими явлениями

Магнитная аномалия была обнаружена на SDO/HMI-магнитограммах 21 октября. На рис. 1 представлено изображение пятна в континууме и ход напряженности магнитного поля вдоль светлой линии магнитограммы. На разрезе четко видно изменение направления магнитного поля в месте “аномалии”, которая наблюдалась на протяжении 21–26 октября. Появившись на несколько часов, “аномалия” изменяла форму и яркость, пропадая и возникая через некоторое время на том же месте. Какой-либо связи со вспышками обнаружено не было. Она состояла из отдельных элементов диаметром около 1 угл. сек, которые группировались в образование округлой формы диаметром до 10 угл. сек. Наблюдалась тесная корреляция “аномалии” с короткой системой петель на SDO/AIA-изображениях Солнца в полосе 171 Å, отражающих магнитные взаимосвязи и структуру магнитных полей в более высоких слоях солнечной атмосферы. Из рис. 2 видно, что основания петель хорошо соответствуют положению магнитных центров в фотосфере. Здесь же отмечена система петель N2S2, магнитный центр N2 которой расположен в месте исследуемой “аномалии”, а область противоположной полярности S2 находится вне хвостового пятна.

Пятно, в котором наблюдалась “аномалия”, было очень нестабильным. В его полутени появлялись новые ядра S- и N-полярности, которые были очень динамичны. Ядра разделялись светлыми мостами, появление которых является свидетельством фрагментации магнитного поля пятна. Спектральные  $H_{\alpha}$ -наблюдения на КГ-2 показали, что в полутени пятна и непосредственно на большом южном ядре все время наблюдались “усы”, появление которых тесно связано с выходом нового магнитного потока. “Аномалия” появилась 21 октября в период бурного массового выхода магнитного потока и не наблюдалась 27 октября, когда поток в АО заметно ослабел.



**Рис. 1.** Изменение напряженности магнитного поля вдоль светлой линии на магнитограмме и изображение пятна в континууме (SDO/HMI)



**Рис. 2.** Изображение АО NOAA 12192 в полосе 171 Å и соответствующая магнитограмма, полученные на SDO/AIA и SDO/HMI

#### 4 Обсуждение и интерпретация

Для того чтобы выяснить степень влияния изменения профиля линии железа 6173 Å в области сильных магнитных полей тени пятна и лучевых скоростей на результаты измерений магнитных полей на SDO/HMI, нами были проведены детальные исследования. Так как “магнитная аномалия” не связана со вспышками, мы уделили основное внимание зависимости измерений от наклона силовых линий магнитного поля, когда контуры усложняются из-за наложения  $\pi$  и  $\sigma$ -компонент. Моделирование проводилось в рамках методики наблюдений продольного магнитного поля, принятой на SDO/HMI (Шоу и др., 2012). Нами были использованы теоретические профили линии 6173 Å в спектре пятна, полученные Степановым (1958) в результате решения уравнения переноса излучения в присутствии

сильного магнитного поля для разных углов наклона силовых линий к лучу зрения. Результаты расчетов показали, что различные комбинации модифицированных профилей линии поглощения в пределах напряженностей до 3000 Гс и лучевых скоростей до 5 км/с могут привести к существенному занижению величины напряженности поля, но не приводят к изменению его знака.

Отмеченные выше особенности “магнитной аномалии”, такие как время существования, эволюция, тонкая пространственная структура, отсутствие временной и пространственной корреляции со вспышками, тесная связь с системой петель на изображениях в полосе 171 Å, появление “усов” и выбросов в области “аномалии”, соответствуют особенностям всплытия нового магнитного потока. При этом анализ аннигиляции магнитных полей в тени солнечного пятна в результате пересоединения магнитных силовых линий в приближении симметричного токового слоя показал, что этот процесс может происходить в течение длительного времени на малых масштабах (Бабин и др., 2018). Таким образом, исследуемая “аномалия” – это скорее реально существующая область другой полярности, которая образовалась в результате выхода нового магнитного потока противоположной полярности в области тени нестабильного пятна. Она состояла из тонкоструктурных элементов магнитного поля, что хорошо согласуется с кластерной моделью тени пятна Северного – Паркера (Северный, 1965; Паркер, 1979).

Работа подготовлена при частичной поддержке Программы Президиума РАН № 28 “Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей”, а также гранта РФФИ 16-02-00221А.

## Литература

- Бабин и др. (Babin A.N., Koval A.N., Tsap Yu.T., Borisenko A.V.) // *Geomagn. Aeronom.* 2018 (в печати).
- Киу и Гари (Qiu J. and Gary D.E.) // *Astrophys. J.* 2003. V. 599. P. 615.
- Мауриа и др. (Maurya R.A., Vemareddy P. and Ambastha A.) // *Astrophys. J.* 2012. V. 747. P. 134.
- Паркер (Parker E.N.) // *Astrophys. J.* 1979. V. 230. P. 905.
- Патерсон и Зирин (Paterson A., Zirin H.) // *Astrophys. J.* 1981. V. 243. P. L99.
- Северный А.Б. // *Астрон. журн.* 1959. Т. 36. С. 208.
- Северный (Severny A.B.) // *Soviet Astronomy.* 1965. V. 9. P. 171.
- Степанов В.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1958. Т. 19. С. 20.
- Харкер и Певцов (Harker B.J. and Pevtsov A.) // *Astrophys. J.* 2013. V. 778. P. 175.
- Шоу и др. (Schou J., Scherrer P.H., Bush R.I., et al.) // *Solar Phys.* 2012. V. 275. P. 229.