Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 148–151.

УДК 523.94
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-148
ORCID: 0000-0002-7932-8775

ФАКЕЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ СПОКОЙНОГО СОЛНЦА: СВЯЗЬ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И НАГРЕВ КОРОНЫ

П.В. Стрекалова[1], В.В. Смирнова[2], Ю.Т. Цап[2]

[1] Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия
[2]Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный
auriga-lynx@yandex.ru

STRUCTURES OF FACULAE OF THE QUIET SUN: RELATIONSHIP BETWEEN UV RADIATION AND MAGNETIC FIELD, AND CORONAL HEATING

P.V. Strekalova[1], V.V. Smirnova[2], Yu.T. Tsap[2]

[1] Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Saint-Petersburg, Russia
[2]Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Russia

Аннотация. В представленной работе на основе оптических и ультрафиолетовых наблюдений, полученных на SDO/HMI и Hinode/SOT, рассматриваются проявления факельных образований в атмосфере спокойного Солнца, которые представляют собой мелкомасштабные области концентрации магнитного поля в фотосфере, время жизни которых может достигать нескольких десятков часов. Показано, что в более высоких слоях солнечной атмосферы они могут быть представлены как более яркими, так и более темными относительно окружающей среды структурами. Полученные результаты не находят однозначного объяснения в рамках современных моделей мелкомасштабных магнитных образований. По данным Hinode/SOT обращено внимание на наличие сложной структуры исследуемых структур. В свете проблемы нагрева солнечной короны обсуждаются возможные следствия полученных результатов.

Ключевые слова: спокойное Солнце, мелкомасштабные магнитные структуры, UV-излучение, факельные образования

Abstract. Structures of faculae of the quiet Sun are observed in the photosphere at any phase of the solar cycle and represent stable magnetic elements whose lifetime can reach up to several tens of hours. This study shows that the manifestations of structures of faculae in the higher layers of the solar atmosphere do not exhibit a direct dependence either on the magnitude of the magnetic field, reaching hundreds of Gausses, or, in some cases, on the very presence of a detectable magnetic field. The obtained results cannot be unambiguously explained within the framework of current models of small-scale magnetic formations. This article presents the results of a study of the manifestations of small-scale magnetic formations in the form of brightenings at various levels of the solar atmosphere in several UV lines based on SDO/HMI data. Furthermore, using Hinode/SOT data, the presence of a complex structure of such objects is shown. Further investigation of these formations will allow us to assess their possible contribution to the heating of the solar corona.

Keywords: quiet Sun; magnetic field; UV emission

ВВЕДЕНИЕ

Факельные образования (ФО) спокойного Солнца — мелкомасштабные, долгоживущие и стабильные магнитные структуры фотосферы–хромосферы, расположенные вне активных областей. ФО характеризуются размерами 1,5–4 Мм, временем жизни от нескольких часов до нескольких десятков часов и магнитными полями в диапазоне 400–1100 Гс.

Ранее на основе наблюдений на инструменте Atmospheric Imaging Assembly, расположенном на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (AIA/SDO), в каналах ультрафиолетового излучения 1700 Å, 1600 Å, 304 Å и 193 Å, которое формируется на различных высотах солнечной атмосферы, было показано, что ФО проявляются как яркие относительно фона структуры [Strekalova et al. 2022]. При этом в данной работе была обнаружена линейная зависимость яркости фотосферного континуума от напряжённости магнитного поля для выборки из 30 ФО, полученной по данным инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI/SDO) с пространственным разрешением около 1″. Эта зависимость была наиболее заметна для полей выше порога в 400 Гс, оставляя неясным поведение ФО при более слабых полях, из-за значительной дисперсии. Пространственное разрешение HMI/SDO не всегда позволяет выявить тонкую структуру ФО, а значения магнитных полей может быть заниженным. Поэтому, представляет интерес использование инструментов с более высоким пространственным разрешением, таких как Solar Optical Telescope на борту спутника Hinode (SOT), с пространственным разрешением ~0.3″. Наблюдения с высоким пространственным разрешением может позволить выявить динамику ФО и уточнить ее связь с физическими процессами в фотосфере, включая конвективные движения и распространение МГД волн.

Ранее, в работах [Kolotkov et al., 2017], [Strekalova et al., 2016, 2018] были обнаружены квазипериодические вариации магнитного поля ФО с периодами в интервале 3-280 минут (для полей 400-1100 Гс). Такие периоды могут быть связаны с распространением медленных МГД волн вдоль “магнитных волноводов”, которые должны также наблюдаться в вышележащих слоях солнечной атмосферы, обуславливая ее нагрев. В связи с этим, можно ожидать корреляцию магнитного поля над ФО

с интенсивностью излучения в ультрафиолетовых каналах, когда интенсивность линейно увеличивается с ростом магнитного поля.

СВЯЗЬ С ИЗЛУЧЕНИЕМ В ХРОМОСФЕРЕ

Наблюдаемое в хромосфере излучение над ФО объяснялось ранее с помощью особенностей конфигурации магнитного поля (модели трех потоков) [Solov'ev & Kirichek, 2019], или мелкомасштабными магнитными пересоединениями всплывающих магнитных трубок с последующим энерговыделением [Martinez Gonzalez & Rubio, 2009].

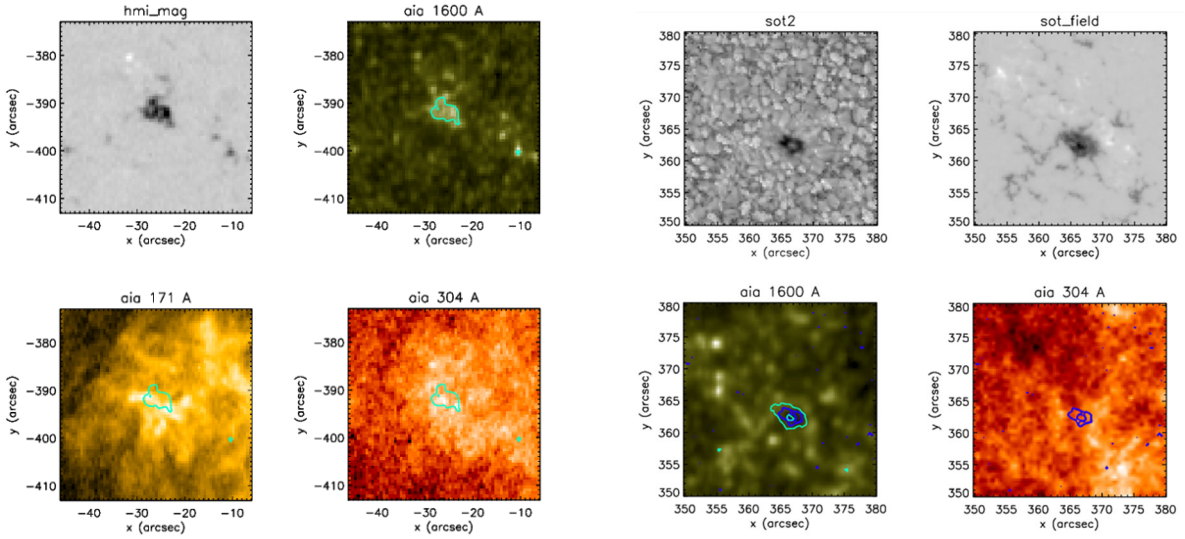
Однако, как было показано ещё [de Wijn et al., 2009], [Stangl & J. Hirzberger, 2005] и др., излучение повышенной яркости наблюдается в атмосфере Солнца не над всеми такими мелкомасштабными магнитными структурами. Это противоречит современным моделям мелкомасштабных солнечных образований [Solov'ev & Kirichek, 2019], согласно которым ожидалась бы прямая зависимость между интенсивностью излучения в хромосфере и магнитным полем. Т.е., при увеличении магнитного поля наблюдалось бы повышение интенсивности. Таким образом, наличие магнитного поля само по себе не является достаточным условием нагрева верхних слоёв солнечной атмосферы. Возможной причиной являются особенности магнитной конфигурации ФО, влияющие на нагрев хромосферной плазмы.

Данная работа посвящена анализу проявлений ФО на разных высотах солнечной атмосферы. Для исследования были использованы данные космического аппарата SDO, инструментов HMI и SOT/Hinode (данные о магнитном поле и континууме) и AIA (данные об интенсивности в каналах УФ излучения: 94 Å, 131 Å, 171 Å, 193 Å, 211 Å, 304 Å, 335 Å, 1600 Å и 1700 Å).

На Рис.1a приведён пример факельного образования, имеющего проявления в виде повышения интенсивности излучения на уровне хромосферы (линия 304Å) и короны (в канале 171Å). На рисунке 1b пример факельного образования, не проявляющего увеличения интенсивности излучения в УФ-каналах несмотря на более мощное магнитное поле.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ SDO

Мы провели корреляционный анализ зависимости интенсивности излучения в УФ каналах от напряженности магнитного поля ФО_2021.05.18. Для анализа вариаций магнитного поля и интенсивности в УФ каналах, были получены временные ряды этих вариаций длительностью 5 часов. На рис. 2 представлена матрица, составленная из коэффициентов попарной кросс-корреляции для всех временных рядов, описывающих изменение суммарной интенсивности, а также суммарного магнитного поля в контуре, проведённом по половине мощности. Матрица была рассчитана для ФО 2021.05.18, представленного на Рис. 1a и имеющего выраженные проявления в хромосфере и короне. Из матрицы видно, что наилучшая корреляция со значениями магнитного поля при нулевом лаге у рядов изменения интенсивности в линиях 1600 Å и 1700 Å. Кроме того, с высотой коэффициент корреляции падает, достигая небольших отрицательных значений на уровне короны. Это говорит о том, что явно выраженной зависимости между магнитным полем и излучением в УФ каналах не наблюдается на временных масштабах 5 часов.



(a) (b)

Рис.1. Пример ФО с видимыми проявлениями в фотосфере, хромосфере и короне. Наблюдение от 2021.05.18, максимальное магнитное поле -800 Гс. Данные о магнитном поле и интенсивности в линиях 1600Å, 304Å и 171Å получены с SDO/AIA (a). Пример ФО без видимых проявлений в фотосфере и хромосфере. Наблюдение от 2021.05.18, максимальное магнитное поле -1100 Гс. Данные о магнитном поле и яркости в континууме получены с SOT/Hinode. Данные об интенсивности в линиях 1600Å и 304Å получены с AIA/SDO (b)

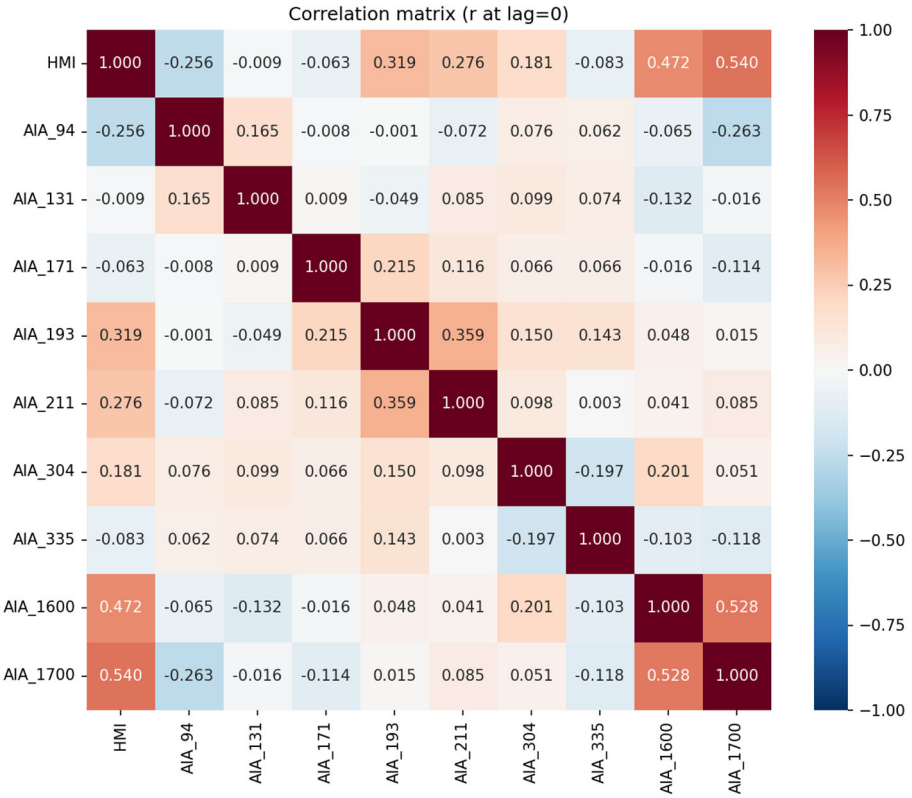


Рис.2. Матрица коэффициентов корреляции изменения суммарного магнитного поля, а также суммарной интенсивности в контуре, проведённом по половине мощности, для временных рядов ~ 5 часов

АНАЛИЗ ДАННЫХ SOT/HINODE

Инструменты космического аппарата SDO обладают пространственным разрешением ~1″, что не даёт возможности детально разрешить структуру факельных образований. Тогда как спутник Hinode (инструмент SOT) имеет пространственное разрешение всего 0.3″, что позволяет исследовать тонкую структуру ФО. На Рис.3 сверху представлены изображения факельного образования от 2022.08.23. Данные в континууме (слева) и магнитном поле (справа) получены с Hinode/SOT. Нижние панели демонстрируют одномерные сечения, показанные красной пунктирной линией. Из Рис. 3(a) видно, что факельное образование имеет сложную структуру и яркость в континууме меняется внутри объекта. Наблюдения того же объекта на SDO/HMI также демонстрируют аналогичное изменение яркости, хоть и гораздо менее выраженное из-за худшего пространственного разрешения. Таким образом, с помощью двух независимых наблюдений подтверждается наличие сложной тонкой структуры у факельных образований.

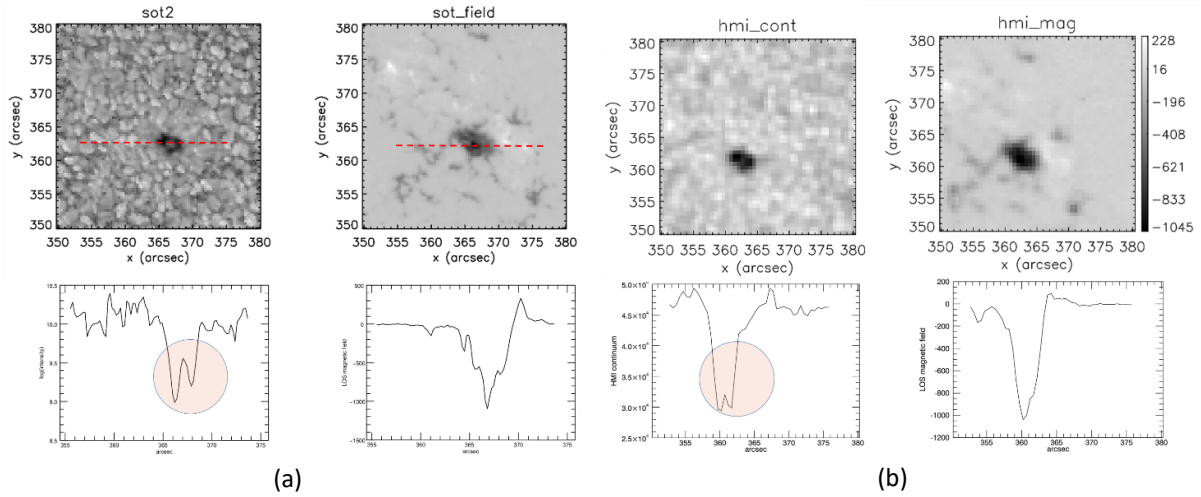


Рис3. Сверху: изображения ФО в континууме (слева) и магнитограмма (справа), полученные по данным спутника SOT/Hinode (a) и по данным HMI/SDO (b). B_{max} = 1100 Гс. Красной пунктирной линией показаны положения сечений. Внизу: одномерные сечения. Видно, что ФО имеет тонкую структуру и яркость внутри объекта меняется

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Из проведённого нами исследования можно сделать следующие выводы:

Во-первых, нет ярко выраженной корреляции между напряженностью магнитного поля факельных образований и интенсивностью в хромосферных линиях. Во-вторых, с высотой коэффициент корреляции между магнитным полем и интенсивностью падает. И в-третьих, нагрев факелов скорее связан с диссипацией мелкомасштабных электрических токов, так как другие механизмы нагрева, такие как распространение МГД-волн предполагает наличие корреляции между яркостью и доплеровскими скоростями.

Полученные результаты указывают на необходимость дальнейшего изучения тонкой структуры и динамики факельных образований для построения теоретической модели ФО, соответствующей наблюдениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

De Wijn A. G., Stenflo J. O., Solanki S. K., Tsuneta, S. Small-Scale Solar Magnetic Fields // Space Science Reviews, –2009. –Vol. 144. – Is. 1-4. – P. 275–315.

Kolotkov D. Y., Smirnova V. V., Strekalova P. V., Riehokainen A., & Nakariakov V. M. Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun // Astron. and Astrophys. – 2017. – Vol. 598. – Id L2.

Martínez González M. J., Bellot Rubio L. R. Emergence of Small-scale Magnetic Loops Through the Quiet Solar Atmosphere // The Astrophysical Journal. – 2009. – Vol. 700. – Is.2, – P. 1391–1403

Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Structure of solar faculae. // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. – 2019. – Vol. 482. – Is. 4. – P. 5290-5301.

Stangl S., Hirzberger J. On small scale magnetic structures in the solar photosphere // Astron. and Astrophys. – 2005. –Vol. 432, –Is. 1, –March II, P.319–329.

Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu. A., Riehokainen A., and Smirnova V.V. Long-period variations in the magnetic field of small-scale solar structures // Geomagn. and Aeron. – 2016. – Vol. 56. – Is. 8. – P. 1052–1059.

Strekalova P. V., Nagovitsyn Yu., V. Smirnova. Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Facular Formations // Geomagn. and Aeron. – 2018. – Vol. 58. – Is. 7. – P. 893-898.

Strekalova P.V., Solov'ev A.A., Smirnova V.V., Nagovitsyn Yu. A. The Magnetic Structure of Facular Formation in the Solar Atmosphere // Geomagn. and Aeron. – 2022. – V. 62. – № 8. –P. 1016 – 1020.