

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ФАКЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА СОЛНЦЕ

П.В. Стрекалова<sup>1</sup>, В.В. Смирнова<sup>2</sup>, Ю.А. Наговицын<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия,  
auriga-lynx@yandex.ru

<sup>2</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный

## STUDY OF THE STRUCTURE AND PARAMETERS OF FACULAR FORMATIONS ON THE SUN

P.V. Strekalova<sup>1</sup>, V.V. Smirnova<sup>2</sup>, Yu.A. Nagovitsyn<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, Saint-Petersburg, Russia,  
auriga-lynx@yandex.ru

<sup>2</sup>Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Russia

**Аннотация.** По данным SDO/AIA о распределении интенсивности в ультрафиолетовых линиях, а также данным в миллиметровом диапазоне радиointерферометра ALMA проведено исследование структуры, локализации и параметров плазмы мелкомасштабных магнитных образований (факельных образований) на разных высотах солнечной атмосферы. Получены значения яркостной температуры выбранных факельных образований на частотах 96 и 233 ГГц по данным ALMA.

**Ключевые слова:** спокойное Солнце, магнитное поле, радиоизлучение

**Abstract.** Using SDO/AIA data on the intensity distribution in ultraviolet lines, as well as data in the millimeter range of the ALMA radio interferometer, a study of the structure, localization and parameters of the plasma of small-scale magnetic formations (facular formations) at different heights of the solar atmosphere was carried out. The dependence of the temperature of flare formations on the height above the photosphere was obtained based on the observed and calculated millimeter radio emission.

**Keywords:** quiet Sun; magnetic field; radio emission

### ВВЕДЕНИЕ

Объектами нашего исследования являются уединённые мелкомасштабные магнитные образования, принадлежащие к областям спокойного Солнца — факельные образования (ФО). Мы предпочитаем использовать данный термин, поскольку в научной литературе для таких объектов нет единого названия [Tarbell et al., 1990; Javaherian et al., 2017 и др.]. В более ранних работах нами было получено, что характерный размер ФО варьируется от 1.5 до 4 Мм, абсолютные значения максимальной напряжённости магнитного поля составляют 400–1100 Гс, а полное время жизни составляет десятки часов [Strekalova, 2016]. Кроме того, в сигналах магнитограмм нами были обнаружены долгопериодические колебания с периодами от 25 до 280 минут [Strekalova, 2016, 2018]. Также ФО имеют свои наблюдательные проявления в ультрафиолетовых линиях, излучение которых приходит из фотосферы и нижней хромосферы.

На данный момент вопрос о модели ФО остаётся открытым. Существующие модели, такие как модель «горячей стенки» [Sptuit et al., 1976] или модель «холмов и облаков» [Shatten et al., 1986], критикуются, как не соответствующие наблюдательным проявлениям [Kostik, Khomenko, 2016]. Однако, существует также модель, основанная на аналогии с моделью мелкого пятна [Solov'ev., Kirichek, 2019]. Она достаточно хорошо соответствует данным о магнитном поле и интенсивности в континууме для ФО, однако для её проверки и уточнения необходимо лучше изучить проявление ФО в различных диапазонах длин волн, которые дали бы возможность определить некоторые параметры плазмы.

### ВЫБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

При выборе объектов мы отталкивались от данных о магнитном поле, полученных SDO/HMI в линии железа 6173 Å. Дополнительно мы рассматривали данные с SDO/AIA на 1600 Å, 304 Å и 171 Å. Для получения значений яркостной температуры на уровне хромосферы нами были использованы данные в радиодиапазоне с радиointерферометра ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) [Wedemeyer et al., 2016] в полосах пропускания 96 ГГц и 233 ГГц (3 мм и 1,2 мм соответственно) за 12.20.2018 г. из проекта 2018.1.01763.S. Средняя высота формирования излучения на длине волны 1,2 мм составляет 0,9 Мм (со стандартным отклонением 0,7 Мм), тогда как наблюдения на длине волны 3 мм формируются на значительно большей высоте и часто наблюдается на уровне спикул II типа. В результате средняя высота формирования на длине волны 3 мм составляет 1,8 Мм (стандартное отклонение 1 Мм). Средняя разница высот на этих длинах волн составляет 0,92 (±0,85 Мм) [Martínez-Sykora et al., 2020].

На рис. 1 представлено факельное образование, имеющее положительную и отрицательную компоненту в непосредственной близости друг от друга. Экстремальное значение магнитного поля положительной компоненты составило 405 Гс, а отрицательной -188 Гс. ФО проявляет себя на всех картах распределения интенсивности УФ-диапазона. В линии 1600 Å, соответствующей нижней фотосфере и переходной области, наблюдается яркий источник, по форме и положению совпадающий с представленным на магнитограмме. Начиная с линии 304 Å, принадлежащей переходной области и хромосфере,

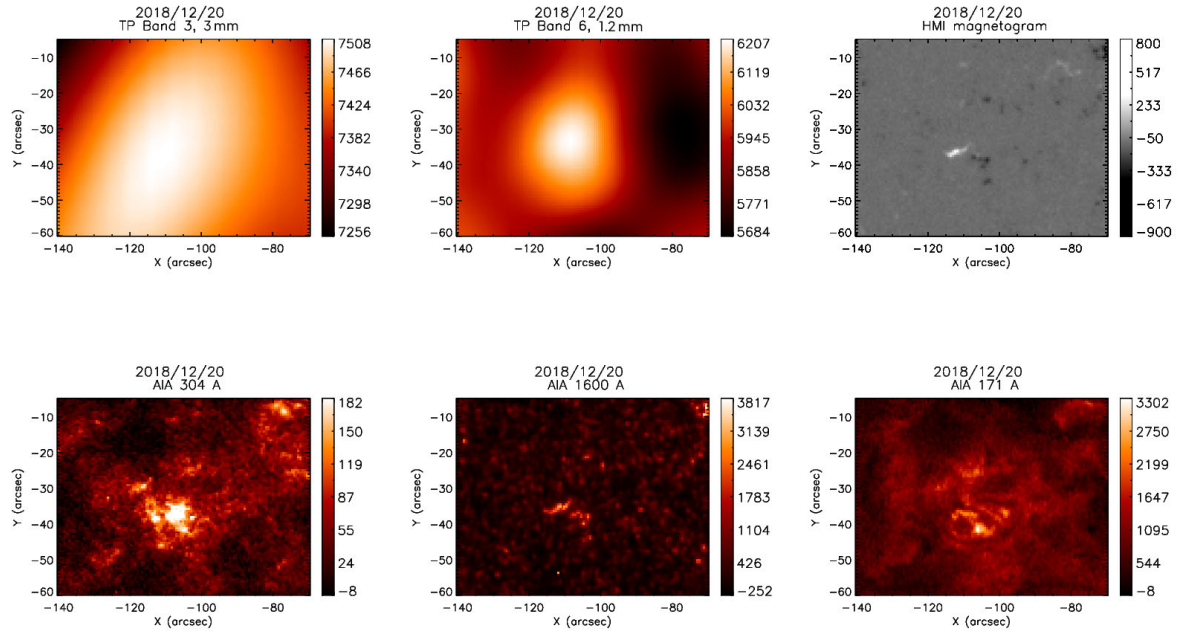


Рис. 1. Пример проявления факельного образования в разных диапазонах длин волн

становится заметна яркая область, связанная с магнитной конфигурацией (петлей), замыкающейся на противоположную полярность. В корональной линии 171 Å видны более высокие петли. В радиодиапазоне на длине волны 1,2 мм наблюдается хорошо локализованный источник, с максимальным значением яркостной температуры 6207 К. На 3 мм яркостная температура видимого источника достигает 7508 К, однако структура сильно размыта из-за низкого пространственного разрешения в данной полосе пропускания.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Было исследовано 7 факельных образований, 2 из которых имели видимую биполярную структуру (№ 6,7 в табл. 1). Источник хромосферного излучения был хорошо заметен, когда на магнитограмме наблюдалась биполярная структура ФО. В случаях, структура оказывалась униполярной, источник в нижней хромосфере был слаб и/или смещён. Это говорит о том, что конфигурация магнитных силовых линий ФО образует низкие петли, которые видны в хромосфере. В табл. 1. представлены значения яркостной температуры на длинах волн 1.2 мм и 3 мм, и экстремальные значения магнитного поля для 7 исследованных объектов, а также значения превышения яркостных температур над фоном для соответствующих длин волн. Фоновые значения на картах 1,2 мм и 3 мм определялись методом, предложенным в работе [Нагнибеда, Пиотрович, 1987]. В нашем случае, они составили 5700 К и 7100 К соответственно.

Также мы провели расчет высотной структуры магнитного поля факельного образования с рис. 1 (№7 в табл. 1). Для этого использовался пакет программ GX Simulator [Nita, 2009]. Данный программный продукт позволяет восстановить потенциальное магнитное поле до корональных высот, исходя из магнитограмм, получаемых на уровне фотосферы по наблюдениям на SDO/HMI. Результат представлен на рис. 2 (a, b).

Таблица 1.

Слева-направо: экстремальные значения магнитного поля ФО, яркостная температура на 1.2мм (233ГГц), яркостная температура на 3мм (96ГГц), превышение температуры над фоном на 1.2мм, превышение температуры над фоном на 3мм

	$B_{extr}, G$	$T_b$ 1.2mm, K	$T_b$ 3mm, K	$\Delta T_b$ 1.2mm, K	$\Delta T_b$ 3mm, K
1	-869	6294	7240	594	140
2	736	6086	7321	386	221
3	509	6167	7467	467	367
4	407	6000	7511	300	411
5	-420	6073	7419	373	319
6	-610 259	6248	7574	548	474
7	405 -188	6207	7508	507	408

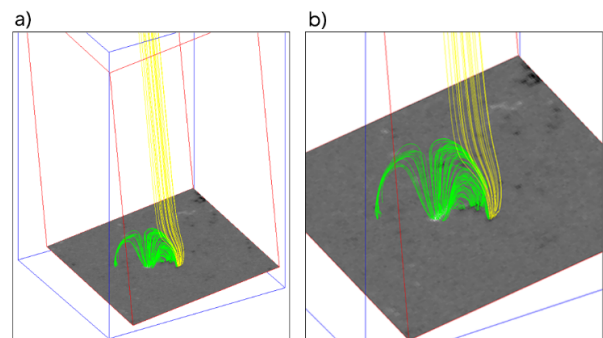


Рис. 2. Структура магнитного поля факельного образования, полученная в программе GX Simulator

Мы видим, что магнитное поле частично образует открытую конфигурацию. Часть магнитных силовых линий замыкается на области противоположной полярности, образуя петли.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Повышение температуры на уровне хромосферы, а также рост интенсивности, в том числе и в корональных линиях может быть интерпретирован по аналогии с моделью трёх потоков, предложенной в работах [Solov'ev et al., 2016, Smirnova et al., 2016] для солнечных пятен. Кроме того, полученные значения температур соответствуют расчётным температурам, представленным в упомянутой ранее модели [Solov'ev, Kirichek, 2019]. Для дальнейшего уточнения модели ФО необходимо получить больше данных о характерных температурах на разных высотах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нагнибеда В.Г., Пиотрович В.В. Радиоизлучение Солнца в миллиметровом диапазоне волн // Труды Астрономической обсерватории. 1987. Т. 41. С. 5–80.

Javaherian M., Safari H., Dadashi N. Statistical Properties of Photospheric Magnetic Elements Observed by the Helioseismic and Magnetic Imager onboard the Solar Dynamics Observatory // Sol. Phys. 2017. V. 292? iss. 11. ID. 164. P. 15.

Kostik R., Khomenko E. The possible origin of facular brightness in the solar atmosphere // Astron. and Astrophys. 2016. V. 589, ID. A6. P. 7.

Nita G.M., Fleishman G.D., Gary D.E. GS-3D Simulator: An Interactive IDL Widget Tool for Simulating Spatially Resolved Gyrosynchrotron Spectra Emitted by Solar Radio Bursts // Bul. of the Amer. Astron. Soc. 2009. V. 41. P. 839.

Shatten K.H., Mayr H.G., Omidrav K., Maier E., A Hillcock and Cloud Model for Faculae // Astrophys. J. 1986. V. 311. P. 460–473.

Solov'ev A. A., Kirichek E. A., Analytical Model of an Asymmetric Sunspot with a Steady Plasma Flow in its Penumbra // Sol. Phys. 2016. V. 291, iss. 6. P. 1647–1663.

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

Smirnova V.V, Konkol P.M., Solov'ev A.A., Murawski K. Numerical Simulations of Solar Spicule Jets at a Magnetic Null-Point // Sol. Phys. 2016. V. 291, iss. 11. P. 3207–3216.

Spruit H.C. Pressure equilibrium and energy balance of small photospheric fluxtubes // Solsr Phys. 1976. V. 50, iss. 2. P. 269–295.

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

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

Tarbell T., Ferguson S., Frank Z. et al. High-Resolution Observations of Emerging Magnetic Fields and Flux Tubes in Active Region Photosphere / J.O. Stenflo (ed.) Solar Photosphere: Structure, Convection, and Magnetic Fields. 1990. P. 147–152.

Wedemeyer S., Bastian T., Brajša R., Hudson H., Fleishman G., et al. Solar Science with the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array—A New View of Our Sun // Space Sci. Rev. 2016. V. 200, iss. 1–4. P. 1–73.