

ДИСКОВЫЕ АНАЛОГИ СПИКУЛ II ТИПА НА СОЛНЦЕ

Якунина Г.В.

*МГУ им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт
им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

THE DISK COUNTERPARTS OF TYPE II SPICULES IN THE SUN

Yakunina G.V.

Lomonosov Moscow State University, Sternberg State Astronomical Institute, Moscow, Russia

Disk observations of active region dynamic fibrils show jet-like features with parabolic ascending and descending motions (Type I spicules). The disk counterpart of type II spicules with "excessive" intensity were detected in the blue/red wing of the absorption lines: Rapid Blueshifted Excursion (RBEs) and Rapid Redshifted Excursion (RBEs). A brief overview of the results of observations of the disk counterpart of type II spicules is presented. The data obtained by ground-based and space telescopes were used.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-323-326

Структура хромосферы неоднородна и состоит в основном из продолговатых вытянутых язычков (спикул), придающих ей вид горящей травы. Температура этих хромосферных струй в два-три раза выше, чем температура фотосферы, а плотность в сотни тысяч раз меньше. С момента открытия спикул были предприняты огромные усилия, чтобы понять механизмы генерации спикул и их роль в нагревании солнечной короны.

Поток массы, переносимый спикулами в корону, превышает поток массы солнечного ветра на два порядка. Поэтому спикулы считаются наиболее вероятными кандидатами на передачу массы и кинетической энергии в корону, а также на ее нагрев. Спикулы обычно наблюдаются в хромосферных линиях $H\alpha$, $H\beta$, D3 и Ca II H и K на солнечном лимбе. Дискowymi аналогами классических спикул являются узелки (mottles) и фибриллы, которые обладают почти теми же свойствами, что и спикулы на лимбе.

Предыдущие наблюдения отдельных спикул были затруднены из-за низкого разрешения наблюдений. Видимость спикул, близкая к предельному разрешению, препятствовала определению даже их основных свойств. Ситуация значительно улучшилась с момента постройки шведского 1-метрового солнечного телескопа (SST) в 2003 г. и запуска спутника *Hinode* в 2006 г. Изображение SST демонстрирует более высокое разрешение по сравнению с изображениями *TRACE*, рис. 1. Наблюдения на солнечном телескопе (SOT) на борту *Hinode* показали другой тип спикул (тип II), которые имеют совершенно разные свойства, чем классические спикулы [1].

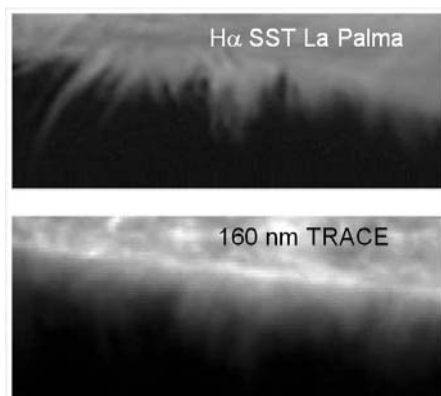


Рис. 1. Изображения западного лимба Солнца 14 июля 2006 г., полученные с разницей во времени 1с на шведском телескопе SST La Palma и *TRACE*. На измеряемые свойства спикул значительное влияние оказывает качество наблюдательных данных. Отсутствие высококачественных наблюдений помешало лучшему пониманию спикул и их связи с короной. По рис. 13 из работы [2].

Классические и вновь наблюдаемые спикулы называют спикулами типов I и II, соответственно. Спикулы II типа доминируют в областях спокойного Солнца и корональных дырах (КД), а спикулы типа I встречаются в основном в активных областях, рис. 2.

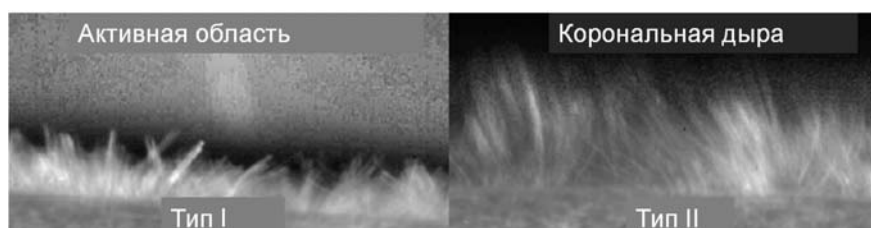


Рис. 2. Спикулы I типа – скорости (10–50 км/с), долгоживущие (100–500 сек), более короткие и имеют больший диаметр, наблюдаются в АО, движения вверх-вниз. Спикулы II типа – более быстрые (30–100 км/с), короткоживущие (20–150 сек), более длинные и тонкие, наблюдаются в КД и в областях спокойного Солнца, быстро исчезают или затухают. Самые быстрые спикулы находятся в КД.

Роль спикул II типа в короне в последние годы стала предметом многочисленных исследований и дискуссий. Спикулы II типа трудно наблюдать из-за их динамичности, быстротечности, малой интенсивности, колебательных и торсионных движений и переналожения. Спикулы обычно состоят из нескольких нитей, причем отдельные нити показывают сложную динамику, группы нитей проявляют общее поведение, а некоторые из них демонстрируют крутильные движения [3, 4], рис. 3.

Наблюдения на *Hinode* обнаружили асимметрию в синем крыле профиля линии Fe XIV 274, что указывало на наличие потоков плазмы, направленных вверх со скоростями в десятки км/с. При наблюдении на лимбе величины скоростей были значительно меньше. Были построены карты сине-красной (B-R) асимметрии и обнаружено, что потоки, направленные вверх, возникают преимущественно в области основания ног корональных петель. Обнаружение быстро протекающих хромосферных событий, видимых на диске, кото-

рые по свойствам можно было считать двойниками спикул II типа, вызвало особый интерес.

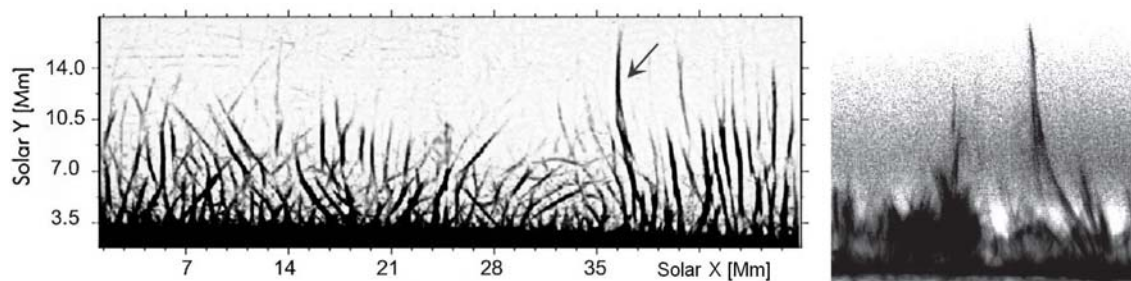


Рис. 3. Изображение спикул в Ca II H *Hinode/SOT*, 17.06.2011 г. (слева [5]) и 1.04. 2007 г. (справа [6]). Стрелочка указывает на длинную скрученную спикулу. Крутильные движения являются важной характеристикой спикул, ответственной за перенос спиральности в верхние слои солнечной атмосферы. Исследования спикул на диске с высоким разрешением (RBE/RREs) также показывают структуры из многих нитей.

Чтобы понять происхождение спикул, важно было установить как они выглядят на диске. Аналогии на диске были отождествлены с "соломинками" на лимбе в линии Ca II 854,2 нм и быстрыми синими смещениями (RBE), наблюдаемыми также в линии H α , [7]. Подобие свойств этих событий (движение вверх, время жизни, быстрое исчезновение) позволяло сделать предположение о связи событий на диске со спикулами II типа. Сначала были обнаружены события с «излишней» интенсивностью в синем крыле линии поглощения – RBEs. Позднее удалось также наблюдать события с превышением интенсивности в красном крыле линии – RREs, [8]. Как спикулы II типа, так и RBE/RRE имеют гораздо более короткое время жизни (около 10–150 с) и более высокие скорости движения вверх (50–150 км с⁻¹), чем классические спикулы (типа I) в линиях Ca II H, H α и Ly α .

Спикулы II типа представляют собой тонкие, удлинённые и яркие структуры над лимбом. RBEs – это тонкие, удлинённые и яркие структуры на диске. Некоторые спикулы выглядят как множественные нити с признаками вращательного движения. RBE и RRE располагаются вокруг мест концентрации магнитного поля [9, рис. 1, рис. 4]. RBEs, наблюдаемые в линии Ca II 8542, расположены ближе к основаниям и появляются раньше, чем H α RBEs [10, рис. 1]. Причем RBE более многочисленные.

Некоторые спикулы, наблюдаемые в Ca II H, становятся видимыми в высокотемпературных полосах пропускания телескопа *SDO/AIA*, подтверждая их возможность нагрева короны [9]. Величины средней скорости спикул на лимбе и средней скорости в короне в центре солнечного диска близки друг к другу, что также является аргументом в пользу возможной роли спикул II типа в нагреве короны.

Недавние исследования, в которых были объединены наблюдения *Hinode* и *IRIS*, показали, что после исчезновения в хромосферных линиях многие спиккулы II типа появляются в более горячих линиях Mg II, C II и Si IV. Дисковые аналоги спиккул спокойного Солнца видны в крыльях хромосферных линий и в линиях переходной области. Они поднимаются в "кустах" хромосферной сетки. Спиккулы на диске и лимбе показывают те же спектральные характеристики, что является доказательством того, что RBEs/RREs – это дисковые аналоги спиккул II типа, [8].

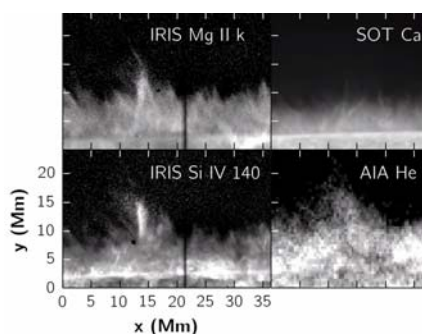


Рис. 4. Эволюции спиккул, наблюдаемых с помощью *IRIS*, *SDO* и *Hinode*. Спиккулы в He II (*SDO/AIA*) простираются чуть выше спиккул, наблюдаемых в линии Si IV (*IRIS*), их форма более размыта, отчасти из-за более низкого пространственного разрешения и, вероятно, отчасти из-за более сложного переноса излучения, [11].

Недавно были открыты другие возможности для дальнейшего изучения спиккул. Например, объединение *IRIS* и радионаблюдений, полученных с помощью *ALMA* [12], показало, что наблюдения, подобные колоскам *ALMA*, хорошо соответствуют аналогу *IRIS*, что является ключевым для диагностики и интерпретации данных *ALMA*.

Спиккулы II типа действительно имеют корональный аналог (видимый в спектрах EUV) и могут играть важную роль в распространении солнечного ветра и снабжении короны массой и энергией. Наблюдения *IRIS* впервые дали возможность проследить эволюцию спиккул II типа и окончательно подтвердили, что угасание (исчезновение) спиккул в Ca II H вызвано быстрым нагревом до более высоких температур.

Литература

1. De Pontieu, B., McIntosh, S., Hansteen, V.H., et al. //2007, PASJ, **59**, 655.
2. Pasachoff, J.M., Jacobson, W.A., & Sterling, A.C. // 2009, SoPh, **260**, 59.
3. Skogsrud H., Rouppe van der Voort L., and De Pontieu B. // ApJL 2014,**795**:L23 (6pp).
4. Pereira T., Rouppe van der Voort L., and Carlsson M. // ApJ, 2016, **824**, 65.
5. Tavabi E., Koutchmy S., Ajabshirizadeh A. et al. //A&A, 2015, **573**, A4.
6. Sterling A., Moore R., Samanta T., et al. // ApJL, 2020. **893**, L45.
7. Langangen O.B. De Pontieu B., M. Carlsson M. et al. // ApJL,2008, **679**, L167.
8. Sekse, D.H., Rouppe van der Voort, L., De Pontieu, B et al. // ApJ, 2013, **769**, 44.
9. Samanta T., Tian H., Yurchyshyn V., et al. // Science 366, 890 (2019) рис.1. рис.4
10. Sekse D., Rouppe van der Voort L., and B. De Pontieu B. // ApJ, 2012, 752:108 (14pp).
11. Skogsrud H., Rouppe van der Voort L., De Pontieu B. et al. // ApJ, 2015, **806**:170 (10pp).
12. Yokoyama T., Shimojo M., Okamoto T.J., et al. // ApJ, 2018, 863, 96.