ГОРЯЧИЕ СТРУИ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

**Кальтман Т.И.¹, Ступишин А.Г.², Анфиногентов С.А.³,
Накаряков В.М.^{1,4}, Лукичева М.А.^{1,2,5}**

¹*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

³*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

⁴*Centre for Fusion, Space and Astrophysics, Phys. Dep., Univ. of Warwick, UK*

⁵*Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen, Germany*

HOT JETS IN MAGNETIC FIELDS SOLAR ACTIVE REGIONS

**Kaltman T.I.¹, Stupishin A.G.², Anfinogentov S.A.³,
Nakariakov V.M.^{1,4}, Loukitcheva M.A.^{1,2,5}**

¹*Special astrophysical observatory of RAS, St. Petersburg, Russia*

²*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

³*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

⁴*Centre for Fusion, Space and Astrophysics, Phys. Dep., Univ. of Warwick, UK*

⁵*Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen, Germany*

Based on the "Catalogue of hot plasma jets in the corona of the Sun" (<https://prognoz2.sao.ru/coronal-jets-catalog/>) an analysis of plasma jet observations is presented, demonstrating a variety of jet flows in strong magnetic fields of active regions. The developed catalogue is used to evaluate various observed parameters of jets and active regions in which they occur. Examples of the evolution of jets in active regions of various classes (according to the classifications of Hale and McIntosh) are given. Simultaneous data from different ranges were compared: observations in the EUV (SDO/AIA instrument) and in the radio band (RATAN-600, SRH and NoRH ground-based radio telescopes) were supplemented with information on the configurations of the reconstructed coronal magnetic field. Estimates of the velocities of some jets, their duration, length and width, etc. are given. The goal of this analysis is to determine the magnetic configurations in which plasma jets appear and their correspondence to existing models of generation of MHD jets.

DOI: 10.31725/0552-5829-2021-151-154

1. Введение

На основе «Каталога горячих плазменных струй в короне Солнца» (<https://solar.sao.ru/coronal-jets-catalog>, [1–3], далее Каталог) представлен анализ наблюдений плазменных струй, демонстрирующий разнообразие струйных течений в сильных магнитных полях активных областей (АО). Наблюдательная база разработанного Каталога использована для статистических оценок наблюдаемых параметров струй и АО, в которых они воз-

никают. Проведен предварительный анализ струй в магнитных полях для 38 АО. Приведено несколько характерных примеров.

2. Струи в активных областях различных классов

В работе были использованы данные, полученные в различных диапазонах: оптическом, ультрафиолете и в радиодиапазоне. Наблюдательные данные были дополнены информацией о конфигурациях реконструированного коронального магнитного поля и расчетами радиоизлучения. Все события были обработаны алгоритмом выделения струй [2] с оценкой их наблюдаемых параметров; все результаты представлены онлайн в модернизированном Каталоге [4]. В выборку для исследования вошли АО различных классов (по Hale и по McIntosh). Статистические оценки, полученные по струям в 38 активных областях приведены в Выводах.

2.1. Струи в областях с простой конфигурацией магнитного поля

Для всех просмотренных областей направления струй совпадали с направлениями локальных силовых линий магнитного поля, т.е. в областях с одиночными пятнами струи направлялись от пятна к периферии вдоль

Рис. 1. АО 12533 (2016/04/28, класс Hale α , McIntosh Hsx) а) Реконструкция силовых линий магнитного поля на фоне фотосферного поля (HMI), расположение струи выделено рамкой; б) и в) кадр из Каталога: изображение АО в линии 171 Å (AIA) и разностное изображение со струей, выделенной алгоритмом [2].

Рис. 2. АО 12680 (2017/09/13, класс Hale α , McIntosh Hsx) Расчет радиоизлучения (параметры Стокса I, V, частоты 10 и 12 ГГц) в последовательные моменты времени (указаны в легенде), на основе реконструкции магнитного поля по данным HMI.

силовых линий, в сторону их «раскрытия» (пример на рис. 1). Так как радиоизлучение чувствительно к изменению структуры сильного магнитного

поля, расчет циклотронного излучения пятенных источников (рис. 2) в некоторых случаях показал изменения интенсивности и поляризации излучения, (чаще небольшие, как в данном примере, на 12 ГГц более заметные, чем на 10 ГГц), свидетельствующие о выходе магнитного потока.

2.2. Струи в областях с дельта-конфигурацией магнитного поля

В более сложных конфигурациях струйные течения показали большое разнообразие своих проявлений. Приведем два характерных примера мелкого и крупного событий. На рис. 3 показана область, в которой возникали несколько мелких струй внутри локальных петель, соединяющих соседние области разной полярности. Эти явления носили локальный характер и не оказывали воздействия на общую структуру магнитного поля АО.

Рис. 3. АО 12661 (2017/06/06, класс Hale $\beta\delta/\beta$, McIntosh Eao). а) то же, что на рис. 1; б) магнитограмма HMI (изображение взято с www.solarmonitor.org); в) и д) кадр из Каталога: изображение АО в линии 171Å (AIA) и разностное изображение с выделенными струями.

Рис. 4. АО 12403 (2015/08/25, класс Hale $\beta\gamma\delta$ и McIntosh Fkc/Ekc) – то же, что на рис. 2, на в) добавлены контуры радиояркости на 17 ГГц по данным NoRH (от 10500 К до 15000 К с шагом 500 К).

Событие на рис. 4 носит более масштабный характер: в данном случае эволюция крупной струи приводит к ее выбросу в сторону от сильного магнитного поля пятна, но не разрушает магнитную структуру, а замкнута внутри боковой аркады. Движение струи сопровождается некоторым кручением и вызывает кратковременное усиление радиоизлучения по наблюдениям Радиогелиографа Nobeyama. В других примерах крупные струи сопровождаются КВМ и радиовсплесками.

Выводы

Проведен предварительный анализ струй в магнитных полях 38 активных областей. Для всех просмотренных областей направления струй – вдоль «локально-открытых» силовых линий. Нам пока не удалось обнаружить зависимости факта образования струи от сложности конфигурации АО или от величины магнитного поля, а также заметного изменения или разрушения магнитной структуры в ходе эволюции струи. В большинстве случаев струя либо движется в сторону от пятен к периферии области и не задевает участки с сильными магнитными полями, либо эволюционирует внутри замкнутой системы петель, не изменяя структуру силовых линий. В некоторых случаях эволюция крупной струи внутри активной области вызывает кратковременное усиление радиоизлучения.

Получены следующие оценки для струй в активных областях: время жизни от 1 до 50 минут (в среднем около 20 мин.), скорости – десятки км/с (максимальная 120 км/с), размеры: длина от 7 до 500 угл. с. (в среднем 200 угл. с.), ширина до 50 угл. с. (средняя 11 угл. с.).

Измеренные скорости для большинства струй примерно на порядок меньше альвеновских скоростей. Этот факт накладывает определенные ограничения на интерпретацию механизмов возникновения и эволюции струи с участием магнитных сил (магнитного пересоединения).

В перспективе планируется дальнейший анализ и статистическое исследование струй в сильных магнитных полях активных областей с целью определения магнитных конфигураций, в которых появляются плазменные струи, и их соответствия существующим моделям генерации МГД струй.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-29-21016.

Литература

1. Кальтман Т.И. и др. Каталог горячих струй в короне Солнца за 2015–2018 гг. // Сб. тр. XXIII Всерос. ежегод. конф. «Солнечная и солнечно-земная физика», 2019, с. 197.
2. Ступишин А.Г., Кальтман Т.И., Анфиногентов С.А. О методике выделения струй в однородных временных сериях изображений Солнца // Сб. тр. XXIV Всерос. ежегод. конф. «Солнечная и солнечно-земная физика», 2020, с. 285-288.
3. Anfinogentov S.A. et al. Diagnostics of plasma jets in the Solar corona // Solar-Terrestrial Physics, vol. 7, issue 2, pp. 3-10
4. Ступишин А.Г. и др. Модернизация каталога горячих струй и перспективы его развития, настоящий сборник
5. Raouafi et al. // Space Science Reviews, 2016, V. 201, I. 1-4, pp. 1-53.