НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В КОРОНЕ СОЛНЦА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

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

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

²*Centre for Fusion, Space and Astrophysics, Phys. Dep., Univ. of Warwick, UK*

³*Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

⁴*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

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

OBSERVATIONAL PARAMETERS OF PLASMA JETS IN THE SOLAR CORONA AND DEVELOPMENT OF DIAGNOSTICS OF THEIR PHYSICAL PARAMETERS

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

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

²*Centre for Fusion, Space and Astrophysics, Phys. Dep., Univ. of Warwick, UK*

³*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

⁴*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk*

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

This paper presents a catalogue of hot jets observed in the corona of the Sun, which compiles the information obtained in EUV and radio bands with the use of leading space borne and ground-based instruments such as SDO/AIA, RATAN-600, SRH and NoRH. The catalogue summarizes observational parameters of jets, such as their locations, geometrical sizes and time durations. In addition, associated radio emission spectra, maps of the photospheric magnetic field and its coronal extrapolation, as well as movies of the events seen in the EUV images of the hosting region of interest, are given. Both fast and slow jets, having the speeds in the Alfvénic and sonic ranges, respectively, are included in the study. The catalogue allows for searching for scaling relationship between observed parameters of the jets and hosting active regions, which is necessary for revealing physical mechanisms responsible for the generation collimation, and dynamics of jets, including the partition of energy released by magnetic reconnection. The included events cover the time range from 2010 to 2018 years, which allows to study the evolution of the coronal jet phenomenon with the solar magnetic cycle.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-139-142

Введение

Водородная плазма солнечной короны (с присутствием альфа частиц и положительных ионов более тяжелых элементов) характеризуется высокой степенью ионизации (до 100%) и широким диапазоном температур (от 50 тыс. до 30 миллионов К) и концентраций 10^6 – 10^{11} см⁻³. Определяющая

роль в организации и динамике плазменных струй в солнечной короне принадлежит магнитному полю (параметр бета < 0.1), хотя не исключена возможность генерации продольных течений плазмы со скоростями порядка скорости звука термодинамическими процессами. Разнообразие физических условий и возможность детальных наблюдений делает солнечную плазму естественной лабораторией для исследования самых различных физических процессов ответственных за генерацию, коллимацию и распространение плазменных струй. В этих процессах могут проявляться как столкновительные, так и бесстолкновительные режимы, тепловые и нетепловые распределения частиц и разнообразные динамические явления (в том числе "холодные" и "горячие" струи, МГД волны различных типов и т.д.) [1–5].

Широкие возможности для изучения и диагностики плазменных струй открывает постоянный мониторинг излучения Солнца в радио, оптическом, УФ, КУФ, рентгеновском и гамма диапазонах высокопрецизионными инструментами наземного и космического базирования. Благодаря открытому доступу к наблюдательным данным и компьютерным программам для их анализа и моделирования мы получили возможность создать описанный ниже каталог, продолжать его заполнение и проводить исследования струй на его основе.

Плазменные струи по наблюдениям в различных диапазонах

Разработка методов диагностики включает сочетание анализа данных, полученных с помощью космического высокопрецизионного КУФ изображающего телескопа SDO/AIA и наземных радиотелескопов и спектрометров, включая РАТАН-600, СРГ, Nobeyama и ALMA, с численным моделированием МГД процессов и использованием его результатов для моделирования их проявления в наблюдениях этих инструментов ("forward modeling").

Пополняемый каталог струй [6] размещен на сайте СПбф САО <http://spbf.sao.ru/coronal-jets-catalog/>. По данным SDO/AIA с помощью системы первичной обработки данных Heliophysics Events Knowledgebase (НЕК) сделано первичное заполнение каталога. Для уточнения этих данных нами специально разработан алгоритм автоматического поиска струй в массиве рутинных наблюдений [7], рис. 1.

Каталог дополнен данными СРГ и РАТАН-600 (рис. 2 и 3), Nobeyama, реконструкциями магнитных полей и др. (подробнее см. [6–7]).

Основное внимание сосредоточено на крупномасштабных "горячих" струях, наблюдаемых в короне Солнца, что позволит в полной мере использовать потенциал наблюдений в радиодиапазоне, с его относительно низким пространственным разрешением, но при этом уникальной информацией об электронной температуре, величине магнитного поля, магнитной геометрии, и ускоренных электронах. В ряде случаев появление струи

Рис. 1. Совмещение изображений магнитного поля активной области и джета в линии 171 Å. Слева: 2015-09-13, 10:24:10UT, справа -2016-04-28, 10:01:22.

Рис. 2. Временные профили параметров Стокса I, V по данным Сибирского радиогелиографа (СРГ 48) за 2017/09/13.

Рис. 3. Сканы РАТАН-600 (I, V) 2015/05/02 на 2.52 см в разных азимутах: слабо меняется соотношение между двумя компонентами активной области во время джета.

сопровождается локальным уярчением в нижних слоях, и изменением поверхностного магнитного поля. Иногда наблюдается геликальная тонкая структура, подтверждаемая квазистереоскопическими методами, указывающая на наличие параллельного магнитного тока. Наблюдалось появление изгибных движений, распространяющихся по струе. Скорость плазмы в некоторых событиях достигает 1000 км/с, что сравнимо с локальной альфвеновской скоростью.

Выводы

Современные исследования, основанные на использовании данных новейших космических и наземных телескопов, позволяют получить как спектр, так и изображение объекта, конфигурацию магнитного поля для широкого разнообразия струйных течений, присутствующих в атмосфере Солнца на всех фазах цикла. Наблюдение плазменных струйных излучений одновременно в различных диапазонах позволяет детально изучить как их инициирование, энергию, динамику и коллимацию, так и связанные с ними плазменные процессы: неустойчивость, турбулентность и ускорение заряженных частиц [2–5].

Продолжено заполнение каталога (2010–2018 гг.) с первичной информацией о событии, параметрах струи, материнской активной области, со-

путствующих эруптивных явлениях. Разработан специальный алгоритм автоматического поиска струй в массиве рутинных наблюдений. Каталог позволит осуществлять поиск различных статистических закономерностей, и сделать выбор в пользу того или иного механизма образования и эволюции струй, предсказываемых отдельными моделями.

Представляется интересным определение экспериментальных скейлингов наблюдаемых параметров струй, таких, как их длительность во времени, скорость, протяженность в пространстве и ширина, между собой, а также вычисляемых параметров, таких, как альфвеновская, звуковая и трубочная скорости. Данная информация является ключевой для оценки энергии и мощности струи, что необходимо для установления механизма, ответственного за ее генерацию. В данном контексте крайне интересным представляется также и оценка энергии и спектра нетепловых электронов, ускоряемых в процессе энерговыделения. В случае генерации струи магнитным пересоединением, данные оценки позволяют определить распределение конвертируемой энергии магнитного поля по трем основным типам выделяемой энергии, а именно прямой нагрев плазмы, ускорение заряженных частиц и кинетическая энергия струй, а также возможную эволюцию данного распределения на разных этапах данного процесса.

Отдельный интерес создаваемый каталог представляет для выявления связи наблюдаемых на струях волновых процессов, прежде всего изгибных и медленных колебаний, с параметрами струй и их сейсмологической диагностики. В частности, недавно установлена и впервые использована возможность оценки изменения скорости течения по медленным магнитоакустическим волнам [2]. В случае изгибных волн, которые относятся к быстрой ветви магнитогидродинамических волн, представляется интересным исследование роли в их инициации эффектов, связанных с волнами с отрицательной энергией (см, например, [3]), что может привести к существенным изменениям нашего понимания генерации МГД волн в короне и солнечном ветре.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-29-21016.

Литература

1. *Raouafi et al.* // Space Science Reviews, V. 201, I. 1-4, pp. 1-53, 2016
2. *Cho, I.-H., Nakariakov, V.M., et al.* Accelerating and supersonic density fluctuations in coronal hole plumes: signature of nascent solar winds // Astrophys. J. Lett. 900, L19, 2020
3. *Yu, D.J., Nakariakov, V.M.* Excitation of negative energy surface magnetohydrodynamic waves in an incompressible cylindrical plasma // Astrophys. J. 896, 21, 2020
4. *Кудрявцев И.В., Кальтман Т.И.* Спектральная диагностика ленгмюровской турбулентности корональной плазмы на основе радиоизлучения на двойной плазменной частоте, *настоящий сборник*
5. *Кудрявцев И.В.* О генерации ионно-звуковых волн в солнечной плазме при разрыве токового слоя, *настоящий сборник*
6. *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.
7. *Ступишин А.Г., Кальтман Т.И., Анфиногентов С.А.* О методике выделения струй в однородных временных сериях изображений Солнца, *настоящий сборник*.