

## ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В КОРОНЕ СОЛНЦА

### DIAGNOSTICS OF PLASMA JETS IN THE SOLAR CORONA

**С.А. Анфиногентов**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru*

**Т.И. Кальтман**

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
С.-Петербург, Россия, arles@mail.ru*

**А.Г. Ступишин**

*Санкт-Петербургский государственный университет,  
С.-Петербург, Россия, agstup@yandex.ru*

**В.М. Накаряков**

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
С.-Петербург, Россия, v.nakariakov@warwick.ac.uk  
Центр термоядерного синтеза, космической и астрофизики,  
Уорикский университет, Великобритания,  
v.nakariakov@warwick.ac.uk*

**М.А. Лукичева**

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН,  
С.-Петербург, Россия, m.lukicheva@spbu.ru  
Санкт-Петербургский государственный университет,  
С.-Петербург, Россия, m.lukicheva@spbu.ru  
Институт исследования солнечной системы Макса Планка,  
Геттинген, Германия, m.lukicheva@spbu.ru*

**S.A. Anfinogentov**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, anfinogentov@iszf.irk.ru*

**T.I. Kaltman**

*Special Astrophysical Observatory RAS,  
St. Petersburg, Russia, arles@mail.ru*

**A.G. Stupishin**

*St Petersburg University,  
St. Petersburg, Russia, agstup@yandex.ru*

**V.M. Nakariakov**

*Special Astrophysical Observatory RAS,  
St. Petersburg, Russia, v.nakariakov@warwick.ac.uk  
Centre for Fusion, Space and Astrophysics,  
University of Warwick, UK, v.nakariakov@warwick.ac.uk*

**M.A. Loukicheva**

*Special Astrophysical Observatory RAS,  
St. Petersburg, Russia, m.lukicheva@spbu.ru  
St Petersburg University,  
St. Petersburg, Russia, m.lukicheva@spbu.ru  
Max Planck Institute for Solar System Research,  
Göttingen, Germany, m.lukicheva@spbu.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается диагностика плазменных струй в короне Солнца по данным современных космических и наземных телескопов, наблюдающих Солнце в крайнем ультрафиолетовом (КУФ) и микроволновом диапазонах. Обсуждаются наблюдательные параметры КУФ- и радиоизлучения в событиях, связанных с плазменными струями, в зависимости от механизма образования, условий излучения и эволюции струй. Показаны возможности изучения солнечной короны, предоставляемые исследованием плазменных струй по наблюдениям одновременно в различных диапазонах. Для ряда струй измерены их первичные параметры и приведены предварительные результаты статистической обработки полученных данных. Подробно рассмотрены микроволновые наблюдения нескольких отдельных событий, выполненные с помощью наземных инструментов РАТАН-600, СРГ и радиогелиографа Нобеяма. Показаны диагностические возможности указанных инструментов при исследовании корональных струй. Для анализа трехмерной структуры коронального магнитного поля использованы данные SDO/HMI, по которым выполнена реконструкция поля в нижней короне. Полученная информация сопоставляется с результатами диагностики магнитного поля в основании короны по данным РАТАН-600. Целью разрабатываемых методов является определение физических механизмов, ответственных за генерацию, коллимацию и динамику плазменных струй в атмосфере Солнца.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечная корона, активные области на Солнце, корональные струи, микроволновые наблюдения Солнца, КУФ-наблюдения Солнца.

**Abstract.** The paper discusses the diagnostics of plasma jets in the solar corona with the use of data from modern space- and ground-based telescopes observing the Sun in the extreme ultraviolet (EUV) and microwave bands. We examine observational parameters of EUV and radio emission in events associated with plasma jets, depending on the mechanism of formation, initiation conditions, and evolution of the jets. The opportunities provided by the study of plasma jets, which relies on simultaneous observations in different bands, are highlighted. For a number of jets, we have measured their primary parameters; and in this paper we present preliminary results of statistical processing of the data obtained. Microwave observations of several specific events, made by ground-based instruments RATAN-600, SRH, and Nobeyama Radioheliograph, are considered in detail. The diagnostic capabilities of these instruments for studying coronal jets are shown. To analyze the three-dimensional structure of the coronal magnetic field, we have used SDO/HMI data, which allowed for the reconstruction of the field in the lower corona. The information gained is compared with the results of diagnostics of the magnetic field at the base of the corona according to RATAN-600 data. The purpose of the methods developed is to determine the physical mechanisms responsible for the generation, collimation, and dynamics of plasma jets in the solar atmosphere.

**Keywords:** Sun, solar corona, solar active regions, coronal jets, microwave observations of the Sun, EUV observations of the Sun.

## 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  $50 \cdot 10^3$  до  $30 \cdot 10^6$  К) и концентраций  $10^6$ – $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Наблюдения показывают, что корона является весьма динамичной средой с широким спектром разнообразных течений, в том числе струйного типа. Определяющая роль в формировании и динамике плазменных струй в солнечной короне принадлежит магнитному полю (параметр  $\beta < 0.1$ ), хотя не исключена возможность генерации термодинамическими процессами продольных течений плазмы со скоростями порядка скорости звука. 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.) [Zhang Ji, 2014; Nisticò et al., 2015; Raouafi et al., 2016; Cho et al., 2020; Yu, Nakariakov, 2020; Joshi et al., 2020].

Широкие возможности изучения и диагностики плазменных струй открывает постоянный мониторинг излучения Солнца в радио-, оптическом, УФ-, КУФ-, рентгеновском и гамма-диапазонах высокоточными инструментами наземного и космического базирования. Благодаря открытому доступу к наблюдательным данным, а также компьютерным программам их анализа и моделирования мы получили возможность создания описанного ниже каталога наблюдений корональных струй, продолжения его заполнения и исследования струй с его помощью.

Статья организована следующим образом: в разделе 1 мы рассматриваем наблюдательные проявления корональных струй в КУФ- и радиодиапазонах; в разделе 2 кратко описан созданный нами каталог корональных струй; в разделе 3 приведены примеры наблюдения корональных струй в микроволновом диапазоне; в разделе 4 и в заключении обсуждаются полученные результаты и формулируются основные выводы.

### 1. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ СТРУЙ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Корональные плазменные струи представляют собой динамические плазменные образования с ярко выраженным течением плазмы, наблюдаемые на КУФ-изображениях в виде относительно короткоживущих (как правило, до нескольких часов) вытянутых структур. Скорость плазмы в некоторых событиях достигает 1000 км/с, что сравнимо с локальной альфвеновской скоростью. В ряде случаев появ-

ление струи сопровождается локальным уярчением в нижних слоях и изменением поверхностного магнитного поля. Иногда наблюдается винтовая (геликальная) тонкая структура, подтверждаемая квазистереоскопическими методами, указывающая на наличие параллельного электрического тока. Как и в корональных петлях, плотность и температура внутри струи отличаются от фоновых значений, что позволяет ей служить в качестве волновода для МГД-волн, в том числе изгибных колебаний, которые наблюдаются в виде изгибных движений, распространяющихся по струе.

По данным коронографов корональные струи наблюдаются на различных высотах в солнечной атмосфере, в том числе в верхней короне [Kudriavtseva, Prosovetsky, 2019]. Мы будем рассматривать плазменные струи в нижней короне, которые хорошо видны на изображениях SDO/AIA. Струи, наблюдаемые в короне Солнца, можно условно разделить на две категории — «горячие» и «холодные». Первые состоят из корональной плазмы с температурой порядка  $10^6$  К и выше, в то время как в холодных струях присутствует существенная доля холодного и плотного хромосферного материала с температурой несколько десятков тысяч градусов.

Из-за существенной разницы в температурах отличаются и наблюдательные проявления двух типов струй. Горячие струи видны в виде тонких и длинных ярких образований в КУФ-излучении в горячих каналах инструмента AIA орбитальной обсерватории SDO [Pesnell et al., 2012]. Пример изображения горячей корональной струи, полученного на длине волны 171 Å инструментом SDO/AIA показан на рис. 1. В более холодном канале SDO/AIA 304 Å, а также на изображениях, получаемых инструментом IRIS, горячие струи, как правило, не видны.

Холодные струи, в свою очередь, лучше всего проявляются в виде ярких образований на длине волны 304 Å, максимум чувствительности этого канала приходится на 60000 К. В более горячих каналах SDO/AIA (171, 193, 131, 94 Å) эти образования часто бывают также видны как густки темного вещества, поглощающего КУФ-излучение. Помимо горячих и холодных струй, иногда наблюдаются струи, состоящие из нескольких компонент с разными температурами [Zhang, Ji, 2014; Joshi et al., 2020]. Такие струи наблюдаются в виде ярких структурированных объектов одновременно в корональных (например, 171 Å) и хромосферных (304 Å) каналах SDO/AIA. Один из примеров такой струи описан в разделе 2.

Таким образом, по своим наблюдательным проявлениям материал холодных и многокомпонентных струй часто напоминает вещество протуберанца, и в некоторых случаях такие струи становятся трудно отличимыми от возвратных выбросов и эрупций мелких волокон. Холодная и плотная фракция таких струй, попав в корону, может экранировать ниже лежащий циклотронный микроволновой источник и вызвать кратковременное уменьшение его видимой яркости. Данное явление было обнаружено в данных

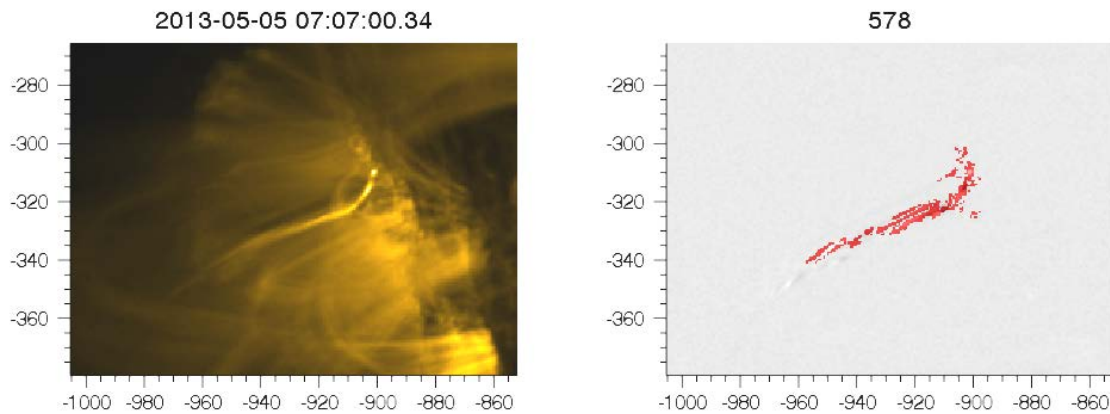


Рис. 1. Пример автоматической идентификации корональной струи на изображениях SDO/AIA в канале 171 Å

радиогелиографа Нобеяма (NoRH) [Nakajima et al., 1994] и Сибирского солнечного радиогелиографа (СРГ) [Лесовой и др., 2017] и стало известно как отрицательные микроволновые всплески [Кузьменко и др., 2009; Кузьменко, 2020].

Для диагностики корональных струй представляет интерес и процесс их инициации. Согласно общепринятым представлениям, струя возникает при ускорении плазмы в ее основании в результате процесса магнитного пересоединения, которое может происходить, в том числе и во время микровсплесков. Поскольку характеристики микровсплески во многом определяют параметры порожденной ею струи, наблюдения и анализ коротких всплесков КУФ-, радио- или рентгеновского излучения в момент инициации струй являются источником важной информации для их диагностики.

## 2. КАТАЛОГ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУЙ

Для диагностики корональных струй и изучения статистических закономерностей их параметров нами был создан каталог наблюдений струй [Кальтман и др., 2019], размещенный на сайте СПбФ САО [<http://spbf.sao.ru/coronal-jets-catalog>]. Каталог основан на данных о корональных струях из базы данных Heliophysics Events Knowledgebase (НЕК) и включает в себя данные наблюдений, полученные с помощью космического высокопрецизионного КУФ изображающего телескопа SDO/AIA, а также наземных радиотелескопов и спектрометров, включая Радиоастрономический телескоп Академии наук (РАТАН-600) [Богод, 2011], СРГ, NoRH. Кроме того, в каталоге размещены радиокарты и кривые потока по данным NoRH и СРГ для тех случаев, когда струя или процесс ее инициации наблюдались указанными телескопами.

В каталог включены также контекстные наблюдения, такие как микроволновые изображения активных областей со струями на частоте 17 ГГц (NoRH) и на нескольких частотах в диапазоне 4–8 ГГц (СРГ), а также данные высокопрецизионного измерения спектров микроволнового излучения, полученные на РАТАН-600. Последние позволяют выполнить оценку магнитного поля в основании короны

и дополняют данные реконструкции коронального магнитного поля в приближении нелинейного бессилового поля, которые также опубликованы в каталоге (подробнее см. [Кальтман и др., 2019; Ступишин и др., 2020]).

Для предварительной обработки имеющихся данных нами специально разработан алгоритм автоматического поиска струй на сериях КУФ-изображений [Ступишин и др., 2020]. Программа, реализующая данный алгоритм, автоматически для каждого события выделяет из каталога детали, связанные со струями, и отмечает их на изображениях и видеофайлах (см. рис. 1). Кроме того, измеряются и сохраняются в каталоге следующие параметры обнаруженных деталей:

- $T_{start}$  — время начала струи;
- $T_{max}$  — время максимума струи;
- $T_{end}$  — время конца струи;
- Duration — продолжительность;
- Max cardinality — макс. количество пикселей;
- Max aspect ratio — максимальная вытянутость;
- Min aspect ratio — минимальная вытянутость;
- $X_{from}$ ,  $X_{to}$ ,  $Y_{from}$ ,  $Y_{to}$  — координаты ограничивающего прямоугольника (координаты даны за всю историю струи).

Параметры, определенные алгоритмом, могут быть использованы для дальнейшего статистического анализа характеристик струй. Например, для предварительной выборки из 80 событий нами были получены характерные оценки некоторых параметров найденных струй (в скобках приведены средние значения): длительность от 1 до 17 мин, максимальная/минимальная вытянутость струи соответственно 4–21 (7.3) / 3.5–7.5 (3.9) угл. сек., длина 13–144 (97) угл. сек.

Поскольку алгоритм независимо запускается для разных каналов SDO/AIA, у нас имеется возможность провести сравнительный анализ видимости отдельных деталей струй в разных длинах волн, соответствующих разным температурам излучающей плазмы. В таблице собраны примеры парных наблюдений струй в линиях 171 и 193 Å. Пары отобраны по совпадению максимума и длительности струи (колонки  $T_{max}$  и Duration), а также по ее расположению ( $X_{from}$ ,  $X_{to}$ ,  $Y_{from}$ ,  $Y_{to}$ ). При незави-



Результаты сравнительного анализа деталей струй, видимых в каналах 171 и 193 Å

T start	T max	Duration	Max card.	Max as.rat.	Min as.rat.	X from	X to	Y from	Y to	Length	Line, Å
2016-04-28T09:58:05.84	2016-04-28T09:58:05.84	6'12	143	9,36	3,53	471,2	496,9	14,2	23,8	27,43447	193
2017-09-04T03:49:40.84	2017-09-04T03:50:40.84	2'12	276	10,04	3,73	-841,8	-820	244,7	275,9	38,29204	193
2017-09-04T03:49:45.34	2017-09-04T03:50:45.34	2'12	291	7,65	3,63	-846	-820	245,3	280,1	43,68066	171
2017-09-04T04:19:16.84	2017-09-04T04:19:52.84	2'12	124	5,58	3,87	-814	-796	246,6	275,4	33,96233	193
2017-09-04T04:19:21.35	2017-09-04T04:20:09.35	2'24	139	5,56	3,51	-812,8	-794	248,4	276,6	34,17206	171
2017-09-13T05:51:40.84	2017-09-13T05:52:16.84	1'24	140	7,08	4,52	-531,6	-508	-3,4	26,6	38,29412	193
2017-09-13T05:51:45.35	2017-09-13T05:53:45.35	3'12	175	7,63	3,58	-530,6	-508	-2,2	24,2	34,68732	171
2018-04-03T04:04:28.84	2018-04-03T04:05:28.84	1'12	1113	5,11	3,89	338,2	380,7	3,4	106,7	111,7011	193
2018-04-03T04:04:33.35	2018-04-03T04:07:09.35	2'48	1708	5,29	3,81	336,2	393,8	-12,4	139,3	162,2672	171
2018-09-14T05:48:40.84	2018-09-14T05:50:52.84	3'12	147	6,1	3,62	189,5	220,9	-287,1	-273,9	34,06171	193
2018-09-14T05:48:21.35	2018-09-14T05:51:09.35	4'12	179	6,7	3,62	188	220,3	-288,9	-274,5	35,36453	171
2018-10-13T05:09:52.85	2018-10-13T05:10:04.85	1'24	526	4,66	3,71	-812,5	-763	-165,6	-146,4	53,37303	193
2018-10-13T05:09:21.35	2018-10-13T05:11:09.35	2'24	539	5,37	3,59	-816,1	-763	-166,8	-147	56,48407	171

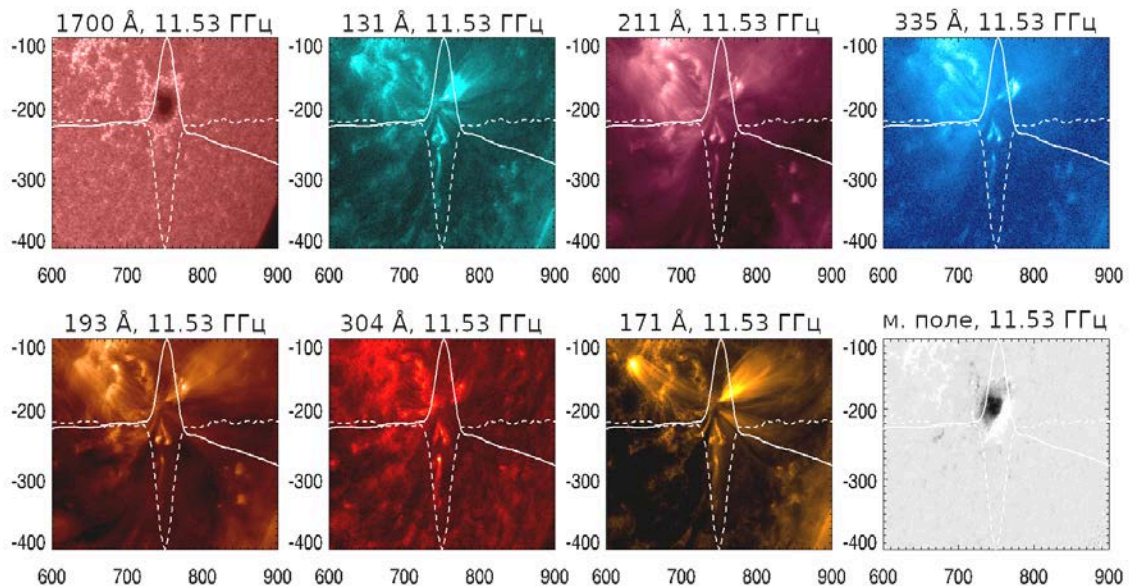


Рис. 2. Изображения SDO (AIA и HMI), полученные 17.04.2019 в 08:32 UT (AIA) и 08:33UT (HMI) с наложенными сканами в антенных температурах (сплошная линия — интенсивность  $I$ , штриховая — поляризация  $V$ ), полученными на РАТАН-600 в 08:32 UT на частоте 11.53 ГГц во время проявления струи (08:28–08:47 UT). Струя расположена вертикально внутри скана  $V$ . При совмещении изображения были повернуты, так чтобы диаграмма направленности РАТАН-600 на изображении была вытянута в вертикальном направлении

симом анализе в разных каналах наблюдается следующая тенденция: в среднем струи в 193 Å меньше по длине и времени существования, чем в 171 Å.

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ СТРУЙ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

В контексте чувствительности, спектрального разрешения и ширины наблюдаемого спектрального диапазона наилучшими характеристиками среди имеющихся радиотелескопов, регулярно наблюдающих Солнце, обладает РАТАН-600. Однако из-за ограничений, связанных со сканирующим режимом, наблюдения на РАТАН-600 в большинстве случаев используются только для получения контекстной информации об активной области, в которой наблю-

далась струя. Тем не менее, при удачном стечении обстоятельств можно наблюдать изменения радиояркости, непосредственно связанные со струей. Для одного из событий нашего каталога развитие струи совпало по времени с несколькими сканами РАТАН-600. На рис. 2 показан скан РАТАН-600 на фоне изображений активной области в разных каналах SDO/AIA/HMI, а на рис. 3 — несколько последовательных сканов, часть которых была сделана во время существования струи. Хорошо заметно увеличение поляризации ( $V$ -параметр Стокса) радиосточника в то время когда струя находилась внутри диаграммы направленности РАТАН-600.

Несколько большие возможности по непосредственному наблюдению корональных струй дают радиогелиографы NoRH и CRG, которые записывают полную двумерную радиокарту всего солнечного

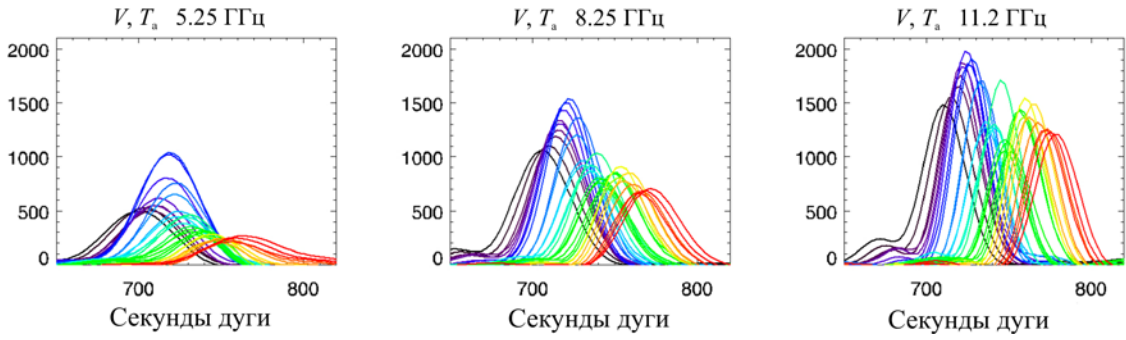


Рис. 3. Сканы РАТАН-600 антенных температур поляризованного излучения АО 12738 за 17.04.2019 на частотах 5.25, 8.25 и 11.20 ГГц. Разными цветами показаны наблюдения в разных азимутах: 31 запись наблюдений в промежутке времени 07:11–11:15 UT с шагом 8 мин. Сдвиг сканов слева направо является проекционным эффектом, связанным с вращением Земли и зависящим от ориентации антенны радиотелескопа. Период прохождения струи соответствует повышению излучения на сканах синего цвета

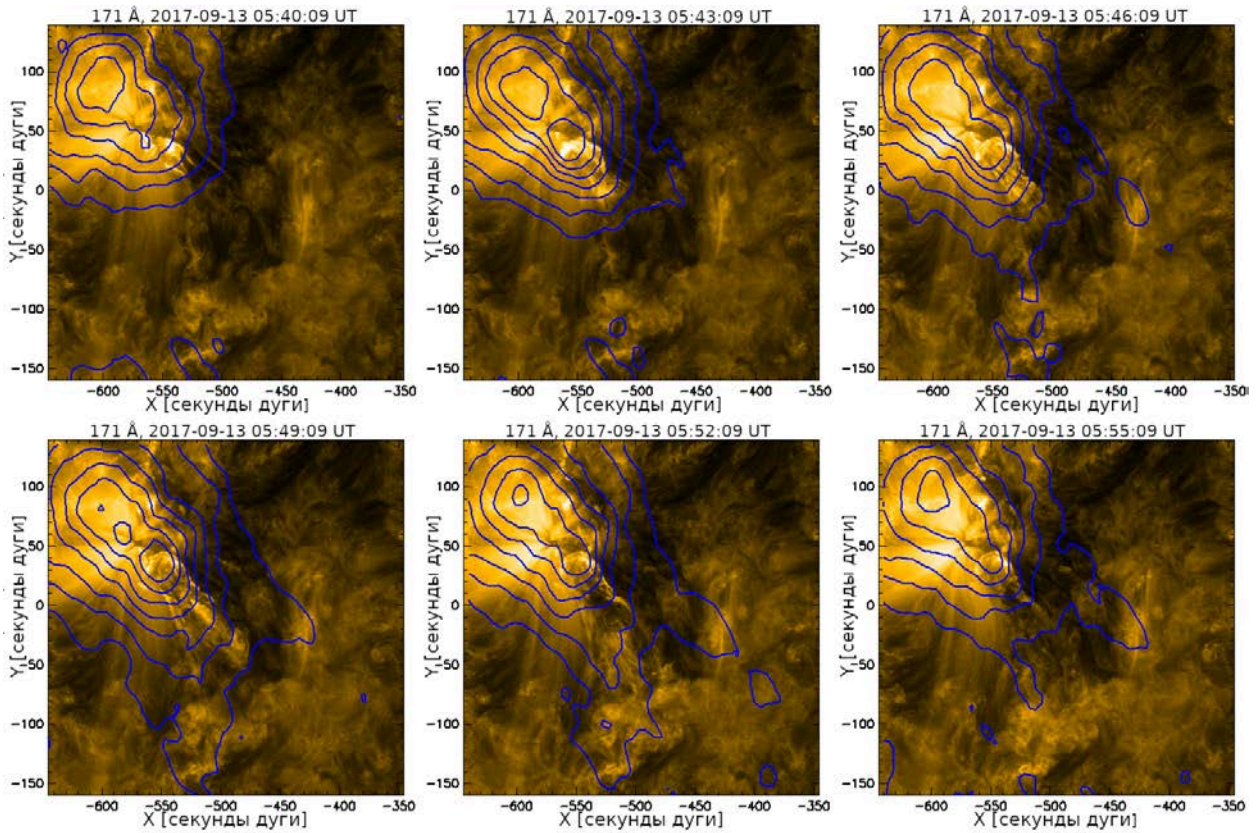


Рис. 4. Радиокарты микроволнового излучения на частоте 17 ГГц, полученные 13.09.2017 радиогелиографом NoRH для разных стадий развития струи и наложенные в виде контуров на изображения SDO/AIA 171 Å. Контур радиояркости соответствуют значениям от 10500 до 15000 К с шагом 500 К

диска со скважностью  $\sim 10$  с для каждой частоты. Примером события одновременного наблюдения струи в радиодиапазоне на радиогелиографах NoRH и СРГ является событие, зарегистрированное 13 сентября 2017 г. в АО 12680.

Струя из АО 12680 относится к многокомпонентным струям, и ее материал содержит фракции как горячей корональной плазмы, так и более холодного и плотного хромосферного вещества. На КУФ-изображениях данная струя видна в нескольких каналах SDO/AIA, в том числе в канале 304 Å, в виде яркой вытянутой структуры. В радиодиапазоне струя наблюдалась одновременно радиогелиографами NoRH и СРГ. На рис. 4 показана радиокарта интен-

сивности  $I$  микроволнового излучения на частоте 17 ГГц (NoRH), наложенная на КУФ-изображение в линии 171 Å. Наблюдается высокая корреляция между формой и размерами струи, выделяемыми на изображениях AIA 171 Å в разные моменты времени, и изменениями формы радиоисточника на частоте 17 ГГц. Это показывает, что в данном случае на частоте 17 ГГц наблюдается непосредственно струя.

Помимо 17 ГГц, данное событие также было зарегистрировано на СРГ в диапазоне 4–8 ГГц. Хотя ограниченное пространственное разрешение не позволило получить непосредственное изображение струи, было зафиксировано увеличение потока радио-



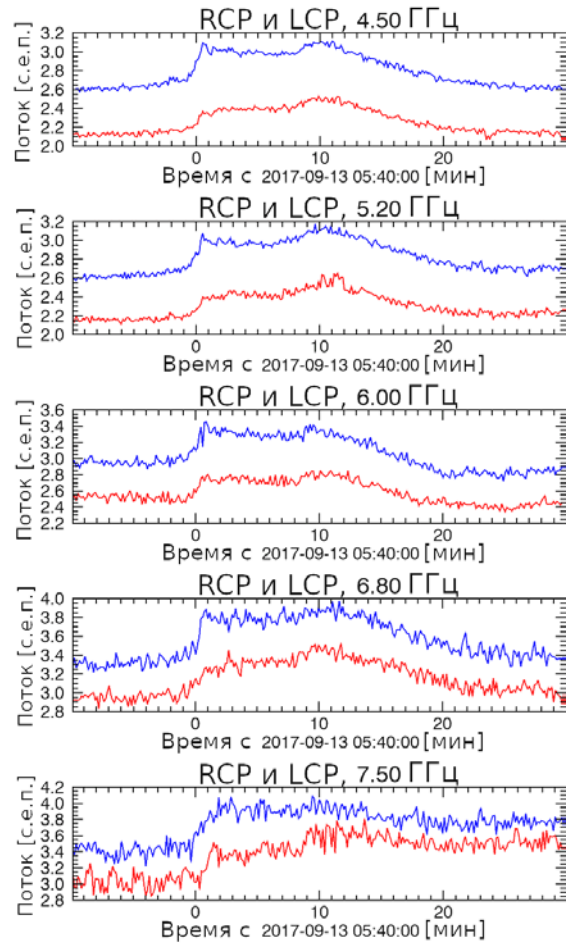
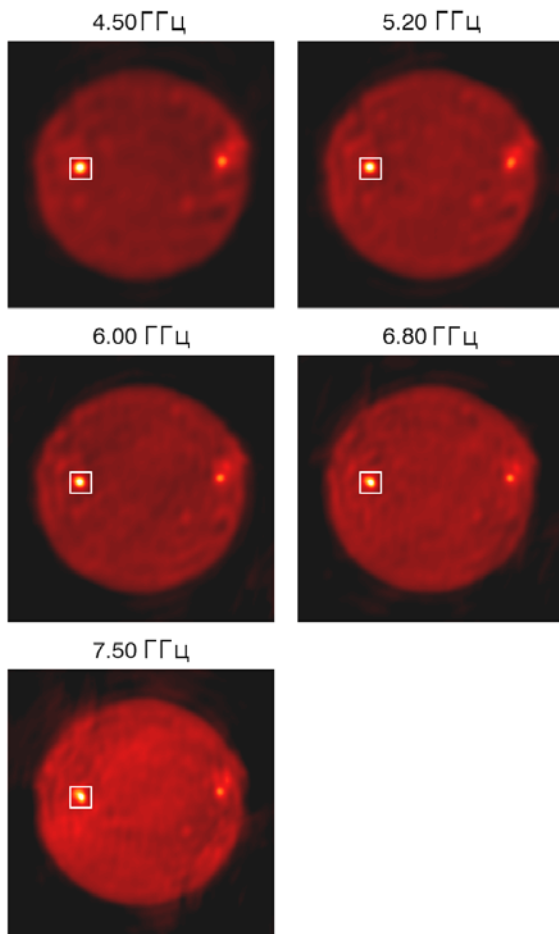


Рис. 5. Радиоизображения Солнца (слева), полученные на СРГ 13 сентября 2017 г. Активная область, в которой наблюдалась струя, выделена белым прямоугольником. Справа показаны кривые потока излучения для выделенной области в правой (RCP, синий) и в левой (LCP, красный) поляризации

излучения от активной области. На рис. 5 показаны радиокарты полного диска Солнца и графики изменения потока микроволнового излучения от активной области, в которой наблюдалась струя. Радиоотклик представляет собой суперпозицию долгоживущего увеличения яркости, которое, по-видимому, связано непосредственно со струей, и короткого сильно поляризованного радиовсплеска, наблюдавшегося в момент инициации струи. Последний, по-видимому, связан с микровспышкой, которая и породила струю.

Хотя данная струя и не попала в период ежедневных наблюдений Солнца телескопом РАТАН-600, его данные были использованы для получения дополнительной информации о максимальной величине магнитного поля в верхней части переходной зоны/основании короны, где предположительно находилось основание струи. На рис. 6 показан спектр микроволнового излучения для АО 12680, полученный по наблюдениям на РАТАН-600. Несмотря на то, что наблюдения были выполнены спустя четыре часа после события, они могут быть использованы для получения контекстной информации о корональном магнитном поле, так как существенных изменений конфигурации АО или солнечных вспышек в ней в указанный период не наблюдалось.

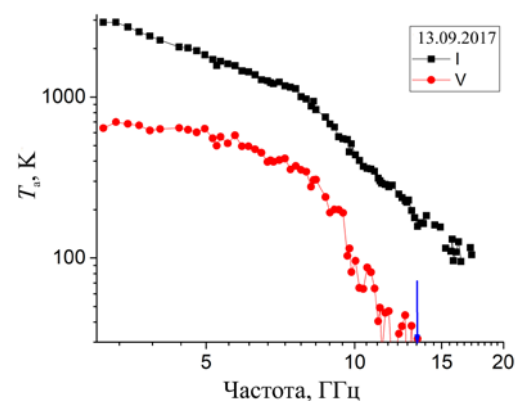


Рис. 6. Спектр антенных температур ( $I$  — интенсивность;  $V$  — поляризация) АО 12680 за 13.09.2017 по наблюдениям на РАТАН-600 (09:09:30 UT). Синей стрелкой показана максимальная частота циклотронного излучения

По спектру поляризованного излучения было найдено, что максимальная частота циклотронного излучения лежит в области 13.3–13.4 ГГц. По этим частотам было определено значение магнитного поля 1580–1620 Гс в верхних слоях переходной зоны на оси радиисточника над пятном в предположении, что излучение необыкновенной моды происходит на третьей гармонике гирочастоты.

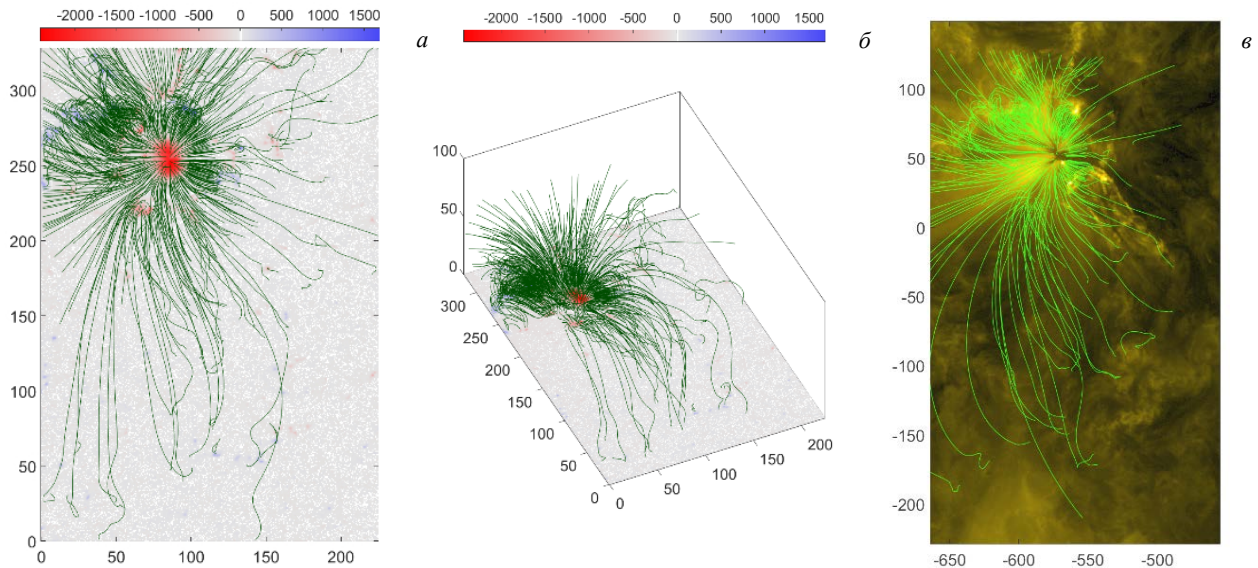


Рис. 7. Силовые линии магнитного поля в АО 12680 по данным NLFFF экстраполяции, наложенные на магнитограмму: вид сверху (а), вид сбоку (б) и вид с Земли на фоне КУФ-изображения в канале 171 Å SDO/AIA (в)

Для получения верификации измерений магнитного поля по микроволновым спектрам, а также для исследования его морфологии была выполнена реконструкция коронального магнитного поля в NLFFF-приближении. Сопоставление измерений магнитного поля в основании короны, выполненных путем анализа микроволнового спектра (1580–1620 Гс), с данными реконструкции магнитного поля показало, что полученное значение соответствует высоте около 1600 км над тенью солнечного пятна и согласуется с ожидаемыми высотами переходного слоя между хромосферой и короной в атмосфере солнечных пятен. Кроме того, была проанализирована структура силовых линий магнитного поля в области, где наблюдалась струя. Сравнение с изображениями струи в канале 171 Å показывает, что силовые линии восстановленного магнитного поля хорошо описывают форму струи. Восстановленная структура магнитного поля, а также ее сравнение с КУФ-изображением струи приведены на рис. 7.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

По современным представлениям, струйные явления, наблюдаемые в короне Солнца, являются комплексными процессами, включающими в себя как акты импульсного и, возможно, квазистационарного энерговыделения за счет магнитного пересоединения, так и нагрев плазмы и ускорение заряженных частиц. В контексте магнитного пересоединения струи являются примером распределения выделенной энергии, альтернативного вспышкам. В струях основная часть магнитной энергии переходит не в ускорение частиц и нагрев плазмы, а в кинетическую энергию макроскопических плазменных течений. В то же время отношение долей энергии, приходящихся на ускорение частиц и нагрев вещества, остается неизвестным и требует оценки. Кроме того, интересным представляется вопрос о том, является ли струя результатом локализованного по времени

ускорения, или ее ускорение продолжается в течение всей ее эволюции. Особое внимание привлекают механизмы коллимации струи, которые предотвращают ее быстрое расширение, поперечную филаментацию, различные неустойчивости (в частности, неустойчивости Кельвина—Гельмгольца и волн с отрицательной энергией) и турбулилизацию.

Ответы на все эти вопросы требуют анализа наблюдений в различных диапазонах, позволяющих получить информацию как о температуре и плотности плазмы в струе, так и об ускоренных частицах. Такие наблюдения могут дать также возможность определения, хотя бы приблизительно, магнитной конфигурации как активной области, в которой струя инициируется, так и фоновой плазмы, с которой струя взаимодействует. Данное условие объясняет необходимость объединения в одном каталоге наблюдений не только на различных длинах волн в КУФ-диапазоне, но и в широком спектральном диапазоне радиоизлучения. Помимо этого, требуется информация о фотосферном распределении источников коронального магнитного поля для его реконструкции с помощью экстраполяции.

Особый интерес представляет определение экспериментальных корреляций наблюдаемых параметров струй (длительность во времени, скорость, протяженность в пространстве и ширина), как между собой, так и с вычисляемыми параметрами, такими как альфвеновская, звуковая и трубочная скорости. Эта информация является ключевой для оценки энергии и мощности струи, что необходимо для установления механизма, ответственного за ее генерацию. В таком контексте крайне интересным представляется также оценка энергии и спектра нетепловых электронов, ускоряемых в процессе энерговыделения. В случае генерации струи в процессе магнитного пересоединения это позволит определить распределение конвертируемой энергии магнитного поля по трем основным типам выделяемой энергии (прямой нагрев плазмы, ускорение заряженных ча-

стиц и кинетическая энергия струй), а также возможную эволюцию этого распределения на разных этапах развития процесса.

Другой важной задачей является классификация струй по нескольким типам, по корреляциям различных наблюдаемых параметров, например скоростей и их эволюции (ускорение, замедление), температур, морфологии, характеристик сопутствующего радиоизлучения и т. п. Это позволяет определить с использованием результатов теоретического моделирования, какие механизмы ускорения и коллимации работают в конкретном типе струй. Проверка различных теоретических моделей может быть проведена также и сопоставлением теоретически предсказанных корреляций различных параметров с наблюдаемыми. Аналогичная методика была недавно успешно применена к анализу механизмов, ответственных за возбуждение изгибных колебаний корональных петель на основе специально созданного каталога соответствующих событий [Zimovets et al., 2015]. Отдельной задачей является определение углов наклона осей струй по отношению к поверхности Солнца и их эволюция в течение солнечного цикла, что позволит существенно улучшить определение глобальной геометрии коронального магнитного поля методом, предложенным в [Fleishman et al., 2017].

Разработанный каталог представляет отдельный интерес для выявления связи наблюдаемых на струях волновых процессов (прежде всего, изгибных и медленных колебаний) с параметрами струй и для их сейсмологической диагностики. В частности, недавно установлена и впервые использована возможность оценки изменения скорости течения по медленным магнитоакустическим волнам [Cho et al., 2020]. В случае изгибных волн, которые относятся к быстрой ветви магнитогидродинамических волн, представляется интересным исследование их роли в инициации эффектов, связанных с волнами с отрицательной энергией (см., например, [Yu, Nakariakov, 2020]), что может привести к существенным изменениям нашего понимания генерации МГД-волн в короне и солнечном ветре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены наблюдательные проявления корональных струй в различных диапазонах электромагнитного спектра. На примере нескольких событий показан потенциал диагностики струй с применением наблюдений инструмента AIA космической обсерватории SDO и наземных радиотелескопов RATAN-600, SRG и NoRH. Для исследования струй использовались как изображения в КУФ- и радиодиапазонах, так и микроволновые спектры, полученные с помощью радиотелескопа RATAN-600. Эти данные были дополнены информацией о конфигурации коронального магнитного поля, реконструированного в NLFFF-приближении по фотосферным магнитограммам, полученным SDO/HMI.

На примере многокомпонентной корональной струи, наблюдавшейся 13 сентября 2017 г. в АО 12680, продемонстрирован разработанный подход к диагностике плазменных струй по данным наблю-

дений в микроволновом и КУФ-диапазонах. По данным NoRH получена серия изображений струи на частоте 17 ГГц, которые пространственно совпадают с КУФ-изображением струи на длине волны 171 Å. Кроме того, данное событие наблюдалось SRG на пяти частотах в диапазоне 4–8 ГГц как увеличение потока микроволнового излучения от материнской активной области в течение всего времени существования струи и короткого сильно поляризованного радиовсплеска в момент ее инициации. Величина магнитного поля в основании короны активной области, в которой находилось основание струи, была оценена по спектрам микроволнового излучения, полученным на RATAN-600, и составила 1580–1620 Гс, а конфигурация коронального магнитного поля восстановлена в NLFFF-приближении по фотосферным магнитограммам SDO/HMI. Силовые линии восстановленного магнитного поля в проекции на картинную плоскость хорошо описывают видимые контуры струи и поэтому могут быть использованы для оценки ее геометрических характеристик, таких как высота и угол наклона по отношению к вертикали.

Представленный подход к анализу наблюдений плазменных струй одновременно в различных диапазонах позволяет детально изучать широкое разнообразие струйных течений, присутствующих в атмосфере Солнца на всех фазах цикла, их иницирование, энергию, динамику и коллимацию, а также связанные с этими событиями плазменные процессы: неустойчивость, турбулентность и ускорение заряженных частиц [Raouafi et al., 2016; Cho et al., 2020; Yu, Nakariakov, 2020; Zhang, Ji, 2014; Joshi et al., 2020].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 18-29-21016 и в рамках государственных заданий САО РАН, ИСЗФ СО РАН и СПбГУ при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<https://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богод В.М. Радиотелескоп RATAN-600 в 24 цикле солнечной активности. I. Новые возможности и задачи. *Астрофиз. бюл.* 2011. Т. 66, № 22. С. 207–222. DOI: [10.1134/S1990341311020064](https://doi.org/10.1134/S1990341311020064).
- Кальтман Т.И., Накаряков В.М., Анфиногентов С.А. и др. Каталог горячих струй в короне Солнца за 2015–2018 гг. *XXIII Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика»: труды.* 2019. С. 197–200. DOI: [10.31725/0552-5829-2019-197-200](https://doi.org/10.31725/0552-5829-2019-197-200).
- Кузьменко И.В. Корональные джеты как причина возникновения микроволновых отрицательных всплесков. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 3. С. 26–32. DOI: [10.12737/stp-63202003](https://doi.org/10.12737/stp-63202003).
- Кузьменко И.В., Гречнев В.В., Уралов А.М. Исследование солнечных эруптивных событий с отрицательными радиовсплесками. *Астрон. журн.* 2009. Т. 86, № 11. С. 1114–1124. DOI: [10.1134/S1063772909110092](https://doi.org/10.1134/S1063772909110092).
- Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Кочанов А.А. и др. Сибирский радиогелиограф: первые результаты. *Солнечно-земная физика.* 2017. Т. 3, № 1. С. 3–16. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588).
- Ступишин А.Г., Кальтман Т.И., Анфиногентов С.А. О методике выделения струй в однородных временных



сериях изображений Солнца. XXIV Всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика»: труды. 2020. С. 285–288. DOI: [10.31725/0552-5829-2020-285-288](https://doi.org/10.31725/0552-5829-2020-285-288).

Cho I., Nakariakov V.M., Moon Y., et al. Accelerating and supersonic density fluctuations in coronal hole plumes: signature of nascent solar winds. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 900, no. 2. P. L19. DOI: [10.3847/2041-8213/abb020](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abb020).

Fleishman G.D., Anfinogentov S., Loukitcheva M., et al. Casting the coronal magnetic field reconstruction tools in 3D using the MHD Bifrost model. *Astrophys. J.* 2017. Vol. 839, no. 1. P. 30. DOI: [10.3847/1538-4357/aa6840](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa6840).

Joshi R., Chandra R., Schmieder B., et al. Case study of multi-temperature coronal jets for emerging flux MHD models. *Astron. Astrophys.* 2020. Vol. 639. P. A22. DOI: [10.1051/0004-6361/202037806](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037806).

Kudriavtseva A.V., Prosovetsky D.V. White-light polar jets on rising phase of solar cycle 24. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. Vol. 193. P. 105039. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.05.003).

Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama radioheliograph. *Proc. IEEE.* 1994. Vol. 82, no. 5. P. 705–713.

Nisticò G., Zimbardo G., Patsourakos S., et al. North-south asymmetry in the magnetic deflection of polar coronal hole jets. *Astron. Astrophys.* 2015. Vol. 583. P. A127. DOI: [10.1051/0004-6361/201525731](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525731).

Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012. Vol. 275, no. 1-2. P. 3–15. DOI: [10.1007/s11207-011-9841-3](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9841-3).

Raouafi N.E., Patsourakos S., Pariat E., et al. Solar coronal jets: observations, theory, and modeling. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 201, no. 1-4. P. 1–53. DOI: [10.1007/s11214-016-0260-5](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0260-5).

Yu D.J., Nakariakov V.M. Excitation of negative energy surface magnetohydrodynamic waves in an incompressible cylindrical plasma. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 896, no. 1. P. 21. DOI: [10.3847/1538-4357/ab8d3c](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8d3c).

Zhang Q.M., Ji H.S. Blobs in recurring extreme-ultraviolet jets. *Astron. Astrophys.* 2014. Vol. 567. P. A11. DOI: [10.1051/0004-6361/201423698](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423698).

Zimovets I.V., Nakariakov V.M. Excitation of kink oscillations of coronal loops: statistical study. *Astron. Astrophys.* 2015. Vol. 577. P. A4. DOI: [10.1051/0004-6361/201424960](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424960).

URL: <http://spbf.sao.ru/coronal-jets-catalog> (дата обращения 9 марта 2021 г.).

URL: <https://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 9 марта 2021 г.).

Статья подготовлена по материалам Шестнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 8–12 февраля 2021 г., ИКИ РАН.

Как цитировать эту статью:

Анфиногентов С.А., Кальтман Т.И., Ступишин А.Г., Накаряков В.М., Лукичева М.А. Диагностика плазменных струй в короне Солнца. *Солнечно-земная физика.* 2021. Т. 7, № 2. С. 3–11. DOI: [10.12737/szf-72202101](https://doi.org/10.12737/szf-72202101).