

К 100-летию СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ СЕРГЕЯ ИВАНОВИЧА СЫРОВАТСКОГО

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Космические и внеатмосферные исследования Солнца*

В.Д. Кузнецов

Исследования по физике Солнца были в сфере научных интересов С.И. Сыроватского, они охватывали широкий круг проблем, и цель этих исследований состояла в получении единой картины физических процессов на Солнце. Наблюдения с космических аппаратов предоставляют всё более детальную информацию о происходящих на Солнце явлениях и процессах, стимулируя построение физических моделей и давая более глубокое понимание того, как устроено и как работает Солнце. Приводится обзор космических и внеатмосферных исследований Солнца, охватывающих все слои солнечной атмосферы от конвективной зоны и фотосферы до солнечной короны и солнечного ветра.

Ключевые слова: Солнце, космические исследования, магнитные поля, вспышки, солнечный ветер

PACS numbers: 07.87. + v, 96.60. – j

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039920>

Содержание

1. Введение (858).
2. Концепция космических исследований Солнца (859).
3. Недра Солнца (861).
4. Солнечная атмосфера между фотосферой и короной (861).
5. Корона и солнечный ветер (866).
6. Перспективы (872).
7. Заключение (873).

Список литературы (873).

1. Введение

Из широкого круга научных интересов С.И. Сыроватского в области космической физики и физики плазмы исследованиям по физике Солнца были посвящены последние годы его жизни. На основе разработанной им теории токовых слоёв в высокопроводящей плазме с сильным магнитным полем [1] им предложен механизм преобразования энергии магнитного поля в нагрев плазмы и излучение, получивший как экспериментальное (лабораторное) [2, 3], так и наблюдательное подтверждение на примере солнечных вспышек (см. ниже). Под руководством С.И. Сыроватского проводились исследования образования и эволюции токовых слоёв (см. [1] и ссылки там), природы солнечных

вспышек [4, 5], колебательной конвекции в сильном магнитном поле [6], вторичных эффектов от солнечных вспышек [7, 8], проблемы ускорения частиц [4], солнечного динамо [9, 10], магнитных полей на Солнце [11, 12], возможности обнаружения токовых слоёв в солнечной атмосфере [13, 14] и др. Солнце, как естественная плазменная лаборатория, самая близкая из астрофизических объектов, наиболее детально изучается с помощью наземных и космических наблюдений, и за последние десятилетия наиболее значимые достижения в изучении Солнца достигнуты с помощью космических исследований. "Золотой век" солнечной физики в космосе [15, 16], который ознаменовался запуском в 1990-х годах целой серии инновационных космических миссий (Yohkoh, SOHO и др.), продолжается, так как наряду с действующими солнечными космическими миссиями (SOHO, Hinode, STEREO, SDO, IRIS и др.), запущены новые (Parker Solar Probe, Solar Orbiter, CHASE, ASO-S, Aditya-L1, Proba-3 и др.), призванные обеспечить исследователей самыми лучшими на сегодняшний день данными для решения таких актуальных проблем физики Солнца, как механизмы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, тонкая и сверхтонкая структура и динамика солнечной атмосферы, триггерные механизмы наиболее мощных проявлений солнечной активности — вспышек и корональных выбросов массы, ускорение частиц и их распространение в короне и гелиосфере, структура и динамика магнитных полей в приполярных областях Солнца, механизм динамо и солнечный цикл, свойства плазменной турбулентности и др.

В.Д. Кузнецов

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Калужское шоссе 4, 108840 Троицк, Москва, Российская Федерация
E-mail: kvd@izmiran.ru

Статья поступила 30 июня 2025 г.

* Обзор написан на основе доклада, представленного на Научной сессии Отделения физических наук Российской академии наук 5 марта 2025 г. (см. УФН 195 (8) 793 (2025))

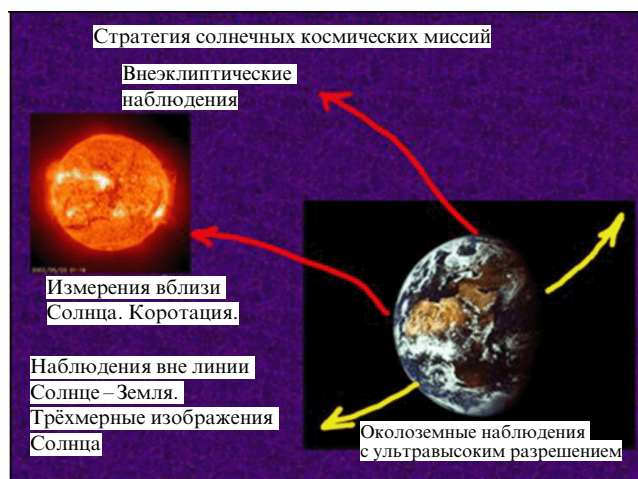


Рис. 1. Иллюстрация стратегии солнечных космических миссий.

2. Концепция космических исследований Солнца

Современная концепция космических исследований Солнца включает наблюдения Солнца с близких расстояний, наблюдения из внеэклиптических положений (с выгодных гелиоположений (точки Лагранжа L1, L5 и др.), с околоземных орбит с высоким пространственным разрешением, а также внеатмосферные ракетные и стратосферные баллонные наблюдения (рис. 1).

В таблице приведены завершённые и действующие солнечные космические миссии различных космических агентств. Из реализованных внеатмосферных ракетных наблюдений Солнца можно указать эксперименты НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США) EUNIS (Extreme Ultraviolet Normal Incidence Spectrograph) (запуски 2006, 2007, 2013 гг.), Hi-C (High resolution Coronal imager) (запуск 2012), VAULT (Very high Angular resolution Ultraviolet Telescope) (запуск 2014 г.) и баллонный эксперимент НАСА совместно с Испанией и Германией SunRise IMAX (Imaging Magnetograph eXperiment) (запуск 2014 г.).

Наблюдения и локальные измерения вблизи Солнца позволяют установить связь явлений в солнечной атмосфере и в короне и солнечном ветре. Мелкомасштабные структуры в солнечной короне, вытягиваемые солнечным ветром от их источников на солнечной поверхности, двигаются от Солнца с разными скоростями, происходит их столкновение и слияние, возникает турбулентность, что приводит к перемешиванию идущих от Солнца возмущений и структур, к их исчезновению и потере информации об их первоначальном происхождении на Солнце [17]. Космические аппараты (КА) Parker Solar Probe и Solar Orbiter при движении по гелиоцентрическим орбитам периодически находятся на расстояниях от Солнца, где возможны измерения неразмытых мелкомасштабных структур солнечного ветра, непосредственно связанных с его источниками на поверхности Солнца. Наблюдения с высоким пространственным разрешением вблизи Солнца позволяют изучать тонкую структуру и динамику солнечной фотосферы и переходной области как основу для понимания механизма нагрева солнечной короны, происхождения солнечного

Таблица. Солнечные космические проекты. В скобках указаны годы запуска и годы работы завершённых миссий

Завершённые	ULYSSES (1990 – 2009) (NASA) Yohkoh (1991 – 2001) (JAXA/ISAS) КОРОНАС-И (1994 – 2001) (Роскосмос) TRACE (1998 – 2010) (NASA) КОРОНАС-Ф (2001 – 2005) (Роскосмос) RHESSI (2002 – 2018) (NASA) КОРОНАС-ФОТОН (2009) (Роскосмос)
Действующие	Voyager-1,2 (1977) (NASA) Wind (1994) (NASA) SOHO (1996) (ESA, NASA) ACE (1997) (NASA) Hinode (2006) (JAXA, NASA) STEREO-A, B (2006) (NASA) IBEX (2008) (NASA) SDO (2010) (NASA) IRIS (2013) (NASA) DSCOVR (2015) (NASA) Parker Solar Probe (2018) (NASA) Solar Orbiter (2020) (ESA, NASA) CHASE (Xihe-1) (2021) (NJU et al.) ASO-S (2022) (CAS) Aditya-L1 (2023) (ISRO) Proba-3 (2024) (ESA)

Сокращения и сайты проектов:

ULYSSES (<https://science.nasa.gov/mission/ulysses/>)
 Yohkoh (<https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/past/yohkoh.html>, <https://science.nasa.gov/mission/yohkoh/>)
 TRACE — Transition Region And Coronal Explorer (<https://science.nasa.gov/mission/trace/>)
 КОРОНАС — Корональные Орбитальные Околоземные Наблюдения Солнца (<http://coronas.izmiran.ru/>)
 Voyager-1,2 (<https://science.nasa.gov/mission/voyager/>)
 Wind (<https://wind.nasa.gov/>)
 SOHO — Solar and Heliospheric Observatory (https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO)
 ACE — Advanced Composition Explorer (<https://science.nasa.gov/mission/ace/>)
 RHESSI — Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (<https://science.nasa.gov/mission/rhessi/>)
 STEREO — Solar TERrestrial Relations Observatory (<https://stereo.gsfc.nasa.gov/>)
 IBEX — Interstellar Boundary Explorer (<https://science.nasa.gov/mission/ibex/>)
 SDO — Solar Dynamic Observatory (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>)
 IRIS — The Interface Region Imaging Spectrograph (<https://iris.gsfc.nasa.gov/>)
 DSCOVR — Deep Space Climate Observatory (<https://science.nasa.gov/mission/dscovr/>)
 Parker Solar Probe (PSP) (<https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/>)
 Solar Orbiter (SolO) (https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter)
 CHASE — Chinese H α Solar Explorer (<https://ssdc.nju.edu.cn/home>)
 ASO-S — Advanced Space-based Solar Observatory (http://aso-s.pmo.ac.cn/en_index.jsp)
 ESA — European Space Agency (<https://www.esa.int/>)
 NASA — National Aeronautics and Space Administration (<https://www.nasa.gov/>)
 JAXA — Japan Aerospace Exploration Agency (<https://global.jaxa.jp/>)
 ISAS — Institute of Space and Astronautical Science (<https://www.isas.jaxa.jp/en/>)
 CAS — Chinese Academy of Science (<https://english.cas.cn/>)
 NJU — Nanjing University
 ISRO — Indian Space Research Organization (<https://www.isro.gov.in/>)
 Aditya-L1 https://www.isro.gov.in/Aditya_L1.html
 Proba-3 (https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Proba_Missions/Proba-3_Mission3)

ветра, триггерных механизмов солнечных вспышек и выбросов массы, а также наблюдать слабые события энерговыделения (микро- и нано-вспышки), не видимые с Земли. Гелиоцентричность орбит при сближении КА с Солнцем, а также наблюдения с КА вне линии Солнце–Земля (проект STEREO), позволяют периодически наблюдать обратную сторону Солнца, что даёт возможность контроля активности на этой стороне и важно для заблаговременного прогнозирования космической погоды. Непрерывные наблюдения Солнца в точке Лагранжа L1 (проекты SOHO, Aditya-L1) позволяют получать оперативную информацию о состоянии активности Солнца — об активных областях, вспышках, выбросах массы и т.д., что используется для изучения и контроля космической погоды, включая изучение и предсказания экстремальных событий в системе Солнце–Земля.

Внеэклиптические наблюдения Солнца (проект Solar Orbiter) и локальные измерения в короне и гелиосфере направлены на изучение приполярных магнитных полей и явлений, что даст лучшее понимание процесса переплюсовки полей в солнечном цикле и солнечного динамо, происхождения быстрого солнечного ветра, корональных дыр и полярных выбросов массы. Наблюдения эклиптической короны и пояса стримеров, а также гелиодолготной протяжённости корональных выбросов массы, также станут возможным.

Наблюдения с орбиты Земли (проекты Hinode, SDO, IRIS, ASO-S, Proba-3, ракетные и баллонные эксперименты) возможны с супервысоким пространственным разрешением и с передачей на Землю большого объёма информации, что позволяет изучать быстродинамические явления в солнечной атмосфере (проект SDO).

Наблюдения на гелиоцентрических орбитах в плоскости эклиптики вне линии Солнце–Земля с двух КА проекта STEREO дают возможность контролировать идущие от Солнца возмущения в направлении Земли, определять их форму и протяжённость, видеть состояние активности на невидимых с Земли участках солнечного диска, обеспечивая, таким образом, получение ключевой информации для изучения и прогнозирования космической погоды.

Обзор некоторых ранее полученных результатов космических исследований Солнца можно найти в [18–23].

Несколько новых солнечных космических проектов было запущено в последнее время (см. таблицу). Приведём краткую информацию о некоторых из них.

В проекте Parker Solar Probe (адрес [24]) КА за счёт многократных гравитационных маневров у Венеры приблизился к Солнцу на рекордное расстояние в 9,5 радиусов Солнца, проводя локальные измерения короны и солнечного ветра, а также наблюдая корону изнутри с помощью оптической камеры. Комплекс научной аппаратуры в составе приборов для локальных измерения электрических и магнитных полей, энергичных частиц (He-3, He-4 и др.); электронов, альфа-частиц и протонов солнечного ветра, а также широкоугольной камеры, предназначен для изучения структуры и динамики магнитных полей в источниках быстрого и медленного солнечного ветра; отождествления потоков энергии, которые нагревают корону и ускоряют солнечный ветер; для определения механизмов ускорения и переноса энергичных частиц; для исследования пылевой плазмы в окосолнечном пространстве и определения её влияния на генерацию солнечного ветра и энергичных частиц.

В проекте Solar Orbiter [25] КА за счёт многократных маневров у Венеры сблизились с Солнцем до 60 солнечных радиусов, после чего КА постепенно будет наклонять орбиту до 24° – 33° по отношению к плоскости эклиптики. Комплекс научной аппаратуры (КНА) проекта в составе десяти приборов, шесть из которых постоянно направлены на Солнце (поляриметрический и гелиосейсмический телескоп, телескоп жёсткого ультрафиолета, рентгеновский спектрометр/телескоп, прибор для спектральных изображений корональной среды, коронограф, гелиосферный телескоп), а четыре (анализатор плазмы солнечного ветра, детектор энергичных частиц, магнитометр, анализатор радио- и плазменных волн) проводят локальные измерения среды вокруг КА, позволяют исследовать различные явления в широкой области от внутренних слоёв Солнца до короны и солнечного ветра, такие как действие динамо и модуляция солнечного цикла, связь Солнца с гелиосферой, нагрев короны, формирование и ускорение солнечного ветра, генерация энергичных частиц и их распространение в гелиосфере и др.

В проекте CHASE (Xihe-1) [26] с помощью изображающего спектрографа в H α (HIS — H- α Imaging Spectrograph) высокого пространственного ($1,2''$), спектрального разрешения ($0,024 \text{ \AA}$) и быстродействия (десятки секунд) впервые получают полнодисковые спектроскопические изображения Солнца в диапазоне H α (спектральные линии Si I ($6560,6 \text{ \AA}$), H α ($6562,8 \text{ \AA}$) и Fe I ($6569,2 \text{ \AA}$)), эквивалентные "компьютерной томографии" нижних слоёв атмосферы Солнца — фотосферы и хромосферы. Такие наблюдения существенно дополняют наблюдения действующих миссий SDO, IRIS, STEREO, PSP, SolO, ASO-S и позволяют изучать динамику фотосферы и хромосферы, механизмы эруптивных явлений, вспышек, вращение солнечной атмосферы, перенос массы и энергии в слоях атмосферы.

В проекте ASO-S [27] КА выведен на околоземную солнечно-синхронную орбиту (высота 700–750 км) для изучения фотосферные магнитных полей, вспышек, выбросов массы и их связи между собой. В составе КНА три прибора — вектор-магнитограф полного диска, телескоп L α полного диска, телескоп жёсткого рентгена.

В проекте Aditya-L1 [28] КА помещён на орбиту вокруг точки Лагранжа L1 с семью приборами на борту — коронограф, ультрафиолетовый телескоп, спектрометр мягкого и жёсткого рентгеновского излучения, два анализатора частиц солнечного ветра, магнитометр. Исследования динамики фотосферы, хромосферы и короны Солнца, наблюдения за корональными петлями и выбросами массы, вспышками, магнитными полями в короне Солнца и солнечным ветром направлены на лучшее понимание механизмов солнечной активности, на решение проблемы аномального нагрева короны, на улучшение предсказания космической погоды.

В технологическом проекте Proba-3 [29] два КА на околоземной высокоэллиптической орбите при каждом обращении вокруг Земли образуют гигантский космический коронограф (с полем зрения 1,08–3 солнечных радиуса) — искусственное солнечное затмение таким образом, что на одном аппарате находится телескоп, а другой выполняет роль затмённого диска (рис. 2). Высокое пространственное разрешение и чёткость изображений внутренней короны даст возможность детального изучения тонкой магнитно-плазменной структуры внутренней короны, переноса массы и энергии, нагрева короны, фор-

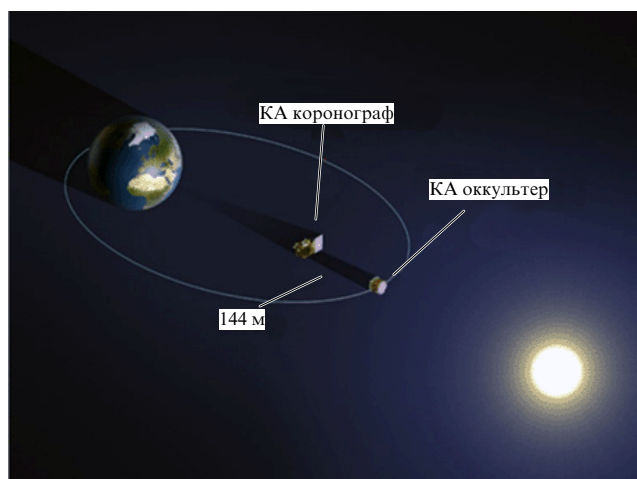


Рис. 2. Схема космического коронографа в проекте Proba-3 (адаптировано [29]).

мирования и ускорения солнечного ветра. В состав КНА входит также радиометр для измерений потока излучения от Солнца и спектрометр для регистрации энергетических электронов в радиационных поясах Земли.

Наблюдения Солнца на космических аппаратах дополняются внеатмосферными наблюдениями на ракетах и стратосферных баллонах, позволяющих исключить влияние атмосферы и получать информацию о Солнце в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра. Такие наблюдения, как правило, направлены на решение ограниченного круга задач из числа наиболее значимых проблем физики Солнца, которые могут быть решены такими наблюдениями.

3. Недра Солнца

Изучение недр Солнца, важное для понимания работы солнечного динамо и солнечного цикла, продолжается на SDO [30] прибором HMI (Helioseismic and Magnetic Imager). На основе анализа гелиосейсмических данных [31], как мы уже отмечали ранее, получены указания на двухъячеистую меридиональную циркуляцию в конвективной зоне Солнца, играющей важную роль в переносе магнитных полей в цикле солнечной активности (рис. 3). Направленное к полюсу меридиональное течение со скоростью 15 м с^{-1} простирается в конвективной зоне по глубине от фотосферы до $\sim 0,91 R_{\odot}$, а направленное к экватору течение со скоростью около 10 м с^{-1} обнаружено в конвективной зоне в области между $0,82$ и $0,91 R_{\odot}$. В области конвективной зоны ниже $0,82 R_{\odot}$ меридиональное течение снова направлено к полюсу, указывая на вторую меридиональную циркуляционную ячейку под поверхностной ячейкой.

Кинематические теории динамо, как правило, предполагают наличие одной ячейки меридиональной циркуляции в конвективной зоне с направленным к экватору течением по её дну. Применение модели динамо с переносом потока, которая в случае одноячеистой меридиональной циркуляции использовалась для описания многих важных наблюдательных деталей солнечного цикла, к случаю многоячеистой меридиональной циркуляции (рис. 4) показало, что наблюдения в виде соответствующих диаграмм-бабочек могут быть воспроизведе-

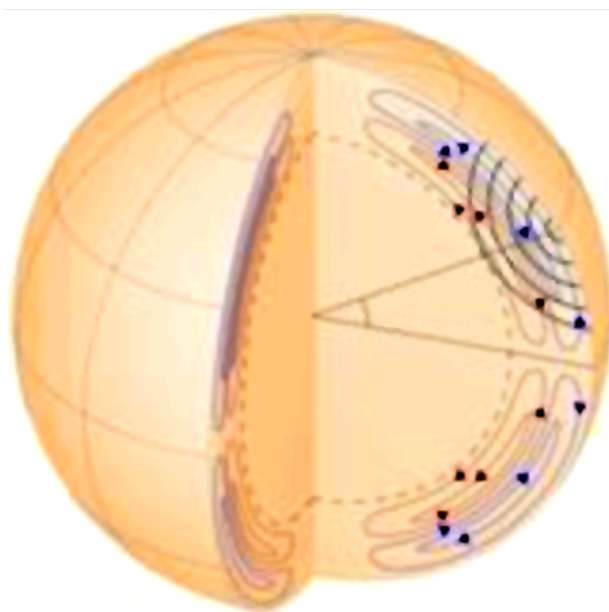


Рис. 3. Схематическое изображение профиля двухъячеистой меридиональной циркуляции в конвективной зоне [31] (<http://hmi.stanford.edu/hminuggets/?p=5>).

дены только в том случае, когда дополнительные ячейки меридиональной циркуляции устроены внизу так, что существует направленное к экватору течение на дне конвективной зоны, т.е. по глубине конвективной зоны должно быть нечётное число ячеек [32].

Анализ по доплеровским данным HMI/SDO гигантских конвективных ячеек (рис. 5) позволил понять, почему экватор Солнца вращается быстрее его полярных областей. Рассчитанная картина широтного распределения напряжений Рейнольдса (рис. 6), связанных с течениями в обнаруженных гигантских ячейках, показала, что перенос углового момента в обеих полусферах происходит к экватору, и это обеспечивает поддержание более быстрого вращения экватора Солнца по сравнению с приполюсными областями (периоды вращения: экватор — 24 дня, вблизи полюса — 35 дней) [33].

4. Солнечная атмосфера между фотосферой и короной

Область солнечной атмосферы, включающая фотосферу, хромосферу, переходную область и нижнюю корону, является самой сложной для изучения в силу её нестационарности и неравновесности, обусловленной непрерывным действием конвекции и всплыванием из-под фотосферы магнитных потоков разных масштабов. Именно в этой области происходят процессы, ответственные за происхождение вспышек и выбросов массы, за нагрев солнечной короны, и формируется тонкая структура, определяющая источники истечения солнечного ветра. На исследования переходной области между фотосферой и короной направлены специальные проекты, в рамках которых обеспечивается высокое пространственное, временное и спектральное разрешение (Hi-C, IRIS, VAULT и др.).

Многочисленные наблюдения магнитных полей в солнечной атмосфере с высоким пространственным разрешением (TRACE, SOHO, Hinode, SDO, Solar Orbiter и др.) свидетельствуют о сильной их скрученности, приобретае-

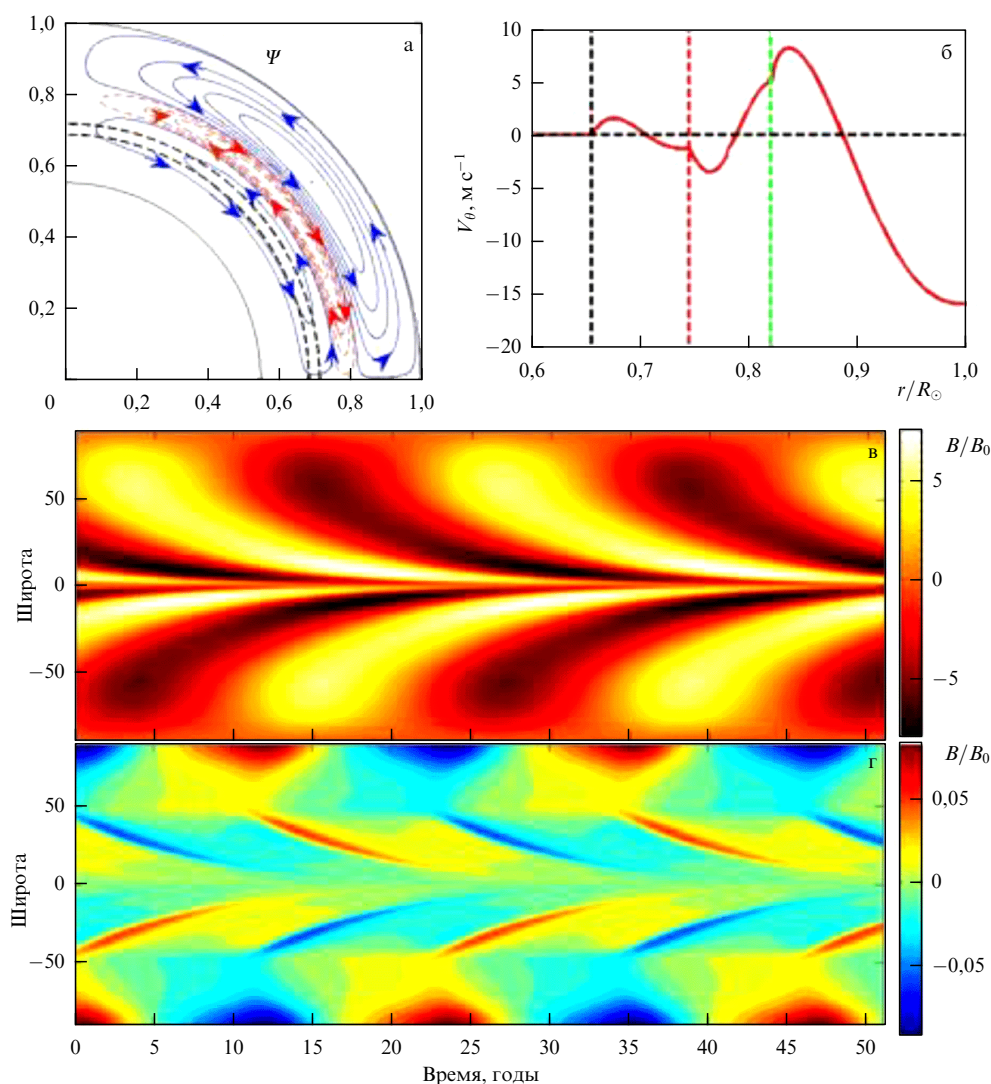


Рис. 4. Воспроизведение диаграмм-бабочек в рамках модели динамо с переносом потока для меридионального течения к экватору по дну конвективной зоны [32] (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/782/2/93>).

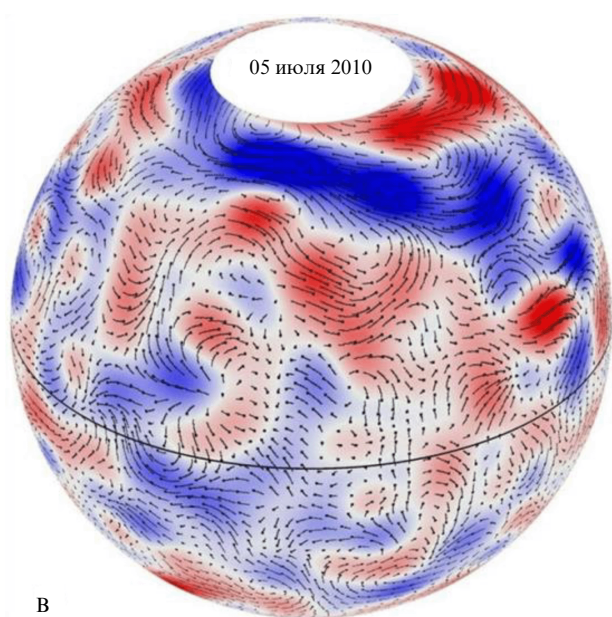


Рис. 5. Гигантские конвективные ячейки на Солнце [33] (<https://www.nasa.gov/missions/sdo/nasa-astrophysicist-confirms-existence-of-giant-convection-cells-on-sun/>).

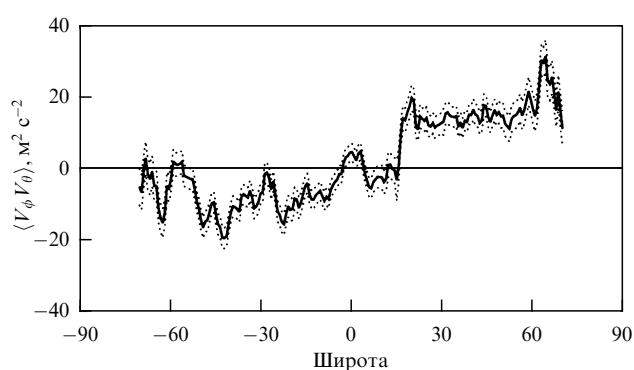


Рис. 6. Широтное распределение напряжений Рейнольдса, производимых гигантскими ячейками, показывающее перенос углового момента к экватору и требующее более быстрого его вращения [33].

мой в подфотосферных слоях и проявляющейся в таких явлениях как вспышки и выбросы массы. На фильмах, полученных в рамках перечисленных выше миссий, можно видеть, как расплетаются скрученные магнитные трубки (жгуты) при их инъекции в верхней атмосфере (рис. 7, 8), и эта скрученность, достигающая определённых критических значений, рассматривается как один из триггерных механизмов наблюдаемых эруптивных явлений.

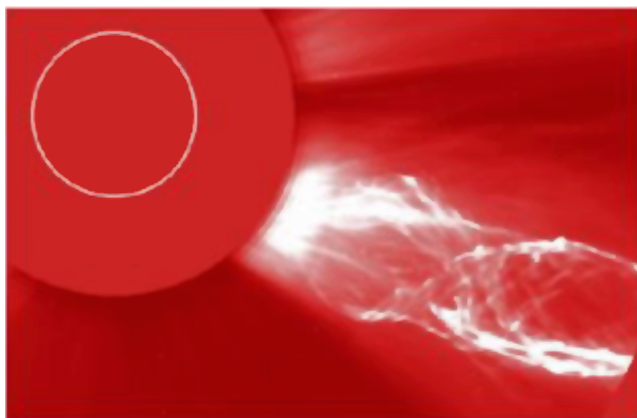


Рис. 7. Расплетающаяся магнитная труба в выбросе массы по данным LASCO/SOHO [34].

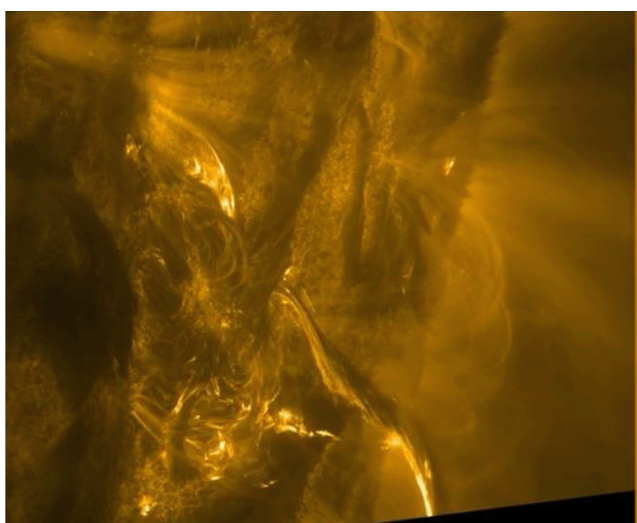


Рис. 8. Фрагмент фильма Solar Orbiter (2503_008_AR_EN.mp4), демонстрирующий раскрутку сильно скрученной магнитной трубки [25].

По высокоточным наблюдениям солнечным магнитографом (поляриметром) IMAX в миссии Sunrise на стратосферном аэростате с рекордным пространственным разрешением (100 км на поверхности Солнца) впервые детально прослежено формирование и эволюция изолированных магнитных трубок, которые считаются фундаментальными магнитными строительными блоками солнечной фотосферы [35]. Наблюдаемый физически сложный процесс характеризовался множеством явлений: всплывание магнитной петли, выталкивание её оснований из гранулы, слияние магнитных потоковых элементов в долгоживущий магнитный поток, образование магнитного элемента с кГс напряжённостью магнитного поля путём конвективного коллапса и грануляционного сжатия, последующее ослабление напряжённости поля с дальнейшим увеличением до кГс значений, либо за счёт колебаний, либо за счёт вторичного коллапса. Дано описание наблюдательных свойств конвективно управляемых вихревых потоков, обнаруженных на спокойном диске, с использованием магнитограмм, доплерограмм и полученных телескопом IMAX изображений. Плотность вихрей составляет около $3,1 \times 10^{-3}$ вихря/(Мм² мин) со средней продолжительностью отдельных событий 7,9 мин. Обнаруживаются

повторяющиеся вихри в одних и тех же местах, типичным завихренностям отвечает период вращения около 35 мин, с предпочтительным вращением против часовой стрелки, что предположительно связано с завихренностью, обусловленной дифференциальным вращением Солнца [36].

Наблюдения на Hinode позволили обнаружить самое сильное магнитное поле в 6250 Гс, когда-либо измеренное на поверхности Солнца. Такое сверхсильное магнитное поле образовалось в результате оттока газа из одного солнечного пятна, давящего на другое солнечное пятно, и оно располагалось в светлой области между двумя тенями солнечных пятен [37].

В работе [38] по наблюдениям Solar Orbiter изучены корональные пустоты — протяжённые области спокойной солнечной атмосферы, которые по наблюдениям в жёстком ультрафиолетовом (УФ) диапазоне характеризуются слабым излучением по сравнению с окружающей спокойной короной. Такие пустоты определены по порогу интенсивности, который принят равным 75 % от средней интенсивности жёсткого УФ излучения для спокойного Солнца, регистрируемой каналом высокого разрешения телескопа EUI (Extreme Ultraviolet Image). Сравнение фотосферных магнитных полей под корональными пустотами с магнитными полями спокойного Солнца проводилось на основе наблюдений телескопом HRT (High Resolution Telescope) прибора PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager). Размеры изучаемых пустот изменялись от нескольких гранул до нескольких супергранул и в среднем имели пониженную интенсивность в 67 % от среднего значения всего поля зрения. Плотность магнитного потока в фотосфере ниже пустот была меньше на 76 % (или более), чем в окружающем спокойном Солнце. Отмечено, что в корональных пустотах сетевые структуры слабо проявляются или вообще отсутствуют. Сделан вывод о том, что корональные пустоты образуются из-за локально пониженного нагрева короны при пониженной плотности магнитного потока в фотосфере, что делает их отдельным классом тёмных структур, отличающихся от корональных дыр.

С помощью доплерограмм всего солнечного диска, полученных CHASE, проанализированы кривые вращения различных слоёв фотосферы и хромосферы. Обнаружена новая закономерность вращения атмосферы Солнца, состоящая в увеличении скорости вращения с высотой, что ставит вопрос о физическом механизме такого явления, так как обычно из-за действия вязких сил скорость вращения уменьшается с высотой [39]. Например, на экваторе скорость вращения увеличивается с $2,81 \pm 0,02$ рад с⁻¹ на дне фотосферы до $3,08 \pm 0,05$ рад с⁻¹ в хромосфере. Одной из причин обнаруженной закономерности вращения могут быть повсеместные маломасштабные магнитные поля и зависящая от высоты степень их вмороженности в солнечную плазму.

По наблюдениям Solar Orbiter (приборы HRT, PHI) изучены волновые процессы в солнечных магнитных порых — интенсивных концентрациях магнитного поля [40]. С помощью совокупности различных измерений и методов осуществлена всесторонняя диагностика МГД-волн в порых в виде изгибных мод и мод типа перетяжек (sausage modes), а также идентифицирована не наблюдавшаяся ранее мода гофрирования ($m = 2$) в одной из наиболее магнитно изолированных пор. Установлено, что наиболее энергичной модой во всех четырёх наблюдавшихся порых (т.е. с наибольшим собственным значением) яв-

ляется sausage мода с частотами в интервале 1,5–3,0 МГц, а изгибные моды, идентифицированные в несколько меньшем диапазоне частот 1,4–2,3 МГц, были вторыми по энергетике эмпирическими модами (т.е. со вторым по величине собственным значением). Их частоты немного ниже, чем у изгибных мод определённых как третьи эмпирические моды (в диапазоне от 1,8 до 2,7 МГц). Близкие частоты в идентифицированных модах МГД-волн могут свидетельствовать о том, что они связаны друг с другом, а наблюдавшиеся большие вариации площади пор, до $40 \pm 10\%$, могут указывать на нелинейный режим. Поскольку идентифицированные вторая и третья пространственные моды представляют собой изгибные моды с перпендикулярными направлениями колебаний, то они могут представлять интерес в связи с поиском проявлений торсионных (крутильных) альвеновских волн в атмосфере Солнца, рассматриваемых в качестве возможных источников нагрева солнечной короны, обнаружение которых, однако, во всех слоях солнечной атмосферы затруднено из-за их несжимаемого характера — они не вызывают изменений интенсивности излучения. Планируется дальнейший анализ наблюдений с более высоким разрешением (в частности, во время полёта солнечной обсерватории SUNRISE, установленной на воздушном шаре, и при сближении Solar Orbiter с Солнцем).

В работе [41] с использованием наблюдений тремя приборами Solar Orbiter (EUI HRIEUV, PHI HRT и SPICE) обнаружены признаки распространения крутильного движения в короне, которые совместимы с интерпретацией либо распространяющихся крутильных альвеновских волн в низкой корональной структуре, либо раскручивания магнитного жгута. Скорость распространения наблюдаемых движений составила 136 км с^{-1} – 160 км с^{-1} , что согласуется с ожидаемыми альвеновскими скоростями. Наблюдаемые вращательные движения в поперечном направлении со скоростями 26 км с^{-1} – 60 км с^{-1} также указывают на наличие крутильных волн, а их амплитуда, составляющая примерно 30 % от локальной альвеновской скорости, указывает на нелинейный режим таких волн. Одним из основных признаков этих колебаний является их значительная амплитуда. Вопрос об их источнике остаётся пока открытым. В рассмотренном случае крутильные волны были вызваны магнитным пересоединением, которое, как было замечено ранее [42, 43], может приводить к закручиванию движения плазмы.

Высокая динамичность хромосферы, установленная по наблюдениям Hinode, играет важную роль в нагреве солнечной короны и переносе массы в солнечный ветер, и она проявляется в виде извержений плазмы вокруг солнечных пятен вверх к короне, в виде мелких и спорадических струй плазмы (рис. 9).

Вдоль обнаруженных спикул II рода [45] хромосферная плазма инжектируется в верхние слои атмосферы со скоростями порядка 50 – 100 км с^{-1} , однако прослеживание процесса переноса массы и энергии в корону затруднено в связи с их угасанием, малыми размерами ($< 0,5''$) и коротким временем жизни (10 – 20 с) [46]. Явления, которые наблюдались в переходной области и нижней короне телескопами высокого разрешения Hi-C (яркие точки) [47], IRIS и SDO (распространяющиеся корональные возмущения) [48], рассматриваются как возможные корональные "двойники" спикул II рода, однако для их идентификации необходимы более детальные коррелирован-

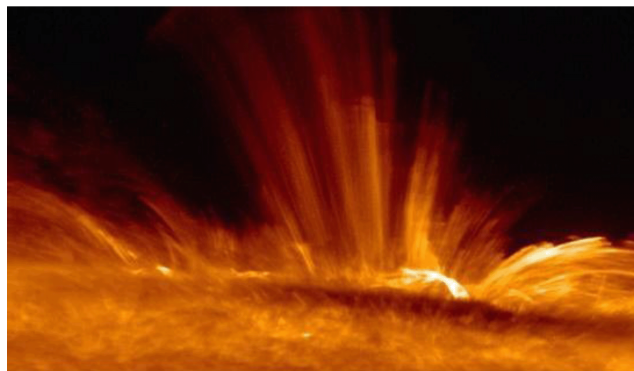


Рис. 9. Динамически активная хромосфера [44] (©NAOJ/JAXA).

ные наблюдения хромосферы, переходной области нижней короны с высоким временным и пространственным разрешением. Моделирование спикул II рода в рамках радиационной магнитной гидродинамики с использованием наблюдательных данных IRIS и ракетного эксперимента VAULT2.0 позволило выяснить некоторые особенности происходящих в спикулах II рода процессов, в частности, наблюдение скоростей до 300 км с^{-1} [49, 50]. Спикульное вещество существует во взвешенном состоянии высоко в атмосфере, но при более низких температурах (наблюдаемых в Ly α) до тех пор, пока оно не нагревается и не становится видимым при температурах переходной области в виде струи. Нагрев начинается ниже в спикулах и происходит быстрое распространение теплового фронта. Этот фронт наблюдается как быстрое движение в картинной плоскости, содержащее внутри ранее существовавшие спикулы. Таким образом, делается заключение о том, что высокие скорости в спикульных струях не следует воспринимать как реальные массовые восходящие вверх течения плазмы, а только как видимые скорости быстро распространяющегося теплового фронта вдоль ранее существовавших спикул.

Малый КА IRIS с УФ изображающим спектрографом высокого пространственного ($0,33''$ – $0,4''$) и временного разрешения (2 с) и с широким спектральным диапазоном обеспечивает получение одновременных спектров и изображений (поле зрения $175'' \times 175''$) фотосферы, хромосферы, переходной области и короны. Анализ полученных изображений и спектров показал большое разнообразие протекающих процессов, среди которых выделяются переплетение силовых линий магнитного поля и магнитное пересоединение, взаимодействие активных областей с магнитным полем хромосферной сетки и мелкомасштабными полями магнитного ковра, взаимодействие всплывающих магнитных потоков с полями в вышележащей атмосфере, быстро вспыхивающие и гаснущие пятна УФ-излучения, отражающие перенос энергии в солнечной атмосфере, генерация и распространение различных типов волн и их конверсия, ускорение нетепловых частиц, поток массы в корону и солнечный ветер, корональные процессы в виде теплопроводности или энергичных частиц [51].

Ракетные наблюдения телескопом Hi-C в УФ диапазоне спектра с высоким пространственным разрешением позволили получить ряд новых результатов, относящихся к переходной области и нижней короне. В работе [52] с использованием данных Hi-C и МГД моделирования проведено исследование турбулентной релак-

саци солнечных корональных петель, содержащих переплетение силовых линий, рассматриваемое в качестве одного из механизмов выделения магнитной энергии и нагрева солнечной короны. При изучении вопроса о наблюдательных проявлениях высвобождения энергии в таких переплетенных магнитных структурах установлено, что наблюдательные проявления зависят от степени и характера запутывания силовых линий в петле, и не всегда отражают переплетения силовых линий. Равномерно нагретая петля, без видимых нитевидных структур, формируется при сильном запутывании силовых линий в петле и при однородной (поперек петли) турбулентности, связанной с выделением энергии. Переплетённые структуры, идентифицированные в наблюдениях Hi-C [53], проявляются в петлях, содержащих большие структуры типа когерентных потоковых трубок, сепаратрис, приводящих к усиленному нагреву на одних нитевидных структурах при меньшем нагреве на других.

В корональных петлях обнаружены субструктуры в виде миниатюрных петель длиной около 10^8 см и толщиной менее, чем 2×10^7 см. Такие мини-петли могут быть интерпретированы как корональные проявления маленьких магнитных трубок, всплывающих из под фотосферы с расстоянием между основаниями трубок на фотосфере, соответствующим диаметру ячейки грануляции [54, 55]. Данные с самым высоким пространственным разрешением ($0,47''$) нижней короны и переходной области, не достижимые в других наблюдениях, получены во время пятиминутных ракетных наблюдений Hi-C 2.1 на длине волны $175 \text{ \AA}$ [56]. Эти данные наряду с другими сопутствующими наблюдениями свидетельствуют о ключевой роли мелкомасштабной структуры и динамики в понимании сложной переходной области между фотосферой и короной. Наиболее вероятные ширины нитевидных структур с низким уровнем излучения оказались близки к величине $\approx 388 \text{ км}$, и дальнейшее повышение пространственного разрешения, как показывает анализ, позволит разрешить фундаментальную ширину отдельных корональных нитей [57]. По данным Hi-C обнаружен также целый ряд новых явлений — мелкомасштабное "искрение" динамичных ярких точек на фоне излучения активных областей в виде моха [47], встречные течения плазмы в волокнах [58], перемещающиеся яркие точки и джеты в тени пятен [59, 60], связь свечений в нижней короне и переходной области с мелкомасштабной хромосферной динамикой в активных областях [56].

База данных рентгеновских явлений, микро- и нановспышек на Солнце для анализа источников нагрева солнечной короны была дополнена наблюдениями с высокой чувствительностью и с высоким пространственным разрешением на малом KA NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) с помощью наведённого на Солнце жёсткого рентгеновского телескопа, предназначенного для изучения чёрных дыр [61].

Высокое пространственное разрешение телескопов Hinode и SDO и спектроскопические измерения позволили наблюдать и исследовать токовые слои в солнечной атмосфере, накопление магнитной энергии в которых и её освобождение путём магнитного пересоединения играет ключевую роль в солнечных вспышках. На основе спектроскопических наблюдений на Hinode и SDO изучены образование, структура и эволюция токового слоя, который возник в результате эруптивной вспышки

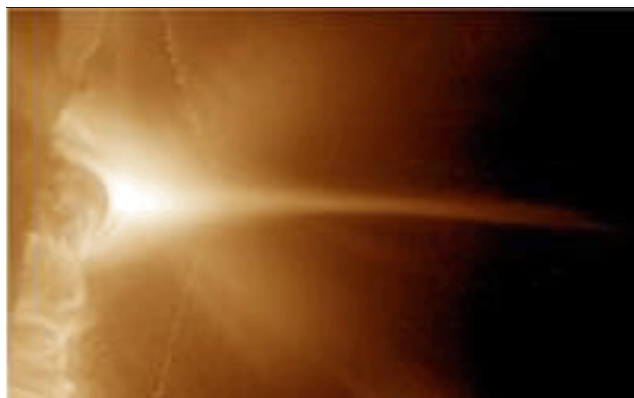


Рис. 10. Один из фрагментов изображения токового слоя в виде яркой линейной структуры, исходящей из каспоподобной области [62].

X8.3, наблюдавшейся на западном краю Солнца 10 сентября 2017 г. (рис. 10) [62]. При извержении волокна в основании извержения образовалась яркая область излучения, отвечающая высокой температуре плазмы, которая после вспышки превратилась в магнитную петлю с каспоподобной формой на её вершине. От неё в направлении извергающего волокна формировалась видимая в излучении длинная и узкая линейная структура, которая и принималась за токовый слой, в котором происходит магнитное пересоединение.

Температура плазмы в токовом слое достигала значений в $15\text{--}20$ млн град и диапазон её значений относительно узок. Самые высокие температуры наблюдались после вспышки у основания токового слоя, в области вблизи вершины аркады, и уменьшались с высотой. Увеличение интенсивности в токовом слое началось на самых низких высотах и распространялось наружу со скоростью около 288 км с^{-1} . В токовом слое наблюдалось сильное нетепловое уширение спектральных линий, отвечающее скоростям плазмы $70\text{--}150 \text{ км с}^{-1}$, которое увеличивалось с высотой и уменьшалось со временем, видимо, отражая всплывающие движения плазмы. Измерения излучения в разных спектральных каналах позволили предположить, что токовый слой сформировался из корональной плазмы, и что в нём происходил нагрев плазмы с высвобождением энергии при магнитном пересоединении поступающих в слой силовых линий. Наблюдения токового слоя солнечной вспышки (SOL2017-09-10T16:06) [63] показало очень большие нетепловые скорости (до 200 км с^{-1}) в слое, что позволяет предположить, что в нём существуют турбулентные движения, и слой имеет внутреннюю тонкую и динамичную структуру, которая способствует эффективному магнитному пересоединению внутри него. Толщина токового слоя оценена в диапазоне $(7\text{--}11) \times 10^8 \text{ см}$. Подробная многофазная эволюция токового слоя на ранних стадиях солнечной вспышки, включающая стадии формирования, квазистационарной эволюции и разрушения слоя, описана в [64] по наблюдениям SDO. Магнитная структура в окрестности токового слоя на разных стадиях эволюции солнечной вспышки включает высокотемпературный магнитный жгут, надаркадные нисходящие потоки плазмы, всплывающие петли, волокно и эруптирующий магнитный жгут. Динамика всплывающего процесса и фаз разрушения токового слоя характеризуется увеличением размеров каспоподобных магнитных петель и растяжением токового слоя, после-

дующим ростом регулярных и упорядоченных возмущений в области между токовым слоем и вспыхивающей аркадой, возникновением растущих в течение почти 10 мин регулярных вихрей и исчезновением токового слоя на изображениях в линии 131 Å, связанных с его вероятным разрушением. Особенности наблюдения токовых слоёв и их характеристики изучены в работах [65, 66] на основе большого объёма данных SDO и SOHO. Для токовых слоёв, образованных в конфигурации X-типа, во время периода магнитного пересоединения видимый токовый слой на диске изменялся от яркой точки к вытянутой линии, и структура становилась тонкой на поздней стадии пересоединения. Впоследствии распределение плазмы в токовом слое проявлялось в виде плазматической цепочки. Для токового слоя, видимого на лимбе, его удлинение происходило быстрее, чем на диске, а также наблюдался процесс истончения слоя. Несмотря на то, что аспектное отношение толщины и ширины токового слоя для случаев лимба сопоставимы с критическим теоретическим значением возникновения неустойчивости тиринг моды, внутри этих лимбовых токовых слоёв не было обнаружено явной плазматической цепочки, а распределение плотности было локально однородно. Предполагается, что из-за быстрого удлинения для лимбовых токовых слоёв неустойчивость тиринг моды происходит очень быстро, из-за чего образуются крошечные плазмотиды, размер которых меньше разрешения прибора. Отмечается, что фактический лимбовый токовый слой может быть лишь небольшим сегментом видимого яркого луча, а не всем лучом. Высокоскоростные потоки плазмы, которые возникают во время солнечных вспышек в процессах магнитного пересоединения и преобразования накопленной в магнитном поле энергии в тепло и движения плазмы, впервые были обнаружены с помощью спектроскопических наблюдений на Hinode [44].

По магнитным данным SDO/HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) впервые удалось идентифицировать изменения магнитных полей на поверхности фотосферы (уменьшение скрученности поля, связывающего два пятна), вызванные вспышкой, т.е. освобождением непотенциальной энергии магнитного поля, и получить ответ на давно поставленный вопрос о возможности регистрации изменений поля на фотосфере во время вспышек [67]. В [68] по данным Solar Orbiter/STIX HXR (STIX — Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays), SDO/AIA (Atmospheric Imaging Assembly) и SDO/HMI сделан вывод о том, что микровспышки, ускоряющие электроны до высоких энергий, локализованы в солнечных пятнах, что указывает на ключевую роль сильных магнитных полей в эффективном ускорении электронов высоких энергий.

Первые наблюдения Aditya-L1 дали полнодисковые изображения Солнца (фотосферы и хромосферы) в ближнем ультрафиолетовом диапазоне (200–400 нм) (телескоп SUI — The Solar Ultraviolet Imaging Telescope), использование которых позволит изучить сложную структуру и динамику намагниченной солнечной атмосферы, получить ограничения на воздействие солнечной радиации на климат Земли [69]. С помощью спектрометра высокого временного и спектрального разрешения HELIOS/Aditya-L1 (High Energy L1 Orbiting X-ray Spectrometer) получены рентгеновские спектры импульсной фазы солнечных вспышек и изображения вспышки на низких высотах, недоступных для наблюдений другими обсерваториями, что даёт новую информацию для пони-

мания взрывного высвобождения энергии вспышек и ускорения электронов во время их импульсных фаз [70–72].

Наблюдения ASO-S, направленные на изучение магнитных полей и их связи со вспышками и выбросами массы, позволили подробно проследить и описать целый ряд солнечных извержений. В [73] приведено описание симпатического извержения из активной области 13575 9 февраля 2024 г. и выделены характерные элементы события: возникновение от первичного извержения вспышки класса X3.4, выброса корональной массы и волны, видимой в жёстком ультрафиолете; волна приводит к высокоамплитудному поперечному колебанию спокойного протуберанца, который теряет равновесие и поднимается вверх, приводя в движение второй корональный выброс массы. Важную роль, таким образом, в связи первичного извержения с симпатическим извержением играет волна, видимая в жёстком ультрафиолете. В [74] на основе выполненных наблюдений описана динамика мультислоековых извержений и представлен новый механизм извержения волокон, в котором крупномасштабные волокна извергаются под действием небольших извергающихся волокон, выталкиваемых снизу. Начальная кинетическая энергия крупномасштабного извержения в этом механизме получается и переносится через другие извергающиеся структуры. В [75] приведено подробное описание морфологии корональных струй (джетов), являющихся миниатюрной версией крупномасштабных извержений, и сделано предположение о ключевой роли вращения солнечных пятен в накоплении свободной энергии для вспышек и струй.

Наблюдения с высоким пространственным разрешением на Hinode и IRIS позволили изучить волновые движения в протуберанце, обнаружить и идентифицировать наблюдательные проявления резонансного поглощения волн, которое может играть важную роль в нагреве солнечной короны. Резонансное поглощение между поперечными (альвеновскими) волнами, которые наблюдал Hinode, и крутильными волнами, которые наблюдал IRIS, приводило к турбулентному потоку, преобразующему волновую энергию в тепловую, в результате чего температура плазмы протуберанца повышалась от значения 10^4 К до 10^5 К [76]. Проведённое моделирование с использованием наблюдательных данных также показало появление турбулентности при резонансом взаимодействии волн — альвеновские волны резонируют с крутильными движениями в поверхностном слое волокна, создавая полукруговой поток крутильных возмущений, который усиливается, переходя в турбулентное состояние и преобразуя волновую энергию в тепло [77].

5. Корона и солнечный ветер

Уже первые снимки Solar Orbiter, полученные 15 июня 2020 г. телескопом жёсткого рентгеновского излучения с расстояния в 77 млн км от Солнца, позволили получить самое детальное изображение полного диска Солнца и его короны и выявить многочисленные небольшие вспышки, которые получили название "солнечных костров" (рис. 11) [25].

Наблюдения Solar Orbiter с близких расстояний позволили также получить детальные изображения и фильмы отдельных участков солнечной атмосферы и активных областей и увидеть сложную структуру магнитных полей, их динамику, мелкомасштабные явления выбро-

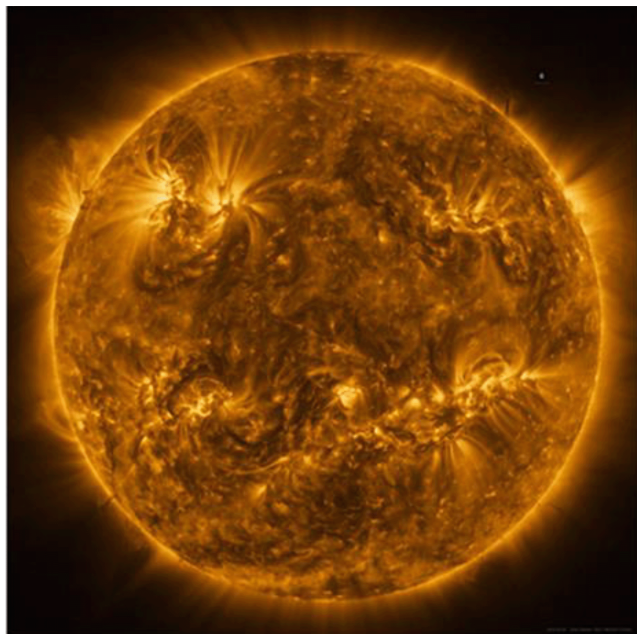


Рис. 11. Детальное изображение диска Солнца, полученное Solar Orbiter [25].

сов массы и т.д. Рисунок 12 иллюстрирует фрагмент из фильма с максимальным на сегодняшний день пространственным разрешением, в котором хорошо видна тонкая структура солнечной атмосферы: излучение в виде моха, отождествляемое с нановспышками, спикеры, выброс небольшой скрученной магнитной трубки, корональный дождь и т.д. [25].

При сближении Solar Orbiter с Солнцем наблюдения вблизи южного полюса Солнца позволили идентифицировать источники быстрого и медленного солнечного ветра, связанные с крошечными струями, которые имеют ширину около 100 км и видны на изображениях в виде волосоподобных пучков, кратковременно вспыхивающих (около минуты) и выбрасывающих заряженные частицы со скоростью около 100 км с^{-1} (рис. 13) [25, 78].

Такие крошечные струи, как показали наблюдения, существуют во всех корональных дырах атмосферы Солнца, и они являются источником как быстрого, так и медленного солнечного ветра. Если быстрый солнечный ветер (скорость более 500 км с^{-1}) истекает из струй, находящихся непосредственно в корональной дыре — области открытых силовых линий, то медленный солнечный

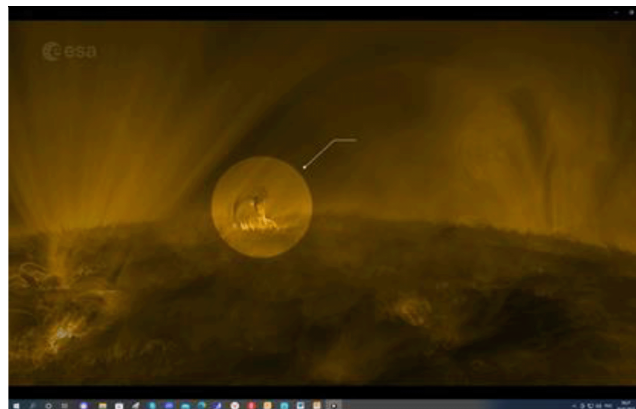
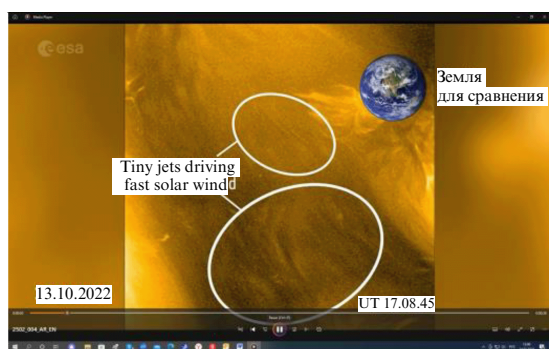
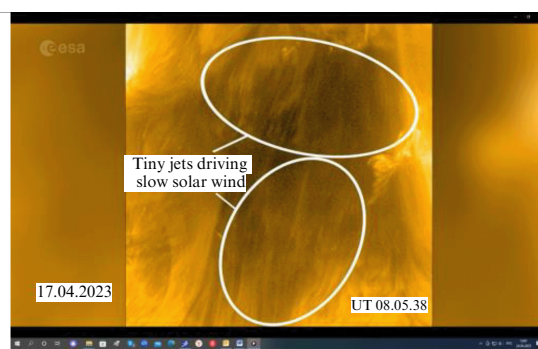


Рис. 12. Изображение участка солнечной атмосферы (фрагмент фильма Solar Orbiter) с максимальным на сегодняшний день пространственным разрешением, демонстрирующее тонкую структуру и динамику солнечной атмосферы [25].

ветер возникает в областях с закрытыми силовыми линиями магнитного поля, граничащих с областями открытых силовых линий, где в результате магнитного пересоединения происходят периодические разрывы и повторные соединения закрытых силовых линий, позволяющие плазме выходить из областей с закрытыми силовыми линиями, формируя неоднородные и нестационарные потоки медленного солнечного ветра. Совместный анализ дистанционных наблюдений крошечных струй в корональных дырах вблизи экватора Солнца с высоким пространственным разрешением, полученных при сближении с Солнцем, и прямых измерений частиц солнечного ветра и магнитного поля позволил напрямую связать солнечный ветер, измеренный на Solar Orbiter, с плазмой, истекающей из наблюдаемых струй. Анализ основан на сопоставлении содержания ионов магния, неона и других тяжелых элементов в короне Солнца, определяемого по дистанционным наблюдениям, с их содержанием в солнечном ветре, определяемым по локальным измерениям. Содержание этих ионов в плазме короны Солнца значительным образом отличается для разных её областей, что и позволяет определить область, где зародился тот или иной поток солнечного ветра [79]. Аналогичные выводы о происхождении медленного солнечного ветра по наблюдениям на Solar Orbiter в процессах магнитного пересоединения на краю активной области сделаны в [80]. Следует отметить, что ранее по наблюдениям Hinode в активной области короны, примыкающей к экваториаль-



а



б

Рис. 13. Фрагменты фильма Solar Orbiter, демонстрирующего истечение быстрого (а) и медленного (б) солнечного ветра из солнечной атмосферы [25].

ной корональной дыре, был обнаружен непрерывный отток плазмы со скоростью около 140 км с^{-1} от края активной области с открытыми силовыми линиями магнитного поля, идентифицированный как область источника низкоскоростного солнечного ветра [81].

Описанная выше наблюдавшаяся картина происхождения быстрого и медленного солнечного ветра, соответственно, из корональных дыр и из их приграничных областей, где происходит магнитное пересоединение открытых и закрытых силовых линий магнитного поля, позволяет предложить модель, в которой выбросы корональной массы, быстрый и медленный солнечный ветер могут быть объяснены единым, пока неизвестным, источником (драйвером) в основании солнечной короны. Если в корональных дырах плазма вдоль силовых линий преодолевает лишь гравитационное притяжение, уходя в корону в виде быстрого солнечного ветра, а в приграничных областях корональных дыр она дополнительно тормозится магнитным полем, всё же уходя в корону в виде медленного солнечного ветра, то в области закрытых силовых линий действие источника должно приводить к напряжению закрытой магнитной конфигурации, магнитный поток которой постоянно уменьшается из-за магнитного пересоединения по её краям и уносится в медленный солнечный ветер. Те же силы источника, которые порождают потоки быстрого и медленного солнечного ветра, в конечном счёте, из-за уменьшения магнитного потока закрытой магнитной конфигурации выталкивают её вверх, порождая корональный выброс массы. Характеристики выброса массы (скорость и т.д.) в таком случае должны зависеть от магнитного потока закрытой магнитной конфигурации, которая приводится в движение при достижении магнитного потока критического значения. Возможными источниками этих динамических процессов могут быть градиент газового давления и магнитные силы в основании короны, обусловленные нагревными процессами (микро- и нановспышки) и переносом магнитного потока из конвективной зоны.

Локальные измерения Parker Solar Probe вблизи Солнца (около 11 солнечных радиусов) позволили наблюдать явление, которое получило название "switchback" ("обратного переключения" или инверсии магнитного поля), когда магнитное поле меняет направление на обратное, описывая форму буквы S, как показано на рис. 14 [82, 83]. В качестве одного из механизмов образования таких структур рассматривается магнитное пересоединение в основании короны между системой открытых и петельных структур, всплывающих из-под фотосферы (рис. 15) [84]. В такой модели явления "обратного переключения" возникают высоко в короне, где корональные магнитные



Рис. 14. Явление "обратного переключения" ("switchback") в солнечной короне — изменение направления магнитного поля на обратное [24].

петли, закреплённые своими основаниями в фотосфере, при сближении с открытыми силовыми линиями магнитного поля в солнечном ветре испытывают магнитное пересоединение, в процессе которого происходит разрыв силовых линий магнитного поля корональной петли и формируется S-образная форма силовых линий. Наряду с этой моделью, в которой наблюдаемый изгиб силовых линий формируется за счёт магнитного пересоединения, предложены и другие модели явления "обратного переключения" [85], в которых его возникновение связывается с такими процессами, как магнитное пересоединение с образованием магнитных жгутов [86] и токовых слоёв [87]; радиальное расширение малых альфеновских флуктуаций солнечного ветра [88]; турбулентность, обусловленная сдвиговыми движениями на границе между быстрыми и медленными потоками солнечного ветра [89], пересоединение между быстрым и медленным солнечным ветром и обгон медленного ветра быстрым [90].

Измерения вариаций функций распределения скоростей электронов и протонов на Solar Orbiter [91] позволили сделать предположение о том, что наблюдаемые изогнутые на 180° силовые линии магнитного поля под действием сдвига скорости солнечного ветра вновь соединяются друг с другом, образуя магнитные жгуты, которые, таким образом, могут быть уцелевшими и модифицированными остатками "явлений переключения", происходящих вблизи Солнца. Изучение поведения энергичных частиц с энергией 80–200 кэВ в области S-образных областей магнитного поля дало ограничение на радиус кривизны изгибов S-формы $< 4000 \text{ км}$ [92]. Высокое пространственное разрешение коронографа Solar Orbiter/Meris позволило непосредственно наблюдать выделение энергии при образовании S-формы силовых

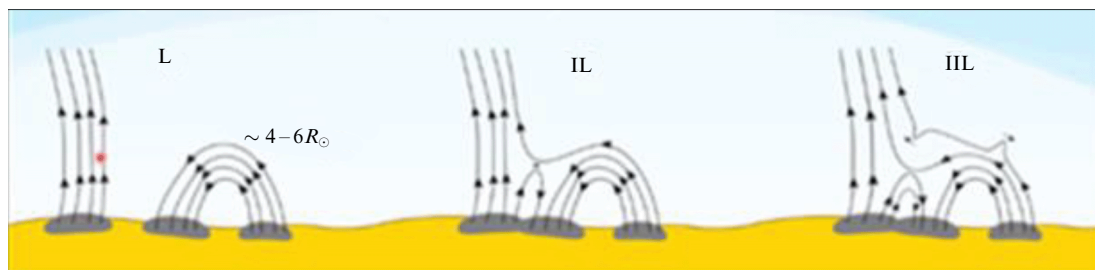


Рис. 15. Магнитное пересоединение в основании короны как возможный источник образования явлений S-образной формы силовых линий магнитного поля ("switchback") [66] (<https://aasnova.org/2021/04/12/switching-it-up-with-solar-switchbacks/>).



Рис. 16. Корональные стримеры, видимые как вытянутые яркие элементы при пролете Parker Solar Probe внутри короны на расстояниях между 50 и 35 солнечных радиусов (фрагмент из фильма <https://en.wikipedia.org/wiki/WISPR>) [24]. (Credit: NASA/Johns Hopkins APL/Naval Research Laboratory.)

линий в магнитном пересоединении и характерное для этого процесса движение плазмы вверх и вниз от области пересоединения [25, 93]. О внезапных и резких инверсиях магнитного поля в гелиосфере на разных расстояниях от Солнца, которые теперь названы явлениями "обратного переключения", сообщалось ранее по данным Helios-1 и Helios-2 [94], а также ULYSSES [95, 96].

Двигаясь в солнечной короне, Parker Solar Probe впервые получал с помощью оптической широкоугольной камеры WISPR (Wide-field Imager for Solar Probe) изображения корональных магнитных структур изнутри короны и неоднократно их пересекал, это корональные стримеры (рис. 16), магнитные петли и жгуты, выбросы массы.

При пересечении коронального выброса массы на расстоянии 10 млн км от поверхности Солнца Parker Solar Probe пронаблюдал турбулентные вихри на границе выброса и окружающего солнечного ветра, обусловленные неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца из-за разности скоростей вдоль границы [24, 97]. По измерениям вариаций яркости короны Parker Solar Probe впервые наблюдал теоретически предсказанный ранее эффект выметания пыли из околосолнечного пространства мощными выбросами коронального вещества с образованием областей пылевых пустот и с последующим быстрым восстановлением распределения пыли. Эффект наблюдался на расстояниях до 9,6 млн км от Солнца (1/6 расстояния от Солнца до Меркурия). Обнаруженный эффект важен для предсказания космической погоды, так как межпланетная пыль изменяет форму и скорость выбросов и её наблюдения дают информацию о выбросах [24]. На основе наблюдений короны камерой WISPR ведётся разработка метода трансляционной томографии для восстановления трёхмерных изображений солнечной короны [98].

В работе [99] по данным гелиосферных магнитных измерений Parker Solar Probe и Solar Orbiter изучены направленные разрывы, которые являются распространёнными структурами в плазме солнечного ветра и одними из наиболее важных разрывов наряду с ударными волнами. В диапазоне гелиоцентрических расстояний 0,06–1,01 а.е. обнаружено более 140 000 разрывов, которые классифицированы на подгруппы тангенциальных (ТР) и вращательных (ВР) разрывов. Установлено, что пространственная плотность разрывов уменьшается с увеличением радиального расстояния от Солнца, а большая часть разрывов, для которых нормальная составляющая магнитного поля мала, на самом деле являются ТР, независимо от скачка амплитуды поля. Изучение радиальной эволюции толщины для ТР и ВР показало, что толщина ВР уменьшается в диапазоне расстояний от 0,06 до 0,30 а.е., а за пределами 0,30–1,01 а.е. увеличивается. После того как толщина достигает инерционного масштаба ионов, кинетические эффекты ионов уравнивают структуру, и, таким образом, её толщина масштабируется с характерной инерционной длиной иона. Для ТР это характеристическое масштабирование имело место во всем изученном диапазоне от 0,06 до 1,01 а.е. Анализ толщин разрывов позволил наблюдательно подтвердить, что ВР образуются в результате укручения альвеновской волны, в то время как ТР, скорее всего, являются границами магнитных трубок, которые примерно следуют теоретической спирали Паркера.

В работе [100] представлены результаты наблюдений на Solar Orbiter области взаимодействия между джетом и корональными перьями ("плюмами") — нитевидными лучевыми структурами, простирающимися от хромосферы до высокой короны, в изобилии присутствующими в корональных дырах и на спокойных участках Солнца и, предположительно, дающими начало потокам солнечного ветра. Наблюдалось развитие ряби и распад капель, которые связаны с развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и появлением вихревой цепочки Кармана, двух взаимосвязанных явлений. Наблюдавшееся образование вихрей может представлять собой механизм перемешивания масс поперёк магнитного поля и усиливать преобразование кинетической энергии в тепловую, нагревая солнечную корону.

Если предыдущие космические миссии не подлетали ближе чем на 60 солнечных радиусов к Солнцу, то Parker Solar Probe приближался на расстояние в 9,5 радиусов Солнца и несколько раз пересекал критическую альвеновскую поверхность, которая разделяет субальвеновскую и сверхальвеновскую области солнечного ветра, т.е. считается границей между короной Солнца, плазмой, ещё связанной с Солнцем, и свободным потоком солнечного ветра. Как показали измерения, эта граница не сферична и располагается на среднем расстоянии в 18,8 радиусов Солнца (13 млн км) от его фотосферы. Измеренное альвеновское число Маха под альвеновской поверхностью равнялось 0,79, магнитное давление преобладало над давлением ионов и электронов. Измерения были проведены над областью устойчивого потока солнечного ветра, возникающего на быстро расширяющихся линиях коронального магнитного поля, лежащих над псевдо-стримером. Измеренный спектр турбулентности в субальвеновской области показан на рис. 17. Излом в спектре между содержащим энергию диапазоном $1/f$ (который в данном случае меньше, чем $1/f_{sc}$, f_{sc} —

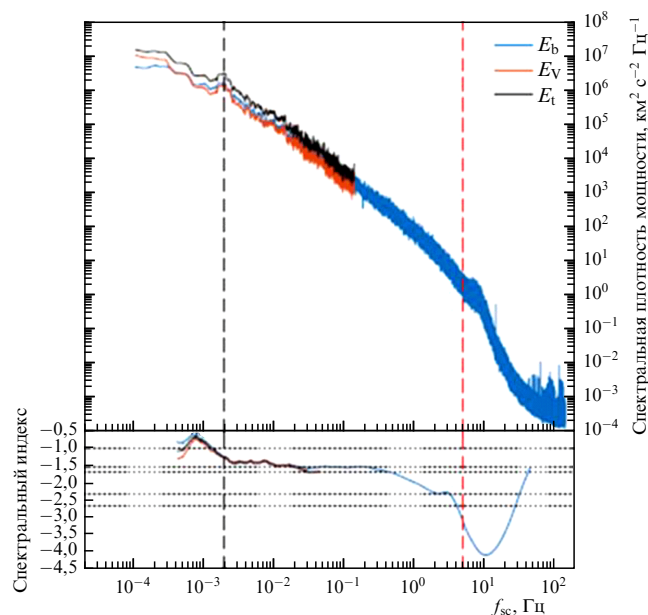


Рис. 17. Вверху — спектр мощности, внизу — спектральный индекс магнитных (E_b), скоростных (E_v) и суммарных (E_t) флуктуаций за 5 ч нахождения КА Parker Solar Probe в субальеновской области [101]. (Пояснения в тексте.)

частота в системе отсчёта КА) и инерционным диапазоном $f_{sc}^{-3/2}$ находился на частоте $f_{sc} \sim 2 \times 10^{-3}$ Гц и обозначен чёрной пунктирной линией. Этот разрыв связан с внешним масштабом, или наибольшим масштабом флуктуаций, который можно отнести к турбулентности. Небольшое повышение спектральной мощности наблюдается в высокочастотной части спектра на ионно-циклотронных частотах (около 8 Гц), а затем спектр резко спадает, не достигнув минимального уровня шума прибора [101]. Для сравнения с измеренным спектром горизонтальные пунктирные линии в нижней части рисунка соответствуют спектральным индексам -1 для спектра $1/f$ и $-3/2$ и $-5/3$ для модельных спектров инерционного диапазона турбулентности [102].

Parker Solar Probe и Solar Orbiter позволили изучить свойства турбулентности плазмы и солнечного ветра в короне и во внутренней гелиосфере на расстояниях 0,1–1 а.е. Формирование турбулентности вблизи Солнца в нижней короне наблюдалось на Solar Orbiter коронографом Metis (поле зрения $1,7 R_\odot - 9 R_\odot$ [103]) (рис. 18). Эти наблюдения, полученные с высоким пространственным разрешением, показали, что течение солнечного ветра в данных областях уже становится хаотичным, давая начало полностью развитой турбулентности в солнечной короне [25].

Измерения Parker Solar Probe и Solar Orbiter во внутренней гелиосфере показали наличие в ней ионных пучков, температурной анизотропии плазмы и кинетических плазменных волн, которые наряду с явлениями "switch-backs" рассматриваются в качестве кинетических механизмов нагрева и ускорения солнечного ветра и формирования спектра его турбулентности [24, 104, 105]. Измерение свойств турбулентности солнечного ветра дало веское доказательство её радиальной эволюции, а именно, происходит эволюция плазмы солнечного ветра от сверхальеновской турбулентности и состояния слабо-развитой турбулентности около Солнца к промежуточной и полностью развитой турбулентности на расстоянии 1 а.е. [24, 106]. Изучение радиальной эволюции тур-

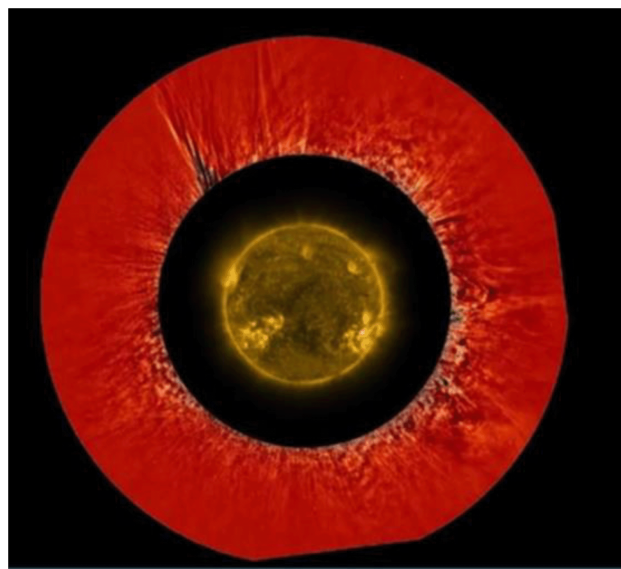


Рис. 18. Фрагмент видеонаблюдения турбулентности коронографом Metis/Solar Orbiter в нижней короне (в красном кольце), сделанного 12 октября 2022 г. с расстояния в 43,4 млн км от Солнца (менее трети расстояния от Солнца до Земли) [25].

булентного характера плазмы быстрого солнечного ветра, исходящего из корональных дыр, по данным Parker Solar Probe и Solar Orbiter проведено в работе [107] для гелиосферных расстояний 0,1–1 а.е. Наряду с подтверждением ряда полученных ранее результатов (уменьшение радиального тренда плотности протонов, которое происходит медленнее, чем ожидалось для радиально расширяющейся плазмы; отклонение магнитного поля от предсказания Паркера; более медленное снижение температуры протонов по отношению к адиабатическому предсказанию и др.) обнаружено ожидаемое снижение уровня мощности турбулентности при расширении плазмы солнечного ветра, степенной закон для спектральной плотности мощности турбулентности в инерционном диапазоне между спектром Колмогорова и скейлингом Крайчана. Спектральный индекс спектральной плотности мощности флуктуаций скорости оставался весьма близким к скейлингу Ирошникова – Крайчана на всех радиальных расстояниях, а спектральный индекс флуктуаций магнитного поля уменьшался в абсолютном значении с увеличением радиального расстояния от 0,1 до 0,97 а.е. Такое же поведение флуктуаций магнитного поля наблюдалось и в диссипативном диапазоне, хотя и с более крутым степенным законом. Отмечается, что наклоны спектров в частотных диапазонах от инерциального до кинетического вдоль турбулентного каскада сильно зависят от типа турбулентности, наблюдаемой двумя КА, а именно от преимущественно параллельной турбулентности (вдоль магнитного поля) в данных Parker Solar Probe и преимущественно перпендикулярной турбулентности в данных Solar Orbiter.

Радиальные зависимости различных параметров солнечного ветра, полученные из анализа данных, аппроксимированы следующими функциями ($R_0 = 1$ а.е.) [107]: — концентрация протонов

$$n = (8 \pm 2) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(-1,8 \pm 0,2)} \text{ см}^{-3},$$

— амплитуда магнитного поля

$$B = (5,3 \pm 0,4) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(-1,60 \pm 0,05)} \text{ нТл},$$

— радиальная компонента магнитного поля

$$|B_r| = (3,3 \pm 0,4) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(-1,72 \pm 0,09)} \text{ нТл},$$

— тангенциальная компонента магнитного поля

$$|B_t| = (3,0 \pm 0,4) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(-1,4 \pm 0,1)} \text{ нТл},$$

— температура протонов

$$T = (1,7 \pm 0,1) \times 10^5 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(-0,93 \pm 0,04)} \text{ К},$$

— плазменный параметр

$$\beta = (1,58 \pm 0,08) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{(0,49 \pm 0,04)}.$$

На основе анализа наблюдательных данных проведён также статистический анализ токовых слоёв и вихреобразных структур, обнаруженных на двух радиальных расстояниях, и установлено, что эти структуры имеют схожие характеристики на разных радиальных расстояниях.

Parker Solar Probe впервые пересёк край одной из магнитных петель в основании выброса коронального вещества на расстоянии всего 14 солнечных радиусов, на котором структура выброса ещё мало изменилась из-за его взаимодействия с межпланетной средой. Измерения показали заметное отличие параметров плазмы в выбросе от параметров солнечного ветра — почти полное отсутствие в пересечённой части выброса тяжёлых и лёгких ионов (от водорода до железа) низкой энергии, которые обычно присутствуют в окружающей плазме солнечного ветра и в головной части выброса. Такое отличие параметров может быть связано с быстрым расширением магнитной петли в основании выброса при его инжекции в корону и охлаждением сверхтепловых ионов [108]. Обзор измерений энергичных частиц в окосолнечном пространстве по данным Parker Solar Probe/IS $\odot$ IS (IS $\odot$ IS — Integrated Science Investigation of the Sun) и Solar Orbiter/EPD (EPD — Energetic Particle Detector) приведён в [109]. Отмечается, что приближение КА к Солнцу — источнику ускорения частиц, уменьшает влияние эффектов переноса на характеристики частиц и позволяет в лучшей степени определить их условиями ускорения. Обнаружено также, что состав частиц от одного и того же источника в событиях, происходящих в быстрой последовательности, может сильно различаться, а отдельные активные области могут производить серию ^3He -богатых событий солнечных энергичных частиц в течение длительного периода времени. Эти и другие неожиданные результаты измерений указывают на различные условия в области ускорения и требуют пересмотра общепринятых теорий генерации энергетических частиц на Солнце и во внутренней гелиосфере.

В работе [110] по измерениям на Solar Orbiter (Electron-Proton Telescope sensor of the EPD suite) про-

анализирована динамика энергичных протонов, ускоренных межпланетной бесстолкновительной ударной волной в событии 3 ноября 2021 г., и рассмотрены ограничения на потенциальные механизмы и процессы ускорения. Анализ основан на качественном сравнении полученных наблюдений, таких характеристик протонов как распределение по питч-углам, временной профиль потока, функция распределения энергичных протонов по скоростям вблизи ударной волны и др., с теоретическими предсказаниями. Обнаружено, что временной профиль протонов с энергией $\sim 1000\text{--}4000$ кэВ быстро нарастал и быстро затухал с чёткой дисперсией скоростей примерно за 2 мин до прохождения ударной волны, подобно импульсным событиям солнечных энергетических частиц. Пиковый спектр протонов по энергиям в этом событии был более крутым, чем спектр на самой ударной волне. Потоки протонов с энергией $\sim 50\text{--}200$ кэВ с обратной дисперсией скоростей достигали максимума между ~ 10 и ~ 20 с до прохождения ударной волны, а события дисперсии скорости и обратной дисперсии скорости были связаны с прохождением ударной волны через магнитные изгибы (явления "обратного переключения"). Вблизи ударной волны наблюдались две различные популяции протонов. В одной из них протоны при энергиях ниже ~ 300 кэВ характеризуются степенным спектром с индексом $\sim 6\text{--}7$ и временным профилем потока, который возрастал до ударной волны и спадал после её прохождения. Данная популяция протонов могла быть продолжением сверхтепловых протонов с энергией $\sim 20\text{--}60$ кэВ и эффективно ускоренных ударной волной. Другая популяция протонов при энергиях выше ~ 300 кэВ — долгоживущий, направленный от Солнца пучок через ударную волну с временным профилем потока, который оставался относительно постоянным до ударной волны и немного возрастал после её прохождения. Такой протонный пучок предположительно мог исходить от источника на Солнце, а его наблюдаемые характеристики могут объясняться неэффективностью ускорения протонов на ударной волне при энергиях выше ~ 300 кэВ, что не относится к случаям весьма эффективного ускорения в событии с дисперсией скорости. В этом событии временной профиль потока с быстрым нарастанием и быстрым затуханием длился $\lesssim 30$ с, что соответствует пространственному масштабу порядка гирорадиуса протона с энергией ~ 1000 кэВ, а наблюдаемая продолжительность может свидетельствовать о том, что протоны импульсно ускоряются в области, сравнимой с протонным гирорадиусом на поверхности ударной волны. Событие с обратной дисперсией скорости для протонов с энергиями $\sim 50\text{--}200$ кэВ наблюдалось непосредственно перед ударной волной и имело малую продолжительность $\lesssim 15$ с, что позволяет предположить, что его источник ограничен областью, сравнимой с гирорадиусом протона с энергией ~ 200 кэВ. Данное событие также было связано с прохождением ударной волны через магнитный изгиб, и такое взаимодействие между магнитным изгибом и ударной волной, по всей видимости, и приводит к импульсному и эффективному ускорению протонов в событиях с дисперсией скорости. Полученные результаты позволяют рассматривать дрейфовый и диффузный механизмы ускорения в качестве механизмов ускорения на межпланетных ударных волнах.

Гелиоцентричность орбиты Solar Orbiter и возможность наблюдать невидимую с Земли сторону Солнца

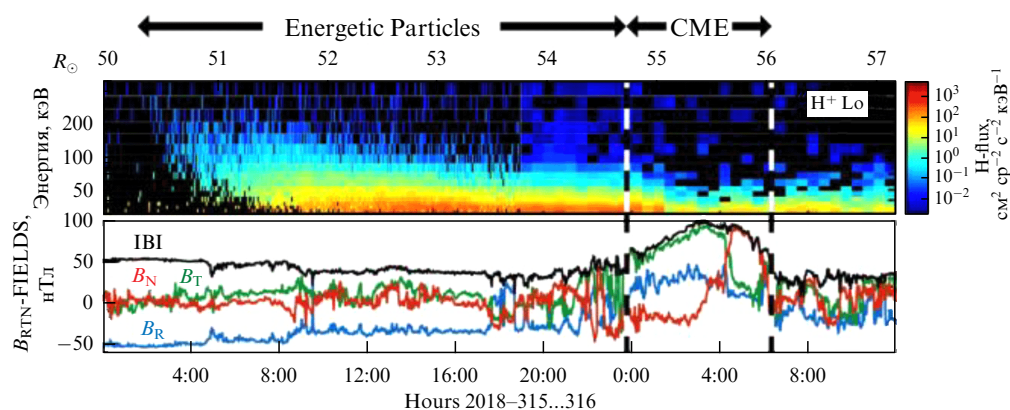


Рис. 19. В верхней части рисунка цветом показан поток протонов, в нижней части — измерения магнитного поля выброса [111] (Credit: NASA/Goddard).

позволило в период мощных событий на Солнце в мае 2024 г., связанных с давшей на видимом диске серию мощных вспышек активной областью AR3664, контролировать вспышечную активность этой области на невидимой стороне Солнца, до выхода области на восточный лимб, обеспечив заблаговременный на несколько дней вперёд (3–4 дня) прогноз космической погоды, и упредив негативные последствия воздействия на радиосвязь и технические системы на Земле, которые потом произошли. Пересекая корональный выброс массы, Parker Solar Probe/IS $\odot$ IS обнаружил потоки энергичных частиц, которые идут впереди коронального выброса массы с интервалом примерно в один день (рис. 19), что можно рассматривать как предвестник самого выброса, используемый для прогноза космической погоды [24, 111].

Важные для прогнозирования космической погоды взаимодействия ударной волны с последовательностью выбросов корональных масс (ВКМ) описаны по данным измерений на Solar Orbiter, Wind, STEREO-A, ASO-S и CHASE [112]. Из трёх последовательных ВКМ, произошедших 27 и 28 ноября 2023 г., ВКМ-3 сопровождался ударной волной, которая при своём распространении последовательно сжала и модифицировала два предыдущих ВКМ. На расстояниях близких к Солнцу наблюдалось взаимодействие ВКМ-1 и ВКМ-2 между собой, а на расстояниях менее чем 0,83 а.е. ударная волна догнала межпланетный ВКМ-2 (МВКМ-2) и сжала его. Продолжая распространяться ударная волна пересекла МВКМ-2, затем МВКМ-1 (на расстоянии 1 а.е.), и обогнала оба выброса, произведя их сжатие, сопровождавшееся увеличением напряжённости магнитного поля ($\sim 150\%$) и ослаблением силы ударной волны (степень магнитного сжатия уменьшилась с 1,74 до 1,49). Несмотря на наблюдавшееся заметное взаимодействие трёх МВКМ в гелиосфере, их магнитная структура сохранялась в разных точках наблюдений, особенно для МВКМ-3.

6. Перспективы

Готовящаяся к запуску миссия НАСА IMAP (Interstellar Mapping and Acceleration Probe) будет работать в точке Лагранжа L-1 (рис. 20) системы Солнце–Земля и иметь на борту 10 научных приборов для изучения гелиосферы, солнечного ветра и его взаимодействия с межзвёздной средой, ускорения энергичных частиц, изучения энергичных нейтральных атомов и мониторинга космической погоды [113]. Совместно с запуском этого КА плани-

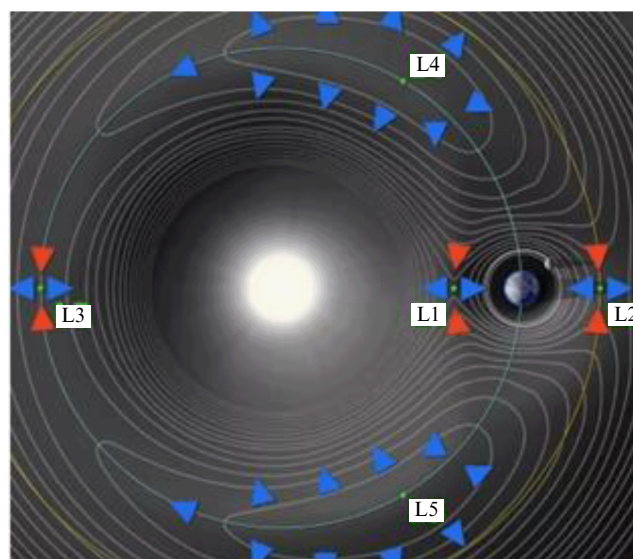


Рис. 20. Диаграмма, показывающая взаимное положение Солнца и Земли и пять точек Лагранжа, с контурными линиями эффективного потенциала (https://en.wikipedia.org/wiki/Lagrange_point).

руется запуск КА SWFO-L1 (Space Weather Follow On-Lagrange 1) [114], который, находясь в точке Лагранжа L1, будет иметь на борту набор инструментов для проведения измерений солнечного ветра, энергичных частиц и магнитного поля в режиме реального времени, а также компактный коронограф [115] для обнаружения выбросов корональной массы. Цель миссии — обеспечить надёжность поступления информации для мониторинга и прогнозирования космической погоды в условиях, когда все космические аппараты, предназначенные для этих целей, проработали дольше своего проектного срока службы.

Китаем планируется запуск в 2026 г. КА Xihe-2 (Lagrange-V Solar Observatory (LAVSO)) для первых наблюдений за Солнцем из точки Лагранжа L5 системы Солнце–Земля (см. рис. 20) [116, 117]. Основная цель — изучение генерации и эволюции солнечных магнитных полей, их связи с выбросами массы, трёхмерности выбросов, обеспечение точного предупреждения и прогноза космической погоды. В 2029 г. планируется отправить космическую обсерваторию Xihe-3 из плоскости эклиптики для изучения полюсов Солнца и для получения данных о циклах солнечной магнитной активности и высокоскоростном солнечном ветре. Орбита с большим наклоном к плоскости эклиптики (около $60-70^\circ$) будет сформирована

за счёт гравитационного манёвра у Юпитера. Получаемая информация с внеэклиптических участков орбиты призвана дать новое понимание солнечных явлений, влияющих на космическую погоду и технологическую инфраструктуру Земли. Планируемый комплекс научной аппаратуры будет включать блок дистанционных приборов (магнитный и гелиосейсмический телескоп, телескопы жёсткого УФ и рентгеновского излучения, коронограф белого света и коронограф с большим углом обзора, низкочастотный радиоспектрометр) и блок приборов для локальных измерений (анализатор ионов солнечного ветра, анализатор энергетических ионов, магнитометр) [118]. Наблюдения Солнца с близких расстояний планируются в рамках обсуждаемой миссии Xihe-4 [119].

Перспективы российских космических исследований Солнца связаны с проектами, которые имеют определённый задел в их разработке и которые постоянно модернизируются в части актуальных научных задач и измерительной аппаратуры с учётом последних достижений в физике Солнца. Проект "Арка" нацелен на рентгеновские наблюдения Солнца с околоземных орбит с высоким пространственным разрешением для изучения тонкой структуры солнечной атмосферы и активности в малых и сверхмалых масштабах ($75 \text{ км} = 0,1''$), на изучение микро- и нановспышки, переходных процессов на границе хромосфера – корона и нагрева солнечной короны. В проекте Интергелиозонд [120] два КА, разведённых на четверть периода, на наклонных к плоскости эклиптики орбитах, смогут обеспечить непрерывные внеэклиптические наблюдения приполярных областей Солнца, а также на стадии сближения с Солнцем за счёт гравманевров у Венеры будут наблюдать Солнце с высоким пространственным разрешением, решая задачи изучения триггерных механизмов солнечных вспышек и выбросов массы, изучать тонкую структуру солнечной атмосферы и её роль в нагреве солнечной короны и ускорении солнечного ветра. Определённый задел имеют эксперименты по наблюдениям Солнца с борта Международной космической станции (МКС), стадия реализации которых может быть перенесена на новую станцию РОС. Это проект "Тахомаг-МКС", состоящий в разработке и апробировании солнечного магнитографа для измерения магнитных полей на Солнце и для его использования в солнечных космических проектах, а также проект "Кортес" для отработки новых методов рентгеновских наблюдений Солнца, для изучения солнечной короны, вспышек и предвспышечных условий, происхождения и эволюции эруптивных явлений. В стадии подготовки для реализации на МКС находится проект "Солнце-Терагерц" для изучения терагерцового излучения Солнца.

7. Заключение

Наблюдения и измерения на космических аппаратах дали новые научные результаты, призванные ответить на нерешённые проблемы физики Солнца, важные для фундаментальной астрофизики и для целого ряда практических задач космической погоды, оказывающей всё возрастающее воздействие на различные сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе. Действующие и планируемые космические миссии позволят сделать очередной важный шаг на пути к лучшему пониманию того, как устроено и как работает Солнце, как могут быть устроены далекие звёзды и как нам минимизировать те риски, которые даёт нам космическая погода, порождает

мая солнечной активностью. Большое число космических аппаратов, наблюдающих Солнце в широком диапазоне электромагнитного спектра и с высоким пространственным разрешением, постоянно продвигают нас во всё более мелкие масштабы солнечной атмосферы, быстро меняют наше представление о Солнце, что даёт основу для разработки новых космических миссий.

Настоящий обзор не претендует на полноту изложения состояния и результатов космических исследований Солнца, а имеет целью отразить лишь некоторые из них на рубеже 100-летия С.И. Сыроватского.

Список литературы

1. Syrovatskii S I *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **19** 163 (1981)
2. Сыроватский С И, в сб. *Нейтральные токовые слои в плазме* (Труды ФИАН, Т. 74, Под ред. Н Г Басова) (М.: Наука, 1974) с. 3; Пер. на англ. яз.: Syrovatskii S I, in *Neutral Current Sheets in Plasmas* (Proc. (Trudy) of the P.N. Lebedev Phys. Inst., Vol. 74, Ed. N G Basov) (New York: Consultants Bureau, 1976) p. 1, https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8564-0_1
3. Сыроватский С И, в сб. *Вспышечные процессы в плазме* (Труды ФИАН, Т. 110 под ред. В Л Гинзбурга) (М.: Наука, 1979) с. 5
4. Сыроватский С И, Буланов С В, Догель В А, в сб. *Итоги науки и техники* (Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНТИ, 1982) с. 188
5. Сыроватский С И, Сомов Б В, в кн. *Итоги науки и техники* (Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНТИ, 1982) с. 221
6. Сыроватский С И, Жугжда Ю Д *Астрон. журн.* **44** 1180 (1967); Syrovatskii S I, Zhugzhda Yu D *Sov. Astron.* **11** 945 (1968)
7. Сомов Б В, Сыроватский С И *УФН* **120** 217 (1976); Somov B V, Syrovatskii S I *Sov. Phys. Usp.* **19** 813 (1976)
8. Сыроватский С И, Шмелева О П *Астрон. журн.* **49** 334 (1972); Syrovatskii S I, Shmeleva O P *Sov. Astron.* **16** 273 (1972)
9. Догель В А, Сыроватский С И *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **43** 716 (1979)
10. Кузнецов В Д, Сыроватский С И *Астрон. журн.* **56** 1263 (1979); Kuznetsov V D, Syrovatskii S I *Sov. Astron.* **23** 715 (1979)
11. Молоденский М М, Сыроватский С И *Астрон. журн.* **54** 1293 (1977); Molodenskii M M, Syrovatskii S I *Sov. Astron.* **21** 734 (1977)
12. Bobrova N A, Syrovatskii S I *Solar Phys.* **61** 379 (1979)
13. Сыроватский С И *Письма в Астрон. журн.* **3** 133 (1977); Syrovatskii S I *Sov. Astron. Lett.* **3** 69 (1977)
14. Kuznetsov V D, Syrovatskii S I *Solar Phys.* **69** 361 (1981)
15. Tsuneta S *Trends Sci.* **18** (11) 11_79 (2013) https://doi.org/10.5363/tits.18.11_79
16. A golden age of solar physics. The Royal Astronomical Society, <https://ras.ac.uk/events-and-meetings/golden-age-solar-physics>
17. "Solar Orbiter Exploring the Sun-heliosphere connection", Definition Study Report ESA/SRE(2011)14 (Frascati: European Space Agency, 2011); <http://sci.esa.int/solar-orbiter/48985-solar-orbiter-definition-study-report-esa-sre-2011-14/#>
18. Кузнецов В Д *УФН* **176** 319 (2006); Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **49** 305 (2006)
19. Кузнецов В Д, в кн. *Пятьдесят лет космических исследований: по материалам международного форума "Космос: наука и проблемы XXI века", октябрь 2007 года, Российская академия наук, Москва* (Под ред. А В Захарова) (М.: Физматлит, 2009) с. 60
20. Кузнецов В Д *УФН* **180** 988 (2010); Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 947 (2010)
21. Кузнецов В Д *УФН* **182** 327 (2012); Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **55** 305 (2012)
22. Кузнецов В Д, в сб. *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 10; Пер. на англ. яз.: Kuznetsov V D, in *The CORONAS-F Space Mission. Key Results for Solar Terrestrial Physics* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 400, Ed. V Kuznetsov) (Berlin: Springer, 2014) p. 1, https://doi.org/10.1007/978-3-642-39268-9_1
23. Kuznetsov V D *Adv. Space Res.* **55** 879 (2015)
24. Parker Solar Probe. NASA Science, <https://science.nasa.gov/mission/parker-solar-probe/>
25. Solar Orbiter. The European Space Agency, https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter
26. Li C et al. *Res. Astron. Astrophys.* **19** 165 (2019)
27. Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S), http://aso.spmo.ac.cn/en_index.jsp
28. ADITYA-L1. Indian Space Research Organisation, ISRO, https://www.isro.gov.in/Aditya_L1.html
29. Proba-3 Mission. The European Space Agency. ESA, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Proba_Missions/Proba-3_Mission3
30. Solar Dynamics Observatory. NASA, <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

31. Zhao J et al. *Astrophys. J. Lett.* **774** L29 (2013)
32. Hazra G, Karak B B, Choudhuri A R. *Astrophys. J.* **782** 93 (2014)
33. Hathaway D H, Upton L, Colegrove O. *Science* **342** 1217 (2013)
34. SOHO: Solar and Heliospheric Observatory. The European Space Agency, https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO
35. Requerey I S et al. *Astrophys. J.* **789** 6 (2014)
36. Bonet J A et al. *Astrophys. J. Lett.* **723** L139 (2010)
37. Okamoto T J, Sakurai T. *Astrophys. J. Lett.* **852** L16 (2018)
38. Nölke J D et al. *Astron. Astrophys.* **678** A196 (2023)
39. Rao S et al. *Nat. Astron.* **8** 1102 (2024)
40. Jafarzadeh S et al. *Astron. Astrophys.* **688** A2 (2024)
41. Petrova E et al. *Astron. Astrophys.* **687** A13 (2024)
42. Kohutova P, Verwichte E, Froment C. *Astron. Astrophys.* **633** L6 (2020)
43. Pariat E, Antiochos S K, DeVore C R. *Astrophys. J.* **691** 61 (2009)
44. Hinode, <http://hinode.ao.ac.jp/en/intro/science/discovery.html>
45. De Pontieu B et al. *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **59** (SP3) S655 (2007)
46. De Pontieu B et al. *Science* **331** 55 (2011)
47. Régnier S et al. *Astrophys. J.* **784** 134 (2014)
48. De Pontieu B et al. *Astrophys. J. Lett.* **845** L18 (2017)
49. De Pontieu B, Martínez-Sykora J, Chintzoglou G. *Astrophys. J. Lett.* **849** L7 (2017)
50. Chintzoglou G et al. *Astrophys. J.* **857** 73 (2018)
51. De Pontieu B et al. *Solar Phys.* **296** 84 (2021)
52. Pontin D et al. *Astrophys. J.* **837** 108 (2017)
53. Cirtain J W et al. *Nature* **493** 501 (2013)
54. Aschwanden M J, Peter H. *Astrophys. J.* **840** 4 (2017)
55. Barczynski K, Peter H, Savage S L. *Astron. Astrophys.* **599** A137 (2017)
56. Rachmeler L A et al. *Solar. Phys.* **294** 174 (2019)
57. Williams T et al. *Astrophys. J.* **892** 134 (2020)
58. Alexander C E et al. *Astrophys. J. Lett.* **775** L32 (2013)
59. Alpert S E et al. *Astrophys. J.* **822** 35 (2016)
60. Tiwari S K et al. *Astrophys. J.* **816** 92 (2016)
61. The Sun. NuSTAR. Caltech, <https://www.nustar.caltech.edu/page/sun>
62. Warren H et al. *Astrophys. J.* **854** 122 (2018)
63. Li Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **853** L15 (2018)
64. Chitta L P, Priest E R, Cheng X. *Astrophys. J.* **911** 133 (2021)
65. Ding T et al. *Astrophys. J.* **964** 58 (2024)
66. Ding T, Zhang J. *Astrophys. J.* **974** 104 (2024)
67. HMI Science Nuggets. Stanford Univ., <http://hmi.stanford.edu/hminuggets/?p=539>
68. Battaglia A F et al. *Astron. Astrophys.* **691** A172 (2024)
69. The Solar Ultraviolet Imaging Telescope. Indian Space Research Organisation, https://www.isro.gov.in/Aditya_L1_SUIT.html
70. HELIOS captures first High-Energy X-ray glimpse of Solar Flares. Indian Space Research Organisation, ISRO, https://www.isro.gov.in/HELIOs_captures_glimpseof_solarflares.html
71. Indian spacecraft Aditya-L1 observes solar flare. Max-Planck-Gesellschaft, <https://www.mpg.de/24282801/solar-probe-aditya-observes-flare>
72. Historic First: India's Solar Ultra-violet Imaging Telescope (SUIT) onboard Aditya-L1 Captures Unprecedented Solar Flare Details. Indian Space Research Organisation, ISRO, https://www.isro.gov.in/SUIT_Aditya-L1_Captures_SolarFlare.html
73. Li S-Y et al. *Res. Astron. Astrophys.* **25** 015006 (2025)
74. Song Y et al. *Solar Phys.* **299** 85 (2024)
75. Gou T et al., arXiv:2406.02783; *Solar Phys.* (2025) accepted
76. Okamoto T J et al. *Astrophys. J.* **809** 71 (2015)
77. Antolin P et al. *Astrophys. J.* **809** 72 (2015)
78. Chitta L P et al. *Science* **381** 867 (2023)
79. Yardley S L et al. *Nat. Astron.* **8** 953 (2024)
80. Barczynski K et al. *Astron. Astrophys.* **673** A74 (2023)
81. Shibata K et al. *Science* **318** 1591 (2007)
82. Bale S D et al. *Nature* **576** 237 (2019)
83. Kasper J C et al. *Nature* **576** 228 (2019)
84. Zank G P et al. *Astrophys. J.* **903** 1 (2020)
85. Hatfield M, Thomas V. "Switchbacks Science: Explaining Parker Solar Probe's Magnetic Puzzle", March 09, 2021, NASA, <https://www.nasa.gov/science-research/heliophysics/switchbacks-science-explaining-parker-solar-probes-magnetic-puzzle/>
86. Drake J F et al. *Astron. Astrophys.* **650** A2 (2021)
87. Huang J et al. *Astrophys. J.* **952** 33 (2023)
88. Squire J, Chandran B D G, Meyrand R. *Astrophys. J. Lett.* **891** L2 (2020)
89. Goldstein M et al. *Radiat. Effects Defects Solids* **175** 1002 (2020)
90. Schwadron N A, McComas D J. *Astrophys. J.* **909** 95 (2021)
91. Fedorov A et al. *Astron. Astrophys.* **656** A40 (2021)
92. Bandyopadhyay R et al. *Astron. Astrophys.* **650** L4 (2021)
93. Telloni D et al. *Astrophys. J. Lett.* **936** L25 (2022)
94. Horbury T S, Matteini L, Stansby D. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **478** 1980 (2018)
95. Balogh A et al. *Geophys. Res. Lett.* **26** 631 (1999)
96. Yamauchi Y et al. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **109** A03104 (2004)
97. Kieokaew R et al. *Astron. Astrophys.* **656** A12 (2021)
98. Kenny K N et al. *Astrophys. J.* **975** 283 (2024)
99. Madar A et al. *Astron. Astrophys.* **690** A328 (2024)
100. Wei H et al. *Astron. Astrophys.* **678** L7 (2023)
101. Kasper J C et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 255101 (2021)
102. Chen C H K. *J. Plasma Phys.* **82** 535820602 (2016)
103. Antonucci E et al. *Astron. Astrophys.* **642** A10 (2020)
104. Ofman L et al. *Astrophys. J.* **926** 185 (2022)
105. Rivera Y J et al. *Science* **385** 962 (2024)
106. Telloni D et al. *Astrophys. J. Lett.* **912** L21 (2021)
107. Perrone D et al. *Astron. Astrophys.* **668** A189 (2022)
108. McComas D J et al. *Astrophys. J.* **943** 71 (2023)
109. Malandraki O E et al. *Phys. Plasmas* **30** 050501 (2023)
110. Yang L et al. *Astron. Astrophys.* **686** A132 (2024)
111. McComas D J et al. *Nature* **576** 223 (2019)
112. Chi Y et al. *Astrophys. J. Lett.* **975** L25 (2024)
113. Interstellar Mapping and Acceleration Probe (IMAP) mission at Princeton. Princeton Univ., <https://imap.princeton.edu/>
114. Space Weather Follow On L1 Mission. National Environmental Satellite, Data, and Information Service. National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://www.nesdis.noaa.gov/our-satellites/future-programs/swfo/space-weather-follow-l1-mission>
115. Adkins J. "NASA Awards Contracts for NOAA Coronagraph Instrument Phase A Study". May 01, 2023. NASA, <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-awards-contracts-for-noaa-coronagraph-instrument-phase-a-study/>
116. Fang C et al. *Aerospace Shanghai* **41** (3) 9 (2024) <https://doi.org/10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.03.002>; <https://www.researching.cn/articles/OJ63ddd4526d92f09>
117. "China to initiate 3D solar exploration as solar probing satellite Xihe-2 enters demonstration stage", Global Times, Sep. 15, 2023, <https://www.globaltimes.cn/page/202309/1298241.shtml>
118. Jones A. "China to send a spacecraft out of the ecliptic to study the Sun's poles", Space News, February 25, 2025, <https://spacenews.com/china-to-send-a-spacecraft-out-of-the-ecliptic-to-study-the-suns-poles/>
119. Paradiso R. "Xihe-2: the Sun and the Earth in a single glance", Space Voyaging, Sep. 21, 2023, <https://www.spacevoyaging.com/news/2023/09/21/xihe-2-the-sun-and-the-earth-in-a-single-glance/>
120. Kuznetsov V D et al. *Geomagn. Aeronomy* **56** 781 (2016)

Space-based and extra-atmospheric studies of the Sun

V.D. Kuznetsov

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences,
Kaluzhskoe shosse 4, 108840 Troitsk, Moscow, Russian Federation
E-mail: kvd@izmiran.ru

Studies in solar physics were in the sphere of the scientific interests of S.I. Syrovatsky covering a wide range of problems, and the goal of these studies was to obtain a unified picture of physical processes on the Sun. Observations from spacecraft provide more and more detailed information about the phenomena and processes occurring on the Sun, stimulating the construction of physical models and giving a deeper understanding of how the Sun is structured and how it works. An overview of space-based and extra-atmospheric studies of the Sun is given, covering all layers of the solar atmosphere from the convective zone and the photosphere to the solar corona and solar wind.

Keywords: Sun, space-based research, magnetic fields, flares, solar wind

PACS numbers: **07.87.+v, 96.60.-j**

Bibliography — 120 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **195** (8) 858–874 (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039920>

Received 30 June 2025

Physics – *Uspekhi* **68** (8) (2025)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2025.03.039920>