

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 75-ЛЕТИЮ ИЗМИРАН

Достижения и перспективы космических исследований Солнца

В.Д. Кузнецов

Наблюдения Солнца с космических аппаратов дают новую информацию о структуре и динамике недр Солнца и его атмосфере. Приводятся результаты исследований подфотосферной конвекции и меридиональных течений на Солнце, результаты моделирования солнечного динамика и изменений магнитных полей в солнечном цикле, полученные с использованием данных гелиосейсмических и магнитных наблюдений прибором HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) обсерватории SDO (Solar Dynamic Observatory). Наблюдения солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением (SOHO, Hinode, SDO, IRIS, Hi-C, EUNIS и др.) позволили детально изучить динамику магнитных полей и их тонкую структуру, процессы выделения энергии во вспышках и возникновения выбросов массы. Даётся краткий обзор перспективных солнечных космических проектов, направленных на решение актуальных задач физики Солнца.

Ключевые слова: Солнце, космические исследования, магнитные поля, динамика, вспышки, выбросы массы

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

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201506k.0664

Содержание

1. Введение (664).
2. Последние достижения космических исследований Солнца (665).
3. Перспективы космических исследований Солнца (669).
4. Заключение (671).

Список литературы (672).

1. Введение

Космические исследования сегодня вносят определяющий вклад в изучение Солнца — в получение ключевых наблюдательных данных и в объяснение того, как устроено Солнце и как оно работает. Целый ряд проблем физики Солнца, охватывающих область от его недр до границ Солнечной системы, по-прежнему остаётся в центре внимания исследователей и является предметом научных программ солнечных космических миссий, действующих и планируемых.

За последние годы наиболее значимый прогресс в гелиофизике достигнут именно благодаря космическим исследованиям (см., например, [1–4]). Космические наблюдения Солнца и локальные гелиосферные измерения современных солнечных миссий направлены на изучение внутреннего строения Солнца; механизма солнечного динамика и солнечного цикла (выяснение вопросов о том,

почему меняется и чем определяется амплитуда и длительность циклов); тонкой структуры и динамики солнечной атмосферы (микро- и нановспышки, жгутовая структура магнитного поля); на объяснение триггерных механизмов инициирования солнечных вспышек и выбросов массы (выяснения, какие движения и процессы приводят к взрывному выделению энергии и эruption магнитных структур); механизмов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра; механизмов ускорения частиц и их распространения в гелиосфере. Помимо этих фундаментальных вопросов солнечной астрофизики, сегодня всё возрастающее значение с практической точки зрения приобретает изучение влияющей на различные сферы человеческой деятельности на Земле и в космосе [5–9] космической погоды, основным источником изменения которой являются Солнце и его активность [5, 10].

В таблице представлены солнечные и гелиосферные космические проекты, как уже реализованные (завершённые или действующие сейчас), так и готовящиеся к реализации или находящиеся пока в стадии разработки. На рисунке 1 показаны действующие и перспективные солнечные космические проекты в привязке к их орбитам.

Исходя из необходимости решения конкретных научных задач физики Солнца и имеющегося набора апробированных и вновь создаваемых научных инструментов концепция современных солнечных миссий предполагает использование космических аппаратов (КА) на околоземных орbitах, как правило, с большими телескопами для наблюдений солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением и КА, помещаемых в выгодные для наблюдений точки (либрационная точка L1, гелиоцентрические орбиты с приближением к Солнцу, с расположением КА сбоку от линии Солнце–Земля, с наклонением к плоскости эклиптики для наблюдений приполярных областей Солнца и т.д.).

В.Д. Кузнецов. Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калужское шоссе 4, 142190 Троицк, Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 851-01-20
Факс (495) 851-01-24
E-mail: kvd@izmiran.ru

Статья поступила 18 апреля 2015 г.

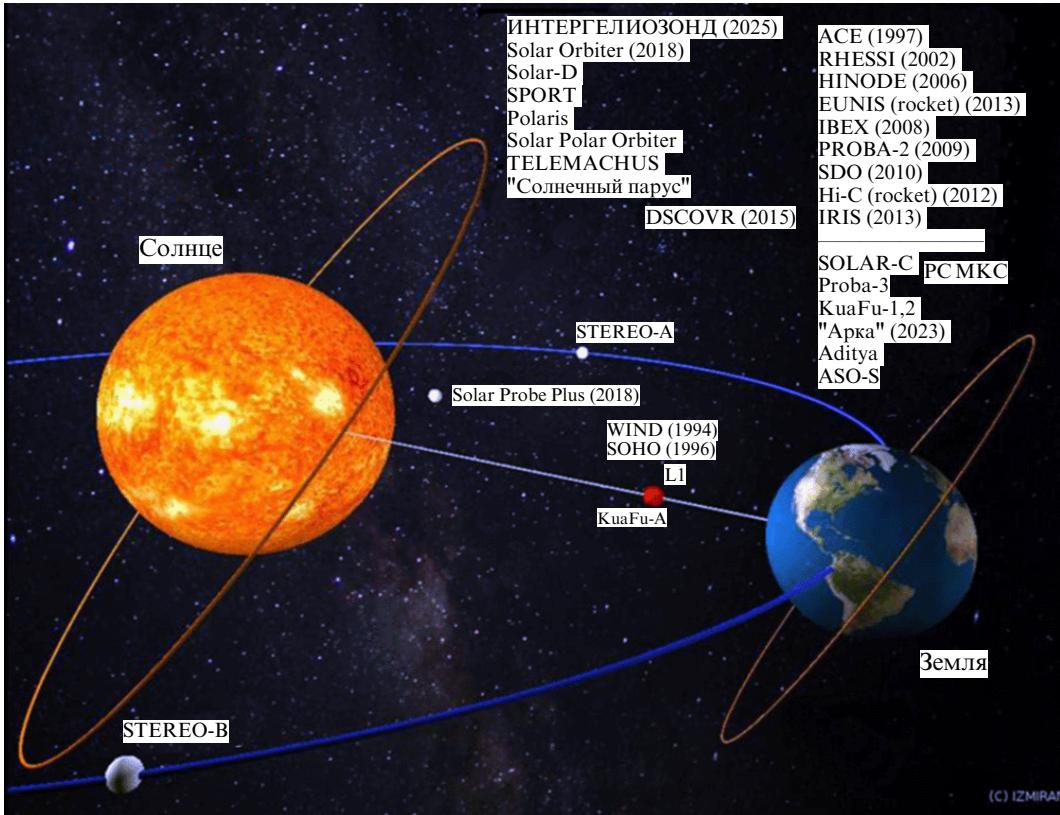


Рис. 1. Действующие и будущие солнечные и гелиосферные миссии (см. таблицу) и их орбитальное расположение (на геоцентрических и гелиоцентрических орбитах).

Таблица. Основные солнечно-гелиосферные космические проекты последних лет*

Стадия реализации	Проект
Завершённые	Yohkoh (1991–2001), КОРОНАС-И (1994–2001), Ulysses (1990–2009), TRACE (1998–2010), КОРОНАС-Ф (2001–2005), КОРОНАС-Фотон (2009–2010), Hi-C (2012), EUNIS (2013)
Действующие	Voyager-1, -2 (1977), Wind (1994), SOHO (1996), ACE (1997), RHESSI (2002), Hinode (2006), STEREO (2006), IBEX (2008), Proba-2 (2009), SDO (2010), IRIS (2013), DSCOVR (2015)
Готовящиеся к реализации	Proba-3 (2017), Solar Probe Plus (2018), Solar Orbiter (2018), "Интергелиозонд" (2025), "Арка" (2023), "Кортес" (PC MKC) (2018), "Taxomag" (PC MKC) (2020)
Разрабатываемые	POLARIS, Solar Polar Orbiter, SpoRT, Solar-C, Solar-D, KuaFu, ASO-S, Aditya-1, Telemachus, "Солнечный парус", "Солнце-Терагерц" (PC MKC)

* В скобках указаны периоды работы завершённых миссий и годы запуска действующих и готовящихся миссий. TRACE — Transition Region And Coronal Explorer, ACE — Advanced Composition Explorer, RHESSI — Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, STEREO — Solar-TERrestrial RElations Observatory, IBEX — Interstellar Boundary Explorer, DSCOVR — Deep Space Climate Observatory, PC MKC — Российский сегмент (PC) Международной космической станции (МКС). Расшифровка остальных аббревиатур дана в тексте.

2. Последние достижения космических исследований Солнца

Достижения в области космических исследований Солнца последних лет представлены в обзорах [1–3]. В работе [4] изложены результаты космического проекта КОРОНАС-Ф¹. Из действующих солнечных космических проектов большой поток новых наблюдательных данных и научных результатов даёт сегодня прибор HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) миссии SDO (Solar Dynamic Observatory), предназначенный для изучения

магнитных полей, фотосферных и подфотосферных течений [1].

Природа солнечного цикла связана с действием солнечного магнитного динамо, с генерацией дифференциальным вращением Солнца тороидального магнитного поля в конвективной зоне, с переносом полоидальных магнитных полей от экватора к полюсам меридиональной циркуляцией. Изучение свойств этих меняющихся и малоизученных движений на Солнце представляет одну из важнейших задач физики Солнца, решение которой позволит ответить на вопросы: почему солнечные циклы различны по длительности и амплитуде и можно ли предсказать по наблюдениям этих движений предстоящие циклы солнечной активности и их влияние на Землю.

¹ КОРОНАС — Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца.

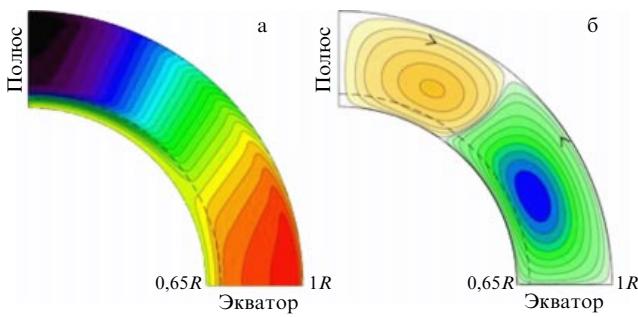


Рис. 2. (а) Картина дифференциального вращения подфотосферных слоёв Солнца [12]. Переход от светлого цвета к более тёмному соответствует увеличению угловой скорости вращения. (б) Картина меридиональной циркуляции, генерированная этим дифференциальным вращением и турбулентной вязкостью [13].

Теоретическое моделирование крупномасштабных движений на Солнце, ответственных за генерацию и перенос магнитных полей, опирается на гелиосейсмологические и магнитные наблюдения, которые сегодня обеспечиваются, в частности, прибором HMI/SDO.

На основе полученной по гелиосейсмологическим данным картины дифференциального вращения подфотосферных слоёв Солнца (рис. 2а) [12] в работе [13] в рамках магнитогидродинамической (МГД) модели рассчитана стационарная картина меридиональной циркуляции и установлено, что она сильно зависит от степени убывания плотности с уменьшением радиуса — содержит одну-единственную циркуляционную ячейку с направленным к полюсу течением по поверхности для уменьшения плотности менее чем примерно на четыре порядка от дна до верха конвективной зоны и две ячейки с обратной циркуляцией на высоких широтах (рис. 2б) для более сильного убывания плотности, в том числе в случае адиабатически стратифицированной солнечной конвективной зоны. Радиальная и широтная компоненты силы Кориолиса, вызывающие эту меридиональную циркуляцию, оказались очень сильными, так что ячейки охватывают всю глубину адиабатически стратифицированной конвективной зоны. Термодинамические эффекты не учитывались.

Сравнение расчётного и наблюдаемого значений скорости направленного к полюсу меридионального течения в основной ячейке показало их сильное различие. Для турбулентной вязкости (турбулентные напряжения Рейнольдса), характерной для солнечных условий, расчётное значение оказалось много больше наблюдаемого, что ставит вопросы перед теориями солнечной меридиональной циркуляции и указывает на необходимость учёта других, специфических для солнечной конвективной зоны, тормозящих меридиональное течение сил, в частности, обусловленных тепловыми условиями: отрицательной плавучестью, анизотропной мелкомасштабной турбулентной диффузией импульса и тепла, зависящим от широты радиальным тепловым потоком солнечной конвекции с учётом вращения Солнца.

Развитие используемой модели предполагает воспроизведение двух ячеек меридиональной циркуляции по глубине конвективной зоны [14] и четырёх ячеек по широте [15], а также изучение вопроса о том, возникает ли такая картина циркуляции кратковременно как транзитная или сохраняется длительно, на временной шкале в несколько десятков лет.

Несоответствие наблюдаемых методами гелиосейсмологии амплитуд конвективных скоростей на глубине $r/R_\odot = 0,96$ (R_\odot — радиус Солнца) результатам моделирования глобальной конвекции для тех же глубин конвективной зоны установлено в работе [16] на основе обработки огромного числа наблюдений волновых полей, полученных HMI/SDO. Подфотосферные течения нарушают симметрию распространения волн вдоль и против течения, что создаёт разницу во времени прохождения этими волнами одного и того же расстояния. С использованием статистики этих времён распространения волн были получены верхние ограничения ($< 1 \text{ м с}^{-1}$) на значения конвективных скоростей в недрах Солнца как функций глубины и степени сферических гармоник. Полученные сейсмологические ограничения на значения конвективных скоростей на глубинах $r/R_\odot = 0,96$ соответствуют экстраполяции наблюдаемых скоростей в глубь области крупномасштабных движений плазмы на уровне фотосферы Солнца ($\sim 8-20 \text{ м с}^{-1}$) [17] с учётом изменения плотности с глубиной.

Наблюдения низких по сравнению с модельными амплитуд конвективных скоростей ($\sim 10 \text{ м с}^{-1}$) ставят под сомнение наше сегодняшнее представление о тепловом переносе и переносе углового момента на Солнце — возникают вопросы: как поддерживаются дифференциальное вращение и меридиональная циркуляция на Солнце и как солнечное излучение переносится вовне через конвективную зону? Необъяснённым остаётся фотосферный конвективный спектр, который показывает падение мощности для сферических гармоник со степенями $L < 120$, а для сферических гармоник с очень низкими степенями мощность убывает линейно с уменьшением L . Причина стремления мощности к нулю на самых больших масштабах не совсем понятна.

В работе [18] выполнено численное моделирование пика мощности для масштабов супергрануляции и последующего убывания в спектре мощности поверхности конвекции при низких L . В противоположность наблюдательным данным было установлено, что мощность должна аккумулироваться при низких L , в результате чего сделано заключение о том, что Солнце переносит энергию через конвективную зону при поддержании крупномасштабных движений с очень низкой амплитудой, таким образом, современные теоретические представления о солнечной конвекции под фотосферой нуждаются в уточнении.

В работе [19] с использованием численного кода EULAG (Eulerian/semi-Lagrangian fluid solver) выполнено численное моделирование глобальной модели солнечного и звёздного динамика, основанной на системе МГД-уравнений в сферической геометрии с соответствующими граничными условиями. Установлено, что формирование установившихся течений зависит от тонкого баланса между силами плавучести и силами Кориолиса, который определяется безразмерным числом Россби. Для больших чисел Россби (преобладание конвективных движений) профиль дифференциального вращения является антисолнечным — полюсы вращаются быстрее экватора. Коллективное действие мелкомасштабных движений в меридиональном направлении создаёт в этом случае вращающуюся против часовой стрелки когерентную меридиональную циркуляцию в северной полусфере (в южной полусфере вращение происходит по часовой стрелке). Эти циркуляционные ячейки переносят угловой момент в направлении более высоких широт. Для малых чисел Россби (преобладание вращения) экватор вращается быстрее полюсов, как это на-

блюдается на Солнце. При этом меридиональное течение имеет сложную многоячеистую структуру, что соответствует гелиосейсмическим наблюдениям [14, 20].

Уменьшение угловой скорости в верхней части конвективной зоны (называемой околоповерхностным сдвиговым слоем) может происходить из-за того, что поверхностные движения — грануляция и супергрануляция — эволюционируют на характерных временах, намного меньших характерных времён для вращения [19]. Направленная к полюсам миграция, наблюдавшаяся в течении плазмы на всех широтах, может быть следствием этого отрицательного поверхностного сдвига благодаря механизму гирокосмической накачки.

Решения в случае крупномасштабного динамика описывают торoidalное наматывание поля обратной полярности в области экватора для моделей с преобладанием конвекции над вращением, а также магнитные циклы с различными конфигурациями поля и периодами для моделей с преобладанием вращения [21]. Модели, отвечающие солнечным условиям, весьма хорошо воспроизводят широтное дифференциальное вращение и тахоклин, однако контуры изолиний вращения имеют цилиндрическую вытянутость, в то время как на Солнце они обладают конической формой. Хотя до сих пор отсутствует модель, способная в полной мере воспроизвести все наблюдавшиеся детали солнечного динамика, результаты проведённых вычислений для глобальных моделей динамика являются обнадёживающими и позволяют надеяться на адекватное описание недр Солнца и звёзд в рамках используемого подхода.

По данным прибора HMI/SDO в начале 2014 г. обнаружена медленная смена знака асимметричного в направлении север–юг полярного магнитного поля [22]. Для анализа процесса смены знака использованы данные наблюдений вдоль луча зрения на протяжении 24-го цикла солнечной активности. Для каждой магнитограммы рассчитывались средние радиальные поля в различных широтных интервалах при предположении, что все векторы поля являются радиальными, и проводилось взвешенное усреднение по площади для оценки среднего поля. Анализ показал, что магнитная активность, характеризующаяся числом солнечных пятен (SunSpot Number, SSN), была низкой и симметричной относительно Северного и Южного полушарий. Максимальное полусферное значение SSN составило около 60 % относительно такового в 23-м цикле, и для северной полусфера оно было достигнуто почти на два года раньше, чем для южной. Полярные магнитные поля также симметричны. Смены знака в Северном и Южном полушарии произошли в ноябре 2012 г. и марте 2014 г. соответственно, т.е. с интервалом около 16 месяцев.

Асимметрия явно была связана с направленным к полюсу асимметричным магнитным потоком сёрджей (от англ. surge — выброс), который был остаточным магнитным потоком активной области. Отдельные сёрджи имели обе полярности, что связано с изменяющимся углом наклона биполярных петель в активных областях. В результате гелиосейсмологических наблюдений [23] установлена заметная антикорреляция между средним полем этих сёрджей и скоростью приповерхностного меридионального течения на средних широтах, т.е. направленное к полюсу течение обычно является более медленным, когда магнитное поле сёрджа имеет ведомую полярность солнечного пятна, и более быстрым в противоположном случае. Показано, что рассматриваемая характерная зависимость может быть объяснена в рамках модели поверхностного переноса

магнитного потока (Surface Flux Transport, SFT) [24], если иметь в виду наблюдаемый, зависящий от магнитного поля поток, сходящийся в направлении активных областей согласно закону Джоя [25]. Включение такого, основанного на наблюдениях, двумерного профиля меридионального течения может улучшить SFT-моделирование амплитуды цикла.

Данные Солнечной обсерватории им. Уилкокса (Willcox Solar Observatory) указывают на то, что произошедшая смена знака магнитного поля Солнца оказалась самой медленной на протяжении последних трёх циклов солнечной активности. Восстановление магнитного поля нового солнечного цикла также является медленным. Северное полушарие показало многочисленные изменения знака магнитного поля вблизи широты 60°, северное полярное магнитное поле остаётся близким к нулю даже спустя два года после момента смены знака. Поскольку максимум полярного поля является хорошим индикатором амплитуды следующего солнечного цикла [26], при сохранении наблюданного тренда 25-й цикл может оказаться очень слабым.

По данным приборов AIA/SDO² и HMI/SDO изучена закрученность магнитных полей солнечных пятен [27]. В некоторых пятнах магнитное поле закручено таким образом, что оно схоже со спиральной структурой, соответствующей вращению против часовой стрелки. Выше в солнечной атмосфере магнитные поля солнечного пятна видны как совокупность магнитных структур, которые обычно закручены во всех направлениях. Если в хромосфере и короне направление закрученности ясно видно, то на высотах фотосферы и ниже солнечной поверхности прямых наблюдений закрученности нет. При прохождении активных областей по диску картина закрученности солнечных пятен сохраняется.

Для определения закрученности магнитного поля на фотосферном уровне — пространственно усреднённого характерного угла закрутки (Spatially Averaged Signed Shear Angle, SASSA) — были использованы векторные магнитограммы прибора HMI/SDO [28]. Для активной области (Active Region, AR) AR 11092 этот параметр имел отрицательные значения, соответствующие закрутке против часовой стрелки, видимой в более высоких слоях солнечной атмосферы. Ниже солнечной поверхности закрутка магнитного поля была оценена по закрутке подповерхностного течения на основе анализа круговых диаграмм, применённых к доплерограммам прибора HMI/SDO.

В качестве меры закрученности в этих течениях была принята рассчитанная плотность кинетической спиральности [29]. Закрученность в нижних слоях солнечной атмосферы, определённая по методу SASSA, имела для активной области NOAA³ AR 11092 то же направление, что и видимая закрученность выше в солнечной атмосфере. Однако под поверхностью закрученность была направлена противоположно, о чём свидетельствует положительная плотность кинетической спиральности. Другое солнечное пятно с закрученностью по часовой стрелке (AR 11084) показало такой же результат — различные знаки закрученности под и над солнечной поверхностью.

В контролльном эксперименте с шестью солнечными пятнами без устойчивой спиральной структуры направ-

² AIA — Atmospheric Imaging Assembly.

³ National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований США.

ление закрученности магнитного поля в солнечной атмосфере для четырёх из шести активных областей совпадало с направлением течений под солнечной поверхностью. Для активных областей без спиральности солнечных пятен всегда наблюдалось одно и то же правило полусфер для их как кинетической, так и токовой спиральности: наличие положительных значений в южной полусфере и отрицательных — в северной. Это означает, что противоположные направления закрученности над и под солнечной поверхностью на самом деле являются характеристикой активных областей с закруткой магнитного поля. Наблюдения и анализ большего числа активных областей позволяют проверить установленные особенности спиральной структуры солнечных пятен.

Детальные карты фотосферных магнитных полей, получаемые по наблюдениям прибора HMI/SDO, в совокупности с теоретическим моделированием позволяют провести детальное изучение магнитных полей в солнечной атмосфере и установить их роль в инициировании вспышек и выбросов массы. В работе [30] на основе анализа изменений фотосферного магнитного поля по данным прибора HMI/SDO изучены процессы высвобождения энергии во вспышках и их проявление в изменении магнитного поля. Изменение коронального магнитного поля рассчитывалось на основе метода NLFFF (NonLinear Force-Free Field modeling). Происходившая во вспышках трёхмерная перестройка магнитного поля активной области согласуется со сценарием корональной имплозии (направленного внутрь взрыва) в нижней атмосфере. Понятие "имплозия" в корональных транзиентах предполагает направленное внутрь сжатие коронального магнитного поля, которое должно происходить одновременно с высвобождением магнитной энергии [31].

Прямыми следствием корональных имплозий должно быть образование более близкой к горизонтальной конфигурации фотосферного магнитного поля. Это подтверждается тем, что, как установлено, поперечное магнитное поле вокруг линии инверсии (Polarity Inversion Line, PIL) магнитной полярности в центре вспыхивающей области часто проявляет быстрые и устойчивые повышения непосредственно после вспышек и выбросов массы [32]. По-видимому, такой направленный внутрь коллапс центрального магнитного поля может сопровождаться направленным вверх поворотом периферийного магнитного поля в активной области, а также распадом полути пятна во внешних частях вспыхивающей области, что наблюдается [33]. Процесс имплозии может иметь многочисленные воздействия на нижнюю солнечную атмосферу, которые пока ещё недостаточно исследованы.

Корональная имплозия наблюдалась и была изучена на примере гомологических вспышек класса X2.1 6 сентября 2011 г. и класса X1.8 7 сентября 2011 г. в AR NOAA 11283. Обе вспышки произошли около PIL с высоким сдвигом, вдоль которой вспышки обычно и происходят, при этом чётко наблюдалось ступенчатое возрастание (соответственно 26 % и 38 %) горизонтального поля B_h .

Более интересным является то, что центральная часть повышения B_h была окружена кольцеподобной областью с уменьшенным значением B_h , которая в значительной степени соответствовала периферийной области полути и была более выраженной на северной стороне.

Для описания внутренней эволюции было также определено расстояние между центрами тяжести противоположных магнитных полярностей. Результат показал

явное уменьшение этого расстояния на 0,85 Мм и 1,4 Мм непосредственно после вспышек X2.1 и X1.8 соответственно для короткого интервала времени, перед тем как тренд долговременной эволюции был восстановлен. Предполагается, что это могло быть поверхностным проявлением корональной имплозии. С использованием метода NLFFF было также установлено, что вспышка X1.8, в отличие от X2.1, могла быть связана с лучше сформированным скрученным жгутом, что отражается в наличии более толстого волокна. Из наблюдений эволюции жгута установлено следующее:

- 1) жгут коллапсировал в направлении к поверхности после вспышки X2.1, затем постепенно поднимался в течение одних суток до больших высот и коллапсировал снова после вспышки X1.8. Как амплитуда движения, так и скорость падающего движения жгута во вспышке X1.8 были в два раза больше, чем во вспышке X2.1, указывая на более сильную имплозию и соответствие с более значительными изменениями фотосферного магнитного поля (повышение B_h и уменьшение расстояния между центрами тяжести магнитных полярностей);

- 2) перед вспышкой X2.1 жгут находился на уровне фотосферы, а перед вспышкой X1.8 он был уже приподнят над поверхностью. Эruption жгута, таким образом, может происходить несколько раз, вплоть до наступления полной его эruptionи, при которой жгут отделяется от поверхности и уходит в межпланетное пространство;

- 3) жгут не был симметричным в его центральном вертикальном поперечном сечении, а утончался в направлении на север под углом 66° относительно поверхности. Вместе с окружающими полями жгуты быстро поворачивались в направлении на юг после обоих вспышек, вызывая уменьшение B_h в периферийных областях на поверхности.

Таким образом, полученные наблюдательные и модельные результаты описывают последовательную картину имплозии в нижней короне, в которой центральное магнитное поле магнитной конфигурации коллапсирует в направлении фотосферы, в то время как периферийное поле релаксирует к более вертикальной конфигурации. Проявление имплозии на уровне фотосферы состояло в том, что расстояние между центрами тяжести основных магнитных полярностей противоположного знака также уменьшалось. Изменения магнитного поля происходят более резко, когда процесс имплозии связан с полной эruptionью жгута.

В работе [34] с использованием данных спутника Hinode по магнитному полю на поверхности Солнца, наблюдений SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) и Парижской обсерватории, а также теоретического моделирования детально изучено инициирование выброса массы (Coronal Mass Ejection, CME), наблюдавшегося обсерваторией SDO 14 октября 2012 г. В данном событии сценарий развития выброса массы был связан с существованием в активной области жгута магнитного поля и его последующей эволюцией. За четверо суток до выброса наблюдались накопление магнитной энергии и признаки всплыvаний магнитных потоков. Магнитный жгут, который сформировался только в последний день, имел достаточно запасённой магнитной энергии, чтобы инициировать выброс массы, для этого было достаточно небольшого внешнего возмущения.

По магнитным данным активной области рассчитано критическое значение запасённой жгутом энергии, при превышении которого магнитный жгут может потерять равновесие и произвести выброс массы. Равновесие

магнитного жгута нарушается также при достижении им критической высоты при подъёме в солнечной атмосфере. Изученные признаки инициирования выбросов массы в виде магнитных жгутов могут быть использованы в наблюдениях для предсказания их возникновения.

Обзор некоторых других результатов, полученных с помощью HMI/SDO, приведён в [1].

Наблюдения солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением направлены на изучение переноса энергии в корону и солнечный ветер и объяснение механизмов нагрева короны и ускорения солнечного ветра. Такие наблюдения проводятся с помощью ультрафиолетового (УФ) многоканального телескопа-спектрографа IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph) в эмиссионных линиях переходной области с пространственным разрешением 1/3 угловой секунды (пространственный масштаб 240 км на Солнце) и временным разрешением 1 с. Первые наблюдения позволили обнаружить сложную структуру магнитных полей в виде множества тонких магнитных нитей с большим разбросом в них плотностей и температур, а также быстро вспыхивающие и гаснущие вспышки, отражающие мелкомасштабные выделения энергии в солнечной атмосфере [35]. Наблюдения спектрографом IRIS позволяют, кроме того, изучить различные типы нетепловой энергии, которые могут иметь место в хромосфере и вне её, перенос массы и энергии в корону и гелиосферу, процессы всплыивания магнитных потоков и установить их роль в инициировании вспышек и выбросов массы.

Наблюдения солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением были выполнены также в ракетных экспериментах Hi-C (High Resolution Coronal Imager) и EUNIS (Extreme Ultraviolet Normal Incidence Spectrograph) во время кратковременного полёта за пределами атмосферы. Наблюдения телескопом Hi-C на длине волн 19,3 нм УФ-диапазона с пространственным разрешением в 150 км на солнечной поверхности также показали наличие в солнечной атмосфере тонких магнитных жгутов — скрученных и переплетённых магнитных трубок, многочисленных магнитных микропетель. Мощные вспышки УФ-излучения, которые группировались вдоль силовых линий магнитного поля, имели характерные размеры до 700 км, длительность свечения до 25 с и энергию порядка 10^{31} эрг, что обеспечивает достаточный для нагрева короны энергетический поток [36–39].

Внеатмосферные ракетные наблюдения высокочувствительным спектрографом EUNIS (в линии Fe XIX $\lambda = 592,2 \text{ \AA}$, образующейся при температуре $T \approx 8,9 \text{ MK}$) также показали важность вклада многочисленных мелкомасштабных импульсных энерговыделений в солнечной атмосфере — нановспышек — в нагрев солнечной короны [40].

3. Перспективы космических исследований Солнца

Перспективные солнечные космические проекты направлены на решение целого спектра научных задач физики Солнца — от определения строения и динамики солнечных недр, ответственных за генерацию магнитных полей на Солнце и солнечный цикл, до изучения нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра вследствие выделения и переноса энергии в солнечной атмосфере от её внутренних слоёв во внешние. Солнечные вспышки, выбросы массы и ускорения частиц являются различными формами и проявлениями такого выделения

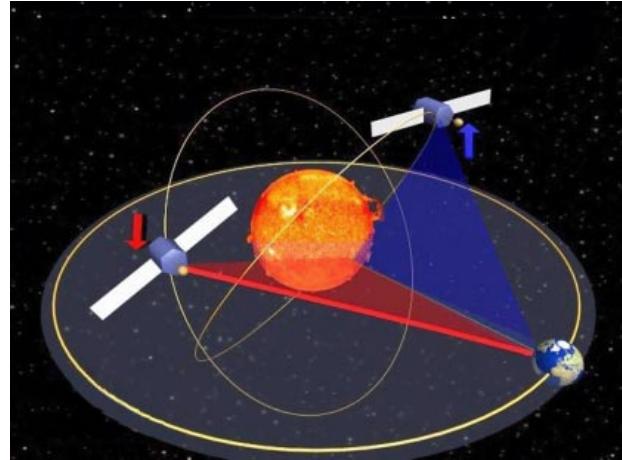


Рис. 3. Баллистическая схема проекта "Интергелиозонд" для исследований внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений.

энергии, и их механизмы также являются предметом исследований в готовящихся и планируемых солнечных космических миссиях и экспериментах (см. таблицу и рис. 1).

Наблюдения Солнца из внеэклиптических положений имеют целый ряд преимуществ, связанных с возможностью изучать приполярные области Солнца, гелиоширотную структуру эклиптической короны и выбросов массы, их гелиодолготную направленность при распространении к Земле, гелиодолготную зависимость солнечной светимости, осуществлять контроль за солнечными источниками космической погоды и т.д. В стадии подготовки находятся проекты Solar Orbiter (ESA⁴) [41] и "Интергелиозонд" (Роскосмос) [42], в которых космические аппараты будут сближаться с Солнцем до расстояний в $60–70 R_{\odot}$, находясь на гелиоцентрических, наклонённых (около 32°) к плоскости эклиптики орbitах, сформированных в результате многократных гравитационных манёвров у Венеры.

В проекте "Интергелиозонд" предполагается использовать два КА (рис. 3), разделённых по орбитальной фазе на четверть периода, для обеспечения непрерывных внеэклиптических наблюдений Солнца и его приполярных областей.

Основные задачи этих проектов связаны с исследованием полярных и экваториальных областей из внеэклиптических положений — изучением полярных магнитных полей, движений плазмы и солнечного динамо, эклиптической короны и гелиоширотной структуры выбросов массы, механизмов нагрева короны и ускорения солнечного ветра, триггерных механизмов вспышек и выбросов массы, механизмов ускорения частиц на Солнце и в гелиосфере, источников солнечного ветра на Солнце и связи солнечных транзиентных явлений с изменениями гелиосферы. Состав приборов включает в себя два основных блока: приборы дистанционных наблюдений атмосферы Солнца (магнитограф, рентгеновские телескопы и спектрометры, коронограф, гелиосферный телескоп) и приборы для локальных гелиосферных измерений основных параметров среды (детектор ионов и электронов солнечного ветра, детектор плазмы солнечного ветра и пыли, радиочастотный и плазменно-волно-

⁴ European Space Agency — Европейское космическое агентство.

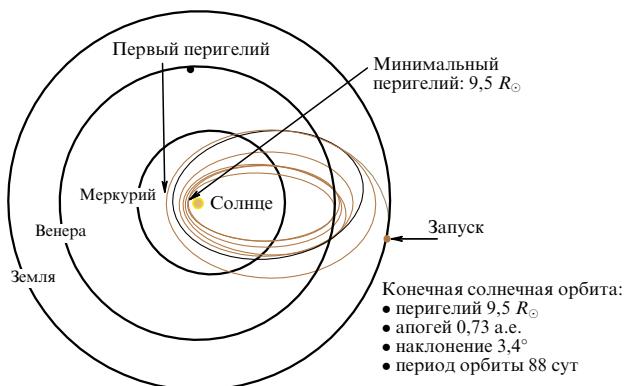


Рис. 4. Баллистическая схема сближения КА Solar Probe Plus с Солнцем с использованием многократных гравитационных маневров у Венеры (NASA).

вой комплекс, магнитометр, детектор энергичных частиц).

Баллистическая схема сближения КА с Солнцем посредством многократных гравитационных манёвров у Венеры (рис. 4) применена также в проекте NASA⁵ Solar Probe Plus [43] для достижения сближения на расстояние в $9,5 R_{\odot}$ при движении по орбите вблизи плоскости эклиптики. Ставятся задачи: в результате наблюдений и измерений вблизи Солнца определить процессы ускорения и источники быстрого и медленного солнечного ветра в максимуме и минимуме солнечной активности; установить источники и потоки энергии, которые нагревают корону; соотнести механизмы ускорения и источники энергичных частиц, оценить роль плазменной турбулентности и пылевой плазмы в генерации солнечного ветра и энергичных частиц. Комплекс научной аппаратуры включает в себя приборы для локальных измерений (быстрый ионный анализатор, два быстрых электронных анализатора, анализатор ионного состава, прибор для регистрации энергичных частиц, магнитометр, плазменно-волновой прибор, гамма-нейтронный спектрометр, пылевой детектор) и гелиосферный телескоп белого света для наблюдений солнечной короны.

В стадии разработки находится проект Solar-D (Plan A, JAXA⁶) [44] — внеклиптическая миссия с небольшим КА, на борту которого предполагается разместить доплеровский вектор-магнитограф, рентгеновский и ультрафиолетовый телескоп, монитор общего потока излучения Солнца, приборы для локальных измерений. Гелиоцентрическая наклонная орбита с периодом в один год будет синхронизирована с вращением Земли.

В проекте NASA Telemachus [45] предполагается поместить КА на гелиоцентрическую полярную орбиту с перигелием/апогеем $0,2 \times 2,5$ астрономических единиц (а.е.) с использованием гравитационного манёвра у Венеры, дважды у Земли и у Юпитера. С периодом 1,5 года КА будет проходить над солнечными полюсами на расстоянии 0,37 а.е. Проект направлен на изучение солнечных полярных течений и их роли в переносе солнеч-

ных магнитных полей, а также на прослеживание цепочки явлений — от генерации магнитного поля динамомеханизмом до образования активных областей, возникновения выбросов корональной массы, генерации солнечного ветра, возникновения вспышек, ускорения энергичных частиц и в конечном счёте динамики внутренней гелиосферы. Комплекс научной аппаратуры проекта включает в себя приборы дистанционных наблюдений: доплеровский магнитограф, рентгеновский спектрометр, гелиосферный телескоп, коронограф белого света, а также приборы локальных измерений: магнитометр, анализатор состава плазмы, анализатор ускоренной плазмы, детектор энергичных частиц, телескоп космических лучей, анализатор волн.

Для достижения гелиоцентрических орбит с более высоким наклонением к плоскости эклиптики (около 75°) с целью проведения гелиосеймологических и магнитных наблюдений полярных областей Солнца и картины распространения возмущений от Солнца в плоскости эклиптики разрабатываются проекты с использованием технологии солнечного паруса: POLARIS (POLAR Investigation of the Sun) (NASA) [46], Solar Polar Orbiter [47] и Solar Polar Imager (ESA) [48], "Солнечный парус" (Роскосмос) (рис. 5). В этих проектах в качестве основных целей ставятся исследования полярных магнитных полей, поверхностных и подфотосферных движений, ответственных за динамо и солнечный цикл; полярной короны, гелиодолготной и трёхмерной структуры короны и выбросов массы; солнечной радиации как функции гелиошироты; свойств полярного солнечного ветра и энергичных частиц и их связи с корональными структурами.

Несколько солнечных космических проектов разрабатывается в Китае. Проект KuaFu [49] направлен на исследования физических процессов, ответственных за космическую погоду. Два КА (KuaFu-B1 и B2) предполагается разместить на околоземной полярной орбите с близкими наборами приборов для исследований магнитных бурь и полярных сияний, и один КА (KuaFu-A) с соответствующим набором приборов — перед магнитосферой в либрационной точке L1 для наблюдений Солнца и регистрации потоков солнечного ветра и идущих к Земле возмущений. Проект ASO-S (Advanced Space-based Observatory Solar) [50] разрабатывается для изучения солнечных магнитных полей, вспышек, выбросов массы и связи между ними. Основные приборы:

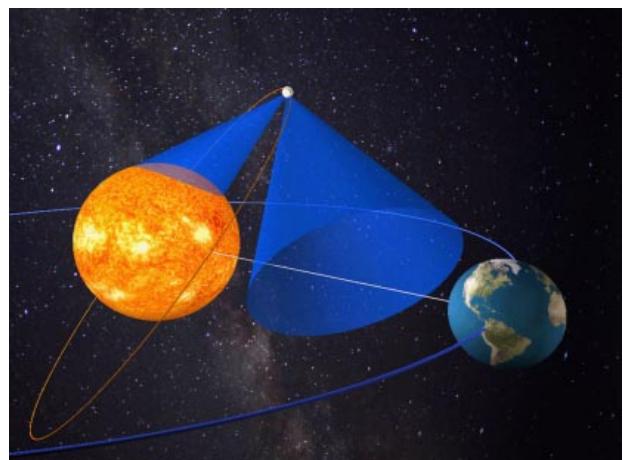


Рис. 5. Перспективный проект "Солнечный парус" с высоким наклонением орбиты к плоскости эклиптики.

⁵ National Aeronautics and Space Administration — Национальное управление США по аэронавтике и исследованию космического пространства.

⁶ Japan Aerospace Exploration Agency — Японское космическое агентство.

вектор-магнитограф полного диска, оптический телескоп (L_α), телескоп жёсткого рентгеновского излучения. В разработанном проекте SPORT (Solar Polar ORbit Telescope) [51], который находится в стадии обсуждения его реализации, предполагается посредством гравитационного манёвра у Юпитера поместить КА на гелиоцентрическую внеэклптическую орбиту, аналогичную орбите КА Ulysses, для изучения солнечных магнитных полей на высоких широтах, высокоскоростного солнечного ветра и распространения выбросов массы от Солнца до Земли. Предполагаемый состав научной аппаратуры включает в себя телескоп крайнего ультрафиолетового диапазона (121,6 нм), магнитограф, коронограф, гелиосферный телескоп, радиотелескоп апертурного синтеза, анализатор солнечного ветра, магнитометр, детектор радиоволн и плазменных волн, детектор энергичных частиц.

В технологическом проекте Proba-3 (ESA) [52] два КА на высокоэллиптической орбите будут обеспечивать наблюдения внутренней солнечной короны, создавая космический коронограф — искусственное солнечное затмение, — на одном аппарате будет находиться телескоп, а другой будет играть роль затменного диска. Возможность достижения в космических условиях высокого пространственного разрешения и получения чётких изображений внутренней короны представляет интерес для изучения тонкой магнито-плазменной структуры внутренней короны, переноса массы и энергии, нагрева короны, формирования и ускорения солнечного ветра.

Исследования Солнца с околоземных орбит планируется провести в ряде проектов, в частности, в тех, которые будут реализованы на борту МКС. Проект "Арка" (Роскосмос) направлен на исследование мелко- и сверхмелкомасштабной (около 75 км) активности в переходной области (микро- и нановспышки, переходные процессы и нагрев короны, триггерные механизмы вспышек и выбросов массы) на основе рентгеновских наблюдений с высоким пространственным разрешением с помощью двух телескопов. КА проекта Solar-C (Plan-B, JAXA) [53] планируется к запуску на полярную солнечно-синхронную околоземную орбиту для изучения динамики хромосфера и переходной области на основе спектрскопических изображений с высоким временным и пространственным разрешением в ультрафиолетовом, жёстком ультрафиолетовом и оптическом диапазонах. Эти наблюдения будут направлены на изучение механизмов нагрева короны и ускорения быстрого солнечного ветра, на исследование фундаментальных плазменных процессов во внешней атмосфере Солнца: пересоединения, образования ударных волн, ускорения частиц и турбулентности.

В индийском космическом проекте Aditya-1 для исследований Солнца планируется использовать современный солнечный коронограф [54] как основной инструмент, а также УФ-телескоп, рентгеновский телескоп, детектор частиц солнечного ветра и спектрометр мягкого рентгеновского диапазона. Основные цели миссии — изучение корональных выбросов массы, солнечных магнитных структур, фундаментальных процессов, лежащих в основе нагрева солнечной короны.

На Российском сегменте МКС в стадии подготовки находятся космические эксперименты (КЭ) "Кортес" и "Тахомаг-МКС", в стадии разработки находится эксперимент "Солнце-Терагерц". КЭ "Кортес" направлен на исследование солнечной короны, эруптивных явлений, вспышек и предвспышечных условий, на отработку новой рентгеновской аппаратуры, в состав которой входят три телескопа крайнего ультрафиолетового ди-

пазона (195, 305 и 584 Å), три спектрографа (170–210 Å, 240–280 Å, 280–330 Å) и три прибора мягкого рентгеновского диапазона (0,5–15 кэВ) (камера-обскура, поляриметр и быстрый спектрограф). В КЭ "Тахомаг-МКС" будет осуществляться отработка космического вектор-магнитографа (6300 Å) и исследование структуры и динамика магнитных полей в фотосфере и хромосфере. КЭ "Солнце-Терагерц" направлен на регистрацию (восемь приёмников и фильтров в восьми частотных каналах в диапазоне 1–20 ТГц) и изучение обнаруженнего, но малоизученного терагерцевого излучения Солнца.

4. Заключение

Наблюдения с космических аппаратов сегодня вносят основной вклад в изучение Солнца и решение ключевых проблем солнечной физики. Действующие и недавно завершённые солнечные космические миссии и эксперименты обеспечивают исследователей большим и разнообразным набором новых данных, которые являются основой для теоретического анализа и моделирования солнечных явлений и физических процессов на Солнце.

Гелиосеймические и магнитные наблюдения прибором HMI обсерватории SDO позволили уточнить структуру и динамику подфотосферных конвективных движений и меридиональной циркуляции в виде дифференциального вращения, многочастотной структуры с глубиной и по гелиошироте, провести моделирование солнечного динамика на основе изученных течений и установить ограничения на теоретические модели и неизвестные пока более глубинные течения исходя из соответствия современных моделей наблюдательным данным и закономерностям солнечного цикла.

Наблюдения магнитного поля Солнца на протяжении 24-го солнечного цикла позволили зарегистрировать его переполосовку и сделать оценку предположительно малой амплитуды предстоящего 25-го солнечного цикла, важную для прогноза возмущённости околоземного космического пространства в ближайшем десятилетии.

Для изучения тонкой структуры солнечной атмосферы были выполнены и продолжаются наблюдения с высоким пространственным разрешением в целой серии солнечных миссий и экспериментов (SOHO, Hinode, SDO, IRIS, Hi-C, EUNIS и др.). Эти наблюдения, важные для понимания процессов нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, триггерных механизмов солнечных вспышек и выбросов массы, позволили установить особую роль скрученности солнечных магнитных полей в виде спиральных магнитных структур и магнитных жгутов, которая, как показали наблюдения и теоретический анализ, в ряде случаев играет ключевую роль в процессах выделения магнитной энергии во вспышках, в эруптивных явлениях и наблюдавшихся явлениях корональной импlosии.

Будущие солнечные космические миссии и эксперименты с использованием более совершенных приборов позволят наблюдать Солнце и проводить локальные измерения солнечного ветра, выбросов массы и энергичных частиц при нахождении КА на различных рабочих орбитах (см. рис. 1), каждая из которых выбрана и обоснована исходя из решаемых научных задач и ресурсных ограничений.

Космические аппараты на гелиоцентрических орбитах смогут проводить измерения вблизи Солнца из внеэклптических положений, а также на орбитах с высоким наклонением к плоскости эклиптики, используя техноло-

гию солнечного паруса, позволяющую достичь этих орбит за приемлемое время и одновременно обеспечить приемлемую стоимость проекта. В солнечных миссиях и экспериментах на околоземных орbitах, ориентирующихся на использование больших телескопов и возможностей Международной космической станции, солнечная атмосфера будет наблюдаваться с еще более высоким пространственным разрешением.

Анализ наблюдательных данных каждого солнечного эксперимента и совокупности всех данных с разных миссий позволит продвинуться в понимании того, как устроено и работает наше Солнце.

Список литературы

1. Kuznetsov V D *Adv. Space Res.* **55** 879 (2015)
2. Кузнецов В Д УФН **180** 988 (2010); Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 947 (2010)
3. Кузнецов В Д, в кн. *Пятьдесят лет космических исследований: по материалам междунар. форума "Космос: наука и проблемы XXI века, октябрь 2007 года, Москва* (Под ред. А В Захарова) (М.: Физматлит, 2009) с. 60
4. Кузнецов В Д (Ред.) *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (М.: Физматлит, 2009) с. 10; Kuznetsov V D (Ed.) *The CORONAS-F Space Mission. Key Results for Solar Terrestrial Physics* (New York: Springer, 2014)
5. Bothmer V, Daglis I A *Space Weather: Physics and Effects* (Berlin: Springer, 2007)
6. Кузнецов В Д УФН **182** 327 (2012); Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **55** 305 (2012)
7. Кузнецов В Д *Космическая техника и технологии* (3) 3 (2014)
8. Marov M Ya, Kuznetsov V D, in *Handbook of Cosmic Hazards and Planetary Defense* (Eds J N Pelton, F Allahdadi) (New York: Springer, 2015) p. 47
9. Кузнецов В Д, Махутов Н А *Вестник РАН* **82** 110 (2012); Kuznetsov V D, Makhutov N A *Herald Russ. Acad. Sci.* **82** 36 (2012)
10. Кузнецов В Д, в сб. *Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле: Труды Международной конф., 4–8 июня 2013 г.* Т. 1 (Под ред. А И Григорьева, Л М Зеленого) (М.: ИКИ РАН, 2013) с. 11
11. Scherrer P H et al. *Solar Phys.* **275** 207 (2012)
12. Corbard T, Thompson M J *Solar Phys.* **205** 211 (2002)
13. Dikpati M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **438** 2380 (2014)
14. Zhao J et al. *Astrophys. J.* **774** L29 (2013)
15. Schad A, Timmer J, Roth M *Astrophys. J.* **778** L38 (2013)
16. Hanasoge S M, Duvall T L (Jr.), Sreenivasan K R *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **109** 11928 (2012)
17. Hathaway D H, Upton L, Colegrove O *Science* **342** 1217 (2013)
18. Lord J W et al. *Astrophys. J.* **793** 24 (2014)
19. Guerrero G et al. *Astrophys. J.* **779** 176 (2013)
20. Schad A, Timmer J, Roth M *Astrophys. J.* **778** L38 (2013)
21. Ghizaru M, Charbonneau P, Smolarkiewicz P K *Astrophys. J.* **715** L133 (2010)
22. Sun X et al. *Astrophys. J.* **798** 114 (2015)
23. Zhao J, Kosovichev A G, Bogart R S *Astrophys. J.* **789** L7 (2014)
24. Wang Y-M, Nash A G, Sheeley N R (Jr.) *Science* **245** 712 (1989)
25. Gizon L, Duvall T L (Jr.), Larsen R M, in *Recent Insights into the Physics of the Sun and Heliosphere: Highlights from SOHO and Other Space Missions* (Proc. of IAU Symp., Vol. 203, Eds P Brekke, B Fleck, J B Gurman) (San Francisco, Calif.: Astronomical Society of the Pacific, 2001) p. 189
26. Svalgaard L, Cliver E W, Kamide Y *Geophys. Res. Lett.* **32** L01104 (2005)
27. Komm R, Gosain S, Pevtsov A *Solar Phys.* **289** 475 (2014)
28. Tiwari S K, Venkatakrishnan P, Sankarasubramanian K *Astrophys. J.* **702** L133 (2009)
29. Komm R et al. *Astrophys. J.* **605** 554 (2004)
30. Liu C et al. *Astrophys. J.* **795** 128 (2014)
31. Hudson H S *Astrophys. J.* **531** L75 (2000)
32. Wang H, Liu C *Astrophys. J.* **716** L195 (2010)
33. Liu C et al. *Astrophys. J.* **622** 722 (2005)
34. Amari T, Canou A, Aly J-J *Nature* **514** 465 (2014)
35. De Pontieu B et al. *Solar Phys.* **289** 2733 (2014)
36. Cirtain J W et al. *Nature* **493** 501 (2013)
37. Testa P et al. *Astrophys. J.* **770** L1 (2013)
38. Winebarger A R et al. *Astrophys. J.* **771** 21 (2013)
39. Peter H et al. *Astron. Astrophys.* **556** A104 (2013)
40. Brosius J W, Daw A N, Rabin D M *Astrophys. J.* **790** 112 (2014)
41. "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/#>
42. Кузнецов В Д, в сб. *Проект Интергелиоид. Труды рабочего совещания, Таруса, 11–13 мая 2011 г.* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: ИЗМИРАН, 2012) с. 5
43. "Solar Probe Plus: Report of the Science and Technology Definition Team", NASA/TM-2008-214161 (Greenbelt, MD: National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2008)
44. Tsuneta S "JAXA plan for solar and heliospheric observations", in *ILWS Tenth Anniversary Symp., Vienna, February 14, 2013*; http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/Documents/2013_ILWS10.pdf
45. Roelof E C et al. *Adv. Space Res.* **34** 467 (2004)
46. Appourchaux T et al. *Exp. Astron.* **23** 1079 (2009)
47. Tsuneta S et al. *J. Spacecraft Rockets* **43** 960 (2006)
48. Liewer P C et al., in *NASA Space Science Vision Missions* (Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 224, Ed. M S Allen) (Reston, Va.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008) p. 1
49. Tu C-Y et al. *Adv. Space Res.* **41** 190 (2008)
50. Gan W, in *40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, 2–10 August 2014*, Abstract D2.3-14-14
51. Wu J et al., in *ILWS Workshop. The Solar Influence on the Heliosphere and Earth's Environment: Recent Progress and Prospects February 19–24, 2006, Goa, India*
52. PROBA-3: Project for On-Board Autonomy-3, <https://directory.eoportal.org/web/epoportal/satellite-missions/p/proba-3>
53. Suematsu Y, SOLAR-C Working Group, in *1st SOLARNET–3rd EAST/ATST Meeting, Oslo, 5–8 Aug. 2013*; <http://folk.uio.no/matsc/oslo-13/suematsu.pdf>
54. Rao V K, in *61st Intern. Astronautical Congress 2010, IAC 2010. Proc. of a Meeting, 27 September–1 October 2010, Prague, Czech Republic* (Paris: Intern. Astronautical Federation, 2011) p. 398

Space solar research: achievements and prospects

V.D. Kuznetsov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences,
Kaluzhskoe shosse 4, 142190 Troitsk, Moscow, Russian Federation
Tel. + 7 (495) 851 01 20. Fax + 7 (495) 851 01 24. E-mail: kvd@izmiran.ru*

Space-based solar observations continue to provide new insights into the structure and dynamics of the Sun's interior and atmosphere. This paper uses helioseismic and magnetic data from the Helioseismic and Magnetic Imager of the Solar Dynamic Observatory (SDO) to present results on the Sun's subphotospheric and meridional flows and on the simulation of the solar dynamo and of the solar magnetic field variation. High spatial resolution observations of the solar atmosphere with SOHO, Hinode, SDO, IRIS, Hi-C, EUNIS, etc. provide detailed clues about the dynamics and fine structure of magnetic fields, flare energy release, and coronal mass ejections. Space projects with a promise to solve current solar physics problems are briefly reviewed.

Keywords: Sun, space research, magnetic fields, dynamo, flares, mass ejections

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

Bibliography — 54 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (6) 664–672 (2015)

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201506k.0664

Received 18 April 2015

Physics – Uspekhi **58** (6) (2015)