

купности экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что импульсный нагрев плазмы в "горячих точках" токового слоя является, по-видимому, наиболее вероятной причиной, вызывающей нарушение поперечного равновесия слоя, его разрушение и в конечном итоге высвобождение накопленной магнитной энергии [42]. Подчеркнём, что определяющая роль тепловых процессов, приводящих к разрушению токового слоя, аналогична роли "теплового триггера" солнечных вспышек, который рассматривался С.И. Сыроватским [43].

8. Заключение

Таким образом, результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что вспышечные явления в плазме могут быть реализованы на основе эволюции и динамики токовых слоёв, как это предсказывалось С.И. Сыроватским. Концентрация магнитной энергии в плазме происходит в окрестности метастабильного токового слоя, при его формировании как в двумерных, так и в трёхмерных неоднородных магнитных полях с особыми линиями X-типа. Быстрое разрушение токового слоя приводит к высвобождению накопленной магнитной энергии, которая трансформируется в тепловую энергию плазмы, энергию сверхтепловых направленных потоков плазмы и ускоренных частиц. Наиболее вероятной причиной прекращения метастабильной стадии эволюции слоя и начала импульсной фазы магнитного пересоединения являются, по-видимому, тепловые процессы, связанные с импульсным локальным нагревом плазмы.

В настоящее время целенаправленные экспериментальные исследования динамики токовых слоёв и магнитного пересоединения в плазме, начатые в 1970-е годы под влиянием идей С.И. Сыроватского, активно развиваются в целом ряде лабораторий, в различных странах (подробнее см. [44] и цитируемую там литературу).

Список литературы

1. Сыроватский С И *УФН* **62** 247 (1957)
2. Гинзбург В Л, Сыроватский С И *Происхождение космических лучей* (М.: Изд-во АН СССР, 1963) [Ginzburg V L, Syrovatskii S I *The Origin of Cosmic Rays* (Oxford: Pergamon Press, 1964)]
3. Сыроватский С И *Астрон. журн.* **43** 340 (1966) [Syrovatskii S I *Sov. Astron.* **10** 270 (1966)]
4. Сыроватский С И *ЖЭТФ* **50** 1133 (1966) [Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **23** 755 (1966)]
5. Сыроватский С И, Франк А Г, Ходжаев А З *ЖТФ* **43** 912 (1973) [Syrovatskii S I, Frank A G, Khodzhaev A Z *Sov. Phys. Tech. Phys.* **18** 580 (1973)]
6. Сыроватский С И, Франк А Г, Ходжаев А З *Письма в ЖЭТФ* **15** 138 (1972) [Syrovatskii S I, Frank A G, Khodzhaev A Z *JETP Lett.* **15** 94 (1972)]
7. Франк А Г, в сб. *Нейтральные токовые слои в плазме* (Труды ФИАН, Т. 74, Под ред. Н Г Басова) (М.: Наука, 1974) с. 108 [Frank A G, in *Neutral Current Sheets in Plasmas* (Proc. (Trudy) of the P N Lebedev Phys. Inst., Vol. 74, Ed. N G Basov) (New York: Consultant Bureau, 1976) p. 107]
8. Сыроватский С И *ЖЭТФ* **60** 1727 (1971) [Syrovatskii S I *Sov. Phys. JETP* **33** 933 (1971)]
9. Petchek H E, in *The Physics Solar Flares, Proc. of the AAS-NASA Symp., 28-30 October, 1963, Greenbelt, MD* (Ed. W N Hees) (Washington, DC: NASA, 1964) p. 425
10. Сыроватский С И, в сб. *Нейтральные токовые слои в плазме* (Труды ФИАН, Т. 74, Под ред. Н Г Басова) (М.: Наука, 1974) с. 3 [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: Consultant Bureau, 1976) p. 3]
11. Дрейден Г В и др. *Физика плазмы* **3** 45 (1977) [Dreiden G V et al. *Sov. J. Plasma Phys.* **3** 26 (1977)]
12. Кирий Н П и др. *Физика плазмы* **3** 538 (1977) [Kirii N P et al. *Sov. J. Plasma Phys.* **3** 303 (1977)]
13. Furth H P, Killeen J, Rosenbluth M N *Phys. Fluids* **6** 459 (1963)
14. Сыроватский С И *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **43** 695 (1979)
15. Syrovatskii S I *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **19** 163 (1981)
16. Rosenau P *Phys. Fluids* **22** 849 (1979)
17. Буланов С В, Ольшанецкий М А *Физика плазмы* **11** 727 (1985) [Bulanov S V, Olshanetskii M A *Sov. J. Plasma Phys.* **11** 425 (1985)]
18. Lau Y-T, Finn J M *Astrophys. J.* **350** 672 (1990)
19. Greene J M *Phys. Fluids B* **5** 2355 (1993)
20. Буланов С В, Франк А Г *Физика плазмы* **18** 1535 (1992) [Bulanov S V, Frank A G *Sov. J. Plasma Phys.* **18** 795 (1992)]
21. Богданов С Ю и др. *Письма в ЖЭТФ* **59** 510 (1994) [Bogdanov S Yu et al. *JETP Lett.* **59** 537 (1994)]
22. Frank A G *Plasma Phys. Control. Fusion* **41** (3A) A687 (1999)
23. Богданов С Ю и др. *Письма в ЖЭТФ* **71** 78 (2000) [Bogdanov S Yu et al. *JETP Lett.* **71** 53 (2000)]
24. Frank A G, Bogdanov S Yu *Earth Planets Space* **53** 531 (2001)
25. Богданов С Ю и др. *Физика плазмы* **33** 483 (2007) [Bogdanov S Yu et al. *Plasma Phys. Rep.* **33** 435 (2007)]
26. Frank A G et al. *Phys. Plasmas* **12** 052316 (2005)
27. Frank A, Bugrov S, Markov V *Phys. Lett. A* **373** 1460 (2009)
28. Воронов Г С и др. *Физика плазмы* **34** 1080 (2008) [Voronov G S et al. *Plasma Phys. Rep.* **34** 999 (2008)]
29. Frank A G et al. *Phys. Lett. A* **348** 318 (2006)
30. Frank A G, Bugrov S G, Markov V S *Phys. Plasmas* **15** 092102 (2008)
31. Сыроватский С И *Изв. АН СССР. Сер. физ.* **39** 359 (1975) [Syrovatskii S I *Bull. Acad. Sci. USSR Phys. Ser.* **39** (2) 96 (1975)]
32. Богданов С Ю и др. *Физика плазмы* **1** 133 (1975) [Bogdanov S Yu et al. *Sov. J. Plasma Phys.* **1** 71 (1975)]
33. Богданов С Ю, Марков В С, Франк А Г *Письма в ЖЭТФ* **35** 232 (1982) [Bogdanov S Yu, Markov V S, Frank A G *JETP Lett.* **35** 290 (1982)]
34. Bogdanov S Yu et al. *Phys. Scripta* **30** 282 (1984)
35. Богданов С Ю, Марков В С, Франк А Г *Письма в ЖЭТФ* **51** 563 (1990) [Bogdanov S Yu, Markov V S, Frank A G *JETP Lett.* **51** 638 (1990)]
36. Сыроватский С И *Вестник АН СССР* (10) 33 (1977)
37. Сыроватский С И *Природа* (2) 143 (1978)
38. Франк А Г, в сб. *Вопросы физики плазмы и плазменной электроники* (Труды ФИАН, Т. 160, Под ред. Л М Коврижных) (М.: Наука, 1985) с. 93 [Frank A G, in *Plasma Physics and Plasma Electronics* (Proc. (Trudy) of the P N Lebedev Phys. Inst., Vol. 160, Ed. L M Kovrizhnykh) (Commack, N.Y.: Nova Science Publ., 1989) p. 131]
39. Frank A G et al. *Contrib. Plasma Phys.* **36** 667 (1996)
40. Кирий Н П, Марков В С, Франк А Г *Письма в ЖЭТФ* **48** 419 (1988) [Kirii N P, Markov V S, Frank A G *JETP Lett.* **48** 459 (1988)]
41. Бейгман И Л и др. *Журн. прикл. спектроскопии* **54** 1021 (1991)
42. Кирий Н П, Марков В С, Франк А Г *Письма в ЖЭТФ* **56** 82 (1992) [Kirii N P, Markov V S, Frank A G *JETP Lett.* **56** 82 (1992)]
43. Сыроватский С И *Письма в Астрон. журн.* **2** 35 (1976) [Syrovatskii S I *Sov. Astron. Lett.* **2** 13 (1976)]
44. Yamada M, Kurlrud R, Ji H *Rev. Mod. Phys.* **82** 603 (2010)

PACS numbers: **07.87.+v**, **52.35.Vd**, **96.60.-j**
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201009i.0988

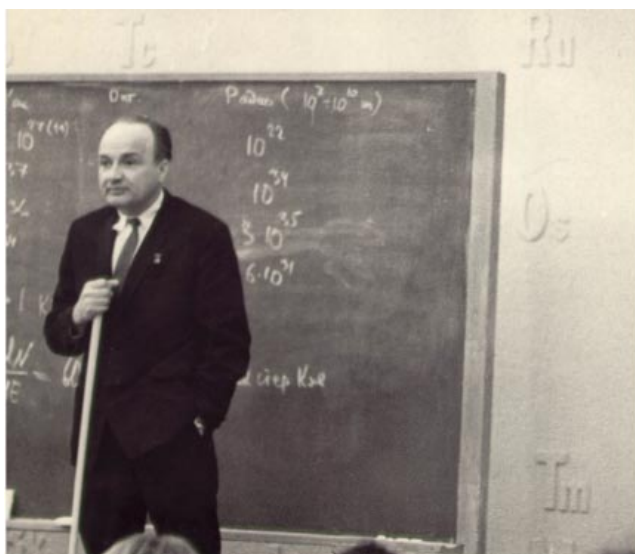
Космические исследования Солнца

В.Д. Кузнецов

1. Введение

Говоря об исследованиях Солнца, мы имеем в виду, прежде всего, Солнце как астрофизический объект, ближайшую к нам звезду, интерес к которой опреде-

В.Д. Кузнецов. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Московская обл., РФ. E-mail: kvd@izmiran.ru



Сергей Иванович Сыроватский. Выступление на семинаре.

ляется как чисто научными (астрофизическими) аспектами, так и практическими, так как Солнце влияет на Землю и на нашу жизнь. Солнечная физика охватывает разные разделы физики: ядерную физику, физику плазмы и магнитную гидродинамику, радиофизику, атомную физику и спектроскопию и др. Все эти направления физики присущи сегодня и современной астрофизике. Солнце является естественной космической лабораторией, доступной для детального изучения. Наблюдения Солнца дают большой объём ценных данных для понимания того, как Солнце устроено и как оно работает, для проверки современных теорий и моделей, применяемых для описания плазменных, магнитогидродинамических и других процессов в космических условиях, в частности, в удалённых астрофизических объектах (например, конвекция, динамо, активные явления и т.д.). Сегодня правильно говорить о науке гелиофизике, так как физика Солнца и гелиосферы неразрывно связаны между собой [1]. Неслучайно 2007 г. в ознаменование 50-летия Международного геофизического года был назван Международным гелиофизическим годом. В последнее время наиболее значительный прогресс в исследованиях Солнца достигнут благодаря исследованиям с помощью космических аппаратов (КА), позволившим наблюдать Солнце в недоступных с Земли диапазонах электромагнитного спектра — в рентгеновском и ультрафиолетовом (внеатмосферная астрономия), а также проводить локальные измерения исходящих непосредственно от Солнца плазменных потоков и частиц. Исключение влияния земной атмосферы при наблюдениях из космоса позволило также обеспечить высокое качество оптических наблюдений, несмотря на то, что размер космических оптических телескопов всегда ограничен по сравнению с размером наземных.

В 1970-х годах основной научный интерес Сергея Ивановича Сыроватского был связан с исследованиями Солнца, с магнитным пересоединением и солнечными вспышками, космической, в основном солнечной, магнитной гидродинамикой (МГД), в которой он является одним из классиков. Наблюдениям Солнца и активных явлений в его атмосфере, происхождение и физика

которых были весьма интересны и не до конца понятны, Сергей Иванович уделял большое внимание. Наблюдательные работы регулярно обсуждались на его семинаре, создавалась теория токовых слоёв и магнитного пересоединения [1, 2], на основе которых разрабатывались модели солнечных вспышек [3, 4] и других активных явлений. В то время не было наблюдений с высоким пространственным разрешением; это, с одной стороны, давало поле для различных подходов к объяснению явлений и дискуссий, а с другой, ставило задачу развития космических наблюдений высокого разрешения, что, в конечном счёте, было достигнуто и дало подтверждение идеям Сергея Ивановича Сыроватского.

2. Солнечные космические проекты

Современный период в исследованиях Солнца называют золотым веком солнечной физики в космосе, так как такого количества космических аппаратов и связанных с ними результатов не было в истории космических исследований. В таблице приведены солнечные космические проекты последних лет, разбитые на четыре части: недавно завершённые, действующие, находящиеся в стадии подготовки и разрабатываемые. Выделена также колонка, показывающая российские проекты, вносящие достойный вклад в эту область исследований.

В разделах 3–7 приводится краткий обзор основных результатов космических исследований Солнца — от недр Солнца до солнечного ветра. В разделе 8 кратко описаны будущие солнечные космические проекты. Более подробное изложение можно найти в [5–7].

Согласно современной модели, Солнце имеет ядро, в котором происходят термоядерные реакции с выделением энергии; лучистую зону, через которую к внешним слоям переносится выделяемая в ядре лучистая энергия; конвективную зону — самую внешнюю невидимую оболочку Солнца, в которой перенос энергии к внешним слоям происходит за счёт конвекции; атмосферу — видимые внешние оболочки Солнца — фотосферу, хромосферу, переходную область и корону, переходящую в солнечный ветер. Ниже изложение материала проведено в соответствии с этой структурой Солнца — от недр до солнечного ветра.

Таблица. Солнечные космические проекты последних лет *

	США, Европа, Япония	Россия
Завершённые	"Ulysses" (1990–2009 гг.)	КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.) КОРОНАС-Фотон (2009 г.)
Действующие	SOHO (1995 г.) TRACE (1998 г.) RHESSI (2002 г.) "Hinode" (2006 г.) STEREO (2006 г.) SDO (2009 г.)	
В стадии подготовки	"Solar Probe +" (2018 г.)	"Интергелиозонд" (> 2014 г.)
В стадии разработки	"Solar orbiter" (> 2017 г.) "Sentinels" "Polaris" и др.	"Полярно-эклиптический патруль" (ПЭП)
* В скобках указаны годы запуска и периоды работы космических аппаратов.		

3. Недра Солнца и гелиосейсмология

Недра Солнца изучаются из космоса с помощью наблюдений его глобальных колебаний, амплитуда которых, проявляющаяся во флуктуациях потоков излучения, плотности или скорости плазмы, является очень малой и требует высокоточных измерений (10^{-6}), достигаемых при внеатмосферных наблюдениях. На Солнце могут существовать два типа глобальных колебаний, несущих информацию о недрах Солнца: G-моды (периоды более 30 мин), которые пока не обнаружены, и p-моды (периоды порядка 5 мин), которые активно изучаются методами гелиосейсмологии [8]. Одновременно могут регистрироваться около 10–15 высокоамплитудных гармоник p-мод [9, 10], при этом со временем одни моды исчезают, другие появляются. Одна из интерпретаций связана с воздействием конвекции, имеющей широкий спектр шума, на собственные гармонические колебания внутри Солнца. Зарегистрировано расщепление частот p-мод глобальных колебаний из-за вращения Солнца, что даёт информацию об угловой скорости вращения внутренних слоёв.

На рисунке 1 представлена картина вращения и течений внутренних слоёв Солнца по данным гелиосейсмологии (прибор MDI (Michelson Doppler Imager) на борту космической обсерватории SOHO (Solar and HelioPhysics Observatory)). Вращение является дифференциальным, угловая скорость зависит от радиуса и широты, так что картина движений является довольно сложной. Более тёмному цвету соответствует скорость, большая средней, более светлому — меньшая. На экваторе скорость вращения больше, к полюсам она спадает. На поверхности Солнца светлые зоны вращаются немного быстрее, и солнечные пятна имеют тенденцию образовываться на краях этих полос. От экватора к полюсам имеет место медленное меридиональное течение, которое замыкается по дну конвективной зоны. Это течение играет важную роль в солнечном динамо и в описании солнечного цикла.

Методами акустической томографии (локальная гелиосейсмология) удаётся восстановить распределение

давления (или скорости звука) в подфотосферных слоях и на поверхности невидимой стороны Солнца [11, 12], что важно для локализации всплывающих из-под фотосферы магнитных потоков и активных областей перед их появлением на видимой стороне Солнца и повышения надёжности более долгосрочного прогноза солнечной спорадической активности.

4. Солнечная атмосфера

Солнечная атмосфера — от фотосферы до короны (фотосфера, хромосфера, переходная зона, корона) наблюдается в разных спектральных линиях, каждая из которых соответствует определённой температуре плазмы и срезу солнечной атмосферы на определённой высоте. Многоволновые наблюдения дают, таким образом, возможность реконструкции высотной (трёхмерной) картины солнечной атмосферы и различных образований. Этот метод изображающей спектроскопии успешно использовался в целом ряде солнечных проектов: SOHO, КОРОНАС-Ф (Комплексные Орбитальные Околоземные Наблюдения Активности Солнца), STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory), КОРОНАС-Фотон, "Hinode", SDO (Solar Dynamics Observatory).

На уровне фотосферы наблюдения с высоким пространственным разрешением позволили детально изучить конвекцию и связанную с ней грануляцию, которая проявляется в виде ярких изолированных областей поверхности, представляющих собой поднимающуюся горячую плазму. Эти области разделены тёмными "коридорами", образующими непрерывную сетку из опускающейся охлаждённой плазмы. Типичный размер гранул 0,2 угловых секунды, или 140 км. Между ячейками за счёт встречных плазменных потоков фоновое магнитное поле на уровне фотосферы напряжённостью около 400 Гс "сгребается" и образуются магнитные трубки с высокой концентрацией поля, достигающей нескольких кГс. Эти трубки, предсказанные ранее [13, 14] и обнаруженные по данным "Hinode" [15], сильно влияют на динамику солнечной атмосферы, демонстрируя важную роль тонкой структуры магнитного поля.

Методами акустической томографии исследована подфотосферная структура течений плазмы в солнечном пятне [11] — основном магнитоплазменном образовании солнечной атмосферы. Долгое время было неясно, как солнечные пятна с высокой концентрацией магнитного поля (2000–4000 Гс) могут оставаться устойчивыми, не распадаясь в течение нескольких недель и солнечных оборотов (один оборот за 27 сут). Пятна оказались удивительно мелкими по глубине, изменяясь от более холодных, чем окружение, до более горячих, чем окружение, только на 5000 км ниже поверхности. На уровне фотосферы газ вытекает из пятна, на уровне хромосферы и короны втекает в него. Сразу под поверхностью обнаружены предсказанные теорией потоки плазмы, втекающие внутрь пятна. Под фотосферой на разных глубинах вокруг магнитной трубки пятна образуется система из двух противоположно циркулирующих тороидальных вихрей, которые и обеспечивают длительную устойчивость пятна (рис.2).

В полутени пятна по наблюдениям "Hinode" с высоким временным разрешением обнаружены многочисленные микровыбросы [16], которые обусловлены процессами множественного магнитного пересоединения "не-



Рис. 1. Структура течений внутри Солнца и на его поверхности (результат SOHO).

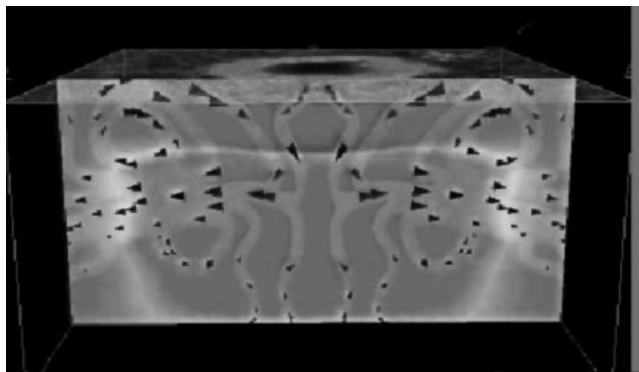


Рис. 2. Структура подфотосферных течений вокруг солнечного пятна, обеспечивающая его длительную устойчивость (результат SOHO).

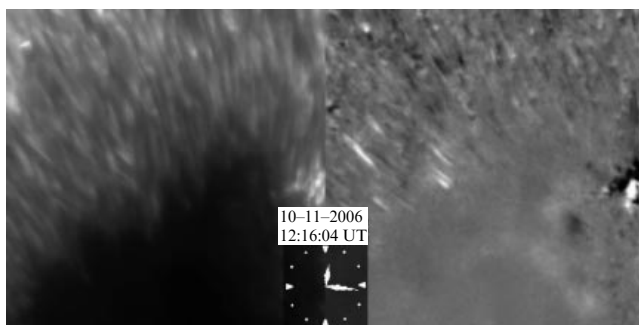


Рис. 3. Множественные процессы магнитного пересоединения в солнечном пятне, сопровождаемые плазменными выбросами (результат "Hinode").

причёсанного" (переплетённого) магнитного поля в окрестности пятна (рис. 3). Эти выбросы имеют длительность около 1 мин, их скорость не менее 50 км с^{-1} , они наблюдаются в полутени повсеместно.

В следующем по высоте после фотосферы слое солнечной атмосферы — хромосфере — с высоким пространственным разрешением изучены его волокнистая структура, спикюлы, протуберанцы и движение вещества в них, другие образования, эффекты нагрева плазмы в окрестности солнечных пятен.

Структура и динамика солнечной атмосферы — от фотосферы до короны — во многом определяются магнитными полями. В короне магнитные силы заметно преобладают над силами давления плазмы. Наблюдения с высоким пространственным разрешением позволили детально изучить структуру, топологию и динамику магнитных полей от фотосферы до короны. Вся поверхность Солнца покрыта магнитным ковром [17], причём топология поля — сложная, многосвязанная: поле, выходящее из одного источника (пятна), замыкается на несколько других источников. При такой топологии в магнитном поле образуется множество нулевых точек, нулевых и предельных силовых линий, через которые происходит перераспределение топологически несвязанных магнитных потоков. В таких местах, согласно теории С.И. Сыроватского, происходит образование токовых слоёв и связанное с ними магнитное пересоединение, приводящее к топологической перестройке структуры магнитного поля и к таким явлениям, как вспышки и выбросы массы [3]. В структуре магнитного поля

преобладают петельные магнитные структуры разных масштабов — от самых малых до гигантских. Иногда они образуют аркады, часто петли являются скрученными и подверженными эрупции. Форма плазменных структур и динамика плазмы, которые определяются магнитными полями, поражают разнообразием: всплывающие магнитные потоки, рост и подъём корональных петель, локальные выбросы и движения плазмы вдоль поля, вращение пятен и связанные с этим эффекты в короне, поперечные колебания корональных петель, выбросы скрученных магнитных трубок и протуберанцев и т.д. Солнечная атмосфера в явном виде демонстрирует явления и процессы, которые находят объяснение в рамках МГД, предоставляя в наше распоряжение естественную плазменную лабораторию.

В спокойной солнечной атмосфере плотность с высотой монотонно падает, а температура в переходной области начинает возрастать, увеличиваясь в короне $((1-2) \times 10^6 \text{ К})$ в 200 и более раз по сравнению с температурой фотосферы ($\sim 6000 \text{ К}$), и одна из проблем в солнечной физике и астрофизике — это проблема нагрева короны. К ней примыкает проблема ускорения солнечного ветра, о которой будет сказано в разделе 6.

Несмотря на длительные и интенсивные исследования проблемы нагрева солнечной короны, однозначного и окончательного ответа о механизме нагрева короны пока не получено. Вопросы о том, откуда берётся энергия, как она переносится в корону, как энергия диссипирует в короне, пока остаются без ответа. Рассматривается несколько механизмов. Один из них — это нагрев идущими снизу волнами, которые генерируются конвективной зоной, трансформируются в альвеновские волны и переносятся вверх, в корону. Долгое время не было наблюдательных подтверждений этого механизма. По наблюдениям "Hinode" [18, 19] с высоким временным разрешением в короне удалось обнаружить идущие снизу волновые колебания, что даёт основание более детально проанализировать вклад волнового механизма в нагрев короны.

Другой механизм нагрева короны связывается с множественными процессами микропересоединения в магнитных трубках, поле в которых имеет характер переплетённых, вследствие хаотических движений на фотосфере, жгутов [20]. На спутнике "Hinode" [21] повсеместно наблюдались направленные в разные стороны малые локальные выбросы, которые сопровождают процесс магнитного пересоединения.

На Солнце наблюдается целая иерархия процессов энерговыделения: от больших вспышек с энергией около 10^{32} эрг, до микро- и нановспышек с энергией соответственно в 10^{-6} и 10^{-9} раз меньшей. Последние наблюдаются в виде ярких рентгеновских точек, которые располагаются даже в спокойных областях и в полярных зонах Солнца. Они оказались в действительности очень малыми петельными структурами, которые существуют практически повсеместно. Эти наблюдения существенно изменили представление о "спокойном Солнце", под которым понималось некое равновесное тепловое состояние при отсутствии нетепловых процессов, характерное для ярких рентгеновских точек. С этой точки зрения Солнце никогда не является спокойным и нагрев солнечной короны происходит непрерывно и в разных масштабах. Самые крупномасштабные горячие образования на Солнце с температурами, в 10–20 раз превы-

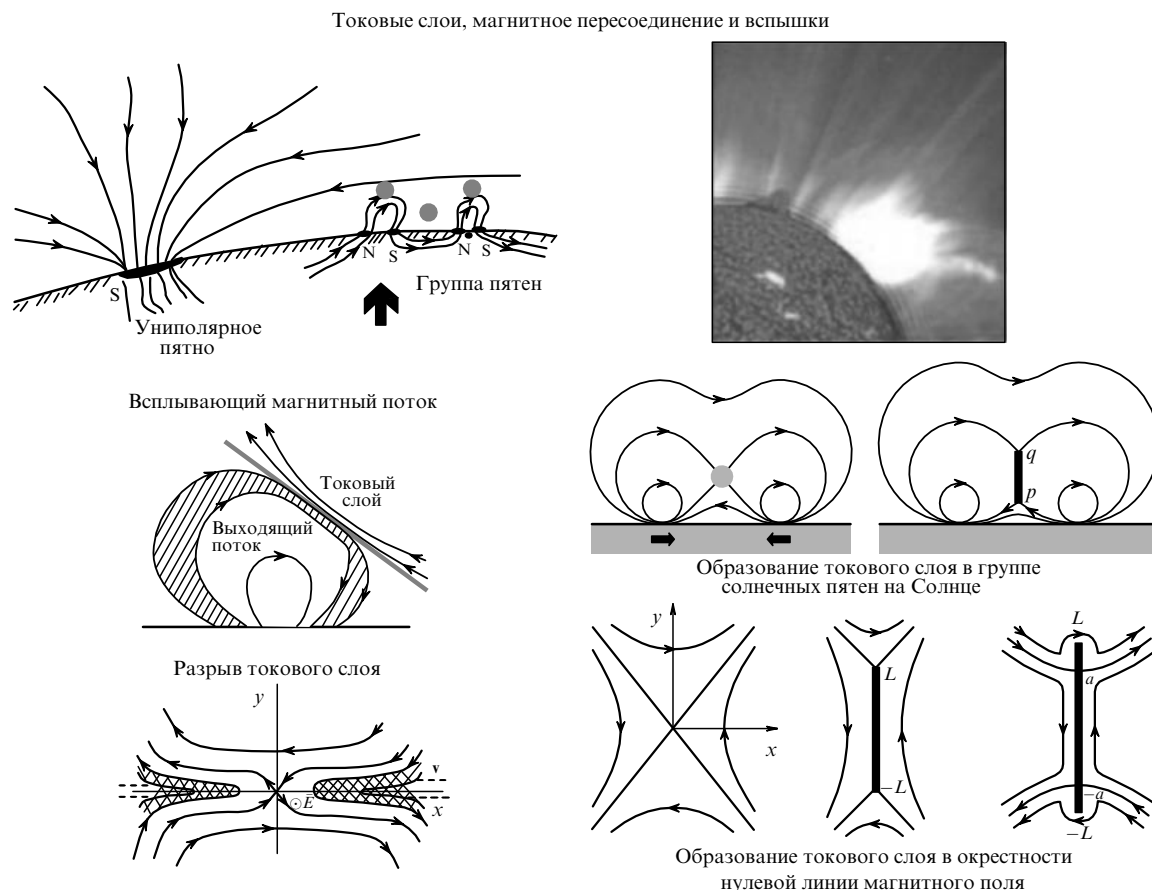


Рис. 4. Иллюстрации к развитой С.И. Сыроватским теории токовых слоёв и солнечных вспышек [1–4].

шающими температуру короны, наблюдались на спутнике КОРОНАС-Ф [22, 23]. Их формирование связано с долгоживущей вспышечной плазмой, захваченной магнитными ловушками, и они представляют собой проявление одного из механизмов нагрева короны — преобразования магнитной энергии в тепловую в процессах магнитного пересоединения во вспышках.

Статистический анализ многочисленных наблюдений, полученных по данным КА ("Yohkoh", SOHO, TRACE (Transition Region and Coronal Explorer), SMM (Solar Maximum Mission) и др.), показал, что события с разным энерговыделением (нано- и микровспышки, обычные вспышки) имеют общие свойства, что выражается в степенном законе распределения числа этих событий по измеряемым интенсивностям [24]. Малоэнергичных событий много, высокоэнергичных мало. Этот результат даёт основание рассматривать солнечную атмосферу как систему с развитой турбулентностью, вплоть до очень малых масштабов, которая и обуславливает диссипацию. При этом роль турбулентных вихрей играют процессы пересоединения в разных масштабах.

5. Активные явления и нагрев короны

Из активных явлений в солнечной атмосфере наиболее мощными являются солнечные вспышки и выбросы массы, которые как с научной, так и с практической точек зрения представляют наибольший интерес.

С.И. Сыроватским внесён основополагающий вклад в создание теории солнечных вспышек и их адекватной

физической модели [4]. Согласно теории С.И. Сыроватского, в структуре магнитного поля в окрестности нулевых точек и линий возникают токовые слои — сильные концентрации тока (рис. 4). С ними связана свободная магнитная энергия в виде энергии магнитного поля текущего тока. Этой энергии, как было показано, достаточно для возникновения вспышки [25].

Сама вспышка связывается с разрушением токового слоя вследствие различных плазменных неустойчивостей [26], при этом происходит магнитное пересоединение в слое, возникновение импульсных электрических полей в области пересоединения и ускорение частиц этим полем.

Были предприняты попытки поиска предвспышечных токовых слоёв в солнечной атмосфере по характеристикам их излучения [27], в частности радиоизлучения [28, 29]. Однако космические наблюдения последних лет с высоким пространственным разрешением в ультрафиолетовом (УФ) и рентгеновском диапазонах спектра дали явные и наглядные доказательства существования токовых слоёв в активных областях Солнца и связи с ними солнечных вспышек, подтвердив основные положения теории С.И. Сыроватского. Приведённое на рис. 5 изображение, полученное наложением двух изображений с SOHO (УФ-диапазон, структура магнитного поля в короне) и RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) (рентгеновский диапазон, нетепловое выделение энергии), демонстрирует образование токового слоя в солнечной атмосфере и связанное с ним энерговыделение во время вспышки.

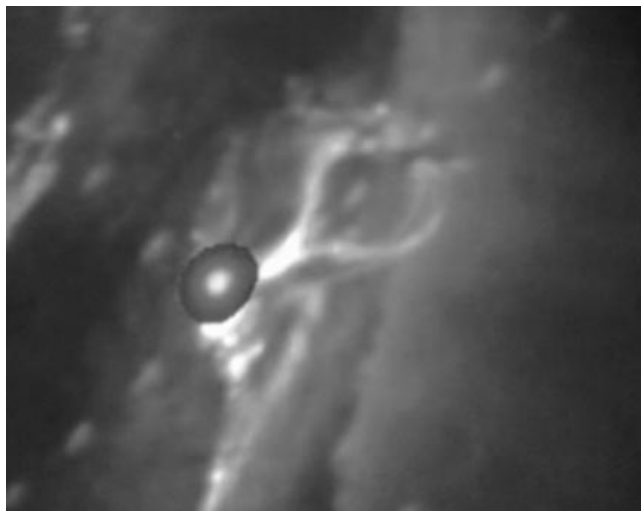


Рис. 5. Наложенные изображения солнечной вспышки, иллюстрирующие магнитную конфигурацию с токовым слоем (SOHO, УФ-излучение) и связанное с ним вспышечное энергетическое излучение (RHESSI, жесткое рентгеновское излучение).

Как уже отмечалось в разделе 4, по наблюдениям с высоким пространственным разрешением на спутнике "Hinode" обнаружены повсеместно многочисленные акты магнитного пересоединения, сопровождаемые выбросами двух противоположно направленных струй [21]. Таким образом, улучшение пространственного разрешения каждый раз открывает новые детали мелкомасштабной картины солнечной атмосферы, одной из характерных особенностей которой являются различные формы магнитного пересоединения. Крупномасштабная перестройка структуры магнитного поля в солнечной короне наблюдалась спутником КОРОНАС-Ф (эксперимент СПИРИТ (Спектрогелиографические исследования с помощью рентгеновского изображающего телескопа)) во время мощнейшей вспышки 7 сентября 2005 г., которая произошла на восточном лимбе [30], что дало хорошую видимость структуры поля. Первоначально закрытая петельная конфигурация поля после вспышки стала открытой, т.е. изменилась топология поля, что свидетельствует о магнитном пересоединении.

В солнечных вспышках происходит ускорение заряженных частиц до высоких энергий (электроны — от нескольких десятков-сотен кэВ, протоны — до 1–10 ГэВ). В рамках теории токовых слоев первичное ускорение заряженных частиц связывается с сильными импульсными электрическими полями, которые возникают при разрыве токового слоя и магнитном пересоединении силовых линий [26]. В наблюдениях на спутнике КОРОНАС-Ф (эксперимент СПР-Н) зарегистрирована линейная поляризация жесткого рентгеновского излучения в максимуме мощных солнечных вспышек [31, 32], возникновение которой связано с тормозным излучением при взаимодействии импульсно-генерированных пучков электронов с фоновой плазмой солнечной атмосферы [33]. Эти наблюдения являются не только прямым доказательством существования самих пучков ускоренных частиц, но и подтверждением того, что эти частицы ускоряются импульсным электрическим полем во время магнитного пересоединения, а не каким-либо стохастическим механизмом.

Наблюдения RHESSI [34] дали ответы на те вопросы физики вспышек, которые ранее ставились и моделировались в теоретических работах [33]. Так, совместно с наблюдениями на TRACE они позволили установить, что вспышечное высвобождение энергии в большинстве случаев происходит в петлях и шлемовидных конфигурациях плазмы, нагретой до температуры в несколько десятков миллионов градусов, а также в виде высокоэнергичных электронов, распространяющихся из верхних слоев короны вниз и разогревающих плазму более низких слоев. Наблюдения нетеплового рентгеновского излучения (30–80 кэВ) с высоким пространственным разрешением позволили локализовать источник излучения как место вторжения ускоренных частиц в плотные слои солнечной атмосферы в основании магнитной петли, причём источники в разных основаниях одной и той же петли имеют разный временной профиль и неодновременное уярчение.

Большой прогресс был достигнут в изучении самых мощных проявлений солнечной активности, так называемых корональных выбросов массы, которые детально наблюдались SOHO, КОРОНАС-Ф, STEREO, SDO. Наиболее часто они имеют форму петель, как правило скрученных. Их происхождение связывается с глобальной неустойчивостью крупномасштабной магнитной конфигурации [35].

В одной из своих последних работ С.И. Сыроватский предложил механизм образования выбросов массы в результате прорыва всплывающего магнитного потока в корону [36]. Всплывание нового магнитного потока сопровождается возникновением нулевой точки, которая движется вверх с возрастающей скоростью, формально стремящейся к бесконечности, а с учётом плазмы — к альвеновской скорости. В какой-то момент на некоторой высоте происходит пересоединение в нулевой точке, перестройка структуры магнитного поля, и новый магнитный поток посредством пересоединения прорывается в корону, приводя к выбросу массы вместе с магнитным полем (рис. 6а). Впоследствии, с учётом новых наблюдений, модель, неотъемлемой частью которой является наличие нулевой точки и токового слоя, была детализирована другими авторами [37] (рис. 6б), и эта усовершенствованная модель хорошо описывает реальную картину развития выброса и его структуру. Модель выброса скрученных петель предложена в [38, 39].

6. Солнечный ветер

Корона переходит в солнечный ветер, который непрерывно истекает в гелиосферу. Локальные измерения на КА "Ulysses" позволили исследовать гелиосферу над плоскостью эклиптики, изучить трёхмерную структуру солнечного ветра и внутренней гелиосферы, магнитного поля, распространение в гелиосфере космических лучей и т.д.

На рисунке 7 показана гелиоширотная зависимость скорости солнечного ветра, которая для фазы минимума солнечного цикла показала чёткое различие свойств солнечного ветра в области полюсов и экватора: высокоскоростной (около 800 км с^{-1}) и устойчивый солнечный ветер из области полюсов и низкоскоростной (около 400 км с^{-1}) и изменчивый из приэкваториальных областей [40]. На фазе максимума солнечного цикла провести чёткое различие между полярными и экваториальными областями по свойствам солнечного ветра затрудни-

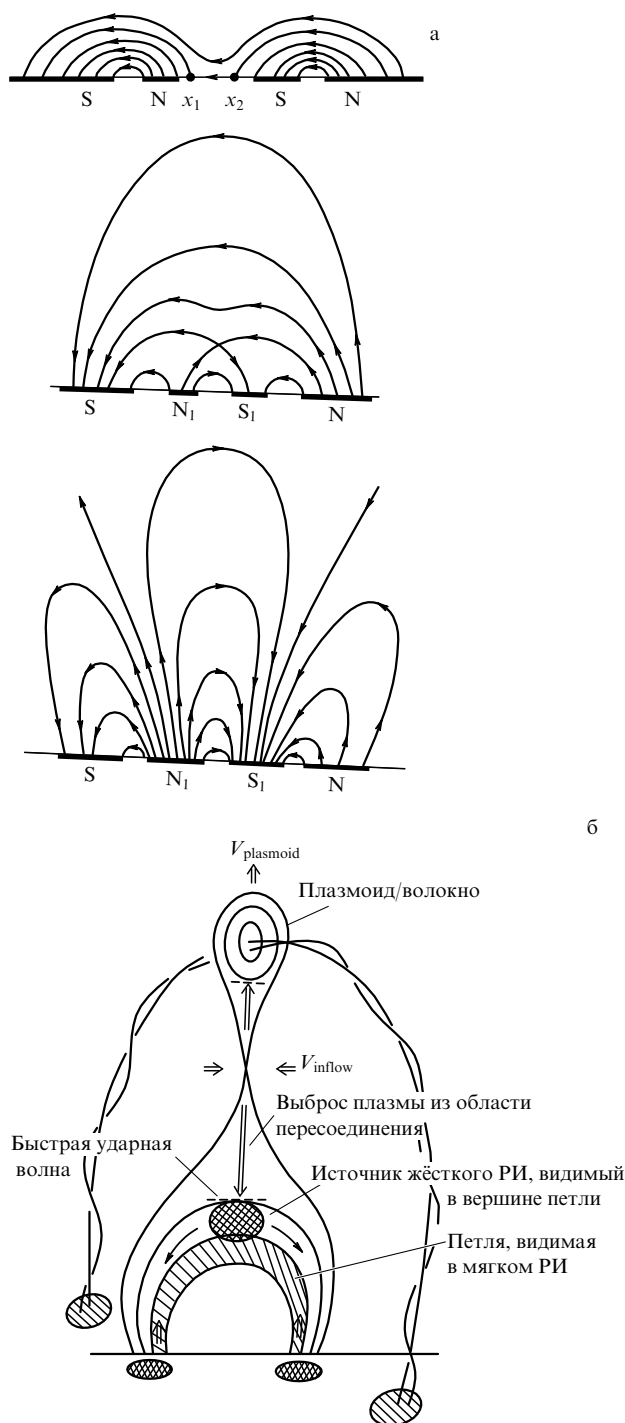


Рис. 6. (а) Модель выброса С.И. Сыроватского, основанная на всплывании нового магнитного потока и прорыва его в корону вследствие магнитного пересоединения в нулевой точке [36]; x_1 , x_2 — положение нулевых точек на фотосфере, S, S_1 , N, N_1 — южная и северная полярности на фотосфере. (б) Развитие модели выброса [37] на основе современных наблюдений (РИ — рентгеновское излучение).

тельно. На скорость истекающего солнечного ветра заметно влияет топология магнитного поля. В полярных областях силовые линии в основном открыты и скорость ветра здесь велика, а в приэкваториальных областях преобладают закрытые силовые линии и скорость ветра примерно в два раза меньше. Двадцать третий цикл солнечной активности (1995–2007 гг.) имел макси-

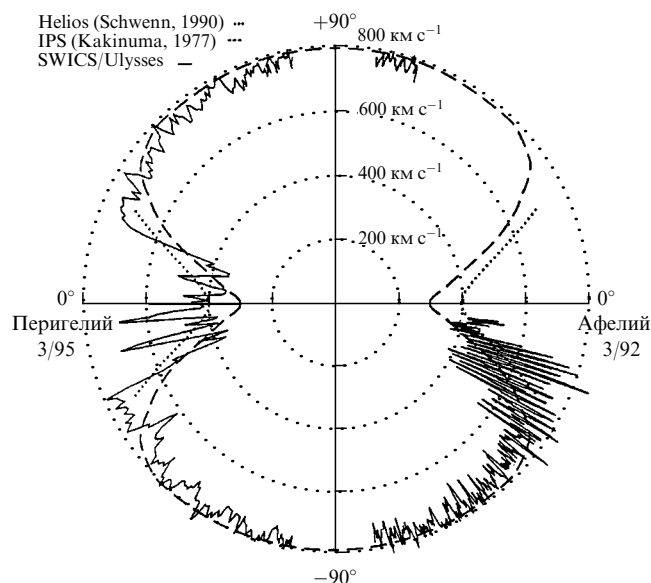


Рис. 7. Гелиоширотная зависимость скорости солнечного ветра, полученная КА "Ulysses".

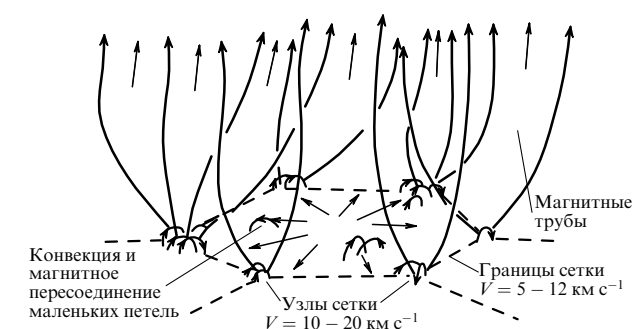


Рис. 8. Магнитная сетка как возможный источник формирования потоков солнечного ветра [41, 42].

мумы вблизи 2000–2001 гг., так что два пролёта КА "Ulysses" над полюсами (Северным и Южным, на расстоянии 2 а.е.) пришлось на максимум солнечного цикла, а три — на минимум цикла (два над Северным и один над Южным).

Остаётся невыясненным вопрос об источниках солнечного ветра на Солнце. В одной из современных моделей предполагается, что солнечный ветер формируется вдоль границ (где скорость истечения от 5 до 12 km s^{-1}) и в узлах (где скорость истечения от 10 до 20 km s^{-1}) хромосферной магнитной сетки [41, 42] (рис. 8). Плазма солнечного ветра поставляется к границам ячеек закрытыми магнитными петлями, которые увлекаются конвекцией в области воронок (магнитных труб) — области открытых силовых линий, где они пересоединяются с существующими открытыми линиями магнитного поля. Плазма, первоначально содержащаяся внутри закрытых петель, высвобождается и ускоряется, образуя солнечный ветер. Наблюдения Солнца с близких расстояний с высоким пространственным разрешением, проведение которых планируется в рамках будущих солнечных космических миссий ("Интергелиозонд", "Solar Orbiter", "Solar Probe +"), позволят получить ответ об истинной картине источников солнечного ветра на Солнце.

7. Космическая погода и её земные эффекты

Солнце является основным источником формирования космической погоды. Вспышки, выбросы массы и потоки солнечного ветра возмущают гелиосферу и околоземное космическое пространство, вызывая магнитные бури и сопутствующие явления [43]. В проекте STEREO два космических аппарата вращаются вокруг Солнца по земной орбите, но один из них всё время находится впереди Земли, а другой — на таком же расстоянии позади неё, так что они могут видеть заметную часть обратной стороны Солнца, и предсказывать, какой активности мы можем ожидать на видимой стороне Солнца. Перекрытие полей зрения с двух КА позволило по полученным данным построить стереоизображения и стереофильмы Солнца, дающие объёмную картину (рис. 9). На КА STEREO впервые реализованы с помощью гелиосферного телескопа наблюдения распространяющихся от Солнца по гелиосфере выбросов массы [44], которые дали возможность проследить движение переднего фронта выброса до значительно больших расстояний от Солнца, чем это позволяют сделать обычные коронографы. Задача таких наблюдений состоит в том, чтобы контролировать столкновение переднего фронта выброса с магнитосферой Земли, что позволит предсказывать более точно, чем это делается сейчас, начало геомагнитной бури и проявления связанных с ней эффектов.

Изучение многочисленных эффектов космической погоды в околоземном космическом пространстве отно-

сится к практическим приложениям исследований Солнца и солнечно-земной физики. Факторы космической погоды — возмущения ионосферы и геомагнитного поля, повышенные потоки энергичных частиц и излучений и т.д. — влияют на спутники, на их электронику и торможение, на наземные технические системы (линии электропередач и энергоинфраструктура, трубопроводы и т.д.). Космическая погода сегодня — это огромная область исследований [45].

8. Будущие солнечные космические проекты

Стратегия будущих солнечных космических миссий направлена на проведение наблюдений с более высоким пространственным и временным разрешением, на выполнение локальных измерений в ближайших окрестностях Солнца, на получение спектроскопических изображений с высоких гелиоширот, на проведение наблюдений вне линии Солнце — Земля, на получение трёхмерных изображений Солнца. Все эти виды наблюдений призваны улучшить наше понимание происходящих на Солнце явлений и дать объяснение таким нерешённым проблемам физики Солнца, как нагрев солнечной короны и ускорение солнечного ветра, природа источников солнечного ветра на поверхности Солнца, триггерные механизмы вспышек и выбросов массы, механизм солнечного динамо и солнечного цикла и т.д. Решение этих проблем откроет пути к пониманию того, как работает Солнце, как устроены солнечно-земные связи, и будет способствовать улучшению прогнозов космической погоды и уменьшению зависимости земной цивилизации от её факторов.

Сроки реализации космических проектов важны в контексте фазы 11-летнего цикла солнечной активности. 23-й солнечный цикл закончился в декабре 2008 г., а новый, 24-й цикл, непредсказуемо долго затягивается. Такая длительная фаза минимума солнечного цикла, которая продолжается уже более трёх лет, не была предсказана специалистами. Это говорит о том, что мы ещё недостаточно хорошо понимаем Солнце и его цикличность. Новый цикл, максимум которого ожидается в 2012–2014 гг., предсказывается невысоким, и этот прогноз также послужит оценкой того, насколько верны наши представления о том, как работает Солнце.

В российском проекте "Интергелиозонд" [7, 46], который сейчас разрабатывается в рамках Федеральной космической программы, КА будет приближаться к Солнцу в результате многократных гравитационных маневров у Венеры. Возможно достижение точки коротации, когда КА будет кратковременно зависать над Солнцем без относительного перемещения. Гравитационные маневры у Венеры позволят также наклонить плоскость орбиты к плоскости эклиптики и провести внеэклиптические наблюдения Солнца. Приближение КА к Солнцу по гелиоцентрической орбите позволит наблюдать масштабы на Солнце, меньшие, чем при наблюдениях с околоземных орбит, с которых только и выполнялись до сих пор космические наблюдения Солнца. Это необходимо, например, для изучения тонкой структуры и динамики солнечной атмосферы: магнитной сетки, магнитных элементов, турбулентности, а также для наблюдений источников солнечного ветра и таких явлений, как микропересоединение. Наблюдения в режиме коротации позволят установить связи между явлениями на Солнце и в гелиосфере. Локальные изме-

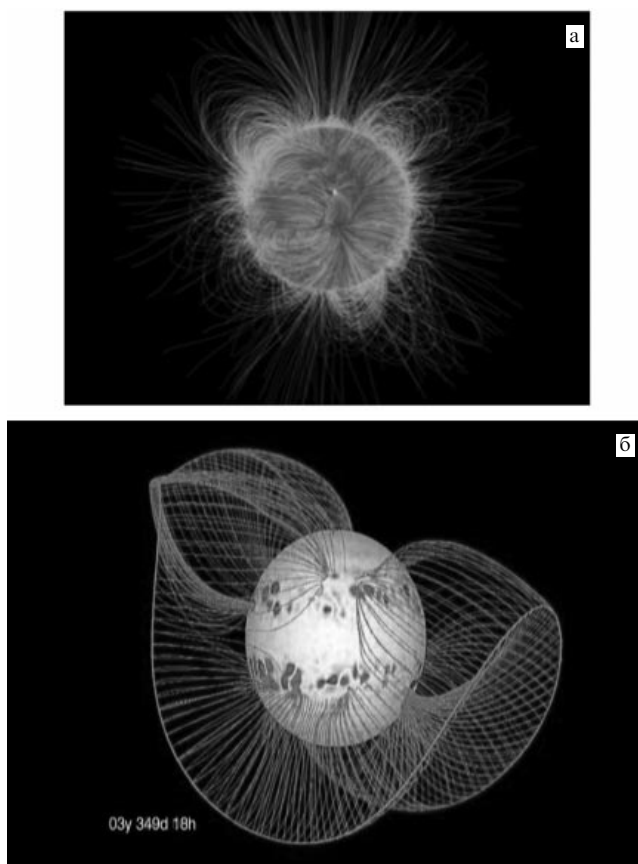


Рис. 9. (а) Трёхмерные магнитные поля на Солнце и (б) в гелиосфере (гелиосферный токовый слой) (результаты моделирования научной группы SOHO).

рения вблизи Солнца, на расстояниях 40–60 солнечных радиусов, дадут возможность детально изучить плазменные процессы.

В более далёкой перспективе разрабатывается проект "Полярно-эклиптический патруль (ПЭП)" [7], в рамках которого два КА на гелиоцентрических наклонных орбитах вокруг Солнца будут осуществлять глобальный обзор Солнца и непрерывные наблюдения линии Солнце–Земля из внеэклиптического положения, что должно обеспечить лучшее понимание объёмной картины солнечной активности и околосолнечного пространства и наиболее эффективный контроль за космической погодой.

9. Заключение

Отмечая плодотворный вклад С.И. Сыроватского в отдельные разделы физики Солнца, необходимо, прежде всего, ещё раз подчеркнуть, что многие его идеи относительно теории токовых слоёв и механизма солнечных вспышек получили подтверждение по результатам космических наблюдений Солнца, которые, в свою очередь, планировались под влиянием работ С.И. Сыроватского. Существенное развитие получила теория токовых слоёв и магнитного пересоединения и её наблюдательное подтверждение как на Солнце, так и в магнитосфере Земли [47, 48]. В 2000 г. опубликована первая книга по магнитному пересоединению [47], которая переведена на русский язык. Реализованы отечественные солнечные космические проекты КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-Фотон. Работы по проекту КОРОНАС-Ф, удостоены Премии правительства Российской Федерации (2008 г.), результаты этого проекта отражены в книге [49]. Заметное развитие получили лабораторное и численное моделирование магнитного пересоединения [50, 51]. Разрабатываются новые отечественные перспективные проекты по изучению Солнца — "Интергелиозонд" и "Полярно-эклиптический патруль". Продолжающиеся наблюдения Солнца из космоса в проектах SOHO, TRACE, RHESSI, "Hinode", STEREO, SDO дадут большой объём более детальной информации о солнечных явлениях на начальной фазе нового цикла и улучшат понимание происходящих на нашей звезде процессов.

Список литературы

1. Сыроватский С И, в сб. *Нейтральные токовые слои в плазме* (Труды ФИАН, Т. 74, Под ред. Н Г Басова) (М.: Наука, 1974) с. 3 [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. 3]
2. Сыроватский С И, в сб. *Вспышечные процессы в плазме* (Труды ФИАН, Т. 110) (М.: Наука, 1979) с. 5
3. Сыроватский С И *УФН* **118** 738 (1976) [Syrovatskii S I *Sov. Phys. Usp.* **19** 354 (1976)]
4. Syrovatskii S I *Solar Phys.* **53** 247 (1977)
5. 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
6. Кузнецов В Д *УФН* **180** 554 (2010) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **53** 528 (2010)]
7. Кузнецов В Д, Зеленый Л М, в сб. *Солнечно-земная физика* Вып. 12 *Труды Междунар. симпозиума "Международный гелиофизический год — 2007: новый взгляд на солнечно-земную физику, Звенигород, 5–11 ноября 2007 г.* Т. 1 (Новосибирск: Ин-т солнечно-земной физики РАН, 2008) с. 83
8. Christensen-Dalsgaard J "Lecture notes on stellar oscillations", <http://www.phys.au.dk/~jcd/oscilnotes/>
9. Лебедев Н И и др. *Астрон. журн.* **81** 956 (2004) [Lebedev N I et al. *Astron. Rep.* **48** 871 (2004)]
10. Жужжа Ю Д, Кузнецов В Д, Лебедев Н И, в кн. *Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 35
11. Kosovichev A G, Duvall T L, Scherrer P H *Solar Phys.* **192** 159 (2000)
12. Lindsey C, Braun D C *Science* **287** 1799 (2000)
13. Parker E N *Astrophys. J.* **138** 552 (1963)
14. Parker E N *Astrophys. J.* **221** 368 (1978)
15. Nagata S et al. *Astrophys. J.* **677** L145 (2008)
16. Katsukawa Y et al. *Science* **318** 1594 (2007)
17. Parnell C E *Solar Phys.* **200** 23 (2001)
18. Erdelyi R, Fedun V *Science* **318** 1572 (2007)
19. Cirtain J W et al. *Science* **318** 1580 (2007)
20. Parker E N *Astrophys. J.* **330** 474 (1988)
21. Shibata K et al. *Science* **318** 1591 (2007)
22. Богачев С А и др. *Астрон. вестн.* **39** 571 (2005) [Bogachev S A et al. *Solar Syst. Res.* **39** 508 (2005)]
23. Житник И А и др., в кн. *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 65
24. Aschwanden M J et al. *Astrophys. J.* **535** 1047 (2000)
25. Сыроватский С И *Письма в Астрон. журн.* **2** 35 (1976) [Syrovatskii S I *Sov. Astron. Lett.* **2** 13 (1976)]
26. Сыроватский С И, Буланов С В, Догель В А, в кн. *Итоги науки и техники* (Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНТИ, 1982) с. 188
27. Сыроватский С И *Письма в Астрон. журн.* **3** 133 (1977) [Syrovatskii S I *Sov. Astron. Lett.* **3** 69 (1977)]
28. Kuznetsov V D, Syrovatskii S I *Solar Phys.* **69** 361 (1981)
29. Кузнецов В Д *Астрон. журн.* **59** 108 (1982) [Kuznetsov V D *Sov. Astron.* **26** 67 (1982)]
30. Кузнецов В Д, в кн. *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 10
31. Житник И А и др., в кн. *Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (Под ред. В Д Кузнецова) (М.: Физматлит, 2009) с. 128
32. Кузнецов В Д *Изв. РАН. Сер. физ.* **70** 56 (2006)
33. Сыроватский С И, Сомов Б В, в кн. *Итоги науки и техники* (Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНТИ, 1982) с. 221
34. Lin R P et al. *Solar Phys.* **210** (1–2) 3 (2002), Special Issue: The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESI): Mission Description and Early Results
35. Кузнецов В Д, в кн. *Плазменная гелиогеофизика Т. 1* (Под ред. Л М Зеленого, И С Веселовского) (М.: Физматлит, 2008) с. 81
36. Syrovatskii S I *Solar Phys.* **76** 3 (1982)
37. Shibata K et al. *Astrophys. J.* **451** L83 (1995)
38. Kuznetsov V D, Hood A W *Solar Phys.* **171** 61 (1997)
39. Kuznetsov V D, Hood A W *Adv. Space Res.* **26** 539 (2000)
40. McComas D J et al. *Gephys. Res. Lett.* **30** 1517 (2003)
41. Axford W I, McKenzie J F, in *Cosmic Winds and the Heliosphere* (Eds J R Jokipii, C P Sonett, M S Giampapa) (Tucson: Univ. of Arizona, 1997) p. 31
42. Hassler D M et al. *Science* **283** 810 (1999)
43. Kuznetsov V D *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* **70** 234 (2008)
44. Harrison R et al. *COSPAR's Inform. Bull.* **168** 25 (2007)
45. Bothmer V, Daglis I A *Space Weather: Physics and Effects* (Berlin: Springer, 2007)
46. Кузнецов В Д *УФН* **176** 319 (2006) [Kuznetsov V D *Phys. Usp.* **49** 305 (2006)]
47. Priest E R, Forbes T *Magnetic Reconnection: MHD Theory and Applications* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000) [Прист Э, Форбс Т *Магнитное пересоединение: магнитогидродинамическая теория и приложения* (Пер. с англ. под ред. В Д Кузнецова, А Г Франк) (М.: Физматлит, 2005)]
48. Зеленый Л М *УФН* **180** 973 (2010) [Zelenyi L M *Phys. Usp.* **53** (9) (2010)]
49. Кузнецов В Д (Ред.) *Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф* (М.: Физматлит, 2009)
50. Франк А Г *УФН* **180** 982 (2010) [Frank A G *Phys. Usp.* **53** (9) (2010)]
51. Yamada M, Kulsrud R, Ji H *Rev. Mod. Phys.* **82** 603 (2010)