

ных волн, синоптической изменчивости и горизонтальной турбулентности. Таким образом, Земля как планета оказывается посредником в процессе передачи крупномасштабных возмущений от атмосферы к океану. Прямое же воздействие атмосферы на океан является менее эффективным, потому что оно передается только через поверхность океана, а временные и пространственные масштабы движений в океане и атмосфере (а также плотность воды и воздуха) различны.

Литература

1. Бреховских Л.М., Корт В.Г., Кошляков М.Н., Фомин Л.М. // Бюл. Комитета по делам изобретений и открытий СССР. 1978. № 207.
2. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л., 1987.
3. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л., 1981.
4. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. М., 1981. Т. 1, 2.

5. Лаппо С.С. Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М., 1979.
6. Арсеньев С.А., Сутырин Г.Г., Фельзенбаум А.И. // ДАН. 1976. **231**, №3. С. 567.
7. Арсеньев С.А., Сутырин Г.Г., Фельзенбаум А.И. // Промысловая океанология. 1976. Сер. 9. Вып. 11. С. 1.
8. Арсеньев С.А. // ДАН. 1995. **343**, №2. С. 251.
9. Жаров В.Е. // Вестн. Моск. ун.-та. Физ. Астрон. 1996. № 6. С. 89 (Moscow University Phys. Bull. 1996. No. 6. P. 72).
10. Пильник Г.П. // Астрон. журн. 1986. **63**, № 1. С. 184.
11. Eubanks T.M., Steppe J.A., Dickey J.O., Callahan P.S. // J. Geophys. Res. 1985. **90**, No. B7. P. 5385.
12. Hide R., Dickey J.O. // Science. 1991. **253**. P. 629.
13. Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер. Л., 1973.
14. Wyrki K. // Deutsche Hydrograf. Zeitschr. 1967. **20**, No. 4. P. 176.
15. Webster F. // Deep-Sea Res. 1969. **16** (Suppl.). P. 357.

Поступила в редакцию
20.10.97

АСТРОНОМИЯ

УДК 523.94; 523.98

ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ С ОРБИТЫ «ГЕЛИОСТАЦИОНАРА»

Н. Н. Контор, Б. В. Сомов

(НИИЯФ; ГАИШ)

Обсуждается научный потенциал космического эксперимента «Гелиостационар» по отношению к ключевым проблемам активности Солнца.

Введение

Исследование фундаментальных механизмов солнечной активности связано с физикой космической плазмы [1] и, без сомнения, является одним из приоритетных направлений современной астрономии. При этом трудно переоценить роль космических аппаратов (КА) как экспериментальных средств исследований. КА позволили изучить многообразные следствия активности Солнца в гелиосфере: всплески гамма- и рентгеновского излучения, потоки высокоэнергичных частиц, высокоскоростные потоки плазмы в солнечном ветре и ударные волны, ускорение частиц на ударных волнах и т. д. Удалось установить их связи с конкретными явлениями активности Солнца — активными областями, вспышками, корональными дырами.

Наряду с продвижением в понимании закономерностей солнечной активности и ее следствий исследования на КА показали, что фундаментальные процессы — генерация магнитных полей внутри Солнца (солнечное динамо) и быстрое преобразование энергии магнитного поля в кинетическую и тепловую

энергию частиц плазмы в его атмосфере — являются труднонаблюдаемыми и требуют принципиально новых методов исследования. Один из них — приближение КА к Солнцу. Наиболее эффективными, по нашему мнению, могут стать наблюдения солнечной активности и ее следствий в гелиосфере с орбиты «Гелиостационара» — искусственного спутника Солнца (ИСС), который был бы аналогом геостационарных ИСЗ.

Для реализации таких наблюдений необходимо решить три задачи: (1) научное обоснование эксперимента «Гелиостационар», (2) расчет и исследование возможных траекторий подлета КА к Солнцу и вывода на гелиостационарную орбиту одного или нескольких ИСС, (3) изучение технической возможности проведения необходимых измерений (масса ИСС, его тепловой режим, условия связи и т. д.). В настоящей работе рассматривается только научный потенциал эксперимента «Гелиостационар» по отношению к фундаментальным механизмам солнечной активности.

1. Нерешенные проблемы солнечной активности

Несмотря на впечатляющие успехи, достигнутые в физике Солнца и гелиосферы, остается ряд нерешенных фундаментальных проблем. Перечислим их кратко.

1°. Солнечное динамо. Наиболее вероятной моделью в настоящее время считается так называемое интерфейсное динамо; оно работает в субадиабатическом слое у дна конвективной зоны на глубине ~ 200 тыс. км под фотосферой [2]. Данные гелиосейсмологии косвенно подтверждают эту гипотезу, однако механизм формирования дифференциального вращения остается неясным, а цикличность солнечной активности в целом — фактически необъясненной. Все больше данных указывают на то, что главный цикл является 22-летним, в частности и для солнечных пятен [3]. При этом новый цикл начинается приблизительно в максимуме цикла старого. В чем состоит связь старого и нового циклов? Как «всплывает» и «тонет» магнитное поле? Эти вопросы остаются открытыми.

2°. Активные области. Самыми большими локальными магнитными структурами на Солнце являются активные области. Предполагается, что они всплывают в виде больших магнитных трубок со дна конвективной зоны в результате действия интерфейсного динамо [4]. Затем магнитные поля активных областей проникают в фотосферу, где они подвергаются воздействию фотосферного динамо [5]. Часть полей снова погружается под фотосферу, тонет. Остальные поднимаются в корону до высот ~ 100 тыс. км, на которых они захватываются солнечным ветром и уносятся в межпланетное пространство.

Время жизни активных областей достигает нескольких оборотов Солнца, так что мы не можем проследить весь процесс эволюции их от появления на фотосфере до полного распада. Поэтому трудно сказать, как эволюционируют локальные магнитные структуры разных размеров, каковы их взаимосвязи и связь с общим магнитным полем Солнца.

3°. Магнитное пересоединение. Процесс пересоединения магнитных полей является основным механизмом диссипации поля и его быстрых изменений, приводящим к таким ярким проявлениям солнечной активности, как вспышки и корональные выбросы массы. Модели пересоединения разработаны довольно подробно, но имеющиеся наблюдения не позволяют сделать выбор между ними. Кроме того, в настоящее время они мало говорят о быстром пересоединении волокнистых магнитных полей [3], сопровождаемом ускорением частиц до высоких энергий и нагревом плазмы до сотен миллионов градусов [6]. Эти процессы должны развиваться за времена порядка секунд на масштабах ~ 10 км. К сожалению, они мало изучены с наблюдательной точки зрения.

4°. Пересоединение электрических токов. Идея топологического прерывания электрических токов в атмосфере Солнца разработана лишь на качественном

уровне (см. [1]). Токи генерируются под фотосферой механизмом солнечного динамо, внутри фотосферы — благодаря фотосферному динамо и над фотосферой — в результате действия различных сил. Независимо от их происхождения токи распределены в атмосфере Солнца по многим силовым линиям магнитного поля и, в силу высокой анизотропии проводимости, направлены вдоль поля.

Описанное выше магнитное пересоединение разрывает магнитные силовые линии и соединяет их иным образом. Одновременно оно делает то же самое с электрическими токами, прерывая их и заставляя течь другими путями. Иными словами, каждый разорванный элемент тока включается в два новых электрических контура, имеющих другие индуктивности и сопротивления. Физическая картина этого явления не исследована ни теоретически, ни экспериментально.

5°. Нагрев короны и солнечный ветер. Общепринятого механизма нагрева короны до сих пор нет (см. обзор проблемы в [7]). Как следствие этого существуют альтернативные модели формирования солнечного ветра. Неотъемлемой частью проблемы являются механизм «вытягивания» коронального магнитного поля в гелиосферу и вопрос о его волокнистой структуре. Кроме того, неизвестны причины образования быстрого и медленного солнечного ветра, а также детальной связи глобального солнечного и гелиосферного магнитных полей.

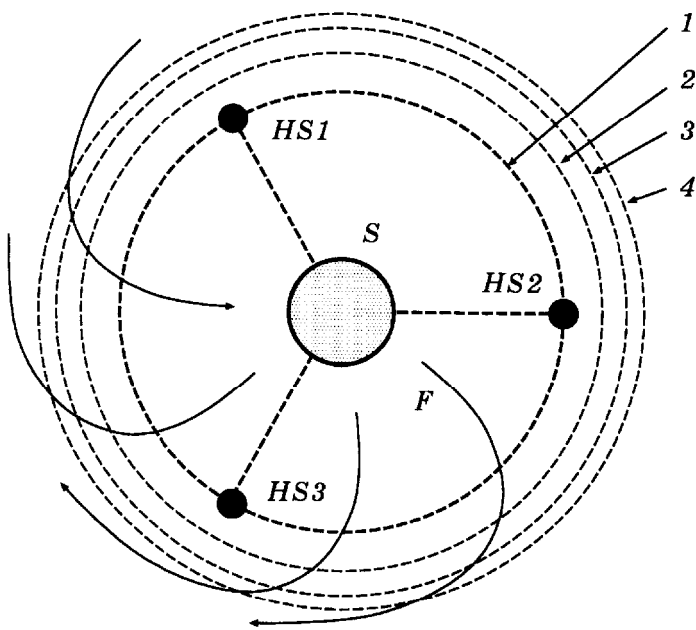
На этом перечень нерешенных проблем солнечной активности не заканчивается, но мы хотели отметить лишь наиболее крупные и принципиально важные из них.

2. Проект «Гелиостационар»

Чтобы подойти к решению указанных проблем, необходим одновременный обзор всей поверхности Солнца, проводимый с достаточно хорошим пространственным и временным разрешением. Таким условиям наиболее полно отвечает предлагаемый нами проект запуска на гелиостационарную орбиту одного или нескольких ИСС. Состав и условия осуществления космического проекта «Гелиостационар» зависят от того, какой из перечисленных фундаментальных проблем будет отдан приоритет.

1°. Одиночный «Гелиостационар». Один спутник Солнца, вращающийся в плоскости солнечного экватора с угловой скоростью $\omega_{\odot} \approx 0,248$ рад/сут, на расстоянии от его центра $R_{HS} \approx 36,2 R_{\odot}$ будет все время «висеть» над одной и той же точкой поверхности. Вследствие дифференциального вращения точки поверхности Солнца с ненулевыми широтами будут медленно отставать, постепенно уходя из поля зрения ИСС. С помощью одиночного «Гелиостационара» можно исследовать проблемы 2° – 5° (см. раздел 1) для активных областей, расположенных под ИСС.

2°. Система «Гелиостационаров». Идеальной представляется система из трех ИСС, отстоящих друг



Идеальная геометрия проекта «Гелиостационар»: S — Солнце; 1 — орбита ИСС «Гелиостационар» ($HS1$, $HS2$ и $HS3$), 2, 3 и 4 — орбиты планет Меркурий, Венера и Земли, F — спирали межпланетного магнитного поля. Расстояния приведены в логарифмическом масштабе, за единицу измерения принята $1/3$ солнечного радиуса

от друга на 120° (рисунок). Такая система позволит производить одновременный обзор всей поверхности Солнца, а поля зрения соседних ИСС будут перекрываться на $\sim 60^\circ$. Создание одновременно работающей системы из трех «Гелиостационаров» позволит исследовать все указанные выше проблемы солнечной активности, причем в наиболее выгодном стереоскопическом режиме. На рисунке помимо орбиты «Гелиостационаров» показаны орбиты Меркурия, Венеры и Земли. Для удобства сравнения расстояния от центра Солнца представлены в логарифмическом масштабе.

3°. Условия осуществления проекта. Время работы системы «Гелиостационаров» должно быть не менее длительности главного солнечного цикла (22 года). Поскольку рассчитывать на безотказную работу любого КА в течение такого срока не приходится, система спутников, очевидно, должна быть дополняемой. Необходимость длительного существования системы диктуется также тем, что помимо основной научной задачи проект «Гелиостационар» может и должен принять на себя и важнейшую прикладную задачу — упреждающий контроль и прогноз опасных эффектов солнечной активности. В этом его роль также является уникальной. Мы считаем, что подобно геостационарным метеоспутникам в будущем должна постоянно работать служба солнечной «погоды» в ближнем космосе, базирующаяся на «Гелиостационарах».

Отмеченные условия проекта «Гелиостационар» накладывают одно серьезное ограничение: проект должен быть относительно дешевым. Это «денеж-

ное» ограничение влечет за собой важное следствие: проект должен быть сосредоточен на решении одной крупной задачи. Лишь значительный успех первого гелиостационарного ИСС может обеспечить запуск следующих «Гелиостационаров».

3. Главная научная задача

Для первого «Гелиостационара» целесообразно определить в качестве главной задачи мониторинг активных областей, комплексов активности, корональных дыр с целью изучения физики нестационарных процессов в атмосфере Солнца и разработки физически обоснованного метода их прогнозирования.

4. Основная научная аппаратура

Нестационарные процессы в атмосфере Солнца, сопровождаемые ускорением частиц и быстрыми гидродинамическими течениями, определяются сильными магнитными полями, точнее говоря, динамическим поведением высокотемпературной плазмы в сильных магнитных полях [1, 6]). По этой причине необходимы два главных инструмента на борту первого «Гелиостационара»: магнитограф и рентгеновский телескоп.

1°. Солнечный магнитограф. На данной стадии рассмотрения проекта «Гелиостационар» нет смысла обсуждать возможные параметры приборов, но важно ясно представлять необходимые типы измерений, выполняемых каждым из них. Магнитограф должен измерять три компоненты поля на двух уровнях: в фотосфере и хромосфере. Наблюдения такого типа необходимы для расчета магнитного поля в короне.

Сравнивая вычисленные варианты трехмерных корональных полей с трехмерными структурами, наблюдаемыми в рентгеновском излучении, можно найти непотенциальную составляющую магнитного поля на фоне доминирующего в нижней короне потенциального поля. Это позволит рассчитать электрические токи в короне. Тем самым можно вплотную подойти к постановке электродинамической задачи о процессах вспышечного типа в атмосфере Солнца.

2°. Рентгеновский телескоп. Практика исследований Солнца на ИСЗ «SMM» и «Yohkoh» свидетельствует о том, что рентгеновский телескоп на первом ИСС «Гелиостационар» должен иметь несколько энергетических каналов. Это позволит диагностировать тепловые и нетепловые процессы. Анализ трехмерных структур в низкоэнергетических ($< 30\text{--}40\text{ кэВ}$) каналах позволит рассчитать не только температуру и меру эмиссии, как в случае двумерных изображений [8], но и концентрацию высокотемпературной плазмы. Данные о рентгеновском излучении в высокоэнергетических ($> 30\text{--}40\text{ кэВ}$) каналах телескопа необходимы для того, чтобы изучать ускорение частиц в нестационарных явлениях на Солнце [9].

3°. Аппаратура для измерений *in situ*. Базовый комплекс аппаратуры для измерений *in situ* должен, как минимум, включать: спектрометр энергичных

частиц, магнитометр, детекторы солнечного ветра. Этот небольшой комплекс предназначен для выполнения следующих задач: (а) измерения динамических характеристик гелиосферы в неисследованной области малых расстояний от Солнца; (б) исследования с близких расстояний эффектов солнечной активности в ближней гелиосфере; (в) выяснение топологических особенностей корональных магнитных полей; (г) проведение упреждающего контроля опасных проявлений активности Солнца.

Заключение

Решение конкретно поставленной физической задачи — исследование электродинамических явлений вспышечного типа в атмосфере Солнца — подразумевает весьма специальный космический эксперимент. В системе координат, вращающейся вместе с Солнцем, его искусственный спутник «Гелиостационар», расположенный на расстоянии $\sim 0,168$ а.е., непрерывно следит за поведением высокотемпературной плазмы в сильных магнитных полях. Для этого принципиально необходимы два прибора: хороший магнитограф и хороший рентгеновский теле-

скоп. Комплекс аппаратуры для измерений *in situ* необходим для наблюдений с близких расстояний эффектов солнечной активности при их распространении от Солнца в гелиосферу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-02-18055 и 96-15-96710).

Литература

1. Somov B.V. Fundamentals of Cosmic Electrodynamics. Dordrecht, 1994.
2. Spiegel E.A., Weiss N.O. // Nature. 1980. **287**. P. 616.
3. Kontor N.N. // Adv. Space Res. 1993. **13**, No. 9. P. 417.
4. D'Silva S., Choudhuri A.R. // Astron. Astrophys. 1993. **272**. P. 621.
5. Hénoux J.C., Somov B.V. // Ibid. 1997. **318**. P. 947.
6. Somov B.V. // Physical Processes in Solar Flares. Dordrecht, 1992.
7. Орешина А.В., Сомов Б.В. // Астрон. журн. 1996. **73**. С. 292.
8. Tsuneta S., Masuda S., Kosugi T., Sato Y. // Astrophys. J. 1997. **478**. P. 787.
9. Somov B.V., Kosugi T. // Ibid. 1997. **485**. P. 859.

Поступила в редакцию
24.10.97