

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЦА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.Д. Кузнецов

SPACE RESEARCH INTO THE SUN: CURRENT STATE AND PROSPECTS

V.D. Kuznetsov

Дается обзор состояния и перспектив космических исследований Солнца, играющих существенную роль в понимании природы протекающих на нем процессов и при изучении других аспектов солнечно-земной физики. Приводятся наиболее значимые результаты, полученные с помощью космических аппаратов и относящиеся к разным разделам физики Солнца – от недр до короны. Кратко излагаются цели и задачи солнечных космических проектов, которые находятся в стадии разработки или стадии рассмотрения.

This paper is a review of the current state and prospects of the space research into the Sun playing an important role in studies of solar-terrestrial physics. We present the most significant results obtained with spacecraft for different fields of solar physics – from the interior to the corona. Goals and tasks of space solar projects under development or consideration are briefly discussed.

Введение

Исследования Солнца являются неотъемлемой частью солнечно-земной физики, которая изучает процессы и явления в системе Солнце–Земля. Солнечное электромагнитное и корпускулярное излучение, солнечный ветер и активные явления на Солнце являются постоянными источниками космической погоды в околоземном космическом пространстве. Изучение и понимание природы солнечной активности открывает возможности понимания солнечно-земных связей и предсказания последствий воздействия солнечной активности на Землю. За последние годы наиболее значимый прогресс в изучении Солнца и его активности был достигнут с помощью наблюдений с космических аппаратов [Кузнецов, 2009а]. Таблица, в которой солнечные космические проекты подразделены по стадиям их реализации (выделена также колонка российских проектов), дает представление о текущем состоянии космических исследований Солнца. Наиболее значимые научные результаты завершенных и некоторых действующих солнечных космических проектов приведены в [Кузнецов, 2009] (см. также [Кузнецов, 2010а, б; Кузнецов, 2009б]). Ниже приводятся некоторые результаты последних лет, а также дается представление о современных тенденциях в развитии космических исследований Солнца. В таблице в скобках указан год запуска космического аппарата (КА), для завершенных проектов – годы работы на орбите. SOHO – Solar Heliospheric Observatory, TRACE – Transition Region And Coronal Explorer, RHESSI – Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager, STEREO – Solar-Terrestrial Relations Observatory, SDO – Solar Dynamics Observatory, КОРОНАС – Комплексные орбитальные околоземные наблюдения Солнца.

Некоторые результаты космических исследований Солнца

Космические исследования Солнца направлены на изучение его как астрофизического объекта, изучение его структуры и динамики, понимание происходящих на Солнце процессов и причин 11-летней солнечной цикличности, которая пока не поддается надежному и однозначному описанию и предсказанию. Аномально затянувшийся минимум 23-го цикла и медленный

подъем 24-го цикла – лишнее подтверждение тому, что мы еще не в достаточной мере знаем внутреннюю динамику Солнца и действие солнечного динамо. Целый ряд научных проблем, представляющих астрофизический и практический интерес, – нагрев солнечной короны, ускорение солнечного ветра и его источники на Солнце, триггерные механизмы выбросов и вспышек и т. д. – остаются предметом детального анализа, в котором космические исследования играют весьма существенную роль, с каждым новым проектом заметным образом расширяя наши знания о Солнце.

Солнечные недрa

При изучении солнечных недр, благодаря гелиосейсмологическим наблюдениям на SOHO, можно отметить целый ряд фундаментальных результатов: получена картина дифференциального вращения Солнца и внутренней структуры конвективной зоны, продемонстрирована возможность детектирования всплывающих магнитных потоков и других процессов на больших глубинах под фотосферой и на обратной стороне Солнца, дано удовлетворительное теоретическое описание наблюдаемых частот глобальных колебаний (p-мод) Солнца, изучены динамика их поведения и другие закономерности. Так, по данным спутников КОРОНАС-Ф (спектрофотометр ДИФОС – дифференциальный фотометр осцилляций Солнца) и КОРОНАС-ФОТОН (многоканальный солнечный фотометр СОКОЛ, СОКОЛ – солнечные колебания) установлена зависимость амплитуды глобальных пятиминутных колебаний как функция длины волны (рис. 1). Расчеты методом решения обратной задачи позволили выяснить, что собственные колебания Солнца в фотосфере состоят из связанных между собой температурных волн и p-мод колебаний, причем периодические флуктуации яркости Солнца и звезд солнечного типа образуются в основном не самими p-модами (как это обычно предполагается), а температурными волнами, создаваемыми p-модами за счет неадиабатичности колебаний в фотосфере.

Важным результатом локальной гелиосейсмологии является также получение картины подфотосферной структуры солнечного пятна – основного магнитоплазменного образования в солнечной атмосфере – и объяснение его длительной устойчивости за счет обра-

Космические проекты разных агентств и стран по исследованию Солнца

Состояние проекта	HACA + ЕКА + Япония + Китай	Россия
Завершенные	Yohkoh (1991–2001) ULYSSES (1990–2009)	КОРОНАС-И (1994–2001) КОРОНАС-Ф (2001–2005) КОРОНАС-ФОТОН (2009)
Действующие	SOHO (1995) TRACE (1998) RHESSI (2002) Hinode (2006) STEREO (2006) SDO (2009)	
В стадии приготовления	SOLAR PROBE+ (2018)	Интергелиозонд (>2014)
В стадии разработки	SOLAR ORBITER (>2018)	Полярно-эклиптический патруль (ПЭП)
В стадии рассмотрения	Проекты программы HACA ROADMAP 2009–2030	Арка Система

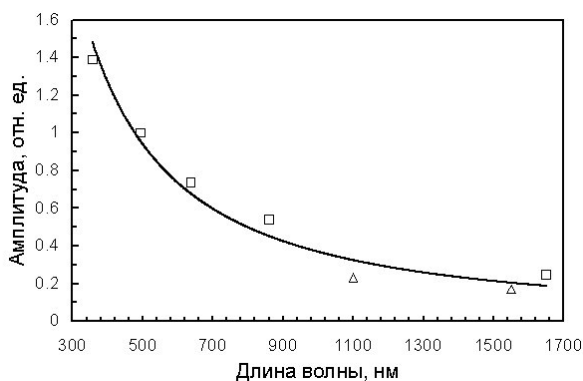


Рис. 1. Амплитуда глобальных пятиминутных колебаний как функция длины волны. Квадраты – данные наблюдений, полученные с помощью фотометра ДИ-ФОС/КОРОНАС-Ф, треугольники – данные фотометра СОКОЛ/КОРОНАС-ФОТОН.

зования под фотосферой на разных глубинах двух тороидальных вихрей, опоясывающих магнитную трубку пятна и препятствующих расширению магнитного поля пятна и его распаду.

По данным наблюдений RHESSI определена сплюснутость Солнца – различие радиусов Солнца (края лимба) на экваторе и на полюсе, возникшее за счет вращения, – которая составила около 6 км.

Солнечная атмосфера – от фотосферы до короны

В изучении солнечной атмосферы от фотосферы до короны заметное развитие получил метод изображающей спектроскопии – одновременные наблюдения в нескольких спектральных линиях, соответствующих разным температурам их формирования и соответственно разным высотным слоям солнечной атмосферы. Наблюдения в оптическом, жестком ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах позволили изучить морфологию активных явлений – корональных выбросов массы и вспышек, понять взаимосвязь процессов в нижней атмосфере и короне, выполнить детальную спектроскопическую диагностику спокойной атмосферы Солнца и вспышечной солнечной плазмы. Так, по данным КОРОНАС-Ф (рентгеновский спектрометр РЕСИК) впервые измерены полнопрофильные (без зашкаливания) спектральные линии от самых мощных вспышек, и на этой основе изучены процессы выделения и дис-

сипации энергии в солнечных вспышках – возбуждение внутренних оболочек атомов и диэлектронной рекомбинации, эффекты изменения ширины спектральных линий за счет наличия заметной плазменной турбулентности, радиальные скорости разлета излучающей вспышечной плазмы. Получены аргументы в пользу того, что фракционирование элементов в солнечной атмосфере, приводящее к FIP-эффекту (FIP – First Ionization Potential), скорее всего, происходит в нижней, а не в верхней хромосфере, как предполагалось ранее.

Наблюдения с высоким временным и пространственным разрешением позволили обнаружить процесс непрерывного микропересоединения над полутьно солнечного пятна, которое сопровождается короткоживущими (менее 1 мин) микровыбросами (длина ~1000–3000 км, скорость ~50 км/с).

Солнечные активные явления и космическая погода

При исследовании активных явлений на Солнце на основе наблюдений с высоким пространственным разрешением на КА SOHO, TRACE, RHESSI, КОРОНАС-Ф выявлены тонкая структура магнитных полей активных областей и процессов энерговыделения в солнечных вспышках, топологическая перестройка структуры магнитного поля при вспышках, сопровождаемая формированием токовых слоев и магнитным пересоединением. О процессах магнитного пересоединения в шлемовидных конфигурациях магнитного поля свидетельствуют многочисленные плазменные микровыбросы, наблюдавшиеся КА «Hinode» на уровне хромосферы. Размер таких шлемовидных структур составляет ~1–5 угл. сек (725–3500 км).

Наблюдения корональных выбросов массы, производившиеся коронографом LASCO/SOHO и много давшие их изучению в ближней зоне Солнца, получили продолжение при работе КА SDO и STEREO. Наблюдения на SDO дают детальную динамическую картину выбросов с поверхности Солнца, в которой хорошо видна структура скрученных выбрасываемых петель. На КА STEREO, помимо коронографических наблюдений выбросов массы в ближней зоне Солнца с помощью гелиосферного телескопа, прослеживается распространение связанных с ними гелиосферных возмущений вплоть до орбиты Земли (рис. 2).

Восстановленная по наблюдениям двух пространственно-разнесенных КА STEREO форма выбросов в гелиосфере изображена на рис. 3 и представляет собой сильно расширившуюся магнитную петлю. Гелиосферные возмущения при ее распространении охватывают широкий диапазон гелиодолгот, достигающий 180° .

Наблюдения Солнца с пространственно-разнесенных КА STEREO позволяют получить данные для реконструкций трехмерных изображений Солнца и структур солнечной атмосферы, а также трехмерного магнитного поля Солнца (рис. 4).

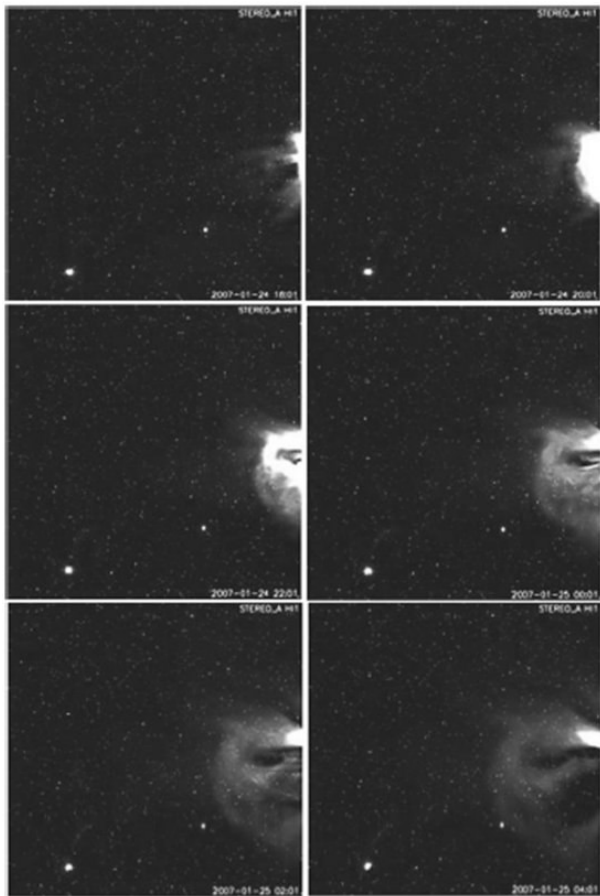


Рис. 2. Корональный выброс массы из Солнца и его распространение в гелиосфере (наблюдения КА STEREO). Две яркие точки – планеты Меркурий и Венера.

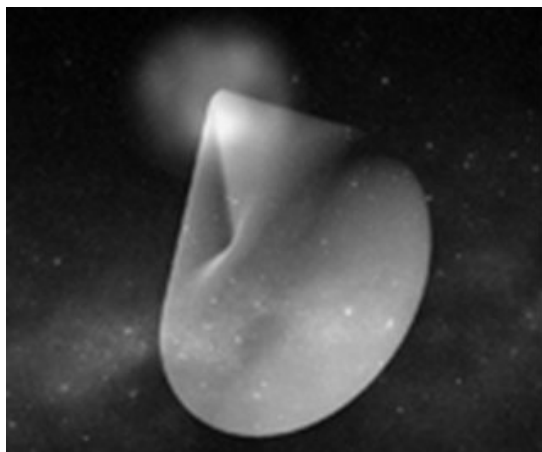


Рис. 3. Реконструкция формы коронального выброса массы в гелиосфере по наблюдениям двух КА STEREO.

Измерения на КА интегрального потока солнечного излучения (солнечной постоянной), играющего важную роль в энергобалансе Земли, показывают незначительные (около 0.1 %) вариации этой величины в 11-летнем цикле солнечной активности (рис. 5) (см., например, [Fröhlich, 2009]). Одним из экспериментальных объяснений хоть и незначительного, но роста потока солнечного излучения в максимуме солнечного цикла могут служить измерения потоков рентгеновского излучения от активных областей, выполненные в безвысшыщенные периоды (рис. 6). На приведенных спектрах видно, что чем больше число солнечных пятен, тем больше поток солнечного излучения в более жесткой части спектра. Такое увеличение потока излучения от активной области можно связать с магнитными полями и нагревом корональной плазмы, вызванным текущими в активной области токами и нетепловыми процессами магнитного пересоединения, которые, как показали наблюдения КА «Hinode» (см. выше), непрерывно происходят в области над полутенью пятна.

Исследования солнечного ветра на основе анализа спектра флуктуаций по данным КА ACE позволили сделать вывод о том, что солнечный ветер не является однородным, а представляет собой структуру типа «спагетти», состоящую из магнитных трубок с разрывами между ними и являющуюся отражением «магнитного ковра» на поверхности Солнца [Borovsky, 2010].

Будущие солнечные космические проекты

Стратегия будущих солнечных космических миссий состоит в проведении наблюдений Солнца с еще более высоким временным и пространственным разрешением, наблюдений из выгодных положений по отношению к Земле и к линии Солнце–Земля (внеэклиптических положений, сбоку от линии Солнце–Земля), проведении локальных измерений вблизи Солнца и т. д. Нерешенными остаются многие проблемы физики Солнца, такие как нагрев короны и ускорение солнечного ветра, локализация

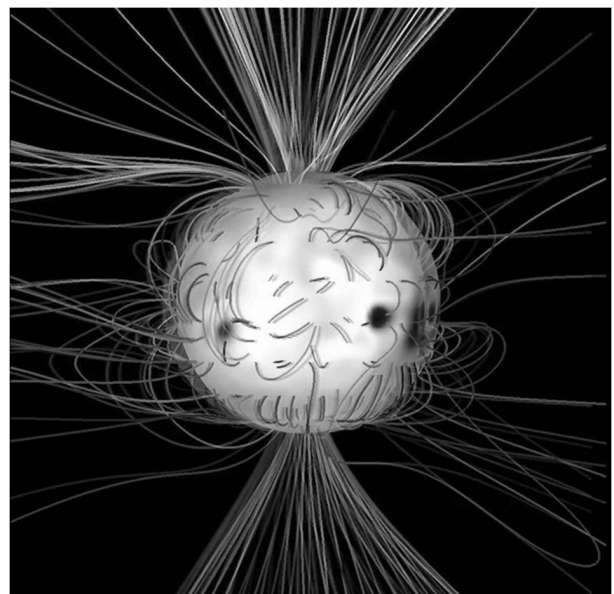


Рис. 4. Модельная реконструкция трехмерного магнитного поля Солнца по данным КА STEREO.

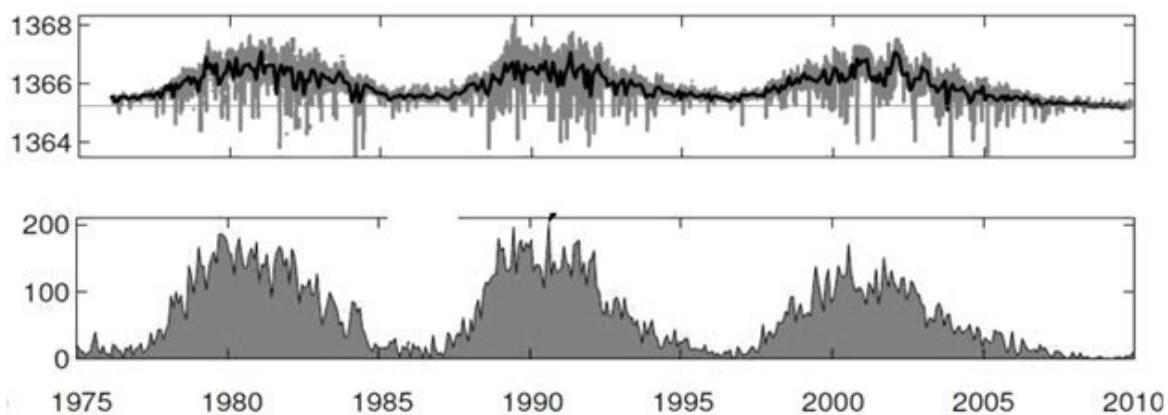


Рис. 5. Вариации солнечной постоянной в 11-летнем цикле солнечной активности. Вверху – изменение интегрального потока солнечного излучения, внизу – изменение числа солнечных пятен.

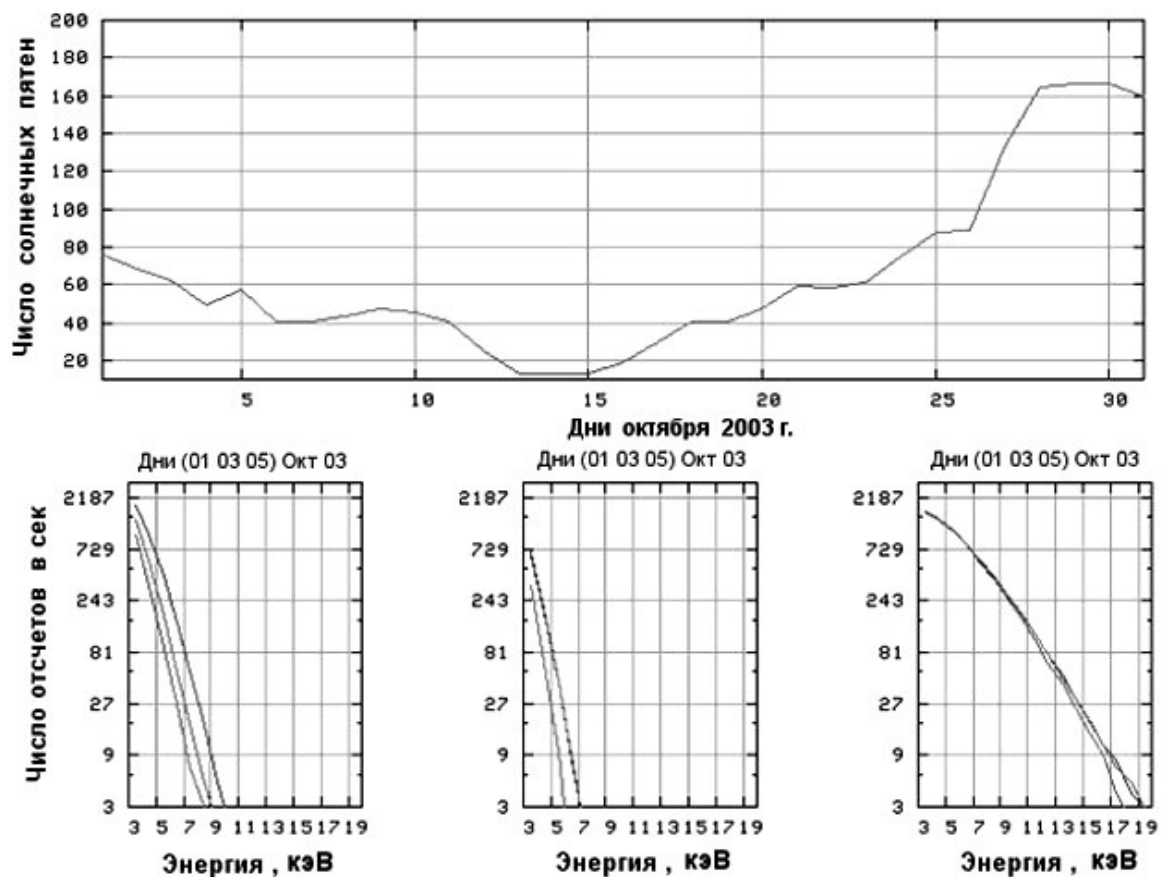


Рис. 6. Зависимость спектров рентгеновского излучения активных областей (для временных интервалов без вспышек) от числа солнечных пятен, иллюстрирующая увеличение солнечного потока излучения в более жесткой части спектра при росте числа солнечных пятен (рентгеновский спектрометр РПС-1/КОРОНАС-Ф) [Кузнецов, 2009б].

источников солнечного ветра на Солнце, механизм динамо, адекватно описывающий солнечный цикл и многие его особенности, прогноз длительности и высоты солнечных циклов, триггерные механизмы солнечных вспышек и выбросов массы и т. д.

В наиболее полном виде проблематика современной гелиофизики, которая включает в себя исследования Солнца и системы Солнце–Земля, солнечно-земную физику и физику гелиосферы, изложена в Концепции НАСА на период до 2030 г. [Heliophysics, 2009]. Приоритетными признаны научные исследования, которые должны дать ответы на следующие глобальные вопросы.

- Каковы причины происходящих на Солнце изменений?
- Как откликаются на эти изменения Земля и гелиосфера?
- Каково воздействие процессов в гелиосфере на человечество?

В связи с этим на данном этапе выделяют три основных группы научных целей:

- 1) разработка методов предсказания условий космической окружающей среды;
- 2) понимание космического происхождения нашей планеты;
- 3) обеспечение безопасности космических миссий.

В рамках каждой научной цели сформулированы основные научные направления исследований.

1. Магнитное пересоединение, ускорение и перенос частиц, взаимодействие ионов и заряженных частиц, работа динамо и изменения, к которым она приводит.

2. Причины и эволюция солнечной активности, земная магнитосфера, ионосфера и верхняя атмосфера, роль Солнца в изменениях земной атмосферы, применение наших знаний при изучении других планет.

3. Переменность, экстремальные состояния и граничные условия; возможность прогноза происхождения, начала и уровня солнечной активности; воздействие на планеты и их окружение.

Далее, более подробная структуризация разработанной Программы НАСА включает приоритетные научные темы (девять тем связаны с изучением фундаментальных процессов, девять – с изучением взаимосвязей в Солнечной системе) и наиболее важные нерешенные научные вопросы (53 вопроса), которые и являются основой разработки и отбора новых космических миссий из числа предложенных коллективами ученых к рассмотрению (45 миссий-кандидатов).

Фундаментальные физические процессы в системе Солнце–Земля в соответствии с изложенными выше приоритетными научными задачами будут изучаться космическими средствами НАСА в рамках двух основных направлений: космические миссии под названием «Солнечно-земные зонды» (четыре миссии) и космические миссии в рамках программы «Жизнь со звездой» (девять миссий, две-три миссии каждые 10 лет). Кроме того, в рамках программы «Explorer» будут реализовываться малые и средние гелиофизические миссии. С перечнем конкретных космических проектов и их назначением можно ознакомиться в [Heliophysics, 2009] (см. также [Кузнецов, 2009а]). В их числе находятся будущие солнечные космические миссии – «Solar Orbiter» (SO, запуск предполагается в 2017 г. совместно с Европейским космическим агентством), «Solar Probe+» (SP+, 2018), «Solar Energetic Particle Acceleration and Transport» (SEPAT, 2021), «Heliospheric Magnetism» (HMag, 2018). В качестве солнечных космических проектов-кандидатов предложено к рассмотрению 16 проектов, охватывающих всю проблематику солнечной физики.

Европейское космическое агентство разрабатывает упомянутый выше солнечный проект «Solar Orbiter», коллективами европейских ученых разрабатываются и предлагаются для рассмотрения проекты «ASPIICS/PROBA-3» (создание космического гигантского коронографа с внешним затмением) и HiRISE (High Resolution Imaging and Spectroscopy Explorer).

Проекты Японии в области солнечной физики разрабатываются и реализуются в тесном международном сотрудничестве JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), НАСА и Европейского космического агентства. В настоящее время на орбите работает солнечный спутник «Hinode» (Solar-B), в разработке находятся два солнечных проекта «Solar-C Plan A» (наблюдения полярных областей Солнца для изучения источников высокоскоростного солнечного ветра и механизма солнечного динамо) и «Solar-C Plan B» (изучение ди-

намики хромосферы и переходной области на основе спектроскопических наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением).

В Китае космические исследования Солнца развиваются в рамках программ «Solar Microscope (SM)» и «Solar Panorama (SP)» [CNCOSPAR, 2010]. Первая направлена на изучение физических процессов, связанных с внутренней структурой Солнца и ее эволюцией, магнитной активностью, корональными конфигурациями и динамическими явлениями, на основе многоволновых наблюдений с высоким пространственным разрешением. Вторая программа направлена на изучение солнечной активности в целом, объяснение связи между мелкомасштабными движениями и крупномасштабными проявлениями, диагностику солнечной переменности посредством многоволновых наблюдений. Для каждой программы предложено несколько миссий-кандидатов, большая часть которых находится только в стадии концептуальной разработки. В настоящее время на начальной стадии ведутся разработки солнечных проектов «Super High Angular Resolution Principle Solar X-ray Telescope» (SHARP-X), «Space Stereo Detection of Solar Magnetic Field» и на технической стадии – проекта «Large-Size and Wide Energy Coverage Spectroscopic Imager of Solar High Energy Radiations». В рамках широкой международной кооперации разрабатывается проект «KuaFu» для исследований космической погоды, магнитных бурь и полярных сияний. В течение более 15 лет ведется разработка космического солнечного телескопа (SST – Space Solar Telescope) и ключевых технологий его создания. Инициативный проект SPORT (Solar Polar Orbit Radio Telescope) направлен на получение изображений корональных выбросов массы в радиодиапазоне с КА на полярной околосолнечной орбите.

В российском проекте «Интергелиозонд» предполагаются наблюдения Солнца с близких расстояний и локальные измерения в ближайших окрестностях Солнца, которые позволят продвинуться в понимании механизмов нагрева солнечной короны, ускорения солнечного ветра, происхождения наиболее мощных проявлений солнечной активности – солнечных вспышек и выбросов коронального вещества. Гелиоцентрическая орбита КА «Интергелиозонд» (рис. 7) формируется за счет многократных гравитационных маневров у Венеры, обеспечивающих постепенное сближение с Солнцем. Они будут использованы также для обеспечения наклона плоскости орбиты КА к плоскости эклиптики и проведения внеэклиптических наблюдений Солнца – полярных областей и эклиптической короны.

Проект «Полярно-эклиптический патруль» (ПЭП) [Кузнецов, 2009в] разрабатывается при кооперации российских институтов для изучения глобальной картины солнечной активности и ее проявлений в гелиосфере и околоземном космическом пространстве. В рамках этого проекта два малых космических аппарата за счет гравитационных маневров у Венеры помещаются на наклоненные к плоскости эклиптики гелиоцентрические орбиты, так что их плоскости располагаются под углом друг к другу (рис. 8), а КА на орбитах разнесены на четверть периода. При такой орби-

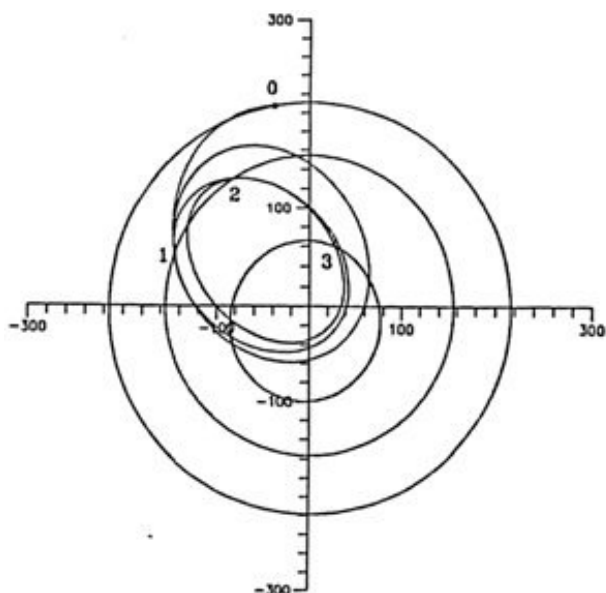


Рис. 7. Баллистическая схема проекта «Интергелиозонд». Показаны орбиты Земли, Венеры и Меркурия; Солнце – в центре координат. Шкала расстояний дана в а.е.



Рис. 8. Баллистическая схема проекта «Полярно-эклиптический патруль».

тальной схеме контроль плоскости эклиптики и линии Солнце–Земля непрерывно обеспечивается не с одного из внеэклиптических КА, а в течение длительного времени с обоих КА. Наблюдения солнечных выбросов с двух пространственно-разнесенных КА и из внеэклиптического положения позволит наиболее точно определять направление распространения выбросов по отношению к линии Солнце–Земля, их гелиоширотную и гелиодолготную протяженность, а также осуществлять непрерывный мониторинг состояния солнечной активности, гелиосферы и космической погоды в околоземном космическом пространстве.

При написании статьи помимо литературных источников использованы материалы сайтов солнечных космических проектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кузнецов В.Д. Космические исследования Солнца // Пятьдесят лет космических исследований (по материалам Международного форума, посвященного пятидесятилетию запуска Первого искусственного спутника Земли, «Космос: наука и проблемы XXI века», РАН, октябрь 2007 г., Москва). М.: Физматлит, 2009. С. 60–92.

Кузнецов В.Д. Космические исследования Солнца // Успехи физических наук. 2010 (в печати).

Кузнецов В.Д. Космические исследования ИЗМИРАН // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 46–52.

Кузнецов В.Д. Солнечно-земная физика: результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф / Под ред. В.Д. Кузнецова. М.: Физматлит, 2009. С. 488.

Кузнецов В.Д. Полярно-эклиптический патруль (ПЭП) для исследований Солнца и контроля солнечных источников космической погоды // Проблемы управления и информатики. № 6, ноябрь–декабрь 2009. С. 71–78.

Borovsky J.E. Contribution of strong discontinuities to the power spectrum of the Solar Wind // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. P. 111102.

CNCOSPAR. Space Science Activities in China 2008–2010. National Report. Beijing, July 2010.

Heliophysics. The Solar and Space Physics of a New Era. Recommended Roadmap for Science and Technology 2009–2030. 2009 Heliophysics Roadmap Team Report to the NASA Advisory Council Heliophysics Subcommittee, May 2009.

Fröhlich C. Evidence of a long-term trend in total solar irradiance // Astron. Astrophys. 2009. V. 501. P. L27.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк