

Бурная жизнь Солнца

А.А.Гурьянов

Сегодня космические исследования Солнца переживают подъем во всем мире. Никогда прежде они не были столь интенсивными и многосторонними.

Знание о Солнце

Наши сведения о строении Солнца так же неполны и недостаточны, как и о Земле. В тело нашей планеты исследователи смогли углубиться всего на десяток километров. Это около тысячной доли ее диаметра. С Солнцем ситуация еще хуже. Прямыми оптическими методами можно изучать только первые сотни километров его глубины, то есть стотысячные доли диаметра. Так что глубокие горизонты обоих небесных тел прямым исследованиям недоступны. Косвенные же экспериментальные данные для своей интерпретации требуют серьезной проработки модельных представлений, которые пока далеки от совершенства.

С каждым годом человечество понимает, как сильно оно зависит от Солнца, и не только из-за получения от него энергии. В XX веке стали популярны идеи о влиянии Солнца на физико-химические, биологические и даже социальные процессы, высказанные А.Л.Чижевским в его книге «Земное эхо солнечных бурь». Теперь понятно, что не только бури на Солнце, но и «штили», такие, как наблюдаемое с 2001 года отсутствие солнечных пятен и мощных выбросов, связаны с земной погодой. Высказаны даже предположения, что нынешняя невысокая солнечная активность коррелирует с климатическими изменениями, которые прекрасно ощущают все земляне. К сожалению, сведений о нашей звезде пока недостаточно для однозначной оценки подобных гипотез. И тем не менее никогда за всю свою историю человечество не знало о Солнце так много.

Стандартная модель

Солнце интересовало астрономов с древних времен. Например, англичанин Уильям Гершель, открывший планету Уран, в конце XVIII века предполагал, что наше светило — это окруженный горячей атмосферой твердый шар, поверхность которого проглядывает в виде темных пятен. Сегодня в науке господствует стандартная модель Солнца, разработанная физиками-ядерщиками в первой половине XX века.

Согласно этой модели, наша звезда — почти идеальный по форме газоплазменный водородно-гелиевый шар диаметром около полутора миллионов километров. Ее средняя плотность в четыре раза меньше земной, около полутора граммов на кубический сантиметр. За счет осевого вращения шар чуть сплюснут у полюсов, всего на тысячную долю процента. По нынешним представлениям, внутри солнечного ядра, занимающего около трети радиуса звезды, миллиарды лет идет ядерный синтез, реакции водородного и углеродного ядерных циклов. В них в результате многостадийного слияния атомов водорода либо замкнутой реакции с участием в качестве катализатора углерода образуются атомы гелия и выделяется колоссальная энергия. Считается, что еще пять миллиардов лет они будут обеспечивать теперешнее энергетическое состояние Солнца и его планетной системы.

Следующую треть радиуса занимает так называемая зона лучистого переноса. Температура в ней уже недостаточна для ядерных реакций, здесь энергию к внешним слоям передают фотоны, изначально образовавшиеся при ядерных реакциях в виде гамма-квантов. Они в своем движении к внешней поверхности постоянно рассеиваются на ионах. Согласно расчетам, отдельный фотон проходит от ядра до поверхности за десять — сто тысяч лет.

Верхнюю треть солнечного шара составляет конвективная зона, в которой постоянно перемешиваются потоки вещества. Из-за них поверхность Солнца выглядит гранулированной. Гранулы-ячейки — это области подъема горячей плазмы, их более темные границы — области ее опускания. Получается что-то вроде ячеек Бенара, возникающих в слое масла, налитого на горячую сковородку. Размер ячеек на Солнце порядка сотни километров, и живут они с десяток минут.

Эту равномерную картину нарушает образование крупных ассоциаций гранул, а также появление очень неоднородных, более холодных и темных на вид из-за своего сильного маг-

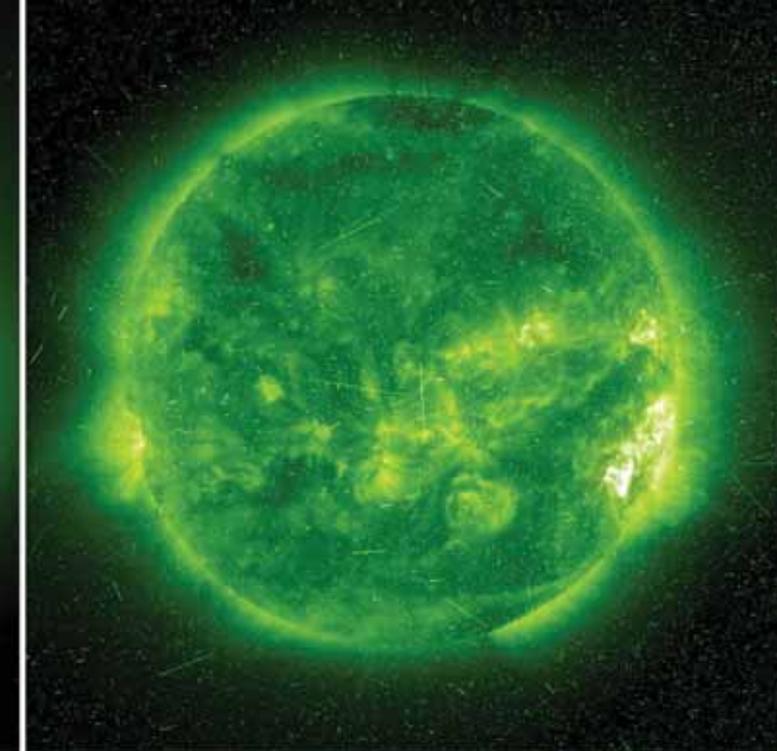


Фото ЕКА



Внешние сферы

Атмосферу звезды принято делить на три слоя. Первый, протяженность которого — несколько сотен километров, называется фотосферой. Эта светоизлучающая зона имеет среднюю температуру около шести тысяч градусов, спадающую наружу примерно на четверть температуры. Такой узкий температурный минимум и принято считать границей Солнца, ведь связать ее с какой-либо фазовой границей, как, например, «почва-атмосфера» или «вода—атмосфера» на Земле, для газового шара не представляется возможным.

Выше фотосферы простирается более разреженная и на порядки более горячая хромосфера, названная так из-за своей розовой окраски. Она неравномерна по толщине и имеет волокнистую структуру. Хромосферный слой значительно менее ярок, чем фотосферный, поэтому с Земли его явно можно наблюдать только при затмениях солнечного диска Луной, которая перекрывает основной поток солнечного света.

Так же можно увидеть и третий атмосферный слой — корону. Она очень неоднородна по своей форме, которая существенно зависит от стадии солнечной активности. Корона непрерывно переходит в солнечный ветер, пронизывающий область влияния нашей звезды — гелиосферу. Этот ветер — поток частиц плазмы, в основном протонов и альфа-частиц, ядер гелия-4, уносящийся в межзвездное пространство вместе с силовыми линиями магнитного поля.

Влияние сложного многополюсного солнечного магнитного поля, которое циклически, в среднем за два десятилетия, обращает свою полярность — то есть северный полюс Солнца меняется положением с южным, — простирается за сотни орбитальных радиусов Земли, до границ нашей планетной системы. При вращении Солнца его магнитное поле, обычно состоящее из двух или четырех секторов противоположной полярности, закручивается в спираль, подобную свастике, и вращается вместе со звездой, совершая оборот за 28 с лишним дней.

Все сказанное делает Солнце уникальной физико-химической лабораторией для изучения самых разнообразных научных явлений. Причем новые выдающиеся результаты достигаются главным образом благодаря современным космическим программам и аппаратам.

Звездные пятиминутки

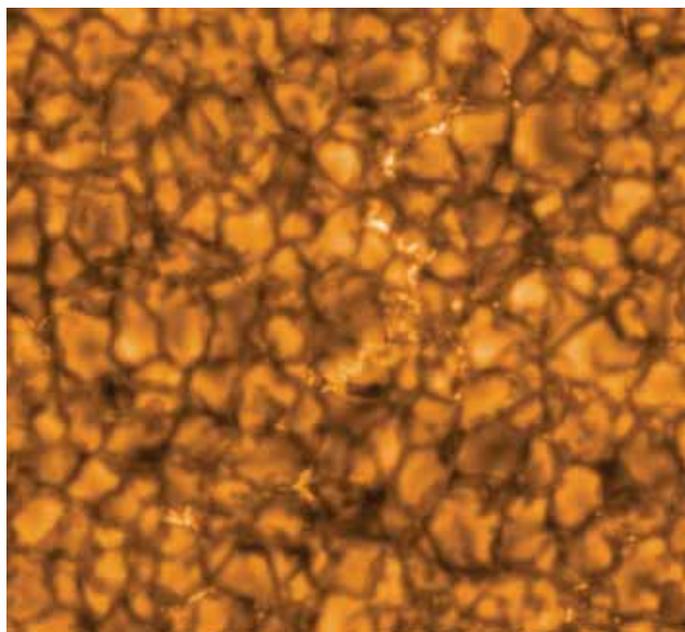
К концу XX века стало возможно детальное исследование глубин Солнца по характеристикам его колебаний. Подобно Земле, наша звезда в разной степени прозрачна для акустических волн, характеристики которых несут уникальную информацию о ее глубинном строении. На Земле сейсмические волны часто генерируют искусственно, но во время землетрясений они возбуждаются естественным образом. Солнцетрясения разных величин и частот возникают постоянно. Они и составляют предмет новой науки — солнечной сейсмологии.

При наблюдениях из космоса были найдены глобальные колебания поверхности, которые проявляются в слабых, на уровне десятитысячных процента, изменениях в потоках светового излучения и скоростей движения плазмы. Космооб-

Аппарат «SOHO» запечатлел в ультрафиолетовых лучах мощную солнечную вспышку в ноябре 2003 года. Первое фото снято спустя несколько минут после события. На втором фото видно, что в районе вспышки (справа внизу) возник мощный источник ионизирующего излучения, оно порождает электроны, летящие со скоростью, близкой к скорости света. Спустя десятки минут до Земли долетают и сами ионы, порожденные вспышкой, — следы их взаимодействия с детектором подобны снежинкам, покрывшим поверхность третьего снимка

нитного поля солнечных пятен. Периодичность их появления составляет одиннадцать с небольшим лет, однако она не строга. На поверхности конвективной зоны также постоянно возникают и другие проявления солнечной активности. Это выбросы различного рода, протуберанцы, факелы, арки, струи, нити и прочие разнообразнейшие поверхностные явления, простирающиеся из конвективной зоны в солнечную атмосферу.

Фото ЕКА



Ячейки на поверхности Солнца, как их увидела обсерватория «Hipode»

серватория «SOHO», например, оснащена для изучения этого явления доплеровским интерферометром Майкельсона. Колебания поверхности в среднем имеют период около пяти минут, однако их можно представить в виде суммы многих отдельных колебаний, которые поочередно появляются и исчезают. Их отслеживание позволило установить, как текут и вращаются внутренние слои Солнца.

При локальном изучении пятиминутки можно восстанавливать распределение скорости звука, а значит, и давления под поверхностью звезды, в том числе на невидимой с Земли стороне. Это позволяет предвидеть потоки солнечного вещества и появление активных областей, что дает ключ к прогнозу космической погоды.

Сейсмическими методами исследуют и солнечные пятна, напряженность поля в которых достигает нескольких тысяч гаусс. Пятна состоят из центральной тени и периферийной полутени с длинными продолговатыми гранулами. При ширине до десятков тысяч километров пятна оказались очень неглубокими — всего пять тысяч километров, меньше радиуса Земли. Интересно, что пятно — это устойчивая система двух противоположно вращающихся тороидальных вихрей. В полутени пятен аппарат «Hinode» обнаружил также многочисленные микровыбросы плазмы, которые обусловлены пересоединением, то есть столкновением и взаимным уничтожением противоположно направленных силовых линий переплетенных магнитных полей.

Развитая турбулентность

Космические спектральные аппараты наблюдают дневное светило в различных спектральных диапазонах и линиях, что дает послойные «срезы» солнечной атмосферы, поскольку линии связаны с определенной температурой и физическими полями, а значит, с определенной высотой над поверхностью Солнца. Так были установлены детали грануляции фотосферы. Между ее ячейками со средним размером 140 км обнаружено усиление магнитного поля до нескольких тысяч гаусс, на порядок больше среднего в грануле.

Недавно завершённые солнечные космические экспедиции

«Ulysses», 1990—2009

Запущенный с космического челнока аппарат НАСА и ЕКА. Он приблизился к Солнцу по сложной траектории и изучал его высокие широты, в частности полюса. Десять различных приборов, в том числе детекторы космической пыли и разных видов частиц, позволили существенно уточнить характеристики Солнца. Интересно отметить, что детектировать гравитационные волны аппарату так и не удалось.

КОРОНАС, 1994—2009 (Комплексные орбитальные околоземные наблюдения активности Солнца)

Обширную главу в российских исследованиях Солнца составляет программа Коронас запуска спутников серии, разработанная в 1990-х годах в результате

Магнитные поля звезды влияют на динамику всей атмосферы. Установлено, что вся поверхность Солнца покрыта своего рода магнитным ковром с «ворсом» из силовых линий; они могут выходить из одной точки и замыкаться на несколько других. Это состояние неустойчиво, поэтому, как показали еще советские исследователи, оно вызывает вспышки, выбросы солнечного вещества, появление аркад, скрученных петель самых разных масштабов. Возникновение высоких концентраций тока, то есть токовых слоев в окрестности точек пересоединения магнитных линий, и последующее разрушение слоев ведут к выделению свободной энергии магнитного поля в виде вспышек. Существование токовых слоев было надежно подтверждено экспериментально.

Установлено интересное свойство иерархии процессов солнечного энерговыделения. Масштаб их простирается от редких громадных вспышек до частых мелких вспышек, которые в миллиарды раз слабее и наблюдаются в виде ярких рентгеновских точек во внешне спокойных областях. Все вспышки имеют общие свойства, поэтому солнечную атмосферу до самых малых масштабов можно рассматривать как систему с развитой турбулентностью. Эти данные, подтвержденные многими космическими аппаратами, существенно поколебали представления ученых о спокойном Солнце, которому раньше приписывали отсутствие нетепловых процессов.

Космические аппараты «SOHO», «STEREO», «SDO», «КОРОНАС-Ф» детально изучили самые мощные проявления солнечной активности — корональные выбросы массы. Оказалось, что чаще всего они имеют форму скрученных петель. Выбросы связаны с прорывом всплывающего магнитного потока в корону, вместе с которым движется и плазма.

Загадка нейтрино

Если стандартная модель Солнца верна, то оно должно излучать безмассовые элементарные частицы — нейтрино, которые рождаются при ядерном синтезе. Однако ведущиеся многие десятилетия эксперименты по ловле нейтрино вы-

международного, главным образом российско-украинского, сотрудничества. «КОРОНАС-И» (1994), «КОРОНАС-Ф» (2001—2005) — эти искусственные спутники Земли изучали структуру и динамику солнечной короны, переходного к ней слоя атмосферы и наблюдали солнечную активность. За годы их работы получено немало данных о Солнце.

КОРОНАС-Фотон (2009) был запущен для изучения передачи энергии от Солнца к атмосфере, механизмов ускорения солнечного ветра, исследования вспышек и магнитных штормов. На орбите он просуществовал меньше года и был потерян из-за неисправности системы энергообеспечения при полной исправности комплекса научной аппаратуры. Аппарат получил и передал на Землю около четырехсот гигабайт научной информации.

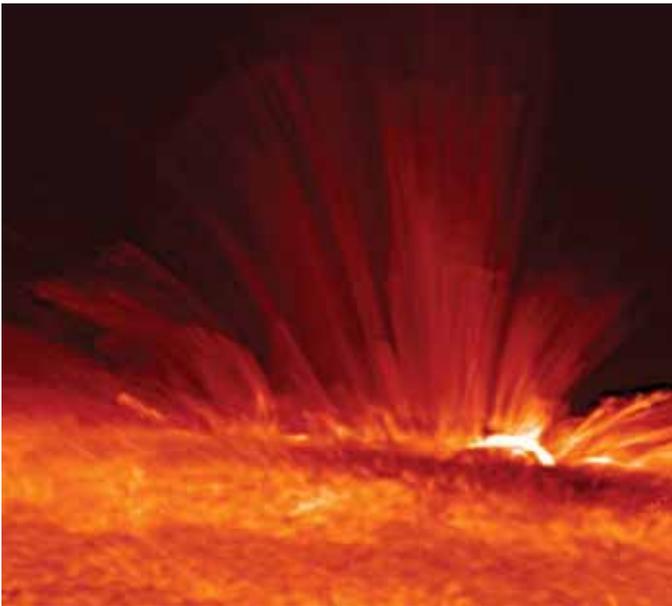
За время полета дюжина приборов спутника детектировала широкий спектр электромагнитных волн и частиц. Время активного функционирования аппарата пришлось на период спокойного Солнца, поэтому крупных вспышек зафиксировано не было. Из-за этого часть научной аппаратуры так и не удалось использовать в полной мере.

Получены и уникальные результаты. В частности, прибор «Сфинкс» зафиксировал микровспышки в ультрафиолете, которые до этого не удавалось поймать другими аппаратами. С помощью телескопов «ТЕСИС» были изучены короткоживущие активные структуры на поверхности Солнца. Прибор «Пингвин-М» успешно измерил вспышки в мягком рентгеновском диапазоне. Прибор «ФОКА» измерил солнечный ультрафиолет, что позволило провести анализ состава и особенностей верхней атмосферы Земли. Передаваемую в Росгидромет каждые четверть часа информацию с этих приборов наряду с изображениями диска Солнца, полученными прибором «ТЕСИС», использовали для прогнозирования земных магнитных бурь до запуска аппарата «Метеор».

Действующие солнечные миссии

SOHO, 1995 (Solar and HelioPhysics Observatory, солнечная и гелиофизическая обсерватория)

Проект НАСА и ЕКА с космическим аппаратом, разработанным консорциумом из Европейского союза, запущен в точку



Обсерватория «Hinode» зафиксировала, как 20 ноября 2006 года линии магнитного поля вертикально выходят из солнечного пятна в окружающее пространство. Они видны благодаря взаимодействию горячего газа с полем

явили так называемый нейтринный парадокс. Число частиц, обнаруженных разными методами и рожденных в ядерных реакциях разных типов, всегда оказывалось в несколько раз меньше теоретически предсказанного — от трети до половины. Значит, либо неверна модель Солнца, либо мы плохо знаем нейтрино.

Для объяснения парадокса выдвигались самые разные гипотезы. Так как ядерный синтез сильно зависит от температуры в центре звезды, то первым делом предположили, что она определена неверно. Детальный анализ совокупности экспериментальных данных вел к неоднозначным выводам.

Лагранжа между Землей и Солнцем (то есть туда, где все гравитационные силы, действующие на спутник, уравновешиваются и он может там находиться, не тратя энергию на коррекцию орбиты) первоначально всего на два года. Но проект оказался настолько успешным, что экспедицию продлили до 2012 года. На борту размещены двенадцать разных приборов, позволяющих проводить масштабные исследования Солнца. Помимо научных данных, аппарат регулярно поставляет информацию о космической погоде, непосредственно влияющей на Землю.

TRACE, 1998 (Transition Region and Coronal Explorer, исследователь переходного слоя и короны)

Одна из экспедиций программы НАСА малых аппаратов-исследователей. Он представляет собой космический телескоп для получения изображений высокого разрешения фотосферы и переходного к короне слоя. Цель — изучение корональных петель, а также связей между тонкой структурой магнитного поля и солнечной плазмой.

RHESSI, 2002 (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, солнечный спектрограф высоких энергий имени Рёвена Рамати)

Шестая из экспедиций малых аппаратов НАСА, названная в честь выдающегося ученого в области солнечной физики высоких энергий. Ее цель — получение изображений солнечных вспышек в диапазоне 3 КэВ — 20 МэВ, то есть от мягкого рентгена до гамма-излучения, а также их высокоразрешающая спектроскопия по частоте и пространству.

STEREO, 2006 (Solar Terrestrial Relations Observatory, обсерватория солнечно-земных связей)

Два почти идентичных аппарата, запущенных на земную орбиту, которые движутся впереди и позади Земли. Они предназначены для получения стереоскопических объемных изображений солнечных явлений. Аппараты несут

С одной стороны, недостаток нейтрино свидетельствовал в пользу более низкой температуры. С другой стороны, сравнение распределений по энергиям нейтрино от разных реакций говорило, что температура должна быть выше.

Эту теоретическую загадку удалось разрешить в предположении, что нейтрино обладает малой массой и тремя разновидностями: электронное, мюонное и тау-нейтрино. Предполагается, что электронное нейтрино преобразовывается (осциллирует) в два других по пути от солнечного ядра до расположенного на Земле детектора. Вместе же их получается ровно столько, сколько предсказывает стандартная модель. Экспериментальные свидетельства в пользу нейтринных осцилляций было получено в начале XXI века в Канаде. И все же это объяснение вызывает много вопросов и пока не завоевало всеобщего признания физиков. Поэтому возникают другие гипотезы

Темные материи светил

Астрономы хорошо знают, что наблюдаемое движение галактик не удается описать с помощью закона всемирного тяготения. Либо неточен закон, либо во Вселенной существует невидимая масса — темная материя, которая взаимодействует с веществом только гравитационно. Млечный Путь, как и остальные галактики, должен притягивать темную материю и находиться в ее облаке. В 2010 году группа испанских

ультрафиолетовые и обычные видеокамеры, детекторы радиоволн и частиц солнечного ветра.

Hinode, 2006 (Рассвет)

Японская экспедиция, совместная с США и Великобританией, изучает взаимодействие магнитного поля Солнца и его короны. На борту космического аппарата размещены оптический и рентгеновский солнечные телескопы, ультрафиолетовый спектрометр.

SDO, 2010 (Solar Dynamics Observatory, солнечно-земная обсерватория)

Экспедиция НАСА, предназначенная для определения влияния Солнца на Землю и околоземное пространство по данным исследований солнечной атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением в широком диапазоне длин волн. Установлены три аппарата: ультрафиолетовый и атмосферный телескопы, магнитно-сейсмический картограф.

исследователей из Института корпускулярной физики при университете Валенсии попыталась с помощью этой модели разрешить нейтринный парадокс.

Их идея в том, что частицы темной материи должны накапливаться внутри массивных объектов, в частности внутри звезд: согласно закону Ньютона, в центре массивного объекта сила тяжести равна нулю. Здесь частицы темной материи захватывают часть энергии вещества и передают ее на периферию, что ведет к охлаждению ядра относительно внешних частей звезды. Поэтому и поток нейтрино окажется уменьшенным в сравнении с предсказаниями стандартной модели.

В том же году было опубликовано и другое теоретическое исследование на ту же тему. Ученые из Оксфорда утверждали, что частицы темного вещества не только снижают поток солнечных нейтрино, но и меняют структуру и химический состав Солнца относительно стандартной модели. В рамках предложенной теории, по имеющимся экспериментальным данным о потоках нейтрино, были определены величина снижения температуры ядра Солнца и вероятность взаимодействия частиц темного вещества с атомами. Это дает возможность более целенаправленно искать легкие частицы темной материи массами 4—10 ГэВ в экспериментах, которые проходят в США и Италии.

Астропроблемы

Нейтринный парадокс — не единственная из нерешенных проблем Солнца. К примеру, неясен процесс нагрева его короны. Вопрос состоит в том, откуда на это берется энергия, как она протекает в корону и в ней распределяется. Предложено несколько физических механизмов. Это и нагрев волнами, рожденными в конвективной зоне, и энерговыделение при множественном пересоединении магнитных силовых линий, и ряд других.

Аппаратура для Солнца

Космические аппараты дают возможность изучить Солнце в тех диапазонах электромагнитных волн, в которых наблюдение с Земли недоступно из-за рассеяния атмосферой, — ультрафиолетовом и рентгеновском. Кроме того, аппараты могут вести исследования с самых разных точек космического пространства, в том числе и вне плоскости вращения Земли по орбите. Специальные зонды могут долго оставаться в сравнительной близости от звезды. Космический эксперимент во многих случаях оказывается более чистым — он позволяет исключить помехи от влияния Земли.

К примеру, одна из насущных задач космических зондов — изучение солнечного ветра, потока частиц, истекающего в гелиосферу. Американский аппарат «Ulysses» детально исследовал эту активность над плоскостью эклиптики, определил гелиоширотную зависимость скорости ветра. Для фазы минимума солнечного цикла эта зависимость до-

У всех на слуху нынешний «сбой» в периодической солнечной активности — современный недостаток солнечных пятен по сравнению с предсказанным их количеством, который длится по крайней мере с 2009 года. Это порождает вопросы о происхождении двенадцатилетнего солнечного цикла и причинах его нестабильности. Примерно одиннадцатилетнюю его периодичность связывают и с движением Юпитера, и с периодичностью интенсивности космических галактических лучей. В гипотезах же о влиянии солнечного цикла на земную погоду или самочувствие людей и разноречивых данных на этот счет недостатка нет.

Еще одна проблема — это источники солнечного ветра. Некоторые исследователи полагают, что он формируется вдоль границ магнитной сетки хромосферы и затем его плазма с ускорением выбрасывается через открытые в пространстве магнитные силовые линии. Неясны также механизмы солнечного динамо, то есть образования магнитного поля Солнца. Непонятны запускаящие процессы вспышек и выбросов массы. И это далеко не все.

Тенденция дальнейшего совершенствования солнечных космических исследований — это прежде всего увеличение пространственного и временного разрешения наблюдаемых явлений. Она связана с задачами детального изучения поверхности Солнца, получения разных ракурсов одних и тех же явлений, а также их трехмерных карт. Все это служит основной цели ясного понимания механизмов существования нашей звезды

Подготовлено с использованием материалов статьи В.Д.Кузнецова, «Успехи физических наук», 2010, №9



Созданный в Институте астрофизики МИФИ прибор «ФОКА» изучал ультрафиолетовое излучение Солнца и верхних слоев атмосферы Земли

статочно проста: устойчивый высокоскоростной ветер из полюсов и изменчивый низкоскоростной из приэкваториальных областей. В фазе максимальной активности установить различие между полярными и экваториальными источниками пока не удается. Напомним, что в 2012—2013 годах нас ожидает максимум солнечной активности.

Солнце, как главный источник космической погоды, возмущает не только гелиосферу. Его ветер и магнитные поля воздействуют и на магнитосферу

Земли. Это ведет к магнитным бурям. Поэтому так важны результаты проекта «STEREO», представляющего собой два космических аппарата, которые вращаются по земной орбите. Один движется впереди Земли, другой позади, оба наблюдают закрытые от земного взгляда области светила. Это позволяет заранее предсказывать и затем отслеживать выбросы солнечной массы, контролировать столкновение их фронтов с магнитосферой Земли, а также создавать трехмерные карты магнитных полей.

Космических солнечных проектов у человечества немало. В 2005 году был завершен российский четырехлетний проект «КОРОНАС-Ф», в 2009-м — «КОРОНАС-Фотон». В том же 2009 году закончен грандиозный проект «Ulysses», продолжавшийся без малого два десятилетия. Активно действуют еще полдюжины международных космических проектов исследования Солнца. Это «SOHO», «TRACE», «RHESSI», «Hinode», «STEREO» и «SDO», начатые соответственно в 1995, 1998, 2002, 2006, 2006 и 2009 годах. К сожалению, среди них нет отечественных, но после 2014 года намечен запуск российского «Интергелиозонда». За рубежом также готовятся к запуску несколько новых космосолнечных программ.