



Венера: научные проблемы, перспективы исследований

Л.В. ЗАСОВА,
доктор физико-математических наук
ИКИ РАН

К сожалению, проект “Вега” поставил последнюю точку в истории наших исследований Венеры. Думаю, что расставание с этой планетой было ошибкой: мы потеряли “экологическую нишу”, одну из немногих областей, где были впереди многие годы, и не только в исследованиях планет, а в фундаментальных космических исследованиях вообще.

В.И. Мороз. Воспоминания

В этой статье речь идет о Венере, которую раньше называли “русской планетой” за решающую роль советских ученых в ее исследованиях. Вернет ли она себе этот титул? Мы подробно расскажем, чем интересна Венера, по каким причинам ее атмосфера и условия на поверхности так не похожи на земные и почему ее изучение так важно для понимания эволюции земного климата. Будет рассказано, какие важнейшие научные задачи стоят перед исследователями в



настоящее время и как предполагается их решать. Читатель узнает и о готовящейся в России миссии “Венера-Д” для комплексного исследо-

вания атмосферы Венеры на различных высотах, поверхности этой планеты и плазмы вокруг нее. Предполагается, что в состав АМС “Венера-Д” войдут орбитальный и посадочный аппараты, субспутник и долгоживущая станция для работы на поверхности планеты. Впервые планируется использовать два орбитальных аппарата. Успешная работа АМС “Венера-Д” позволит получить уникальные научные результаты.





ВЕНЕРА – СЕСТРА ЗЕМЛИ

Близость Венеры к Земле, сходные размеры, плотность и количество энергии, получаемой от Солнца (Венера расположена ближе к Солнцу, но ее облака отражают 77% поступающей солнечной энергии), заслужили ей титул “близнеца Земли”. На Венере нет смены времен года и отсутствующие океаны, переносящие тепло и вращательный момент. Все это предполагает, что венерианская атмосфера устроена относительно просто. Тем не менее оказалось, что она представляет собой очень сложную динамическую систему.

До сих пор мы очень мало знаем о нашей соседке (Земля и Вселенная, 2012, № 3). Несомненно, основные особенности Венеры сейчас хорошо известны: высокая температура на поверхности (около + 470 °C), сернокислотные облака, на пять порядков меньшее содержание воды по сравнению с Землей, обилие сернистых соединений, отсутствие собственного магнитного поля и совершенно иная геологическая эволюция. Венера – это планета, на примере которой впервые была продемонстрирована важность парникового эффекта. Даже понятие “парниковый эффект” было впервые применено по отношению

к атмосфере планеты, именно Венеры, американским ученым А. Ингерсоллом в 1969 г. Особенность Венеры еще и в том, что скорость ветра там растет от 0,5–1 м/с вблизи поверхности до ураганной, десятки метров в секунду, на верхней границе облаков, причем везде – от экватора до высоких широт. В результате планета и ее атмосфера вращаются с разными скоростями: сама планета совершает оборот вокруг оси за 243 земных суток, а ее атмосфера (на уровне верхнего облачного слоя) вращается с периодом около четырех суток, то есть более чем в 60 раз быстрее! Эта особенность атмосферы получила название суперротации. Да и само направление осевого вращения Венеры и ее атмосферы, в отличие от других планет (кроме Урана), направлено в сторону, противоположную орбитальному вращению вокруг Солнца.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕНЕРЫ

В 1960-х гг., вскоре после начала космической эры, Венера была открыта фактически заново. Стало известно, что по целому ряду характеристик Венера совсем не похожа на Землю. В отличие от нашей планеты на Венере наблюдаются:

– массивная углекислотная атмосфера, соз-

дающая мощный парниковый эффект, который делает поверхность горячее, чем дневная сторона более близкой к Солнцу планеты – Меркурия;

– отсутствие воды, которая могла бы растворить углекислый газ или способствовать его отложению, например, в панцирных живых организмах, как это, по-видимому, произошло на Земле;

– мощная вулканическая активность, формирующая молодую поверхность и выбрасывающая большое количество сернистых соединений в атмосферу;

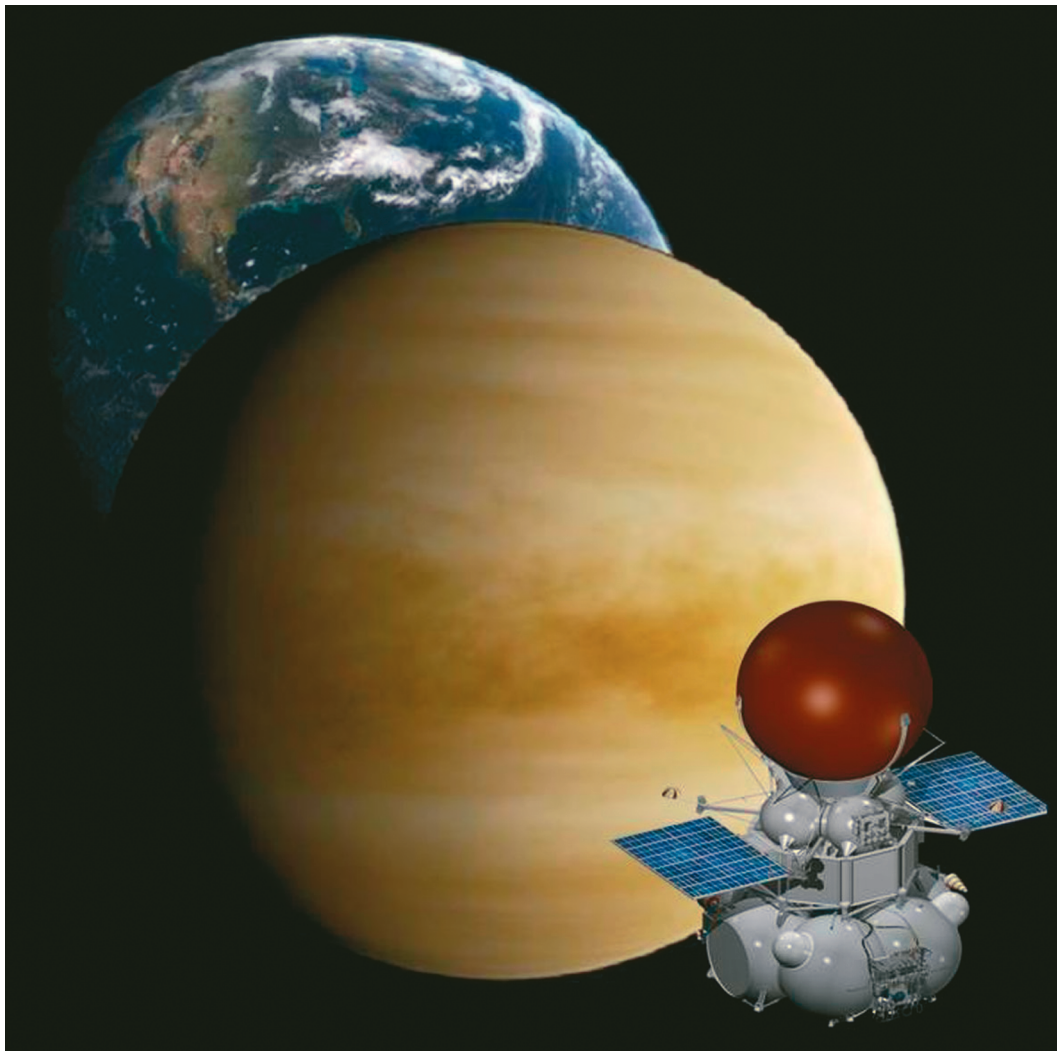
– отсутствие магнитного поля, которое могло бы препятствовать проникновению солнечного ветра в атмосферу и “сдуванию” атмосферных составляющих.

Все это делает исследование Венеры чрезвычайно интересным и важным для понимания того, почему ее эволюция пошла иным путем по сравнению с эволюцией нашей планеты, где есть и вода, и магнитный щит, охраняющий нас от потоков солнечного ветра, и, главное, есть многообразная жизнь.

Вопросы, на решение которых направлено изучение Венеры, можно разделить на три группы.

Как возникла и эволюционировала планета,





Венера в УФ-диапазоне. На переднем плане – макет АМС “Венера-Д”, на заднем плане – Земля. Коллаж.

и были ли условия на ранних этапах ее эволюции пригодными для возникновения жизни?

Для ответа на эту группу вопросов необходимо понять, как происходило формирование планеты, какие процессы впоследствии модифицировали атмосферу, приведя к

ее современному газовому и изотопному составу, значительно отличающемуся от земного. Существующее определенное сходство в строении атмосфер Земли и Венеры и не очень большое различие в содержании таких устойчивых молекул, как N_2 (в атмосфере Ве-

неры азота всего втрое больше), говорят о сходных условиях образования этих планет, а столь драматическое различие между ними связано с различием в их эволюционном пути. Остается открытым и вопрос о том, куда и вследствие каких процессов “ушла”





вода с планеты, почему сильно различается относительное содержание водорода и дейтерия в атмосферах Земли и Венеры, хотя эти изотопы вступают в совершенно одинаковые химические реакции, и почему в земной атмосфере во много раз меньше углекислого газа CO_2 . Масса CO_2 в атмосфере Венеры примерно соответствует его массе в карбонатах на Земле. Предполагается, что на Земле именно живые организмы перевели углерод из атмосферы в связанное состояние. Исследование поверхности Венеры и ее сравнение с поверхностью Земли поможет разобраться в том, какие факторы определяют свойства со-

ставляющих ее пород, в частности уяснить роль вулканов и взаимодействия поверхности с газовой оболочкой планеты в эволюции планеты. Изучение плазменной оболочки Венеры, экзосферы, магнитосферы, ионосферы, взаимодействия атмосферы с солнечным ветром важно для того, чтобы понять, когда и как Венера потеряла магнитное поле и какую роль играл солнечный ветер в формировании ее климата.

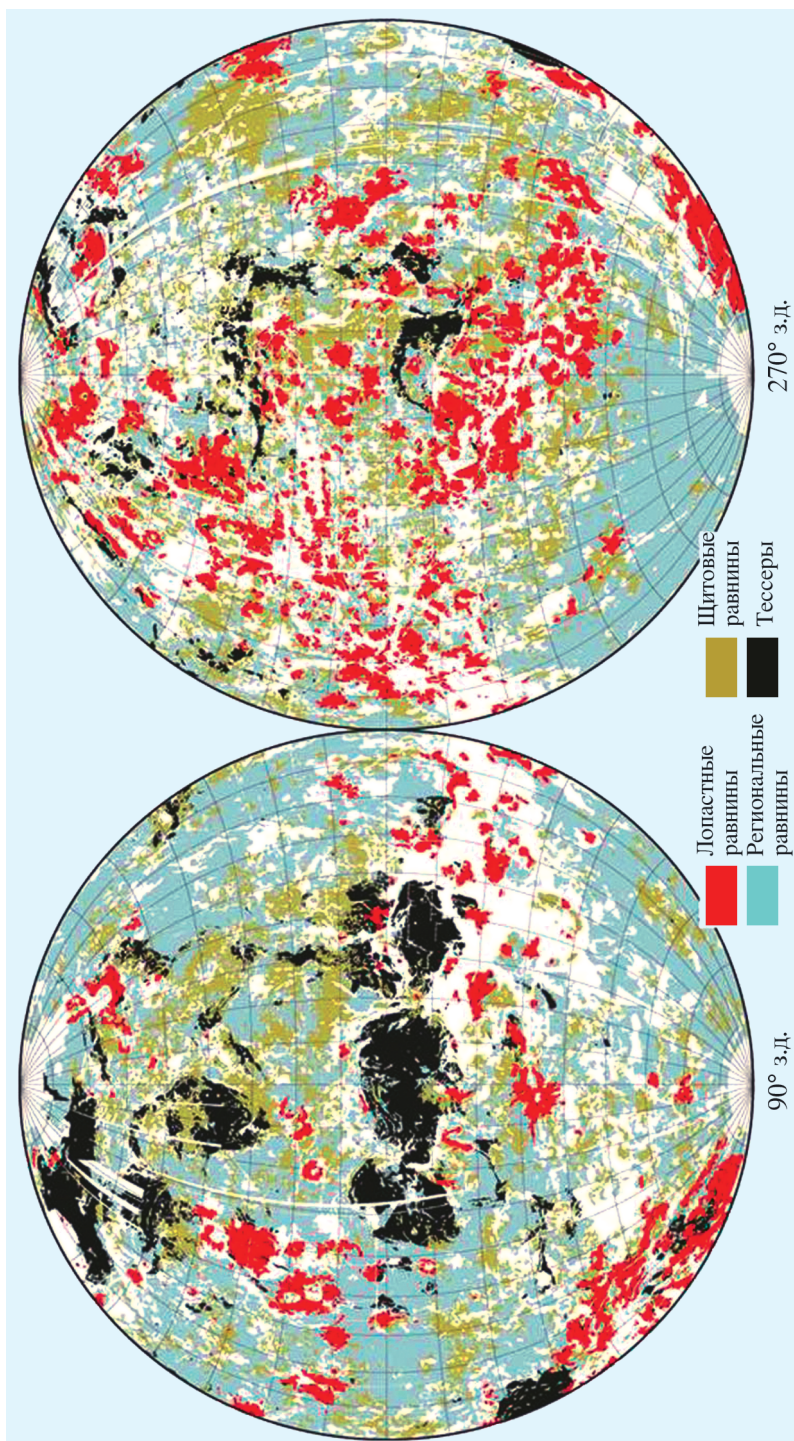
Сходный состав Земли и Венеры (их средние плотности близки), говорит о том, что они образовались практически в одной области, из одного и того же вещества протопланетного диска, поэто-

Вероятное извержение вулкана на Венере в настоящее время. Рисунок ESA.

му содержали вначале одинаковое количество легких соединений (летучих). В процессе эволюции их относительное содержание очень сильно изменилось. Таким образом, состав атмосферы Венеры отражает историю ее происхождения и эволюции. Содержание инертных газов, особенно изотопные соотношения ксенона, криптона, неона, позволяют понять, откуда и как были принесены эти элементы.

Чтобы понять, как эволюционировал состав





Геологическая карта Венеры. Черным отмечены тессеры, занимающие около 8% поверхности Венеры. По данным М.А. Иванова, А.Т. Базилевского, ГЕОХИ РАН.





атмосферы, необходимо с высокой точностью измерить содержание и изотопные соотношения благородных газов, в частности таких элементов, как Xe, Kr, ^{40}Ar , ^{36}Ar , Ne, ^4He , ^3He . Оценка изотопных соотношений H/D, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ и $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ поможет узнать, с какой скоростью и как планета теряла атмосферу и куда исчезли из нее пары воды. Измерение отношения радиогенных изотопов ^4He , ^{40}Ar и Xe, образовавшихся в результате радиоактивного распада, могло бы дать ключ к определению средней скорости внутренней дегазации и ее изменения с течением времени.

Изучение эволюции Венеры, как и других планет земной группы, важно и для понимания условий на экзопланетах. Если в Солнечной системе мы имеем две столь схожие по многим параметрам планеты, находящиеся на соседних орбитах, но сильно отличающиеся по составу атмосферы и условиям на поверхности, то можно ожидать, что и среди экзопланет мы встретим планеты, развитие которых эволюция направила по разным путям и сделала их непохожими друг на друга, несмотря на, казалось бы, одинаковые начальные условия.

Какие процессы сформировали и про-

должают формировать поверхность Венеры?

В поисках ответа надо разобраться в химии и минералогии планетной коры, в процессах, которые ее формировали и видоизменяли с течением времени, во внутреннем строении и динамике, классифицировать разновидности вулканизма и тектоники и их изменение со временем, исследовать текущие процессы взаимодействия поверхности с атмосферой.

Изучение Венеры привело к выводу, что около 80% ее поверхности подверглось реформированию в течение последнего 1 млрд лет в результате гигантских вулканических извержений. Это означает, что только тессеры (возвышенности размером сотни – тысячи километров с системами хребтов, образующих сложную мозаику, впервые обнаруженные ИСВ “Венера-15 и -16”) остались не залитыми лавой, могут рассказать нам о более древней поверхности, а может быть и о следах древнего океана. На поверхности следует идентифицировать составляющие элементы (включая водород) и минералы, в которые эти элементы входят, попытаться отождествить минералы типа гранитов, образовавшиеся, возможно, в присутствии воды.

Измерение содержания в венерианских облаках компонентов, таких как SO_2 , H_2O , OCS , CO , и сернокислотных аэрозолей (H_2SO_4) позволит разобраться, как происходит циклический химический обмен между атмосферой и поверхностью.

Что Венера может сказать нам о будущем земного климата?

Не окажется ли, что мы, совсем того не желая, нарушаем экологические балансы, чем по-прежнему делаем Землю похожей на Венеру?

Чтобы найти ответ, надо досконально изучить, как работает парниковый эффект на Венере, понять, была ли на поверхности Венеры когда-либо в далеком прошлом жидкая вода, как взаимодействует атмосфера с твердым телом планеты. Для этого необходимо:

– разобраться в том, как происходит диссипация атмосферных составляющих;

– выяснить, какие процессы определяют динамику атмосферы, ее суперротацию, рождают атмосферные волны локального и планетарного масштаба;

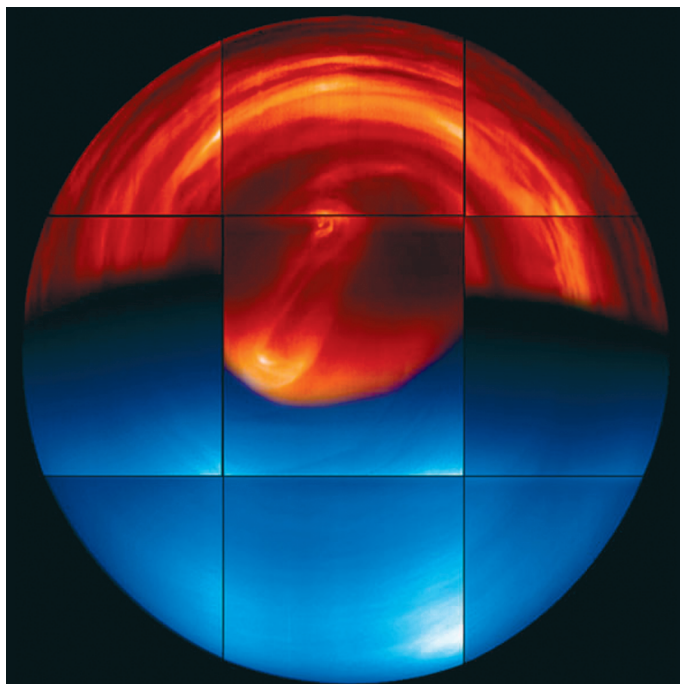
– измерить глобальное количество солнечной энергии в атмосфере и ее радиационный баланс в зависимости от высоты, широты и долготы;





– уточнить содержание и высотные профили химически активных атмосферных парниковых газов, паров воды.

Помимо перечисленных выше глобальных вопросов, важная научная проблема связана также с исследованием химического состава и структуры облаков Венеры. Они простираются на высотах от 50 до 70 км (или от 30 до 90 км с учетом подоблачной и надоблачной дымки) над поверхностью, но, несмотря на малую плотность, играют огромную роль в динамике, парниковом эффекте, химии атмосферы. Основным компонент облачного слоя на всех широтах – серная кислота высокой концентрации. Капли серной кислоты, в составе которых 10–25% воды, вполне могут быть пригодными для существования микроорганизмов (аналогичных земной бактерии *Helicobacter Pylori*). В составе нижнего слоя облаков в результате прямых измерений были обнаружены хлор, сера и фосфор – элементы, необходимые для формирования клеток. Температура и давление в нижнем облачном слое не очень отличаются от условий на поверхности Земли. Поэтому гипотеза о существовании бактерий в области нижнего облачного слоя не кажется столь уж фантастической.



Мозаичное изображение Южного полушария Венеры. Вверху (красный цвет) – ночная сторона ($\lambda = 1,74$ мкм, высота – 50 км), внизу (голубой цвет) – дневная сторона (ультрафиолет, высота – 70 км), в центре – полярный “диполь” ($\lambda = 3,8$ мкм, высота – 60 км). Снимок получен ИСВ “Венера Экспресс”, ESA.

Детальное исследование химического состава облачного аэрозоля исключительно интересно еще и потому, что с ним связан неизвестный пока ультрафиолетовый поглотитель солнечной радиации, влияющий на тепловой баланс и глобальную циркуляцию атмосферы. К примеру, чтобы понять причину суперротации, требуется объяснить, как угловой момент передается от поверхности к атмосфере, и отождествить источник энергии для поддержания ее быстрого

вращения. По современным представлениям, энергию на поддержание суперротации атмосферы дают так называемые термические приливы (волновые изменения температуры в атмосфере в течение солнечных суток), рождаемые солнечным излучением. Термические приливы, в свою очередь, – результат поглощения половины всей поступающей солнечной энергии упомянутым выше “неизвестным УФ-поглотителем” в тонком верхнем облачном слое толщиной





менее 10 км. Этот поглотитель впервые был обнаружен в спектрах Венеры в 1975 г. Состав его до сих пор неизвестен.

ВЕНЕРА – “РУССКАЯ ПЛАНЕТА”

Начало научных наблюдений Венеры в телескоп было положено в 1610 г. Галилео Галилеем. Он описал фазы Венеры, наглядно показав, что она светит отраженным солнечным светом. Между тем исследование Венеры как планеты начал русский ученый М.В. Ломоносов (Земля и Вселенная, 2011, № 6). Он открыл атмосферу Венеры при наблюдении ее прохождения по диску Солнца: *“Планета Венера окружена знатной воздушной атмосферой, таковой (лишь бы не большею), как-ва обливается около нашего шара земного”*. Но до начала космических исследований о строении атмосферы Венеры и условиях на ее поверхности и деталях рельефа и даже о периоде ее осевого вращения не было известно ровным счетом ничего.

В СССР космические исследования Венеры начались в 1961 г., когда к Венере была направлена АМС “Венера-1”. Но с ней, так же как и с последующими “Венерой-2, -3”, связь была потеряна (хотя “Венера-3”, судя по ее траектории,

все же должна была достичь планеты). Первые три аппарата были изготовлены в ОКБ-1 под руководством академика С.П. Королёва. Все следующие полеты станций, от “Венеры-4” до “Веги-1, -2”, изготовленных в НПО им. С.А. Лавочкина под руководством Г.Н. Бабакина, оказались очень успешными.

В 1967 г. спускаемый аппарат АМС “Венера-4” впервые проник в атмосферу планеты и передал информацию о ее температуре и давлении на высоте 55–25 км (Земля и Вселенная, 1969, № 1). Спускаемый аппарат был снабжен тормозным и основным парашютами, площадь купола основного – 55 м², с их помощью он должен был погасить скорость падения. Поначалу было неясно, достигла ли “Венера-4” поверхности, но условно было принято административное решение: считать, что посадка все же произошла. В том же 1967 г., когда американская АМС “Маринер-5” провела радиопросвечивание атмосферы Венеры, был получен профиль температуры и давления в атмосфере (40–90 км). Стало понятно, что “Венера-4” не могла достичь поверхности в рабочем состоянии: она была раздавлена, когда давление возросло до 25 атм. Тем не менее этот аппарат позволил сделать несколько очень важных

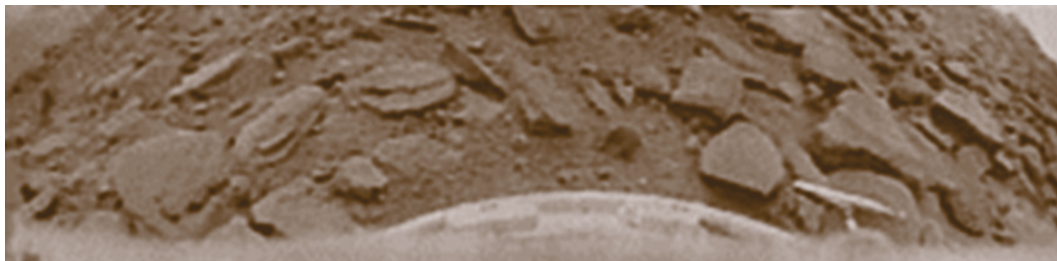
открытий: был выяснен состав атмосферы (90–95% – углекислый газ), обнаружена водородная корона Венеры и показано отсутствие собственного магнитного поля и радиационных поясов.

В 1969 г. были запущены АМС “Венера-5 и -6”. Войдя в атмосферу Венеры на ночной стороне планеты, аппараты передавали информацию до высоты 18 км, пока давление не стало для них слишком высоким. С помощью газовых анализаторов был уточнен состав атмосферы (97% CO₂, 2% N₂, O₂ < 1%, следы H₂O).

Первыми аппаратами, успешно севшими на поверхность Венеры, были “Венера-7” (1970), проработавшая на поверхности 27 мин, и “Венера-8” (1972) – 50 мин. На поверхности были измерены давление (90 ± 15 атм) и температура (475 ± 20 °C). Впервые удалось осуществить радиосвязь с Землей с поверхности другой планеты.

Спускаемый аппарат АМС “Венера-8”, в отличие от предыдущих, сел на освещенной стороне Венеры в 500 км от утреннего терминатора. Это было важно для подготовки к получению изображений поверхности на последующих станциях. Спускаемый аппарат был снабжен фотометром, предстояло измерить освещенность, чтобы понять, темно или





Панорамы поверхности Венеры, переданные спускаемыми аппаратами АМС "Венера-9 и -10".

светло на поверхности под непрозрачным облачным слоем толщиной более 20 км. Стало известно, что ранним утром освещенность составляет 350 ± 150 лк, а если экстраполировать к полудню, то получится 1000–3000 лк – как в сумерках на Земле, этого должно быть достаточно для получения изображения.

Все измерения на этих "Венерах" делались впервые в истории. В частности, была определена скорость ветра (по доплеровскому изменению частоты сигнала на разных высотах), оказавшаяся равной 50–60 м/с на высоте 50 км и 0–2 м/с

вблизи поверхности. На спускаемых аппаратах гамма-спектрометры впервые измерили минеральный состав грунта. С помощью бортового радиовысотомера измерены диэлектрическая проницаемость и плотность грунта (по оценкам мощности радиоволн, отраженных от поверхности).

АМС серии "Венера", запущенные в 1970–1980-е гг., можно отнести уже к следующему поколению аппаратов: они более тяжелые, с более емкой научной нагрузкой и в отличие от предыдущих миссий запускались РН "Протон-К". "Венера-9 и -10" содержали посадочные и орбитальные аппараты. Они впервые позволили заглянуть под облачный слой планеты, были получены первые в мире черно-белые панорамы поверхности (Земля и Вселенная,

1976, № 2). Спускаемые аппараты были оснащены комплексом научной аппаратуры, включающим панорамный телефотометр для изучения оптических свойств и получения изображения поверхности в месте посадки. После спуска – сначала на парашюте, затем за счет тормозного аэродинамического щитка – спускаемые аппараты совершили мягкую посадку на освещенной Солнцем, но невидимой с Земли стороне Венеры. Освещенность оказалась достаточной для получения изображений, и прожекторы, которыми были оснащены обе "Венеры", не потребовались. Спускаемый аппарат АМС "Венера-9" сел на склон с уклоном 30° . Место его посадки в области Бета (Beta Regio) выглядело как россыпь довольно крупных камней. "Вене-





ра-10” опустилась на расстоянии 2200 км от этой области. В месте посадки были хорошо видны базальтовые плиты со следами выветривания. По содержанию естественных радиоактивных элементов – калия, тория и урана – состав грунта оказался аналогичным земным вулканическим базальтам. Измерения проводились и во время спуска: вертикальный профиль интенсивности солнечного излучения в нескольких спектральных диапазонах; свойства аэрозолей в атмосфере, при этом была выявлена резкая нижняя граница облачного слоя на высоте

около 48 км. Обнаружен рассеивающий слой, ниже уровня облаков, возможно, содержащий аэрозольные кристаллы. Орбитальные аппараты стали первыми в истории искусственными спутниками Венеры. Они содержали научные приборы, а также использовались для ретрансляции информации с посадочного аппарата на Землю. Обнаружены ночное свечение молекулярного кислорода, тепловая асимметрия в тепловом ИК-диапазоне в верхнем облачном слое, которая впоследствии была связана с солнечным приливом.

На “Венере-11 и -12” были впервые измерены

Так могут выглядеть молнии в атмосфере Венеры. Рисунок ESA.

содержания инертных газов: неона, аргона, криптона. Оказалось, что отношения изотопов неона и аргона существенно отличаются от земных значений, так что в случае аргона отношение изотопов $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ для Венеры близко к 1, то есть превышает в 300 раз земное отношение. ^{36}Ar является реликтовым изотопом, тогда как ^{40}Ar образуется из ^{40}K в коре планеты в процессе радиоактивного распада и попадает в





атмосферу в результате дегазации. Другой важный эксперимент проводился с помощью спектрометра в ближнем ИК-диапазоне. Основной задачей здесь было определение вертикального профиля содержания водяного пара. Прямые измерения давали противоречивые результаты с очень высокими значениями концентрации – до 100 и даже до 1000 ppm H_2O под облаками. Спектральные измерения имели огромное значение, их интерпретация позволила убрать противоречия в содержании водяного пара под облаками: было получено 30 ± 10 ppm в подоблачной атмосфере и до поверхности. Это значение в дальнейшем под-

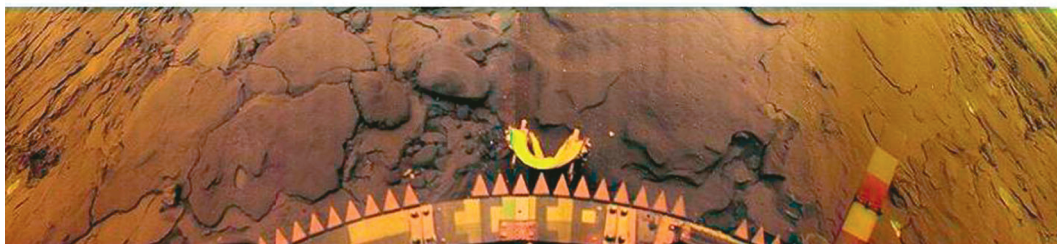
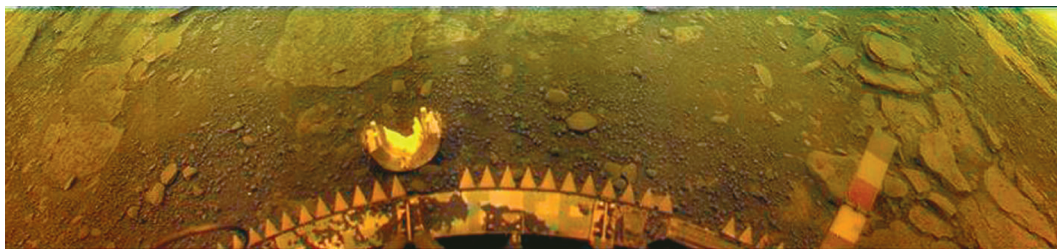
твердилось, в частности в ходе эксперимента ВИРТИС на АМС “Венера Экспресс”. Кроме того были впервые зарегистрированы электрические разряды в атмосфере, а также измерено содержание SO_2 и CO под облаками.

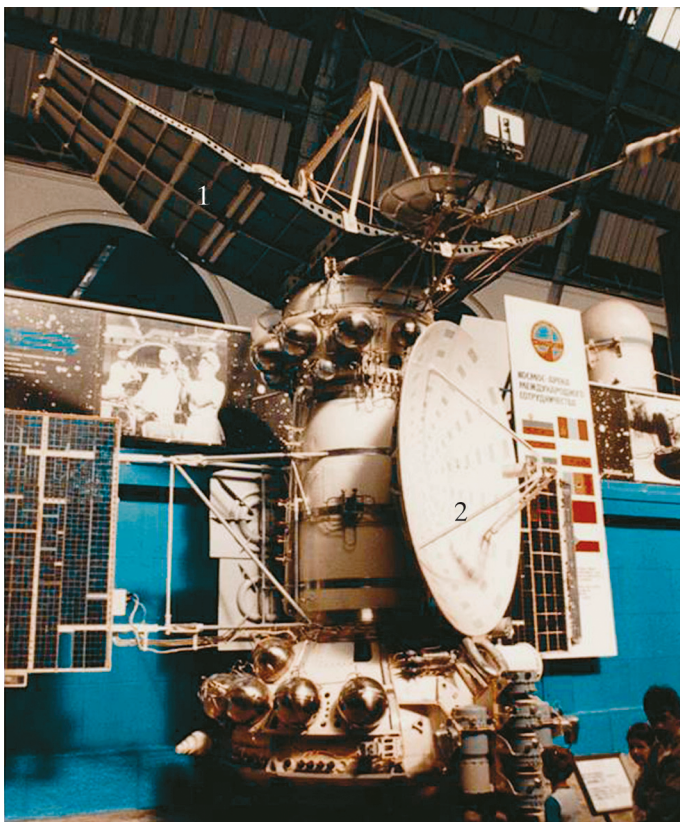
На спускаемых аппаратах АМС “Венера-13 и -14” панорамная съемка была уже цветной (Земля и Вселенная, 1983, №№ 3, 4). Она позволила наглядно продемонстрировать, что поверхность планеты – это горячая, обезвоженная и безжизненная каменистая пустыня, раскинувшаяся под мощным слоем плотной углекислотной атмосферы. Был произведен забор пробы грунта. С помощью рентгено-флуоресцентного спектрометра был измерен состав грунта, показано, что порода в месте посадки представляет собой аналог земных базальтов.

В 1983 г. на орбиты искусственных спутников Венеры выведены АМС “Венера-15 и -16”, основной задачей которых было радарное картирование поверхности. Получены карты Северного полушария планеты с разрешением по горизонтали 0,9-2,5 км, по вертикали – 50 м. На борту находился прибор для исследования атмосферы – фурье-спектрометр со спектральным интервалом 6–40 мкм. По его данным ученые построили 3D-поле температур в области 60–100 км, уточнили строение облачного слоя и рассчитали вертикальные профили плотности SO_2 и H_2O на разных широтах.

Последними космическими аппаратами, направленными в нашей стране к Венере, были станции “Вега-1 и -2”, “посетившие” Венеру в 1985 г. на пути к комете Гал-

Панорамы поверхности Венеры, переданные спускаемыми аппаратами АМС “Венера-13 и -14”.





Макет орбитального аппарата АМС “Венера-15” в павильоне “Космос” ВДНХ: 1 – радиолокатор бокового обзора, 2 – остронаправленная антенна для передачи информации на Землю.

настоящее время (Земля и Вселенная, 1984, № 1; 1985, № 3).

ЕВРОПЕЙСКАЯ МИССИЯ “ВЕНЕРА ЭКСПРЕСС”

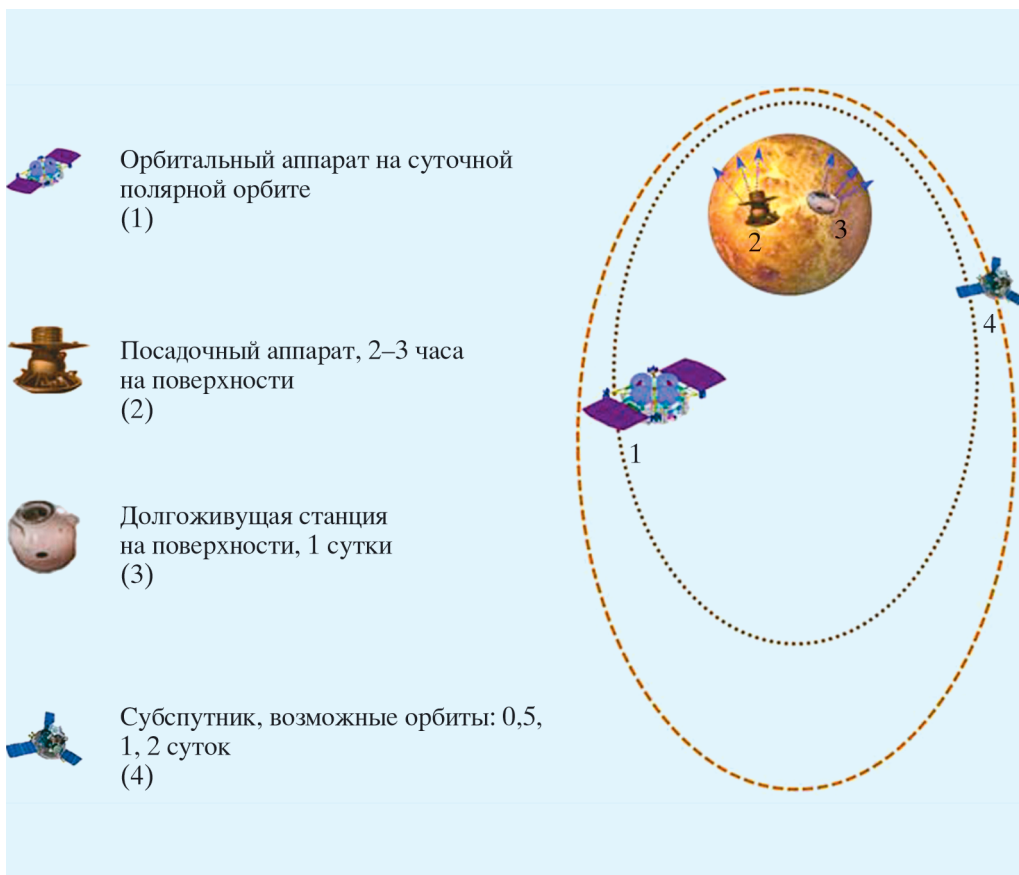
После “Магеллана” Венера “отдыхала” от земных посланников более 10 лет, пока в 2005 г. на орбиту вокруг планеты не была выведена АМС “Венера Экспресс” (ESA). Достигнув Венеры в 2006 г., она успешно проработала на орбите восемь лет и, вероятно, заканчивает свое существование в конце 2014 г., значительно перекрыв расчетный срок функционирования – 500 сут (Земля и Вселенная, 2006, № 2, с. 17; 2009, № 6). Среди приборов, установленных на “Венере Экспресс”, два прибора (планетный Фурье-спектрометр PFS и атмосферный спектрометр SPICAV-SOIR) были изготовлены с участием российских ученых. Анализ данных ИСВ “Венера Экспресс” подтвердил: на Венере очень мало воды. Если бы содержание океанов Земли было равномерно распределено по всей планете,

лея. Спускаемые аппараты массой около 2 т содержали посадочные аппараты и атмосферные зонды с комплексом научных приборов. Впервые в атмосфере Венеры аэростатные зонды дрейфовали более 48 ч на высоте 53–55 км. Также впервые было выполнено бурение и определен состав поверхности рентгено-флуоресцентным и другими методами (Земля и Вселенная, 1986, № 4).

После этого вплоть до настоящего времени в СССР и в России космических запусков к Венере не производилось. Американская АМС “Ма-

геллан”, выведенная на орбиту вокруг Венеры в 1990 г., впервые точно измерила гравитационное поле планеты (Земля и Вселенная, 1989, № 3, с. 76–78; 1991, № 4, с. 112). Станция продолжила начатое американской станцией “Пионер Венера” и советскими АМС “Венерой-15 и -16” радиолокационное картографирование планеты. Картирование поверхности Венеры радаром ИСВ “Венера-15 и -16” и “Магеллан” показало, что поверхность Венеры наиболее молодая в Солнечной системе, поэтому планета может быть геологически активной и в





Предполагаемая схема проекта “Венера-Д” с обозначением орбит искусственных спутников Венеры и времени работы посадочных станций.

вода образовала бы слой глубиной 3 км. Но если сконденсировать водяной пар в атмосфере Венеры на ее поверхность, то слой воды будет толщиной только 3 см. Миллиарды лет назад на Венере, скорее всего, было значительно больше воды. “Венера Экспресс” подтвердила, что планета могла потерять много воды через атмосфе-

ру. По-видимому, поток ультрафиолетового излучения от Солнца расщеплял в атмосфере Венеры молекулы воды, состоящие из двух атомов водорода и одного – кислорода, затем они навсегда покидали планету. Но измеренная экспериментом ASPERA “Венеры Экспресс” современная скорость диссипации недостаточна для объяснения потери всей воды на планете. Либо эта скорость в прошлом была выше, либо действуют другие процессы, удаляющие воду. Например, воду могли абсорбировать и связывать минералы на

поверхности. Но детали этого процесса не очень понятны. Не ясно даже, были раньше на планете моря и океаны или же вода существовала только в атмосфере.

Значительное количество недостаточно стабильных серосодержащих газов в атмосфере говорит об относительно недавней вулканической активности, происходившей в течение последнего миллиона лет. Но достоверных свидетельств продолжающейся активности не обнаружено. В результате измерений полос поглощения SO_2 в УФ-диапазоне с помощью





аппаратуры АМС “Пионер Венера” в 1978 г., а позднее и “Венеры Экспресс” была получена практически идентичная картина изменения содержания SO_2 над облаками: высокое содержание (до 1 ppm) SO_2 в начале измерений быстро уменьшилось в процессе измерений почти на порядок. Хотелось бы связать такие изменения с происшедшими на поверхности извержениями. Однако подобная интерпретация выглядит сомнительной: почему извержения в обоих случаях прекратились сразу после начала измерений? Очевидно, что могут существовать и другие объяснения.

ИСВ “Венера Экспресс” получила впечатляющие результаты, но не смогла решить фундаментальных проблем, связанных с эволюцией планеты и ее атмосферы, с выяснением причин кардинального отличия от земных условий. Так как эти задачи в принципе не решаются при наблюдениях с орбиты, необходимы прямые измерения в атмосфере и на поверхности. Данные, полученные на “Венере Экспресс”, помогают сформулировать научные задачи для новых миссий.

ПРОЕКТ “ВЕНЕРА-Д”

В России сейчас создается новая миссия к Венере – АМС “Венера-Д” (Земля и Вселенная, 2012, № 3). Это миссия для комплексного

исследования Венеры, ее атмосферы, поверхности и окружающей плазмы. “Венера-Д” поможет выяснить причины столь непохожих эволюционных путей Земли и Венеры. Планируется производить дистанционные измерения с орбиты и прямые измерения в атмосфере и на поверхности.

“Венера-Д” состоит из двух основных частей: большого посадочного и орбитального аппаратов. Ее посадочный аппарат создается на основе посадочного аппарата АМС “Вега”. Кроме того, в комплекс “Венеры-Д” войдут малый орбитальный аппарат – субспутник и долгоживущая станция для работы на поверхности Венеры. Субспутник будет оснащен “плазменным” комплексом научной аппаратуры, а долгоживущая станция – сейсмометром, метеокомплексом и другой аппаратурой для мониторинга состояния атмосферы и поверхности в течение 24 ч.

Ранее изучалась возможность включения двух аэростатных зондов, один из которых должен был плавать в среднем облачном слое (на высоте 55 км, аналогично баллонам “Веги-1, -2”), другой – под облаками, по пути следования последнего должны были сбрасываться дрон-зонды, которые во время спуска в течение 30 мин должны были исследовать атмосферу.

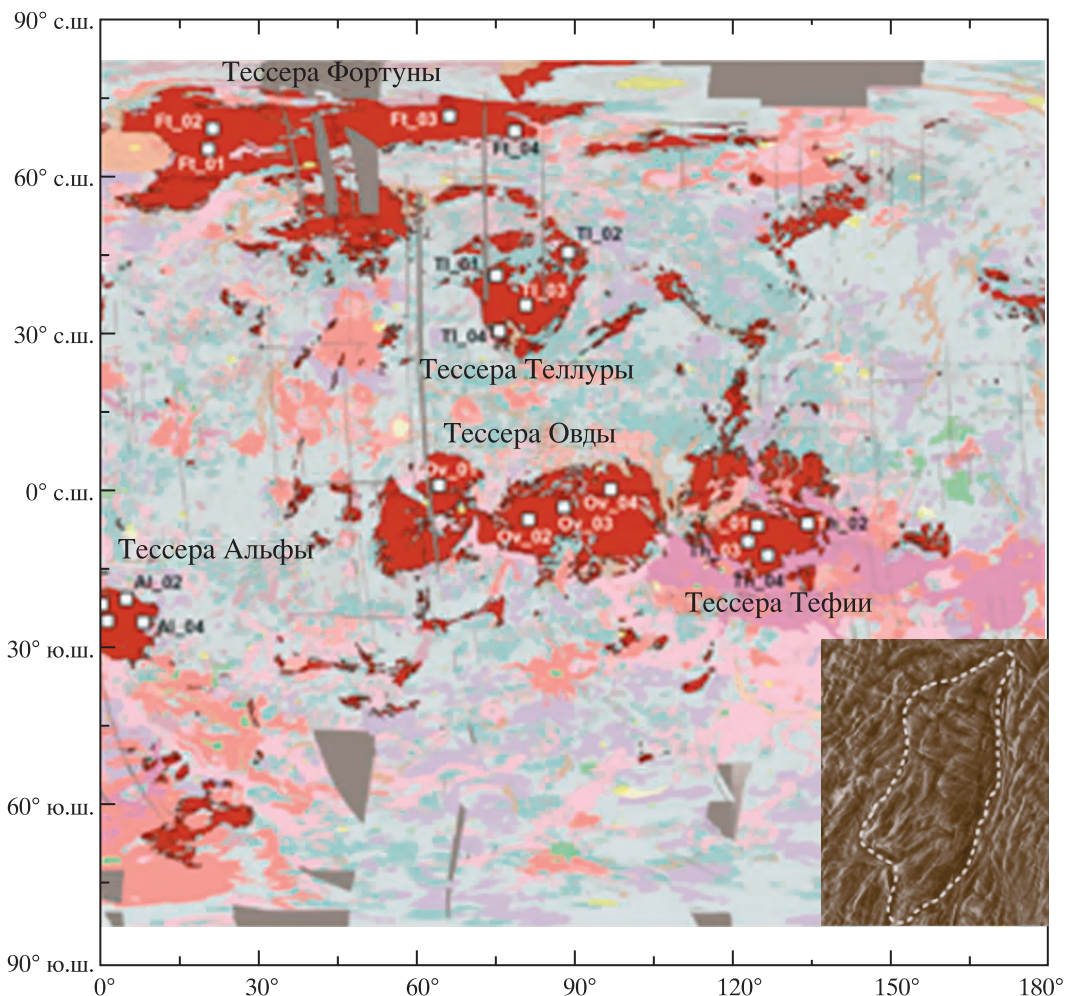
Основной принцип проектирования АМС “Венера-Д” – использование средств доставки научной аппаратуры, многократно показавших свою надежность (например, серия АМС “Венера-Вега”, 1975–1985 гг.), в совокупности с самым современным комплексом научной аппаратуры и инновационными методами исследований.

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

Чтобы понять причины “неземных” условий на Венере, предполагается исследовать:

- состав атмосферы, содержание различных газов, включая инертные газы и их изотопы, изотопы летучих, малые составляющие;
- состав, строение, микрофизику и химию облаков;
- термическое строение, тепловой баланс и природу гигантского парникового эффекта;
- механизм суперротации и другие особенности динамики атмосферы Венеры;
- детали строения и химического состава наиболее древних из наблюдаемых на поверхности геологических образований (тессеры и родственные им структуры);
- элементный состав минералов на поверхности, включая радиоактивные изотопы и железо на различных степенях окисления;
- проявления современной вулканической,





Геологическая карта Венеры с предполагаемыми местами (обозначены белыми квадратами) посадки спускаемого аппарата “Венера-Д”. Справа – Тессера Фортуны на радиолокационном изображении обведена пунктирной линией. По данным М.А. Иванова, ГЕОХИ РАН.

электрической и сейсмической активности Венеры, сейсмический фон планеты;

– строение экзосферы, ионосферы и магнитосферы, диссипацию атмосферных составляющих.

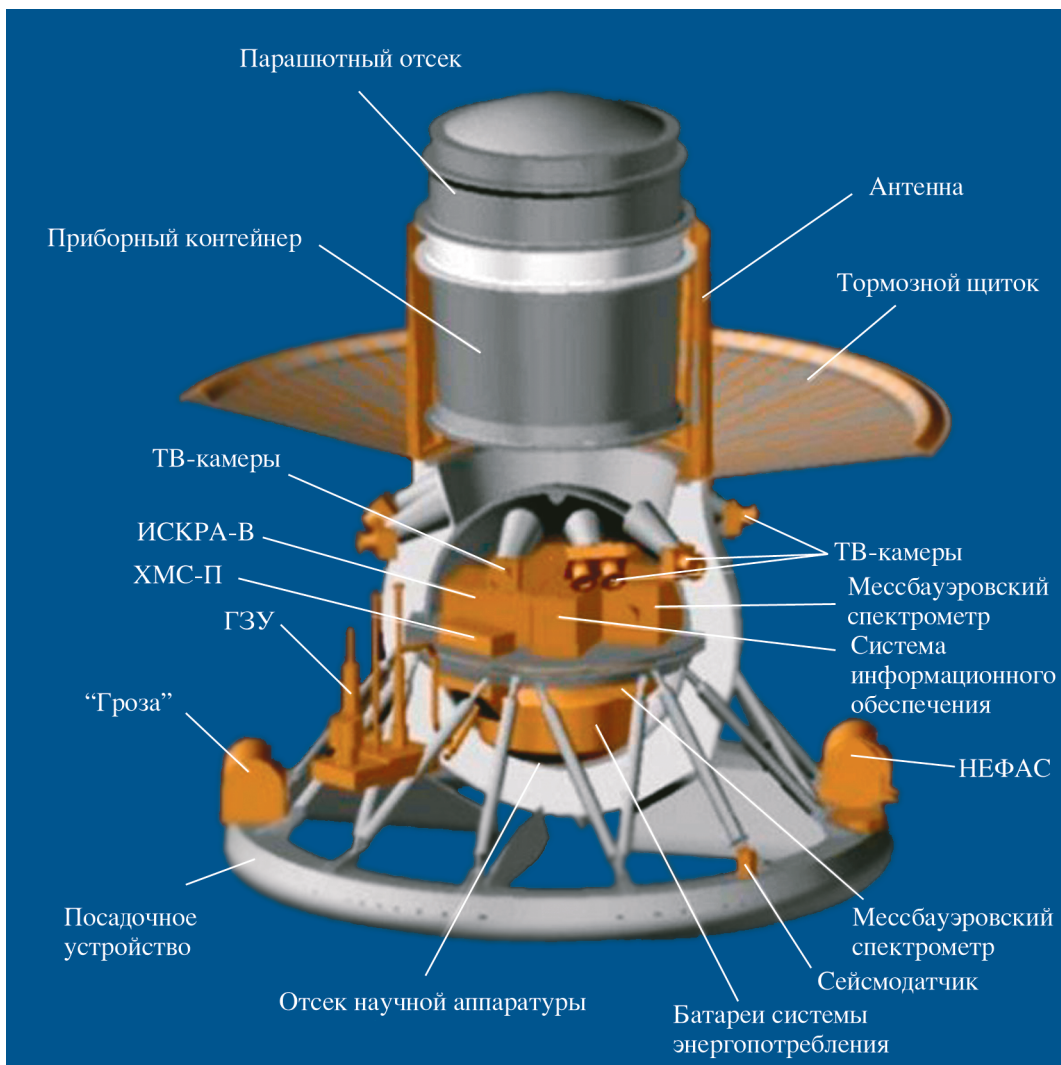
Посадочный аппарат “Венеры-Д” будет представлять собой модерни-

зированную версию успешно использованного ранее на аппаратах серий “Венера” и “Вега”. Напомним, что последняя посадка на поверхность Венеры была совершена 30 лет назад (АМС “Вега-1 и -2”). Посадка “Венеры-Д” предполагается на пересеченную местность (тессеры), в то время как

все советские аппараты совершали посадки в равнинной местности, “залитой” вулканическими базальтами.

Выбирают и анализируют возможные места посадки сотрудники ГЕОХИ РАН. Они детально изучают тессеры на картах, составленных по радиолокационным





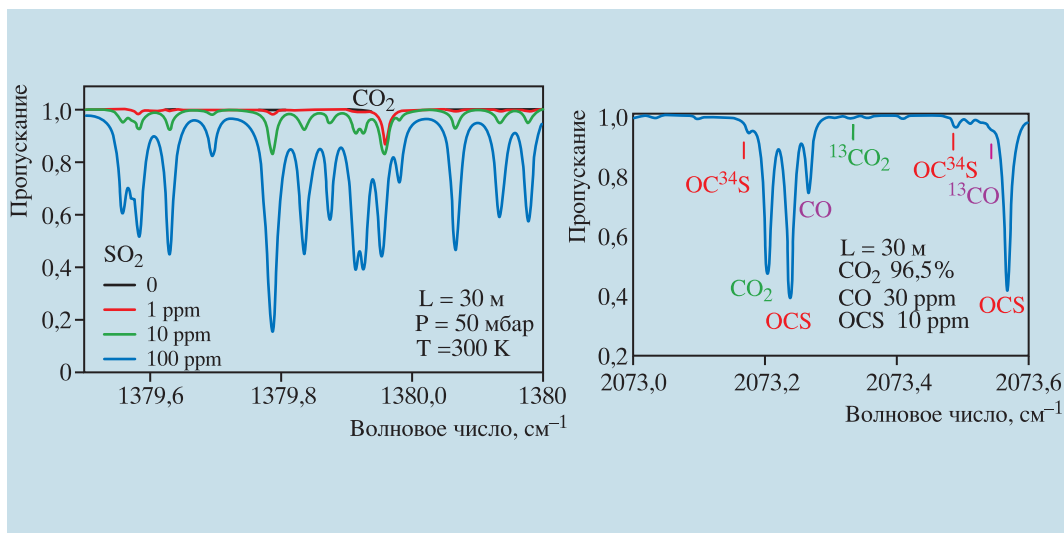
изображениям ИСВ “Магеллан”, которые сравнивают с земными аналогами. Поверхность тессер сильно изрезана структурами с крутыми склонами, поэтому существует риск потери посадочного аппарата “Венера-Д” при посадке, хотя “Венера-9” успешно села на склон 30°. Тессеры занимают всего 8% поверхности, поэтому, прежде чем совершить безопасную по-

садку, необходимо “попасть” на тессеру. Во время предыдущих миссий при подлете к Венере за двое суток спускаемый аппарат отделялся от орбитального отсека, по баллистической траектории двигался к Венере и совершал посадку в заданном месте. При таком спуске в зависимости от окна старта может оказаться, что в месте посадки тессера

Посадочный аппарат АМС “Венера-Д” с предварительной компоновкой размещения научной аппаратуры. Рисунок НПО им. С.А. Лавоочкина.

отсутствует или занимает малую часть участка поверхности, соответствующего эллипсу разброса. Поэтому, чтобы посадочный аппарат “Венеры-Д” сел в выбранный район планеты, в ИПМ





Примеры ожидаемых спектров в эксперименте ИСКРА-В. Измерения выполняются в спектральных диапазонах двух лазеров: 7,2 мкм для изучения содержания SO_2 (слева) и 4,82 мкм – CO , OCS , изотопов серы и углерода (справа). L – длина оптического пути в кювете, P – давление, T – температура, содержание газа дано в единицах ppm (1 ppm – одна миллионная доля). По данным Н.И. Игнатьева, ИКИ РАН.



РАН изучается возможность его спуска с орбиты искусственного спутника Венеры.

На посадочном аппарате будут установлены приборы:

- многоканальный диодно-лазерный спектрометр (ИСКРА-В);

- газовый хроматограф-масс-спектрометр (ХМС-П);

- активный гамма- и нейтронный спектрометр;

- мессбауэровский спектрометр;

- телевизионный комплекс, включающий посадочные камеры, стерео- и панорамные камеры, камеры высокого разрешения (до 0,1 мм);

- нефелометр и спектрометр размеров частиц для исследования микро-

физических свойств частиц и строения облаков (НЕФАС);

- волновой комплекс (“Гроза”), метеокомплекс, сейсмометр;

- устройство для забора грунта и атмосферных проб (ГЗУ).

Три эксперимента нацелены на исследование проб атмосферы и грунта в герметическом отсеке посадочного аппарата АМС “Венера-Д” (ИСКРА-В, хромато-масс-спектрометр, мессбауэровский спектрометр).

В качестве примера расскажем, как будет работать один из значимых приборов – “ИСКРА-В” (И.И. Виноградов, О.И. Кораблёв, ИКИ РАН). Он измеряет с большой точностью и высоким спектральным разрешением

($\lambda/\Delta\lambda = 10^7$) содержание летучих и их изотопов – SO_2 , CO , CO_2 , OCS , H_2O , D/H , $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$, очень важных для понимания процессов происхождения и эволюции атмосферы, механизма исчезновения воды и образования серосодержащих соединений. Для измерения со столь высоким спектральным разрешением важно обеспечить низкое давление (50 мбар), чтобы линии поглощения были узкими. Но приходится учитывать, что давление окружающего газа в нижней атмосфере очень высокое – до 100 бар. Поэтому плотный газ, забранный в кювету прибора, надо сделать очень разреженным, а после измерения





удалить его из кюветы, чтобы забрать следующую порцию во время спуска. Проблема еще и в том, что линии излучения избранных изотопов очень слабые и их нелегко зарегистрировать. Современные оптические методы позволяют обеспечить очень большую длину оптического пути (до 2 км) в кювете, прежде чем свет попадет в спектрометр. Для эксперимента подбираются несколько лазеров разных спектральных диапазонов в соответствии с длинами волн линий газов и изотопов, которые будут измеряться.

На орбитальном аппарате будут установлены приборы либо новые, никогда не использовавшиеся для исследования Венеры, либо летавшие ранее, но модернизированные в соответствии с научными задачами “Венеры-Д”. Это картирующий УФ-спектрометр, миллиметровый радиометр, гетеродинный спектрометр со сверхвысоким разрешением, ИК- и Фурье-спектрометр, картирующий спектрометр в ближнем ИК-диапазоне, камера с фильтрами от УФ-диапазона до ближнего инфракрасного, эксперимент по наблюдению звездных и солнечных затмений. Эксперимент по двухчастотному радиопросвечиванию, предложенный ФИРЭ РАН, подразумевает исполь-

зование орбитального аппарата и субспутника. При этом в качестве излучателя предполагается использовать 70-м радиоантенну на Земле, а сигнал принимается на борту (обычно поступают наоборот). Это на порядок увеличивает мощность сигнала, что очень важно для проведения эксперимента.

В настоящее время проект АМС “Венера-Д” находится в стадии научно-исследовательской разработки. Первоначально он был включен в Федеральную космическую программу России 2006–2015 гг. (исключен с 2014 года), и, вероятно, войдет в программу 2016–2025 гг. По классификации NASA, проект “Венера-Д” относится к классу флагманских миссий (<http://vfm.jpl.nasa.gov>). Научные задачи миссии “Венера-Д” во многом пересекаются с дорожной картой исследования Венеры, разработанной аналитической группой NASA VEXAG (Venus Exploration Analysis Group), а также с задачами американской венерианской климатической миссии АМС “Venus Climate Mission”, рекомендованной к запуску в 2021 г. Эта миссия пока не финансируется из-за отсутствия средств.

В январе 2014 г. Планетным департаментом NASA (Planetary Depat-

ment) было решено принять участие в проекте “Венера-Д”. Была создана Объединенная рабочая группа (The Venera-D IKI/Roscosmos – NASA Joint Science Definition Team) для определения возможной степени вовлечения NASA в проект “Венера-Д”: элементы миссии, научные приборы. Рабочая группа должна была проанализировать научные задачи проекта и выработать соответствующие рекомендации. К середине 2015 г. рабочая группа должна была подготовить отчет о результатах работы для NASA, ИКИ РАН и Роскосмоса. К сожалению, работа группы была приостановлена в апреле 2014 г. из-за политических санкций.

Подводя итог, подчеркнем: имеются все основания надеяться, что в результате работы “Венеры-Д” наши представления о процессах на этой удивительной планете и в ее атмосфере перейдут на качественно новый уровень. Может быть, тогда мы сможем найти ответы по крайней мере на часть вопросов, поставленных в настоящей статье, и понять, почему Венера пошла по другому пути эволюции, нежели Земля. Важно и то, что миссия “Венера-Д” поможет Венере остаться “русской планетой”.





Информация

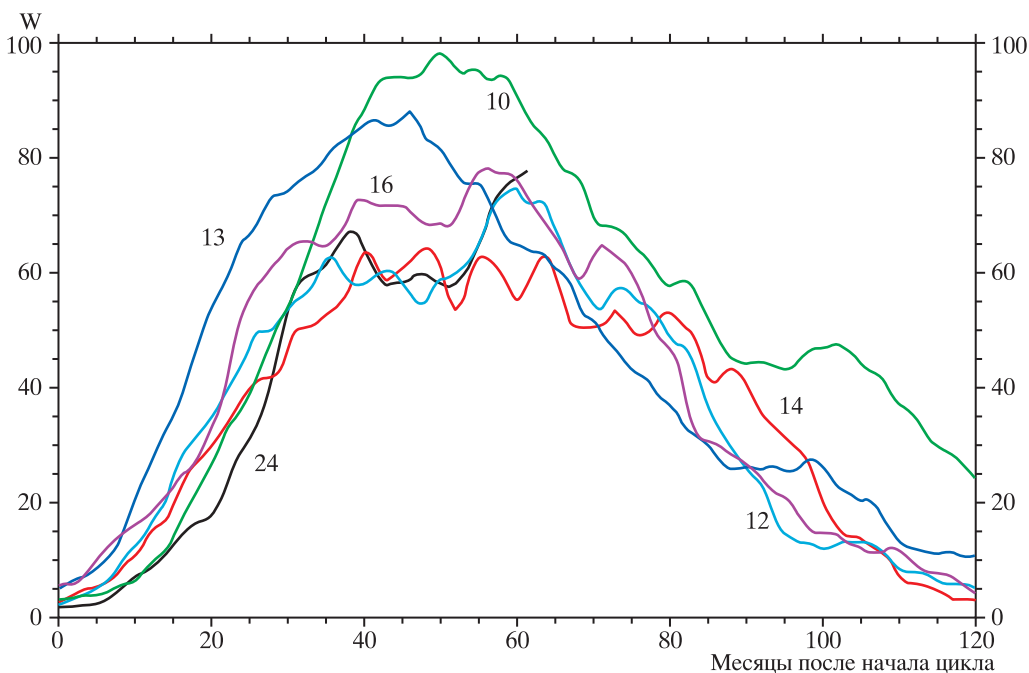
Солнце в августе – сентябре 2014 г.

В.Н. ИШКОВ
ИЗМИРАН

Пятнообразовательная активность Солнца в рассматриваемый период уверенно держалась на среднем уровне, но временами поднималась до высокого, поэтому отдалается время наступления максимума текущего

24-го цикла. Число групп пятен на видимом диске Солнца менялось от 10 до 4. Группы пятен преимущественно были небольшими и спокойными и лишь четыре – средними ($300 < Sp < 500$ м.д.п.), три из них

образовались в Южном полушарии. Всего же из 56 групп солнечных пятен 21 появилась в Северном полушарии, то есть продолжается тенденция к увеличению их числа в Южном полушарии. Кривая роста



Ход развития (61 месяц) текущего 24-го цикла солнечной активности среди всех достоверных (с 1849 г.) солнечных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен.



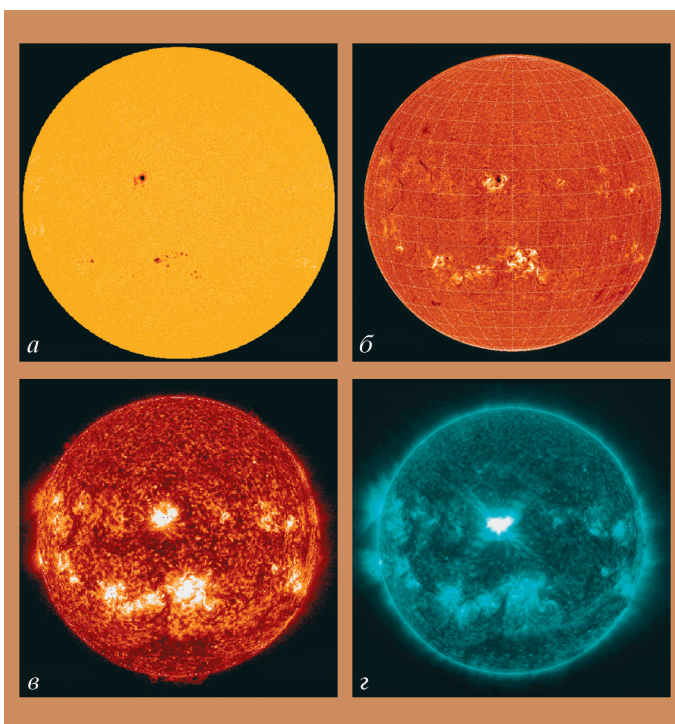
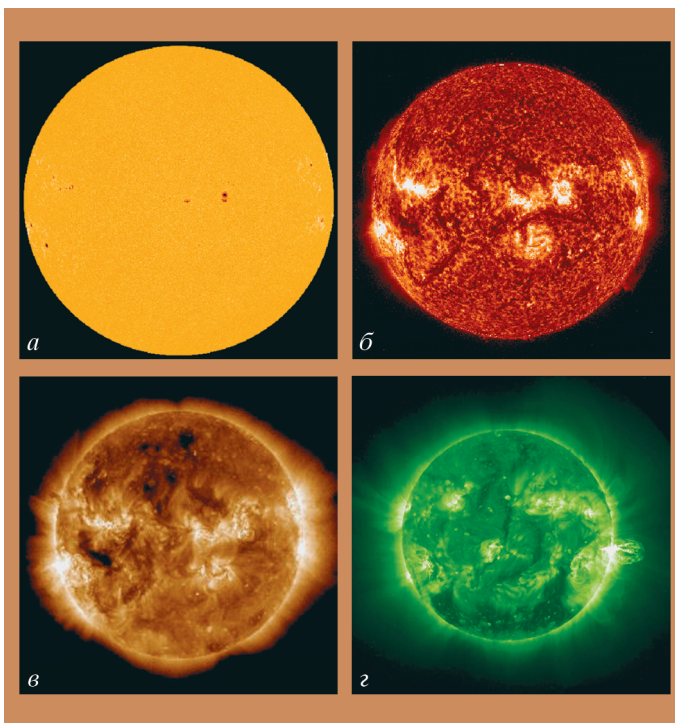


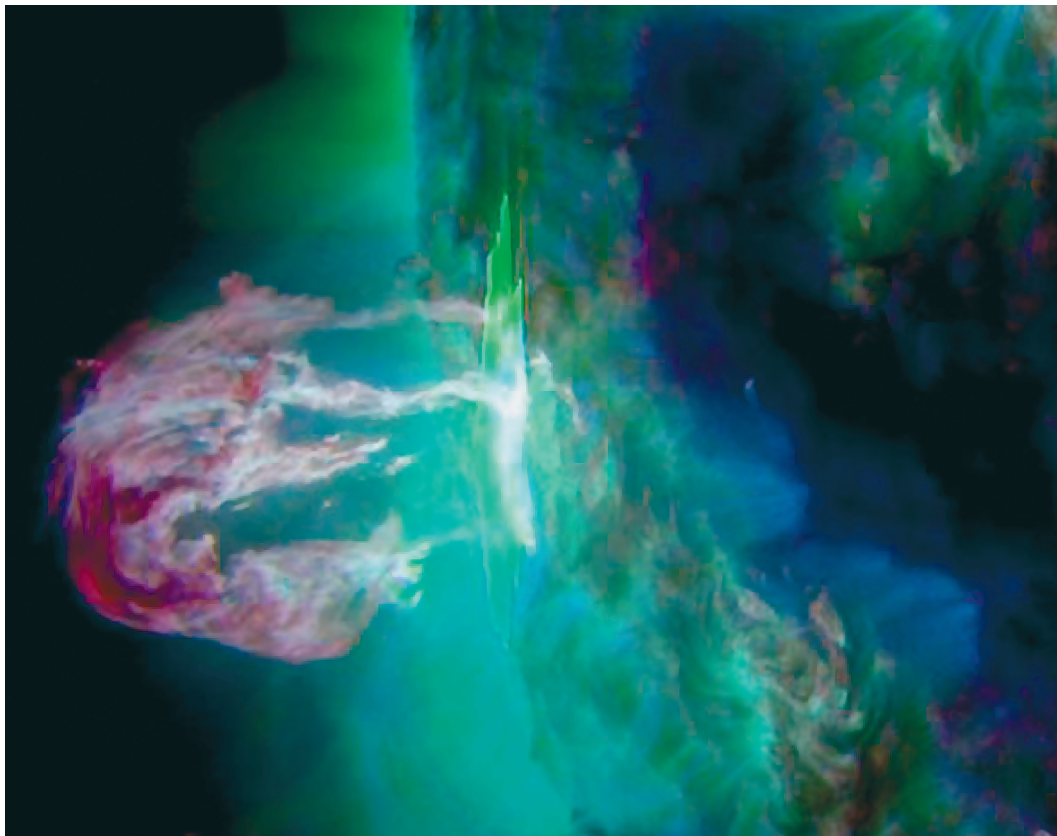
Солнце 24 августа 2014 г.:
а) фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$);
б) в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$);
в, г) в линии крайнего ультрафиолета Fe XII ($\lambda = 193 \text{ \AA}$).
Вспышка балла M5.9/2B видна слева на лимбе Солнца. Космические солнечные обсерватории "SDO" и "STEREO-B" (<http://spaceweather.com>).

сглаженных за год значений относительного числа пятен продолжает подъем к максимуму текущего цикла. Поэтому рост текущего цикла (более 5,3 года) становится рекордным после 12-го цикла (5 лет). Текущие среднемесячные значения чисел Вольфа – $W_{\text{авг.}} = 74,7$ и $W_{\text{сент.}} = 87,6$. Сглаженное значение относительного числа солнечных пятен в феврале и марте 2014 г. составило $W^* = 78,4$ и $80,8$ соответственно.

В первой половине августа относительное число солнечных пятен держалось на среднем уровне, затем достигло высоких значений и лишь 15 августа вернулось к среднему уровню,

Солнце 10 сентября 2014 г.:
а) фотосфера в непрерывном спектре ($\lambda = 4500 \text{ \AA}$); б) в самой сильной водородной линии H_{α} ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$);
в) в линии крайнего ультрафиолета He II ($\lambda = 304 \text{ \AA}$), в линии крайнего ультрафиолета Fe IX ($\lambda = 131 \text{ \AA}$). В центре диска видна вспышка балла X1.6/2B. Космическая солнечная обсерватория "SDO" (<http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>).





Вспышка балла M5.9/2B и выброс коронального вещества, произошедшие 24 августа 2014 г. Снимок получен в линиях крайнего ультрафиолета ($\lambda = 131 \text{ \AA}$, 171 \AA , 304 \AA). Космическая солнечная обсерватория "SDO".

который продлился до конца месяца. Максимальное ежедневное значение относительных чисел солнечных пятен отмечено **1 и 2 августа ($W = 115$)**, минимальное – 10 августа ($W = 43$). В небольшой группе пятен Южного полушария, выходящей из-за восточного лимба, 24 августа произошла солнечная вспышка рентгеновского балла M5.9/2B. Средний уровень вспышечной активности держался 1, 21, 22 и 26 августа. В остальные дни вспышечная активность оставалась

на низком уровне, лишь 12 и 14 августа опустилась до очень низкого. Выбросы солнечных волокон (25 событий) состоялись 2, 3, 6, 15 (2), 19, 22, 24 (2), 25 (2) и 29 августа. Корonoграфы космической обсерватории "SOHO" зарегистрировали 137 корональных выбросов вещества разной интенсивности, среди них один был типа "гало", два – "частичное гало III" (угол раствора 180° – 270°) и шесть – "частичное гало II" (угол раствора 90° – 180°). Межпланетная ударная волна от

выброса большого солнечного волокна 15 августа достигла 19 августа околоземного космического пространства (SI) и вызвала 6-часовую геомагнитную суббурю. Одна рекуррентная и одна вновь образовавшаяся корональные дыры проходили по видимому диску Солнца, однако высокоскоростные потоки не вызвали в околоземном космическом пространстве значимых геомагнитных возмущений. Единственная малая магнитная буря 27 и 28 августа вызвана возмущением





от выброса большого волокна 22 августа. На средних широтах Земли в течение 8 сут сохранялась возмущенная геомагнитная обстановка. На геостационарных орбитах очень высокий поток релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ зарегистрирован 30 и 31 августа.

В **сентябре** пятнообразовательная активность Солнца была в основном на среднем уровне, высокий уровень держался 6–13 и 26–28 сентября. На видимом диске Солнца возникли от 5 до 9 групп солнечных пятен, 4 из которых были среднего размера. Максимальное число пятен наблюдалось **26 сентября (W = 123)**, минимальное – 21 сентября (W = 43). Высокий уровень

вспышечной активности зафиксирован 10 сентября (вспышка балла X1.6/2B) и 28 сентября (вспышка балла M5.6/2B). Первая вспышка произошла в центральной зоне видимого диска Солнца в группе пятен Северного полушария, вторая – Южного. Вспышки среднего балла отмечены 3, 6, 8, 11, 14, 18, 23 и 27 сентября. Выбросы солнечных волокон (16 событий) случились 2, 11, 12 (2), 13, 18, 19 (3), 20 (3), 23, 24 и 25 (2) сентября. Коронोगрафы космической обсерватории “SOHO” регистрировали более 140 корональных выбросов вещества разной интенсивности, среди них – по два типа “гало” и “частичное гало III” (угол раствора 180°–270°) и 10 – типа “частич-

ное гало II” (угол раствора 90°–180°). В сентябре образовались рекуррентная и две новые корональные дыры, но их геоэффективность оказалась незначительной. Зарегистрированы умеренная (12 сентября) и малая (24 сентября) магнитные бури. В сентябре в течение 5 сут была возмущенная геомагнитная обстановка. На геостационарных орбитах очень высокие потоки релятивистских электронов с энергиями больше 2 МэВ наблюдались 1, 5 и 26–30 сентября.

Текущее состояние солнечной активности и ее прогноз на русском языке можно найти в Интернете (<http://www.izmiran.ru/services/saf/>). Страница обновляется каждый понедельник.

Информация

Завершение работы “Чибиса-М”

15 октября 2014 г. академический ИСЗ “Чибис-М” массой 40 кг вошел в плотные слои атмосферы в южной части Южной Америки на 15 310-м витке на высоте около 80 км и прекратил существование. 25 января 2012 г. его запустили в автономный полет космонавты с борта МКС из транспортного контейнера гру-

зового корабля “Прогресс М-13М”. Космический аппарат вышел на орбиту высотой 500 км. “Чибис-М” превысил заявленный срок службы в 2,5 раза.

Это первый микроспутник из серии, создаваемой Российской академией наук на базе универсальной платформы, разработанной в СКБ космического приборостроения ИКИ РАН. В цели полета входило изучение молниевых разрядов из космоса. На борту “Чибиса-М” впервые работала аппаратура, изучавшая высотные атмосферные гроззовые разряды в широком диапазоне электромагнитного излуче-

ния (от радио- до гамма-диапазона) и определявшая, как грозы влияют на состояние ионосферы и тем самым на космическую погоду около Земли (Земля и Вселенная, 2013, № 4). За время работы “Чибис-М” передал на Землю 24,8 Гбайта научных данных о том, что происходит в атмосфере и ионосфере Земли. Научные руководители проекта – директор ИКИ академик Л.М. Зелёный и заведующий сектором взаимодействия радиоволн с плазмой академик А.В. Гуревич.

Пресс-релиз ИКИ РАН,
16 октября 2014 г.

