

“Венера Экспресс”: новые открытия и загадки Венеры

Д.А. БЕЛЯЕВ,
кандидат физико-математических наук
ИКИ РАН

Планета Венера схожа с Землей по массе, размеру и количеству получаемой солнечной энергии. Последний факт объясняется тем, что меньшее расстояние от Солнца компенсируется большим альбедо Венеры. Все это до поры до времени давало основания полагать, что климатические условия на Венере не очень отличаются от земных. С началом космической эры выяснилось, что это совсем не так. Первые планетные экспедиции к Венере открыли ее практически заново. Сухая, углекислотная атмосфера с мощным парниковым эффектом разогрета у поверхности до 500 °С, атмосферное давление в сто раз выше, чем на Земле. Кроме того, Венера оказалась полностью покрытой плот-



ным слоем облаков из капель серной кислоты. У планеты отсутствует собственное магнитное поле, а значит, потоки солнечного ветра напрямую взаимодействуют с верхними слоями атмосферы. Еще одно отличие от Земли – отсутствие смены времен года и большая длительность суток (117 земных суток), что привело, например, к формированию криосферы на ночной стороне с тем-

пературами, отличающимися от земной термосферы.

Эти факты поставили перед исследователями глобальные вопросы в области сравнительной планетологии. Почему Венера так сильно отличается от Земли? Была ли она в прошлом похожа на Землю? Ждет ли Землю судьба Венеры? Изучение природы Венеры началось с полетов многочисленных советских и американских аппаратов, работавших на орбите и на поверхности планеты в 60–80-х гг. XX в. В 2005 г., после почти 15-летней паузы, была запущена первая европейская АМС – “Венера Экспресс” – для обширного и детального исследования атмосферы и околопланетной плазмы. Аппарат проработал на орбите Венеры до конца 2014 г.,

осуществив систематический обзор состава, структуры и динамики атмосферы за девять лет (Земля и Вселенная,

2006, №№ 2, 3; 2012, № 3; 2015, № 1). Новые данные “Венеры Экспресс” о процессах, поддерживающих экстремальные

условия на планете, породили новые вопросы о природе и эволюции загадочной и близкой к нам Утренней звезды.

ДВЕ ЭПОХИ

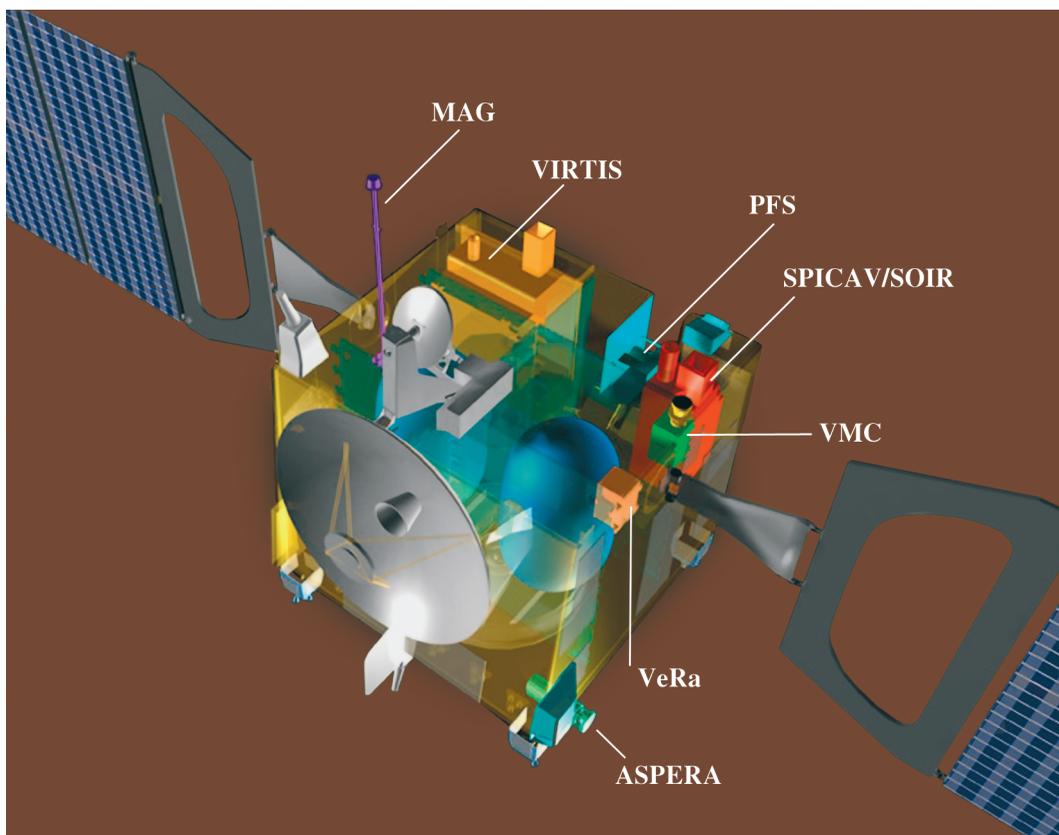
История космических исследований Венеры насчитывает более 20 всевозможных миссий и делится на две эпохи. В первый период (1962–1989) советские и американские аппараты регулярно изучали планету с помощью орбитальных, пролетных и посадочных модулей, а также атмосферных баллонов. Вполне закономерно, что именно с Венерой связаны многие технические достижения в области планетных экспедиций, о которых говорят “впервые”: “Маринер-2” (1962) – первый успешный перелет к другой планете; “Венера-4” (1967) – первые прямые измерения на другой планете; “Венера-7” (1970) – первая посадка на поверхность другой планеты. Детальный обзор выполненных в XX в. планетных экспедиций представлен в статье доктора физико-математических наук В.И. Мороза (Космические исследования. 2002, т. 40, № 5, с. 451–481). Особого внимания заслуживает глобальное картирование поверхности в 1980-х гг. АМС “Пионер Венера”, “Венера-15, -16” и “Магел-

лан”, наряду с данными со спускаемых модулей оно помогло многое узнать о геологии и геофизике поверхности. Также нельзя не отметить последний на сегодня выдающийся отечественный проект, связанный с Венерой – “Вега” (1984–1985). Посадочные станции и аэростатные зонды измерили структуру и динамику нижней атмосферы и облаков. Пионерские миссии наряду с параллельными наземными наблюдениями привели к общему пониманию физических и химических условий в атмосфере и на поверхности планеты. Пришло время детально исследовать атмосферные процессы, определяющие столь необычный климат на планете.

Нового шага в освоении Венеры пришлось ждать более 15 лет, до тех пор пока Европейское космическое агентство не подготовило АМС “Венера Экспресс”, предназначенную для глобального исследования атмосферы планеты с ее орбиты. Запуск состоялся в ноябре 2005 г. с космодрома Байконур (РН “Союз-Фрегат”), в апреле 2006 г. она вышла на орбиту вокруг Вене-

ры, спустя месяц начались научные исследования. Основное внимание было уделено детальному изучению структуры, состава и динамики атмосферы, процессам взаимодействия солнечного ветра с атмосферой и потерям вещества планетой. Научная аппаратура унаследована от уже действовавших к тому времени европейских АМС “Марс Экспресс” и “Розетта”. Некоторые из приборов оказались актуальными для решения научных задач на Венере – PFS, SPICAV, ASPERA, VeRa (“Марс Экспресс”) и VIRTIS (“Розетта”). Еще три прибора – магнетометр MAG, ИК-спектрометр SOIR и камера мониторинга VMC – были разработаны специально для АМС “Венера Экспресс”.

Космический аппарат находился на полярной орбите Венеры высотой 250 × 65 000 км, период обращения – 24 ч. С помощью спектрометра VIRTIS и камеры VMC была детально изучена морфология полярных вихрей в облаках в УФ- и в ИК-диапазоне спектра. Благодаря такой вытянутой орбите прибор ASPERA исследовал про-



цессы взаимодействия солнечного ветра с ионосферой, а магнетометр MAG измерял величину индуцированного магнитного поля и его направление в зависимости от удаленности от планеты. Находясь на теневой стороне, ИК-каналы спектрометров SPICAV и VIRTIS смогли “заглянуть” под облака планеты (ниже 60 км), измерили тепловое излучение атмосферы в спектральных “окнах прозрачности”. Кроме того, особенности орбиты позволили впервые провести на Венере затменный эксперимент, называемый ме-

тодом солнечного (или звездного) просвечивания. Для этого был разработан ИК-спектрометр высокого разрешения SOIR, который совместно с каналами SPICAV измерил вертикальное распределение слоев и химического состава надоблачной атмосферы (выше 70 км). Радиолокатор VeRa методом радиопросвечивания зондировал структуру нейтральной атмосферы (40–80 км) и ионосферы (100–600 км). Научные задачи Фурье-спектрометра PFS, связанные с картированием верхней атмосферы в тепло-

Размещение научной аппаратуры на AMC “Венера Экспресс”: MAG – магнетометр, VIRTIS – картирующий спектрометр УФ-, видимого и ИК-диапазона, PFS – Фурье-спектрометр, SPICAV – спектрометр УФ- и ближнего ИК-диапазона, SOIR – ИК-спектрометр высокого разрешения, VMC – камера мониторинга, VeRa – радиозондирование, ASPERA – анализатор космической плазмы. Рисунок ESA.

вом диапазоне, к сожалению, не были решены, поскольку прибор вышел из строя во время полета к Венере.

Участие России в европейском проекте “Венера Экспресс” имеет немалую инженерную и научную значимость. ИКИ РАН поставил на прибор SPICAV инфракрасный канал, а также акустооптический блок для спектрометра SOIR. На нашу долю приходится также участие в испытаниях и калибровках приборов VMC и PFS. Научные сотрудники ИКИ РАН ана-

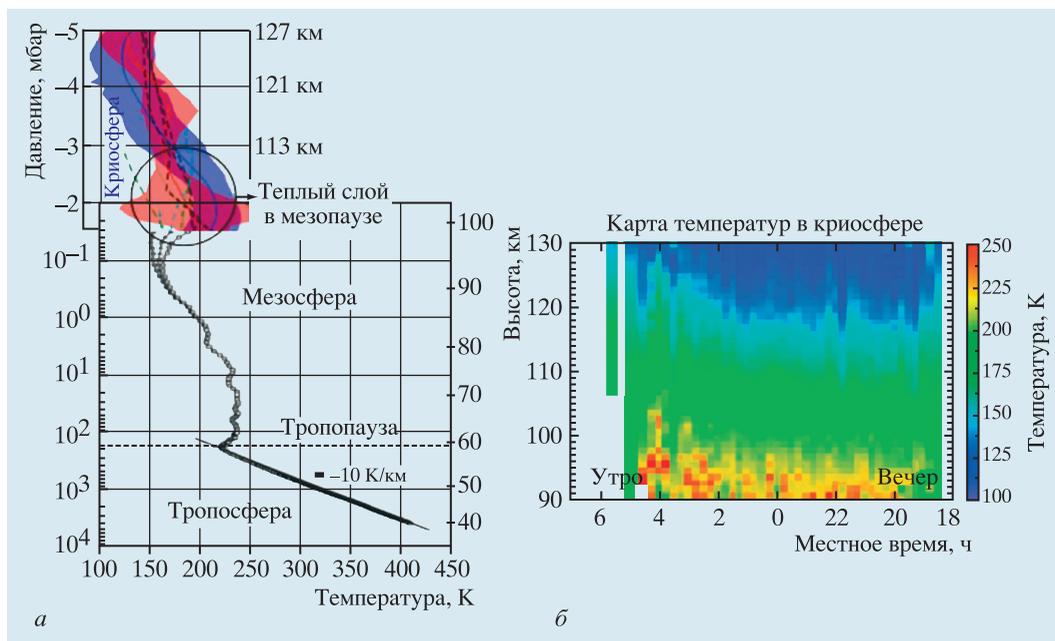
лизируют данные экспериментов SPICAV, SOIR, VMC и VIRTIS. Ниже приведены основные научные результаты миссии “Венера Экспресс”, которая завершилась в конце 2014 г., закрыв вторую эпоху изучения Венеры.

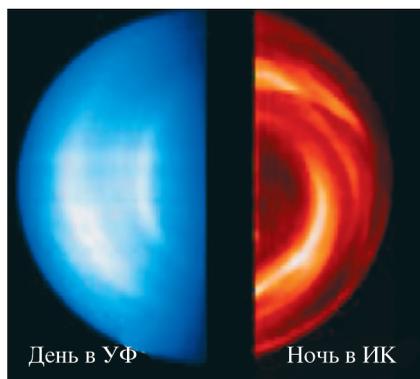
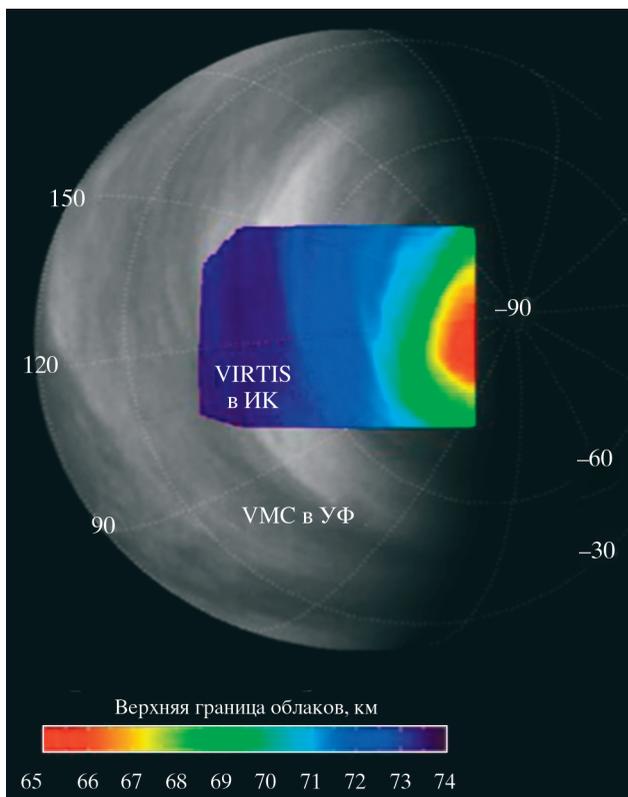
ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ПРОФИЛЬ И ЗАГАДКИ КРИОСФЕРЫ

Прежние исследования нижней атмосферы Венеры – тропосферы (0–60 км), скрытой под толстым слоем облаков и разогретой парниковым эффектом, – показали, что на динамику ее температуры практически не влияют широта и время суток. Эта зависимость начинает сказываться в верхней атмосфере – мезосфере (60–100 км), где широтные и временные

вариации температуры обусловлены радиационными и динамическими процессами над облаками. Ситуация кардинально меняется в термосфере (100–200 км), где на дневной стороне температура не опускается ниже $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и далее растет с высотой, а на ночной стороне продолжает убывать до $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такую “холодную” ночную термосферу Венеры иногда называют криосферой. Она не имеет аналогов в Солнечной системе и до сих пор была изучена неполно, поскольку все предыдущие эксперименты в этой области имели плохое высотное разрешение (хуже 10 км) и покрывали лишь экваториальную часть планеты.

Структура атмосферы Венеры: а) температура ниже 90 км (радиопросвечивание с помощью прибора VeRa) и выше 90 км (звездные просвечивания спектрометрами SPICAV и SOIR); б) карта температур криосферы, по данным SPICAV в УФ-диапазоне на ночной стороне. ESA.





Несколько приборов АМС “Венера Экспресс” методом просвечивания измеряли температурную структуру верхних слоев атмосферы на всех широтах и с рекордно высоким пространственным разрешением – от 0,3 до 3 км в зависимости от расстояния до лимба планеты. Впервые была построена карта температур в зависимости от времени суток в криосфере, где на высотах около 100 км обнаружен слой с температурой, повышенной на 20–40 °С. Точная причина образования загадочного “теплого слоя” пока не известна. Ответ кроется,

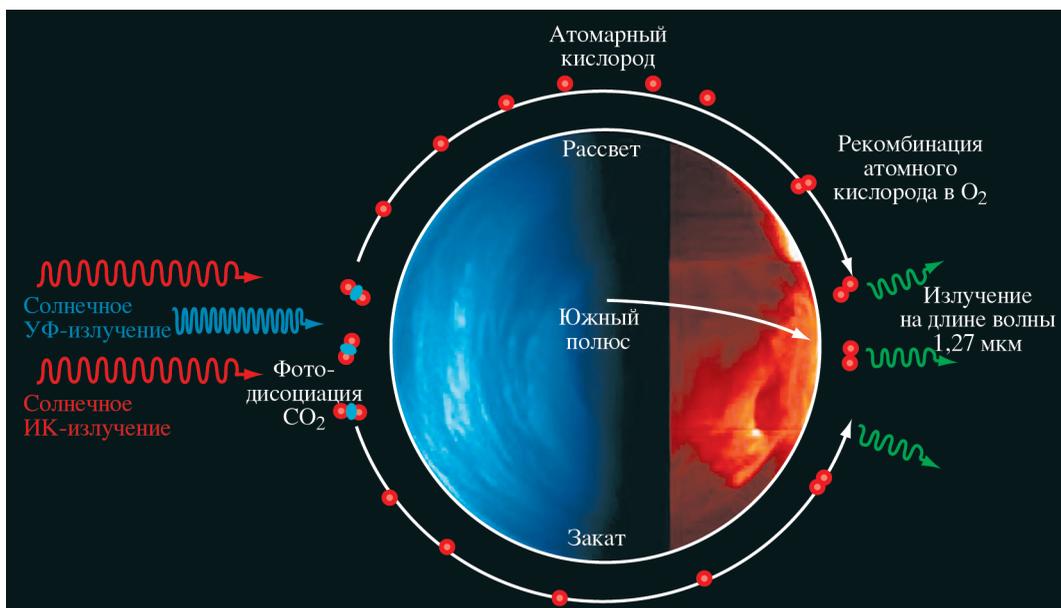
возможно, в глобальной циркуляции атмосферы с дневной стороны на ночную, где охлажденная криосферой воздушная масса опускается ниже 100 км, что может приводить к адиабатическому сжатию и локальному нагреву атмосферы.

СТРУКТУРА ОБЛАКОВ И ЦИРКУЛЯЦИЯ АТМОСФЕРЫ

Венера полностью покрыта облачным слоем, расположенным на высоте 50–70 км. В видимом диапазоне планета представляет собой равномерный диск. В ультрафиолете на верхней границе облаков видны

Карта верхней границы облаков Венеры в ИК-диапазоне, по данным VIRTIS АМС “Венера Экспресс”, полученным 20 декабря 2006 г. Граница убывает от экватора (74 км) к полюсу (65 км). Справа вверху – изображение облаков со стороны южного полюса, полученное одновременно на дневной и на ночной сторонах прибором VIRTIS. Видна глобальная суперротация облаков. Внизу – снимок полярного вихря, сделанный камерой VMC АМС “Венера Экспресс”. Фото ESA.

контрастные детали, обусловленные присутствием неизвестного пока вещества, поглощающе-



Свечение кислорода на ночной стороне Венеры и его взаимосвязь с глобальной циркуляцией в термосфере. Снимок получен спектрометром VIRTIS AMC "Венера Экспресс". Фото ESA.

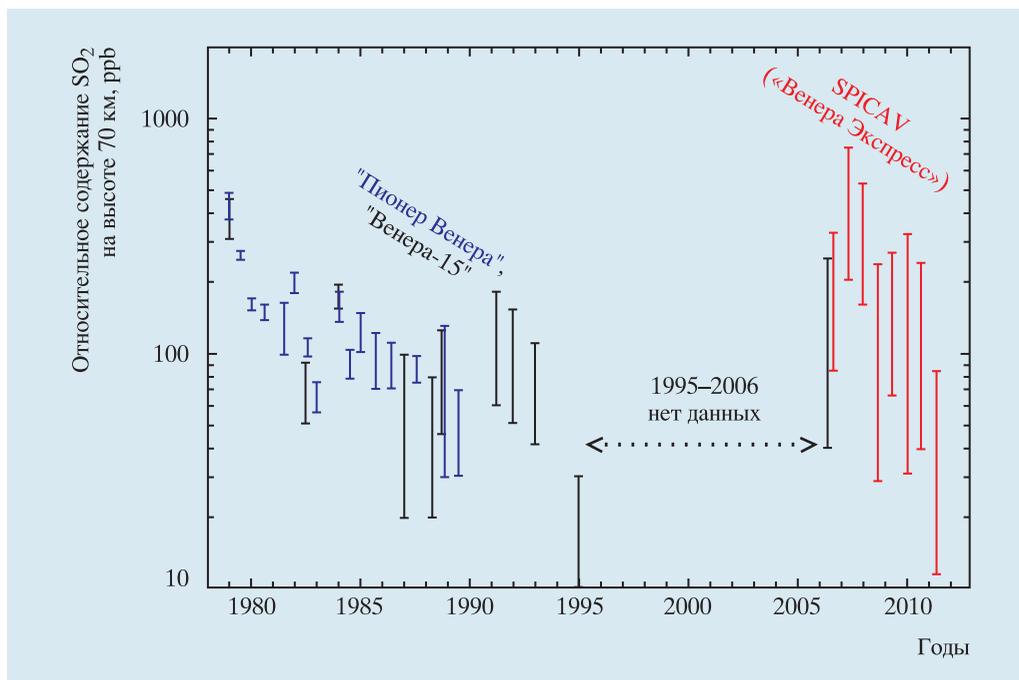
го около половины потока излучения Солнца. По контрастным УФ-изображениям (камера VMC) и мультиспектральному картированию (прибор VIRTIS) удалось изучить морфологию облаков на разной высоте, а методом альтиметрии – определить верхнюю границу облачного слоя. Впервые детально исследованы полярные области со спиральными вихрями.

В атмосфере Венеры можно выделить два режима общей циркуляции:

обратная зональная суперротация в тропосфере и мезосфере и поток от подсолнечной к противосолнечной области в термосфере. Скорость ветра у суперротации меняется от примерно 100 м/с у верхней границы облаков до нуля у поверхности. На циркуляцию накладывается более медленное (<10 м/с) меридиональное движение от экватора к полюсам, завершающееся огромными полярными вихрями. "Венера Экспресс" количественно исследовала поле ветров на высоте около 70 км посредством слежения за УФ-детальными на верхней границе облаков. По статистике, набранной за семь лет наблюдений, обнаружена периодичность в изменении скорости ветра, связанная с

периодом суперротации (4–5 земных суток). Получен также общий тренд к увеличению средней зональной скорости от 80 м/с в 2006 г. до 120 м/с в 2013 г.

Глобальную циркуляцию в термосфере изучали по результатам наблюдений на ночной стороне свечений кислорода, гидроксила (OH), окиси азота (NO). Это красивое явление связано транзитом освобожденных после фотодиссоциации атомов с подсолнечной стороны на противоположную, где они рекомбинируют на высоте около 100 км, что приводит к генерации излучения на определенных длинах волн: 200–300 нм (NO), 1,27 мкм (O₂), 1,44 и 2,8 мкм (OH).



СОСТАВЛЯЮЩИЕ АТМОСФЕРЫ

Углекислый газ и азот – основные компоненты атмосферы Венеры. Серосодержащие газы, окись углерода, водяной пар и другие малые составляющие присутствуют в атмосфере в количестве от нескольких промилле до нескольких сотен промилле (ppm). Несмотря на такое малое содержание, их роль в химических процессах в атмосфере весьма велика. Так, взаимодействие двуокиси серы (SO₂) с водяным паром и кислородом в верхней тропосфере приводит к формированию облаков из капель серной кислоты. С борта КА "Венера Экспресс" методом про-

свечивания были получены вертикальные распределения газов CO, H₂O, HDO, SO₂, SO, HCl, HF по всей мезосфере (60–100 км). Для многих из них высотные профили содержания получены впервые, так как прежде концентрация газов определялась только на уровне верхней границы облаков (70 км) при наблюдениях в надир.

Особого внимания заслуживают серо- и хлорсодержащие составляющие, поскольку это продукты вулканической активности на Венере. Двуокись серы считается одним из косвенных индикаторов вулканизма: единичный всплеск нарушает режимы вертикального перемешивания под облаками и, как

Диаграмма содержания двуокиси серы в области верхней границы облаков (70 км) Венеры. ESA.

следствие, увеличенные порции SO₂ могут проникать в надоблачную среду. Этот газ измеряется на Венере уже более 40 лет. В 1978–1988 гг. в результате непрерывных наблюдений получен тренд к снижению содержания SO₂ на уровне верхней границы облаков. Похожий тренд получился и сейчас по данным SPICAV в 2006–2013 гг. Уменьшение концентрации SO₂ и связь его с возможной вулканической деятельностью на планете вызывают жаркие дискуссии.

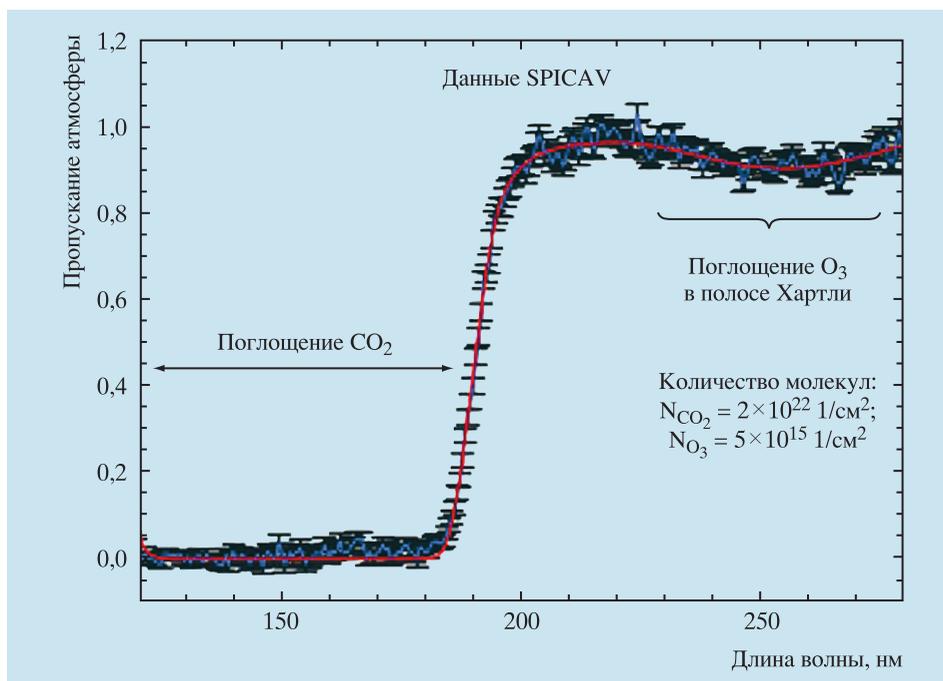


Диаграмма детектирования поглощения озона прибором SPICAV в УФ-диапазоне в атмосфере Венеры на высоте 100 км. По данным АМС "Венера Экспресс". ESA.

В вертикальном распределении двуокиси серы, впервые полученном приборами SPICAV и SOIR, обнаружен слой с повышенным содержанием газа на высоте 90–100 км. Этот слой прежние модели не предсказывали, согласно им, концентрация SO_2 монотонно убывает с высотой. Новые фотохимические расчеты привели к появлению двух гипотез: SO_2 обогащается за счет окисления частиц серы либо фотодиссоциации

паров серной кислоты, то есть распада молекулы H_2SO_4 на составляющие H_2O и $\text{SO}_2 + \text{O}$. Для точного выяснения причин требуется исследовать состав и свойства аэрозольных частиц в мезосфере, а также найти взаимосвязь между вариациями двуокиси серы и водяного пара.

Одна из фундаментальных проблем в исследовании Венеры — эволюция воды на ней. Венера сегодня — крайне сухая планета. Но ведь когда-то там была вода в изобилии? Механизмы потери атмосферой воды можно оценить через отношение дейтерия к водороду (D/H). По современным представлениям, планеты земной группы на стадии зарож-

дения имели одинаковые изотопные соотношения. Зная величину $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ относительно земного содержания, можно понять, как эволюционировала вода на другой планете. На Венере это соотношение определялось прежде лишь под облаками и оказалось в 150 раз больше земного. Для полной оценки ухода воды необходимы были измерения в верхней атмосфере. С этой задачей прекрасно справился спектрометр SOIR, детектируя поглощения паров HDO и H_2O одновременно в обоих интервалах спектра (3,67 и 2,7 мкм) и получив вертикальное распределение $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}$ по всей мезосфере. Здесь это отношение оказалось больше в 240 раз. Что же проис-

ходит? Выше 70 км водород, освободившийся после фотолиза водяного пара, легко покидает атмосферу. С “тяжелой водой” (HDO) эти процессы протекают медленнее, что и повышает изотопное соотношение. Сценарии ухода воды исследуются и выше, в ионосфере, по потокам ионов кислорода и водорода. Прибором ASPERA было измерено отношение Н/О – 2:1, что подтверждает теорию непрерывной утраты воды Венерой.

С миссией “Венера Экспресс” связано еще одно достижение в области состава атмосферы – открытие озонового слоя. Химические модели предсказывали наличие озона в малых количествах на ночной стороне, но подходящих экспериментов до сих пор не было. Его образование здесь имеет тот же источник, что и свечение кислорода, – глобальная циркуляция в термосфере. С другой стороны, молекула О₃ разрушается под воздействием гидроксидов ОН и хлора, радикалы которого доставляются сюда все той же циркуляцией. Подобные процессы происходят и на Земле. Озон на Венере детектирован УФ-каналом SPICAV в режиме звездного просвечивания на высоте 90–100 км, когда прибор измерял спектр определенной

звезды, ослабленный атмосферой, на лимбе планеты. В спектре атмосферного пропускания четко виден провал в области полосы Хартли, одной из фундаментальных полос поглощения озона в интервале длин волн 230–280 нм. Количество молекул газа на луче зрения ($\sim 10^{16}$ 1/см²) оказалось достаточным, чтобы выявить такое поглощение на указанных высотах. Для сравнения: это в 300 раз меньше, чем на Марсе и примерно в 1000 раз меньше, чем на Земле.

ВЗГЛЯД ПОД ОБЛАКА

Плотный облачный слой, отражающий около 60% солнечного излучения, не позволяет визуально заглянуть под него и тем более рассмотреть поверхность. В инфракрасном диапазоне благодаря спектральным “окнам прозрачности” можно дистанционно зондировать подоблачную атмосферу вплоть до поверхности. Эти “окна” соответствуют интервалам спектра, где основной атмосферный газ СО₂ не поглощает, давая тепловому излучению атмосферы выйти “наружу” из-под облаков. Если в таком “окне” присутствуют спектральные линии поглощения малой газовой составляющей, можно определить ее содержание на определенной высоте в атмосфере. Та-

ким образом, ИК-каналами VIRTIS и SPICAV детектировалось поглощение газов в окне 2,3–2,5 мкм на высоте около 35 км (Н₂О, SO₂, OCS и CO) и в полосе 1,18 мкм у поверхности (Н₂О). Кроме того, в окне около 1 мкм проводились измерения тепловой эмиссии с поверхности, чтобы обнаружить области вулканической активности. Абсолютно достоверные результаты этих экспериментов пока не известны ввиду невысокой чувствительности детектирования. Ведь наблюдения в “окнах прозрачности” можно проводить только на ночной стороне, чтобы избежать мощной засветки солнечного света, отраженного облаками.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ОКОЛОПЛАНЕТНАЯ ПЛАЗМА

Первые исследования Венеры показали, что у нее нет собственного магнитного поля. Тем не менее вокруг планеты формируется индуцированная магнитосфера, возникающая при взаимодействии с ионосферой солнечного ветра, потока заряженных частиц от Солнца и межпланетного магнитного поля. Такая магнитосфера содержит ударную волну, магнитослой, магнитопаузу и хвост на теневой стороне, однако размеры этих областей значительно меньше,

чем у планет, обладающих собственным магнитным полем. Магнитометр MAG и анализатор плазмы ASPERA на борту АМС “Венера Экспресс” зарегистрировали эти слои и границы между ними. Во время работы станции был минимум солнечной активности, что дополнило эксперименты на АМС “Пионер Венера-1” в период максимума. Было показано, что ударная волна в подсолнечной точке локализована на высоте около 2000 км (0,3 радиуса планеты) во время минимума (2007–2008). В максимуме ударная волна оказалась ближе к ионосфере в несколько раз, “заставляя” нижнюю границу магнитосферы проникать внутрь ионосферы (около 250 км). В эти моменты процессы ухода частиц из атмосферы усиливаются, что видно по анализу потоков ионов водорода, кислорода и гелия. Кроме того, новые данные уточнили магнитодинамическую модель, согласно которой маг-

нитный хвост на теневой стороне простирается на 30 – 45 радиусов Венеры. Предыдущие модели, построенные на основе экспериментов 1970–1980-х гг., оценивали длину хвоста в 200 радиусов.

* * *

В конце ноября 2014 г. мы получили последние научные данные с приборов “Венеры Экспресс”. Далее, ввиду истощения энергетических запасов, аппарат посылал на Землю лишь данные телеметрии, показывая постепенное снижение своей орбиты и погружение в атмосферу. В начале 2015 г. перицентр станции составлял уже 120 км... Научная миссия продлилась восемь с половиной лет – более 3 тыс. оборотов вокруг планеты. Ученые заглянули во все “уголки” облаков Венеры, частично под облака, и максимально подробно изучили надоблачную атмосферу, расширив знания о природе нашей “соседки”. Анализ данных еще

продолжается, и многие вопросы остаются открытыми. Предстоит уточнить свойства аэрозольных частиц, составляющих надоблачную дымку; найти корреляцию между серосодержащими частицами и водяным паром; исследовать взаимосвязь озонового слоя с хлорсодержащими веществами и гидроксидом. До сих пор неясен состав загадочного ультрафиолетового поглотителя в облаках. Продолжаются поиски более достоверных признаков вулканизма на Венере.

Автор данной статьи благодарит за предоставленные материалы коллег по экспериментам SPICAV, SOIR, VMC, VIRTIS, VeRa, ASPERA и MAG, а также руководителя проекта “Венера Экспресс” Х. Сведхема и научного координатора миссии, кандидата физико-математических наук Д.В. Титова из центра космических экспериментов ESTEC в Голландии (г. Нордвейк).