

и, в частности, благодаря гранту поддержки научных школ 1739.2003.2.

Список литературы

1. Davis L (Jr) *Phys. Rev.* **100** 1440 (1955)
2. Parker E N *Astrophys. J.* **128** 664 (1958)
3. Грингауз К И и др. *ДАН СССР* **131** 1301 (1960)
4. Witte M *Astron. Astrophys.* **426** 835 (2004)
5. Möbius E et al. *Astron. Astrophys.* **426** 897 (2004)
6. Parker E N *Astrophys. J.* **134** 20 (1961)
7. Баранов В Б, Краснобаев К В, Куликовский А Г *ДАН СССР* **194** 41 (1970)
8. Baranov V B, Malama Yu G *J. Geophys. Res.* **98** (A9) 15157 (1993)
9. Izmodenov V V, in *The Sun and the Heliosphere as an Integrated System* (Astrophys. and Space Sci. Library, Vol. 317, Eds G Poletto, S Suess) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004)
10. Izmodenov V V, Gruntman M, Malama Yu G *J. Geophys. Res.* **106** (A6) 10681 (2001)
11. Malama Yu G *Astrophys. Space Sci.* **176** 21 (1991)
12. Baranov V B, Lebedev M G, Malama Yu G *Astrophys. J.* **375** 347 (1991)
13. Linsky J L, Wood B E *Astrophys. J.* **463** 254 (1996)
14. Izmodenov V V, Lallement R, Malama Y G *Astron. Astrophys.* **342** L13 (1999)
15. Wood B E *Living Rev. Solar Phys.* **1** (2) (2004); <http://www.livingreviews.org/lrsp-2004-2>
16. Krimigis S M et al. *Nature* **426** 45 (2003)
17. McDonald F B et al. *Nature* **426** 48 (2003)
18. Izmodenov V, Gloeckler G, Malama Yu *Geophys. Res. Lett.* **30** (7) 3 (2003)
19. Alexashov D B et al. *Astron. Astrophys.* **420** 729 (2004)
20. McComas D et al. *AIP Conf. Proc.* **719** 162 (2004)
21. Izmodenov V, Malama Yu, Ruderman M S *Astron. Astrophys.* **429** 1069 (2005)
22. Stevenson D J *Earth Planet. Sci. Lett.* **208** (1) 1 (2003)
23. Stevenson D J *Earth Planet. Sci. Lett.* **82** (1–2) 114 (1987)
24. Giampieri G, Balogh A *Planet. Space Sci.* **50** 757 (2002)
25. Acuna M H et al. *Science* **279** 1676 (1998)
26. Dungey J W *Phys. Rev. Lett.* **6** 47 (1961)
27. Frank A G et al. *AIP Conf. Proc.* **703** 431 (2004)
28. Ness N F et al. *Icarus* **28** 479 (1976)
29. Russell C T *Adv. Space Res.* **26** 393 (2000)
30. Slavin J A et al. *Planet. Space Sci.* **45** 133 (1997)
31. Kennel C F et al. *Geophys. Res. Lett.* **16** 915 (1989)
32. Galeev A A, Kuznetsova M M, Zelenyi L M *Space Sci. Rev.* **44** (6) 1 (1986)
33. Vaisberg O L et al., in *Solar System Plasmas in Space and Time* (Geophysical Monograph, 84, Eds J Burch, J H Waite (Jr)) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1994) p. 207
34. Vaisberg O L, Zelenyi L M *Icarus* **58** 412 (1984)
35. Ерошенко Е Г *Космич. иссл.* **17** 93 (1979)
36. Verigin M, Luhmann J G, Russell C T, in *Plasma Environments of Non-Magnetic Planets* (COSPAR Colloquia Ser., Vol. 4, Ed. T I Gombosi) (Oxford: Pergamon Press, 1993) p. 259
37. Verigin M I, Gringauz K I, Ness N F *J. Geophys. Res.* **89** (A7) 5461 (1984)
38. Russell C T, Elphic R C *Nature* **279** 616 (1979)
39. Wolff R S, Goldstein B E, Yeates C M *J. Geophys. Res.* **85** (A12) 7697 (1980)
40. Котова Г А и др. *Космич. иссл.* **37** (1) 31 (1999)
41. Winterhalter D, Acuña M, Zakharov A (Eds) *Mars' Magnetism and its Interaction with the Solar Wind* (Space Science Series of ISSI, Vol. 18) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2004)
42. Ness N F et al. *J. Geophys. Res.* **105** (A7) 15991 (2000)
43. Russell C T, in *Physics of Magnetic Flux Ropes* (Geophysical Monograph, 58, Eds C T Russell, E R Priest, L C Lee) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1990) p. 413
44. Luhmann J G, in *Physics of Magnetic Flux Ropes* (Geophysical Monograph, 58, Eds C T Russell, E R Priest, L C Lee) (Washington, DC: Am. Geophys. Union, 1990) p. 425

PACS numbers: **96.30.** – t, 96.35.Hv, 96.35.Cr

Исследования атмосфер планет земной группы

О.И. Кораблев

1. Введение

Из планет земной группы значительными атмосферами обладают Венера, Земля и Марс. Меркурий и Луна считаются безатмосферными небесными телами, хотя и в том, и в другом случае обнаружены разреженные атмосферы. Процессы в гораздо более плотных атмосферах Венеры и Марса можно напрямую сравнивать с аналогичными процессами на Земле, и их исследования связаны с такими актуальными проблемами, как изменение условий обитания на Земле и происхождение жизни. За последние полтора десятилетия наиболее продвинулись исследования Марса. Летучие компоненты, в частности вода, и их история, а также серьезные свидетельства об изменениях климата привлекают особое внимание ученых. Доклад посвящен сравнительному анализу атмосфер планет земной группы, особое внимание уделено новым результатам исследования Марса, полученным в миссии Европейского космического агентства (ЕКА) "Марс-Экспресс" при участии российских исследователей.

2. Гипотезы формирования и первичного состава

Считается, что Солнце, планеты и их атмосферы сконденсировались около 4,6 млрд лет (1 Ga) назад из примитивной солнечной туманности, близкой по составу к солнечному (H, He, с небольшой примесью более тяжелых элементов). Соединения этих элементов (минералы и льды) сконденсировались и аккрецировали в планеты [1]. Атмосферы и летучие компоненты планет могут быть остатками первичных атмосфер, результатом ударной или постепенной дегазации планетеземалей либо, возможно, они были позднее занесены кометами. Планеты-гиганты, образовавшиеся вдали от Солнца, оказались способными удержать большое количество газа — в составе их спутников и систем колец содержится большое количество льдов. Планеты земной группы состоят преимущественно из минералов и содержат льды и летучие лишь в виде небольшой примеси, из которой состоят их атмосферы, океан Земли, полярные шапки и т.д.

Существует несколько гипотез, связанных с процессами аккреции планет земной группы. Согласно одной из них [2], в результате гравитационных возмущений планетеземали из любого места внутренней солнечной системы могли войти в состав любой из планет земной группы. Таким образом, первичный состав летучих на планетах должен быть приблизительно одинаковым. Различия в составе появились в процессе эволюции: Меркурий и Луна либо потеряли атмосферы в результате крупных ударов, либо вследствие малой массы просто оказались неспособными удержать атмосферы. Согласно этой гипотезе, Марс и Венера образовались с таким же количеством воды, как и Земля. В соответствии с количеством получаемой от Солнца энергии, вода на

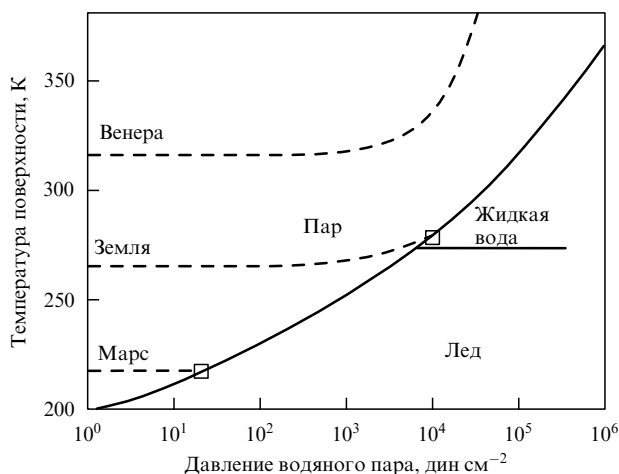


Рис. 1. Простейшая модель ранней эволюции планетных атмосфер: постепенная дегазация; накопление воды и ее фазовые превращения. Начальные температуры соответствуют эффективным (отвечающим равновесию уходящего планетарного и приходящего солнечного излучения). На Венере вся вода остается в атмосфере, температура катастрофически возрастает из-за парникового эффекта. На Земле образуются океаны, на Марсе — лед и вечная мерзлота [3].

планетах в дальнейшем либо замерзла и частично диссипировала (Марс), либо была практически полностью утеряна в результате катастрофического парникового эффекта (Венера). Земля сохранила большую часть своих запасов благодаря удачному расположению (рис. 1).

Другая школа (см., например, [4]) связывает различия первичного атмосферного состава с расстоянием от Солнца. В пользу этого говорит увеличение средней плотности планет в ряду от Марса к Меркурию. По этой гипотезе Меркурий сформировался только из твердых минералов, на Венере сосредоточилось больше углерода, а вода удержалась лишь на Земле и Марсе.

Первичные атмосферы могли быть потеряны на ранней стадии эволюции при бомбардировке все более крупными (вплоть до размеров Марса) телами. Согласно расчетам, сделанным для Земли, при таких ударах теряется практически вся атмосфера [5]. В этом случае вода и летучие должны были быть затем принесены из внешних, более спокойных областей солнечной системы. Гипотеза о кометном происхождении атмосферы и океана была впервые предложена О.Ю. Шмидтом [6]. Современные расчеты [7, 8] показывают, что в результате случайных столкновений с кометами на Земле могло собраться количество воды, достаточное для формирования современного океана. Однако М.В. Герасимовым с коллегами на основе экспериментов было показано [9, 10], что масса выделяющихся при ударной дегазации летучих может на два порядка превысить массу современного океана. С другой стороны, новое рассмотрение ударного взаимодействия в механическом аспекте [11] показало, что при крупном ударе могла сохраниться не только атмосфера Земли, но и атмосфера ударника. Из этого следует, что крупные ударные взаимодействия приводят не к потере атмосферы, а напротив, к ее обогащению за счет быстрого высвобождения запасов летучих компонент взаимодействующих тел. Сказанное не исключает, тем не менее, возможности привнесения летучих кометного

происхождения на разных стадиях эволюции планетных атмосфер.

Таким образом, единого объяснения того, как сформировались и эволюционировали атмосферы планет земной группы пока не существует. Скорее всего на разных стадиях эволюции преобладали различные факторы. Экспериментальной основой для проверки гипотез являются обилия и изотопные отношения "тяжелых" инертных газов (Ne, Ar, Xe, Kr), тщательно измеренные в разнообразных условиях на Земле. Измерить количество этих газов дистанционно невозможно, а данные, полученные на поверхностях Марса и Венеры с помощью масс-спектрометров, пока не обеспечивают достаточной точности. Обилия благородных газов на планетах, существенно отличающиеся от таковых на Солнце и метеоритах, стали основой многих исследований механизмов их накопления, потерь и изотопного фракционирования (см., например, [12]). Такие обилия практически несовместимы с полной или фактически полной потерей атмосфер в процессе формирования [13] и лучше согласуются с гипотезой диссипации, чем с теорией дифференциации в соответствии с расстоянием от Солнца [14].

3. Современное состояние, оценки первичных запасов и механизмы диссипации

Простейшая модель ранней эволюции (см. рис. 1) игнорирует многие факторы. Так, для оценки эффективной температуры надо учитывать изменение светимости Солнца. Формирование планет примерно совпадает по времени с выходом Солнца на главную последовательность диаграммы Герцшпрунга–Рассела. В этот период его светимость должна была быть на 30 % меньше, но есть и противоположные оценки. Уже упоминались внешние источники — кометы, которые, видимо, пополняли запас летучих в процессе эволюции. Часть летучих адсорбируется горными породами или входит в их состав и участвует в химических реакциях. На температуру планеты влияет атмосферная циркуляция, облака, присутствие других газов. Наконец, определяющую роль играют механизмы диссипации летучих.

Современное состояние атмосфер является результатом их неравномерного развития с учетом всех перечисленных факторов. Основные данные об атмосферах планет земной группы приведены в табл. 1 и 2. Атмосферы Марса и Венеры состоят преимущественно из CO_2 , тогда как на Земле этот газ практически полностью связан в коре в виде карбонатов. Общее количество летучих, оцениваемое для Земли с неплохой точностью, практически неизвестно для Марса. Водяной и углекислотный льды стабильны в полярных шапках Марса и в грунте (см. ниже); можно предположить также, что существуют запасы карбонатов, хотя пока их значительного содержания не обнаружено. По косвенным свидетельствам наличия в прошлом жидкой воды на Марсе, в том числе геологическим (размеры и количество русел и т.д.), получены оценки глубины исходного океана на Марсе — 0,5–1 км (~ 30 бар) [16]. Можно лишь предполагать, что количество летучих на Венере изначально было приблизительно таким же, как и на Земле.

Об атмосферной эволюции позволяет судить селективная диссипация изотопов разной массы. Наиболее различаются по массе изотопы водорода, и *отношение*

Таблица 1. Некоторые характеристики планет земной группы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, а.е.	Масса относительно Земли	Давление у поверхности, бар	Температура поверхности, К	Основные атмосферные газы	Парниковый эффект, К
Меркурий	0,39	0,052	10^{-16}	440	Na, He	0
Венера	0,72	0,81	92	735	CO ₂ , N ₂	500
Земля	1	1	1	289	N ₂ , O ₂ , (CO ₂ , H ₂ O)	39
Марс	1,52	0,11	0,006	214	CO ₂ , N ₂ , (H ₂ O)	4

Таблица 2. Основные атмосферные газы и запасы летучих на планетах земной группы*

Планета	Давление, бар	CO ₂	N ₂	Ar	H ₂ O	D/H относительно Земли
Меркурий	10^{-16}	—	—	7 %	—	—
Венера	92	96,5 %	3,5 %	70×10^{-6}	$30 - 100 \times 10^{-6}$	146
Земля**	1,013	370×10^{-6}	78 %	0,934 %	< 3 %	1
Марс [11]***	0,0061	95,3 %	2,7 %	1,6 %	$< 100 \times 10^{-6}$	6

* Данные из [10] с изменениями.
** В океане и ледниках Земли содержится эквивалент 270 бар H₂O, а в коре Земли — эквивалент 53 бар CO₂ и C.
*** В полярных шапках Марса содержится эквивалент 20 бар CO₂ и C и 30 бар H₂O (верхние пределы).

D/H, которое, в отличие от случая благородных газов, может быть измерено спектроскопическими дистанционными методами, используется в качестве удобного индикатора. Отношение D/H на Земле примерно в 10 раз превышает космическое. Если предположить, что такое фракционирование появилось на ранней стадии формирования планет, то из этого следует, что на Земле не было селективной диссипации, с Марса (см. табл. 2) ушло значительное количество воды ($D/H \approx 6(D/H)_{\text{Терр}}$), а на Венере была утеряна практически вся вода ($D/H \approx 150(D/H)_{\text{Терр}}$). Необычайно высокое по сравнению с H обогащение D на Венере измерено с высокой степенью достоверности как на посадочном аппарате [17], так и средствами наземной спектроскопии (см., например, [18]). Отношение D/H, измеренное на сегодня в трех кометах, примерно в два раза превышает земное [19]. Это не исключает кометного происхождения воды на планетах, так как измеренные значения D/H относятся к кометам из дальних областей солнечной системы, а поставщиками летучих на ранней стадии были скорее всего кометы из зоны Юпитера.

Получение простейших количественных оценок (умножение современного значения содержания воды на фактор D/H или больший его, если учитывать диссипацию D) затруднено, так как плохо известны современное содержание воды (например для коры и полярных шапок Марса), баланс между механизмами диссипации и факторы, влияющие на их работу.

Рассмотрим основные механизмы диссипации. Классическая теория тепловой диссипации состоит в следующем: выше определенного уровня, называемого экзобазой (на Земле 500–600 км), атомы, имеющие скорость выше второй космической (для Земли $11,2 \text{ км с}^{-1}$), покидают атмосферу. Эта теория объясняет отсутствие атмосферы на Меркурии и астероидах, дефицит легких элементов (H, He) в атмосферах планет земной группы и их обилие в атмосферах планет-гигантов. Однако она

сталкивается с существенными трудностями, когда необходимо "вывести" большое количество вещества: диссипация происходит только с уровня экзобазы, где плотность атмосферы очень мала. Экспоненциальная зависимость от атомной массы — эффект пропорционален $\exp\{-GMm/kTr\}$ — не может объяснить почти одинакового обилия инертных газов, в то время как их атомные массы от Ne к Xe возрастают в шесть раз. Наконец, тепловая диссипация предсказывает стабильную азотную атмосферу на Луне.

Для согласования с наблюдениями необходимо предположить, что, по крайней мере, в некоторые периоды эволюции доминировали другие механизмы. Как уже обсуждалось выше, столкновения планетезималей и бомбардировка может как разрушать, так и пополнять атмосферы. Атмосферы Земли и Венеры благодаря большой массе планет скорее всего выдерживают удары, но судьба Марса ясна не до конца. Для Меркурия любой крупный удар был бы фатальным, но запасы воды там могли пополняться за счет столкновений с кометами.

Итак, для объяснения соотношения $D/H \approx 150(D/H)_{\text{Терр}}$ на Венере необходимо рассмотреть другие механизмы. Предполагается, что на ранней стадии эволюции доминировал гидродинамический вынос летучих [13]. Этот механизм предусматривает сильный поток легкого газа (H, H₂ и даже CH₄), который захватывает более тяжелые атомы и молекулы с эффективностью, линейно, а не экспоненциально зависящей от массы частиц. Это хорошо согласуется с наблюдаемыми обилиями инертных газов. Однако для создания достаточного потока водорода с Венеры (или Земли) необходимо разрушить соответствующее количество молекул воды. Фотодиссоциация эффективно происходит при ультрафиолетовом (УФ) облучении с длиной волны короче 1000 Å, что составляет $\sim 10^{-5}$ мощности в спектре современного Солнца. Можно предположить, что у

раннего Солнца (до ~ 4 Ga) мощность УФ излучения была в 100 раз больше, например, как у молодой звезды Т-Тельца. Однако вопрос о том, существовал ли такой мощный восходящий поток газа-носителя когда-либо в истории планет, остается открытым.

Основным современным механизмом, за счет которого планеты теряют атмосферы, является *нетепловая диссипация*. Она происходит из-за столкновения атомов и молекул атмосферы (в основном ионизованного кислорода) с высокоэнергетичными частицами солнечного ветра и захваченными, ускоренными ионами. Исследованию этого механизма посвящен один из экспериментов на борту космического аппарата (КА) "Марс-Экспресс" [19].

Теоретические модели ранних атмосфер пока носят умозрительный характер. Возможно, теплый климат на Земле и Марсе при слабом солнечном потоке (так называемый парадокс слабого раннего Солнца [21]) обеспечивался парниковым эффектом в атмосферах, богатых углекислым газом при небольшой примеси водяного пара [22]. Впервые эта модель была предложена Л.М. Мухиным и В.И. Морозом [23, 24], и лишь позднее ее стали рассматривать западные авторы (см., например, [25]). Парниковый эффект играет огромную роль в современном климате Земли, поддерживая среднюю температуру на 38 К выше эффективной. На Марсе тоже присутствует слабый парниковый эффект (≈ 4 К).

Возможно, именно гипертрофированный, *нестационарный парниковый эффект* придал современный облик Венере [26], которая получает в два раза больше энергии от Солнца, чем Земля. При испарении H_2O в CO_2 -атмосфере возникает положительная обратная связь, что приводит к полному испарению (испарение земного океана дало бы 270 бар водяного пара). Температура катастрофически возрастает, происходят диссоциация водяного пара и потеря летучих, возможно, работает механизм гидродинамического выноса. С уменьшением УФ излучения Солнца гидродинамический вынос прекращается, охлаждение атмосферы приводит к конденсации облаков, становится возможным образование жидкого океана. Дальнейшая диссипация воды определяется тепловыми и нетепловыми механизмами, и глубину такого гипотетического "океана" можно оценить через значение D/H , что дает не менее 30 м, но эта глубина может быть и намного больше, если учесть потери дейтерия (см. выше). Современная температура 735 К на поверхности Венеры поддерживается стационарным парниковым эффектом за счет наличия CO_2 и остатков воды. Кроме того, важную роль играет облачный слой, возможен также вклад атмосферной циркуляции. Тепловое излучение покидает планету лишь через несколько "окон прозрачности" между основными полосами поглощения CO_2 . Модели показывают, что тепловой баланс определяется в основном содержанием водяного пара и других малых составляющих (например SO_2), заполняющих "окна прозрачности" [27] (рис. 2). Очень молодой возраст поверхности свидетельствует о том, что температура поверхности достигала точки плавления во времена 0,6–1,1 Ga. Причиной этого могло стать столкновение с кометой или массовый выброс вулканических газов. Впрочем, модели включают много допущений, и достоверно ответить на вопрос о том, достаточно ли парникового эффекта для поддержания температуры поверхности на уровне 735 К, пока нельзя.

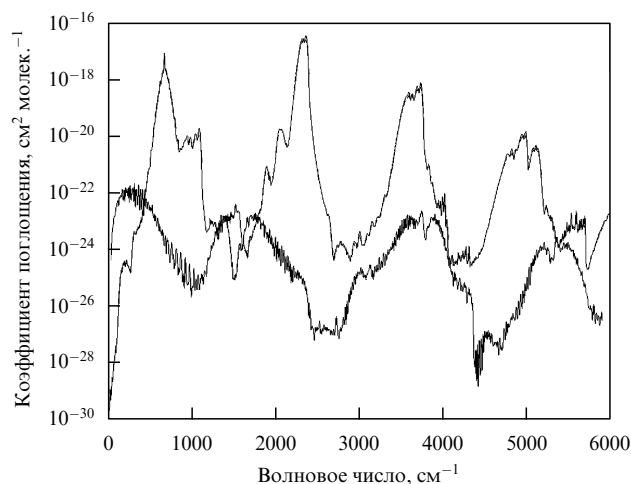


Рис. 2. Модель переноса излучения в атмосфере Венеры. Спектр коэффициента поглощения. Верхняя кривая — CO_2 , нижняя — H_2O и другие примеси [28].

4. Исследования атмосферы Венеры

Плотная непрозрачная атмосфера делает Венеру идеальным объектом космических исследований [30]. Первый удачный полет к Венере был осуществлен США в 1962 г.: космический аппарат (КА) "Mariner-2" провел радарные исследования, подтвердившие высокую температуру поверхности планеты. В дальнейшем в исследованиях Венеры лидировал СССР. Помимо 13 спускаемых аппаратов, на орбиту планеты были выведены четыре спутника. Атмосферные исследования были наиболее полно представлены на спускаемых аппаратах "Венера-9" — "Венера-13" (комплекс приборов для атмосферы и облаков), и на спутниках "Венера-15", "Венера-16" (фурье-спектрометр, атмосферная циркуляция). Исследования Венеры в СССР завершились яркой экспедицией "Вега" (к Венере и комете Галлея, 1985 г.), во время которой в атмосферу Венеры были выпущены два спускаемых аппарата и два аэростатных зонда, на которых впервые были проведены прямые измерения температуры и давления вдоль трассы полета в облачном слое на высоте 45–50 км. Впервые были также измерены вертикальные пульсации скорости ветра (конвективные движения).

Наиболее важными вехами исследования Венеры США были запуски КА "Pioneer-Venus" (1978 г.; три спускаемых аппарата и спутник) и спутника-радар "Magellan" (1989 г.), осуществившего съемку поверхности Венеры с большей точностью, чем это было сделано ранее КА "Венера-15" и "Венера-16".

Приведем основные данные, касающиеся атмосферы Венеры [32–34]. Полная масса углекислотной (97 % CO_2) атмосферы составляет $\sim 10^{-4}$ массы планеты и примерно в 100 раз больше земной. Малыми составляющими атмосферы, помимо указанных в табл. 1, 2 CO , O_2 , SO_2 , COS , HCl , HF , являются благородные газы Ar , Ne , Kr , Xe . Планету отличают аномальные (больше реликтовых, чем на Земле) изотопные отношения инертных газов. Очень мало воды — не более 0,003 %; D/H в 150 раз больше, чем на Земле.

Планету окутывает сплошной облачный слой с высоким альбедо (0,76). Эффективная температура Венеры $T_e = 235$ К, но температура поверхности, определяемая

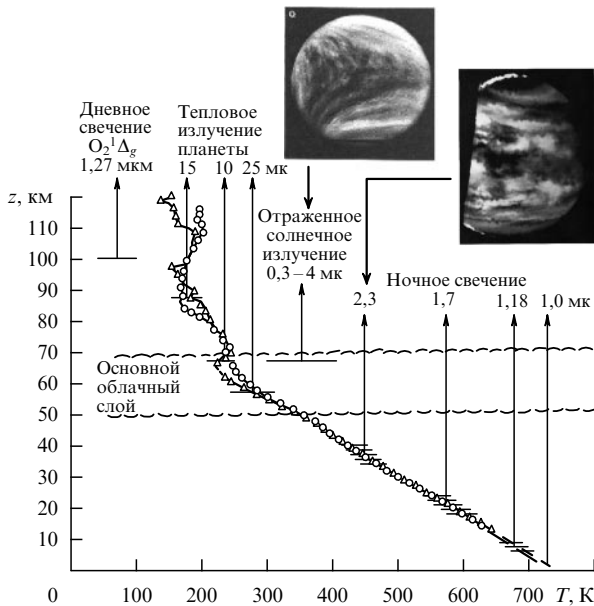


Рис. 3. Вертикальные профили температуры атмосферы Венеры, полученные на спускаемых аппаратах [32]. Положения уровня $\tau \sim 1$ для излучения, покидающего планету на разных длинах волн. Кружки — пример измерений на широте 30° , треугольники — на 60° . Профили на разных широтах и в разное время суток очень близки. Изображение Венеры в УФ диапазоне (350 нм), соответствующее высоте ≈ 70 км (верхняя граница облачного слоя) [32], и изображение уровня ≈ 30 км под облаками в ближнем ИК диапазоне, полученное зондом "Galileo" [35].

сильнейшим парниковым эффектом (см. выше), достигает 735 К. Ниже уровня 60 км градиент температуры почти не зависит от высоты и близок к адиабатическому. В нижней атмосфере нет ни суточных, ни сезонных вариаций; температурные профили на разных широтах практически не различаются (рис. 3). Причина этого — большая тепловая инерция атмосферы. Вблизи полюсов тепловое излучение увеличивается; на высоте 60–65 км наблюдается "холодный" воротник, отделяющий "горячий" полярный диполь от низких широт.

На Венере наблюдается суперротация: атмосфера (выше уровня 50–60 км) вращается с периодом ≈ 4 сут в ту же сторону, что и твердое тело (период 243 сут). Суперротация была обнаружена при наблюдениях с Земли в ближнем УФ диапазоне. На фотоснимках с КА в УФ диапазоне наблюдаются движение облаков со скоростью около 100 м с^{-1} и волны планетарного масштаба (см. рис. 3). Хотя суперротация предсказана теоретически [36] и обоснована численными моделями для атмосфер Венеры и Титана, механизм, заставляющий вращаться атмосферу, до конца не ясен. Энергию поставляет диссипация термических приливов, на которые расходуется $\sim 50\%$ от солнечной энергии, поглощаемой Венерой в интервале высот 60–70 км в верхнем облачном слое. Альbedo облаков в УФ-видимой области определяется поглотителем, состав которого (как и природа наблюдаемых УФ контрастов) неизвестен; возможно, — это аллотропы серы.

Как передается момент от поверхности, пока тоже не ясно. Термическое зондирование на КА "Венера-15" и "Венера-16" подтвердило, что меридиональная циркуляция организована в виде ячеек Хэдли. Воздушные массы поднимаются с экватора и в области верхней границы

облаков движутся к высоким широтам против градиента давления, температура здесь растет с широтой. Они несут угловой момент, который сбрасывают в средних широтах. Обратная ветвь, вероятно, проходит ниже высоты 60 км, где изменяется знак широтного температурного градиента. Как организована циркуляция под облаками, есть ли там тоже ячейки Хэдли, неизвестно [32].

Тепловое и отраженное излучения планеты уходят с уровня 60–70 км. В "окнах прозрачности" (см. выше) между полосами CO_2 на длинах волн 1, 1,4, 1,7, 2,3, 3,7 мкм сквозь облачный слой пробивается тепловое излучение подоблачной атмосферы, которое можно наблюдать только на ночной стороне планеты. Его спектр содержит информацию о малых составляющих на разных уровнях. Впервые ночное свечение атмосферы в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне было обнаружено на аэростатных зондах в проекте "Вега", затем оно наблюдалось с Земли [28] и при пролете КА "Galileo" (см. рис. 3). Космическая миссия к Венере Европейского космического агентства (ЕКА) "Венера-Экспресс" (запуск в октябре 2005 г.) впервые исследует эти свечения с орбиты, что позволит получить глобальную информацию о глубоких слоях атмосферы. На борту КА "Венера-Экспресс" будут находиться приборы, в создании которых совместно с европейскими учеными принимали участие ученые ИКИ РАН.

Венера — наряду с Марсом — одна из планет солнечной системы, изучение которых наиболее важно для понимания будущего Земли. Необходимо ответить на ключевые вопросы о происхождении Венеры и ее атмосферы, о судьбе воды и возможном периоде ранней истории Венеры с более холодным климатом и жидкой водой на поверхности. Необходимы оценки устойчивости современного парникового эффекта, роли облачного слоя и возможного вклада динамики. Сейчас эта планета оказалась почти забытой: "Венера-Экспресс" полетит к ней после более чем 15-летнего перерыва. В прошлом именно исследования Венеры были единственной областью фундаментальных космических исследований, где наша страна имела безусловный приоритет. Российская промышленность накопила уникальный опыт создания посадочных аппаратов для исследований Венеры. Проект, предусматривающий посадку на Венеру, с запуском в 2016 г., включен в Федеральную космическую программу. Современная масс-спектрометрическая и другая аппаратура на посадочном аппарате позволят провести ключевые измерения изотопов инертных газов у поверхности, исследования облачного слоя, выяснить распределение и состав частиц, природу УФ-поглотителя. Предусматриваются также дополнительные исследования с помощью аэростатных зондов, каждый из которых может нести несколько сбрасываемых мини-зондов для изучения поверхности в различных точках. В состав миссии должен входить орбитальный аппарат для передачи данных. Мы убеждены, что целью долгосрочной программы исследований России может и должна вновь стать Венера.

5. Исследования атмосферы и летучих составляющих Марса

Многое о Марсе известно из наземных наблюдений. Например, с Земли был открыт водяной пар в атмосфере [37], связанная вода в почве и водяной лед в северной

полярной шапке планеты [38]. По спектрам более высокого разрешения были получены первые реалистические оценки давления у поверхности, обнаружено наличие CO и O_2 . Однако "каналы" присутствовали на картах Марса вплоть до получения первых космических снимков. В космических исследованиях Марса приоритет принадлежит США. Большой вклад в исследования состава атмосферы внес КА "Mariner-9" (1969 г.) благодаря хорошим спектральным наблюдениям УФ и ИК диапазона. Было картировано $\sim 80\%$ площади планеты. Наиболее значительный прорыв в исследованиях Марса за всю космическую эпоху состоялся в результате проекта "Viking" (1976 г.; два спутника Марса и два посадочных модуля). Рекордным было время жизни аппаратов, например, "Viking Lander-1" работал на поверхности более шести лет. Более двух марсианских лет охвачено дистанционными измерениями. На основе огромного объема наблюдательных данных была сформирована картина современного климата Марса, называемая "викинговской" [22, 39].

В СССР важной вехой в исследовании Марса стал проект "Фобос". Хотя посадка на Фобос не удалась, за два месяца 1989 г. орбитальный аппарат "Фобос-2" сделал больше, чем все прежние советские миссии. Например, были получены приоритетные данные о вертикальном распределении H_2O и аэрозоля в атмосфере [40, 41]. Затем наступил период крупных неудач. На подлете к Марсу погиб разносторонний орбитальный аппарат НАСА "Mars Observer" (1992 г.). Еще более амбициозный российский проект "Марс-96" (550 кг научной аппаратуры, две малые станции, два пенетратора) закончился неудачно: КА не вышел на межпланетную траекторию из-за отказа разгонного блока ракеты. Эта авария на многие годы заморозила российскую планетную программу. А в США научную аппаратуру "Mars Observer" стали запускать по частям (несмотря на интенсивность американской программы, некоторые эксперименты "Mars Observer" еще не реализованы). Значительный шаг в исследовании планеты сделан благодаря "Mars Global Surveyor" (MGS) (1996 г.) с аналогами приборов "Mars Observer": фурье-спектрометр TES, телевизионная система, лазерный альтиметр и магнетометр. MGS до сих пор работает на орбите Марса. По данным спектрометра TES уже более трех марсианских лет идет мониторинг температурных профилей, пылевого и конденсационного аэрозолей и водяного пара [42]. Лазерный альтиметр позволил впервые определить фигуру планеты с высокой точностью, и ее глобальную асимметрию (южное полушарие выше северного) [43]. Данные магнетометра позволили установить остаточную намагниченность марсианской коры [44]. После серии неудач КА "Mars Odyssey" (2001 г.) доставил к Марсу следующий прибор "Mars Observer": гамма-спектрометр. Открытия, сделанные с помощью этого прибора и работающего совместно с ним российского нейтронного спектрометра ХЭНД, — обнаружение воды в верхнем слое (1–3 м) грунта — широко известны. Содержание замерзшей воды в грунте составляет 35–50% в полярных областях и 5–10% в некоторых областях вблизи экватора [45, 46].

Приведем основные факты, касающиеся атмосферы Марса. Помимо основных газов, перечисленных в табл. 1, 2, в атмосфере обнаружены CO , O_2 , O_3 , H_2O_2 ,

Ne , Ne , K_2 , Xe . Средняя температура поверхности около 210 К; наблюдаются большие суточные, широтные и сезонные вариации температуры: от 145 К (полярная ночь) до 290 К (на экваторе после полудня). Среднее атмосферное давление около 6 мбар (зависит от высоты местности). Длительные наблюдения на посадочных аппаратах "Viking" позволили установить большие сезонные, широтные и суточные вариации [47]. Сезоны на Марсе похожи на земные, но сезонный цикл усложнен большим эксцентриситетом орбиты: южное лето существенно теплее северного. Зимой CO_2 конденсируется на полярных шапках, в конденсированную фазу периодически переходит до 25% атмосферы. Эта оценка основана на моделях общей циркуляции, опирающихся на сезонные колебания давления, и подтверждается данными лазерного альтиметра. Спектрометр нейтронов высокой энергии ХЭНД также позволяет оценить толщину слоя CO_2 в твердой фазе, экранирующего слой, богатый водородом [48]. Полярные шапки Марса существенно асимметричны: северная полярная шапка значительно больше южной и состоит в основном из водяного льда. Также асимметричен сезонный цикл воды. Т. Клэнси [49] высказал гипотезу, объясняющую эту асимметрию влиянием конденсационных облаков, наблюдаемых на экваторе в афелии во время испарения северной полярной шапки, которые препятствуют переносу воды в южное полушарие, что подтверждается моделированием [50] (рис. 4).

Иногда в период прохождения перигелия вся планета бывает покрыта пылевыми облаками. В этот период возникает положительная обратная связь между адвекцией пыли, поглощающей солнечное излучение, и интенсивностью циркуляции ячейки Хэдли. Глобальные пылевые бури — явление, не имеющее земных аналогов. Неясен процесс инициализации подъема пыли, который, возможно, связан с сублимацией полярных отложений.

Жидкая вода на Марсе неустойчива, хотя (и, скорее всего, неслучайно) давление и температура недалеко от тройной точки и возможно образование потоков воды с малым временем жизни [52]. Почти вся вода находится в грунте — в виде льда. Споры геологов о том, был ли в прошлом климат Марса более теплым и о существовании гидросферы земного типа, переживают циклическое развитие. После разочарования, вызванного первыми фотографиями луноподобных ландшафтов с пролетных КА, "Mariner-9" и "Viking" принесли противоположные доказательства: изображения русел рек, долин, каналов [16, 22, 53]. Подтверждением этому стало измеренное значение $D/H = 5,5 (D/H)_{\text{Terр}}$ [54]. Позднее русла и каналы, в частности на основе изучения их формы и поперечного профиля, стали все чаще интерпретировать как результат деятельности ледников. На новом витке исследований гипотеза о существовании древнего океана в северном полушарии была подтверждена данными лазерного альтиметра [55]. На месте посадки "Pathfinder" (1997 г.) найдены свидетельства активности текущей воды, марсоходы "Spirit" и "Opportunity" обнаружили минералы, для формирования которых необходима жидкая вода [56]. Последние открытия сделаны с помощью мессбауэровского и альфа-рентгеновского спектрометров, подготовленных с участием наших ученых и восходящих к спектрометрам малых станций проекта "Марс-96".

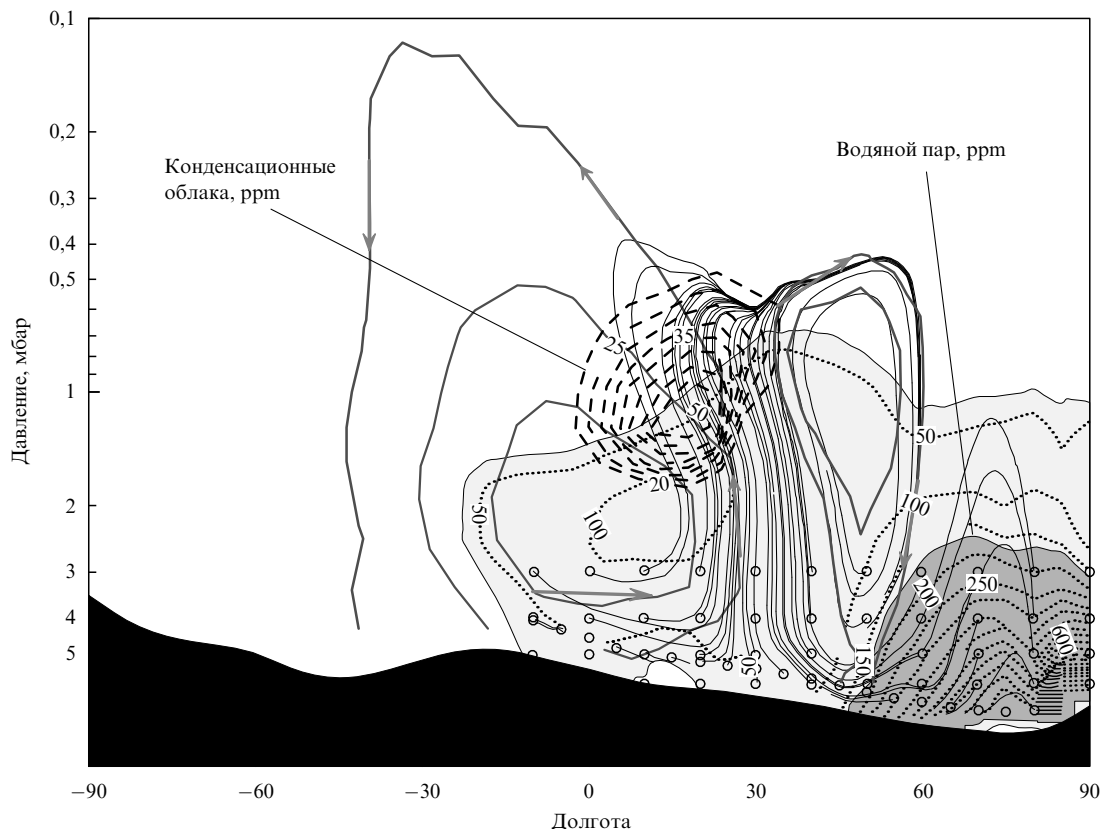


Рис. 4. Результаты моделирования водяного цикла в атмосфере Марса [50]. Линии тока (перенос) водяного пара (сплошные кривые) в сезон афелия (лето в северном полушарии). Относительное содержание водяного пара обозначено градациями серого, конденсационные облака показаны штриховыми контурами (ppm — parts per million). Расчет выполнен с помощью модели общей циркуляции GFDL [51].

6. Первые результаты, полученные космическим аппаратом "Марс-Экспресс"

Аппарат ЕКА "Марс-Экспресс" работает на орбите Марса с января 2004 г. Реализация "Марс-Экспресса" как преемника российского аппарата "Марс-96" является крупнейшим успехом европейской и российской планетной науки. На борту находится семь научных приборов: ТВ-камера HRSC для стереосъемки поверхности планеты с разрешением 10 м (с расстояния 250 км), спектрометры OMEGA, PFS и SPICAM, анализатор плазмы и нейтрального газа ASPERA [20], длинноволновый радар MARSIS и оборудование для эксперимента по радиопросвечиванию MARS. Эксперименты "Марс-Экспресс" повторяют аналогичные исследования в программе "Марс-96"; в случае OMEGA даже использован запасной прибор. Хотя для этого были все предпосылки, "Марс-Экспресс" не стал совместным проектом ЕКА и Роскосмоса. Руководителями всех экспериментов являются европейские ученые; в шести экспериментах российские ученые принимают участие в качестве соисследователей.

Для трех спектрометров: OMEGA (картирующий спектрометр, диапазон 0,5–5,2 мкм, пространственное разрешение 0,3–5 км), PFS (ИК-фурье-спектрометр высокого спектрального разрешения, диапазон 1,2–40 мкм, разрешение 1,4 см⁻¹) и SPICAM (универсальный УФ-ИК спектрометр для измерений в надири и режимах затмений Солнца и звезд), Россией были постав-

лены важные элементы: сканер OMEGA, детекторы PFS и один из двух измерительных каналов SPICAM — спектрометр ближнего ИК диапазона на базе акустооптического фильтра (1,0–1,7 мкм, спектральное разрешение 3,5 см⁻¹) [57].

Взаимодополняющие измерения с помощью спектрометров, созданных с российским участием, уже позволили получить важные результаты, многие из которых пока только готовятся к публикации. Измерения структуры атмосферы с высокой точностью в беспрецедентном диапазоне высот (PFS и SPICAM), включая высоты 100–150 км, на которых происходит торможение КА, дали возможность исследовать распределение и свойства облаков и аэрозолей. Прибор PFS позволяет по каждому спектру одновременно восстанавливать температурный профиль атмосферы высотой до 50–55 км, измерять содержание пыли и детектировать облака. Исследовано состояние атмосферы северной полярной области в начале зимы [58]. Впервые одновременно измерены содержания и построены карты водяного пара и озона в атмосфере. Водяной пар измеряется PFS и SPICAM в ИК диапазоне, озон — в УФ диапазоне (SPICAM) и по регистрации свечения O₂⁺Δ_g на 1,27 мкм (рис. 5). Свечение возникает при фотодиссоциации озона выше уровня 15–20 км. Оно наблюдалось в спектрах всех трех экспериментов: с высоким спектральным разрешением в экспериментах SPICAM и PFS и высоким пространственным разрешением — в OMEGA. Изображения OMEGA в полосе излучения 1,27 мкм имеют волновую структуру, подоб-

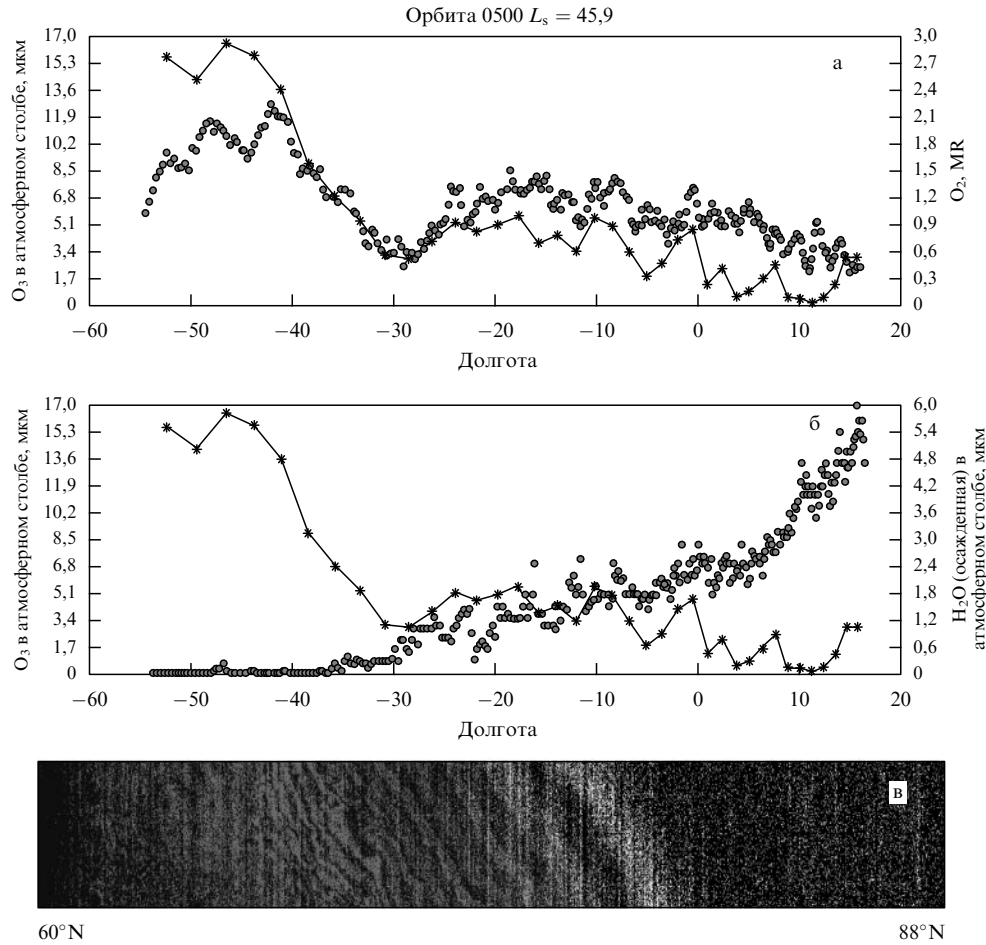


Рис. 5. (а) Измерения озона вдоль орбиты прибором SPICAM. Сплошная линия — результат УФ (200–300 нм) измерений, точки — измерения свечения в полосе $\text{O}_2\Delta_g$ на 1,27 μm . (б) Анतिकорреляция озона и водяного пара. Сплошная линия — УФ измерения озона, точки — содержание водяного пара по полосе 1,38 μm (SPICAM-ИК). (в) Свечения в полосе $\text{O}_2\Delta_g$ в северных широтах. Данные OMEGA.

ные же волны наблюдаются и в изображениях облаков из H_2O - и CO_2 -льда. Это могут быть гравитационные волны, впервые наблюдаемые с такой наглядностью. С помощью прибора SPICAM обнаружено ночное свечение NO, присущее атмосфере Венеры, но ранее не наблюдавшееся в атмосфере Марса [59]. Объем статьи не позволяет подробно комментировать эти результаты. Остановимся лишь на двух самых интересных открытиях.

Впервые обнаружен *водяной лед* в постоянной южной полярной шапке Марса в конце марсианского лета. Полярные шапки Марса состоят из двух частей — сезонной и постоянной. Сезонная часть — конденсат CO_2 — развивается осенью и зимой, а весной исчезает. Природа постоянных шапок, сохраняющихся вблизи полюсов даже летом, менее ясна. Постоянная северная полярная шапка более теплая, и, по-видимому, она состоит из обычного водяного льда. Исходя из низкой температуры постоянной части южной шапки считалось, что она состоит из льда CO_2 , но до сих пор прямых подтверждений не было. Их получили ИК-спектрометры спутника "Марс-Экспресс". На южной полярной шапке в спектрах трех экспериментов идентифицированы полосы поглощения CO_2 -льда. Лед CO_2 включает в себя примеси льда H_2O и пыли (рис. 6); распределение льдов и пыли пространственно неоднородно. Карты, построенные по данным OMEGA с разрешением 1–3 км, свидетельствуют о том, что участки H_2O -льда

находятся по краям крупных областей CO_2 -льда [62]. В сочетании с анализом снимков MGS [63] эти данные позволяют заключить, что толщина слоя CO_2 -льда не превышает нескольких метров [64]. Исследования постоянной северной полярной шапки в конце 2004 г. (после летнего солнцестояния) подтвердили, что она состоит из водяного льда, и позволили проследить увеличение размера ледяных частиц со временем. Установлено, что загрязнение льда пылью незначительно ($\ll 1\%$) [65]. Прибором OMEGA проведено минералогическое картирование значительной части планеты, и, несмотря на большое разнообразие минерального состава, карбонаты не обнаружены. Таким образом, данные с "Марс-Экспресса" не подтверждают наличия существенных запасов CO_2 на Марсе.

После долгих бесплодных попыток *метан в атмосфере Марса* был обнаружен практически одновременно тремя независимыми группами исследователей. Планетный фурье-спектрометр (PFS) обладает высоким спектральным разрешением, что позволяет детектировать и исследовать распределение малых газовых составляющих атмосферы. Определено среднее содержание метана, равное 10 ± 5 ppb (частей на миллиард) [66], что подтверждает появившиеся несколько ранее астрономические данные [67]. Измерения PFS свидетельствуют о различном содержании CH_4 в разных областях Марса: от 0 до 30 ppb, и такая изменчивость также подтверж-

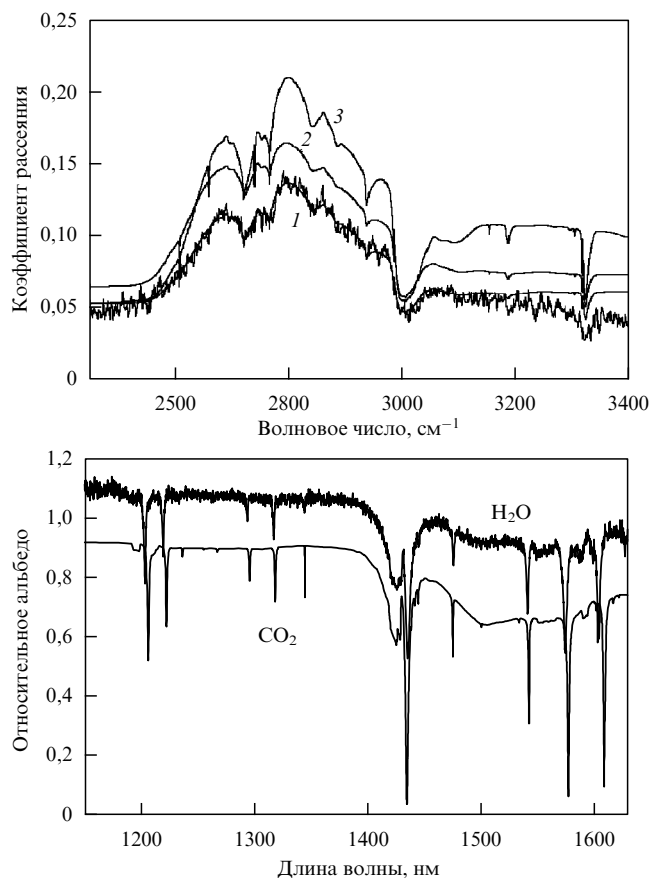


Рис. 6. Спектры остаточной Южной полярной шапки, полученные приборами PFS (русские детекторы) и ИК-спектрометром SPICAM (изготовлен в ИКИ), позволяющие идентифицировать лед CO_2 с примесью пыли и льда H_2O [60, 61]. Показаны три синтетических спектра, соответствующие трем разным орбитам, в случае 1 приведен также измеренный спектр. Доля поверхности, не покрытой льдом, изменяется от 0,14 до 0. Содержание пыли составляет 0,005–0,05 %, льда H_2O — 0,0009–0,0025 %. Размер частиц CO_2 изменяется от 2 до 5 мм. Спектр SPICAM показан в сравнении с синтетическим спектром CO_2 -льда, содержащим примесь воды и пыли.

дается астронаблюдениями [68]. Это содержание мало, но так как метан в атмосфере непрерывно разрушается в результате фотодиссоциации, необходимо предположить существование источника метана интенсивностью ~ 300 т в год [67]. Возникновение такого источника трудно объяснить абиогенными процессами (остаточный вулканизм, геотермальная активность и др.), так как ИК-картирующий радиометр THEMIS (КА "Mars Odyssey"), специально созданный для поиска "горячих точек", не обнаружил ни одной из них. Метан кометного или метеоритного происхождения может дать только от 2 до 4 % необходимого потока. Источником могли бы служить бактерии-метаногены, подобные обнаруженным в глубоких подземных экосистемах Земли. На Марсе их существование возможно на нижней границе криосферы (>2 км), где могут образоваться залежи газогидрата [69].

7. Заключение

Действительно ли была, однократная или повторяющаяся несколько раз, "эпоха теплого Марса"? При обилии воды в приповерхностных слоях Марса, каза-

лось, должны были образоваться карбонаты. Почему они до сих пор не обнаружены? А если на Марсе был теплый и влажный период, то там могли возникнуть и живые организмы. На поиск ответов на эти вопросы нацелена космическая экспедиция ЕКА "Марс-Экспресс". Измерения "Марс-Экспресса" не подтверждают наличия постоянных озер и океанов на поверхности Марса позднее 3 Ga. Карбонаты, которые могли бы поглотить плотную CO_2 -палеоатмосферу, снова не обнаружены, запасы CO_2 в полярных шапках, по-видимому, малы. Похоже, что Марс потерял атмосферу на раннем этапе, а парниковый эффект мог работать лишь кратковременно. Зато вода сохранилась в значительных количествах в полярных шапках и грунте. Исследовать глубокие слои грунта позволит радар КА "Марс-Экспресс", включение которого запланировано на май 2005 г. Открытие метана сенсационно — оно указывает на наличие живых микроорганизмов или на необнаруженную вулканическую активность.

Эволюция климата Марса существенно отличается от эволюции климата Земли. Что ждет нашу планету в будущем? Нет ли опасности, что она станет второй Венерой или, как Марс, потеряет атмосферу? Одна из задач изучения Марса и Венеры — найти ответы на эти вопросы.

Участие российских ученых в экспедиции "Марс-Экспресс" и в проектах НАСА позволило сохранить в России школу планетных исследований в условиях долгого отсутствия национальных проектов. Сейчас в России возобновлена подготовка экспедиции "Фобос-Грунт", в программе которой — климатический мониторинг Марса и атмосферные измерения с орбиты. При этом остается перспективной политика участия посредством использования российских приборов в космических проектах других стран.

Доклад посвящается памяти В.И. Мороза, 30 лет руководившего отделом Физики планет ИКИ РАН, научному руководителю программ "Марс-96" и "Марс-Экспресс" (в России). При подготовке доклада использованы материалы В.И. Мороза. Автор благодарен за помощь Л.В. Засовой, Л.М. Зеленому, А.В. Родину, А.В. Захарову. Работы по созданию российских элементов аппаратуры "Марс-Экспресс" поддержаны Роскосмосом, участие российских соисследователей в проекте поддержано ЕКА, CNRS, CNR, DLR, работы ИКИ по обработке данных поддержаны грантом РФФИ 04-02-16856а.

Эксперименты "Марс-Экспресс" с участием российских ученых, руководители и члены российских команд:

ASPERA: руководитель Г. Лундин, С. Барабаш (Институт космической физики, Киуна, Швеция), А.О. Федоров, Е.Ю. Будник (ИКИ РАН);

HSRC: руководитель Г. Нойкум (DLR, Берлин, Германия), А.Т. Базилевский (ГЕОХИ РАН), Б.А. Иванов (ИДГ РАН), Р.О. Кузьмин (ГЕОХИ РАН);

MARSIS: руководитель Дж. Пикарди (университет La Sapienza, Рим, Италия), Н.А. Арманд, В.М. Смирнов (ИРЭ РАН);

OMEGA: руководитель Ж.-П. Бибринг (IAS/CNRS, Орсе, Франция), В.И. Мороз, В.А. Котцов, Л.В. Засова, Д.В. Титов, Н.И. Игнатьев (ИКИ РАН);

PFS: руководитель В. Формизано (IFSI/CNR, Рим, Италия), В.И. Мороз, Л.В. Засова, Н.И. Игнатьев, И.В. Хатунцев, Д.В. Титов, А.П. Экономов, Б.Е. Мош-

кин, А.В. Григорьев, Ю.В. Никольский, В.Н. Гнедых, Д.В. Пацаев, А.В. Киселев (ИКИ РАН);

SPICAM: руководитель Ж.-Л. Берто (Service d'Aéronomie/CNRS, Верьер-ле-Буиссон, Франция), О.И. Кораблев, В.И. Мороз, А.А. Федорова, А.В. Родин (ИКИ РАН).

Список литературы

- Сафронов В С *Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет* (М.: Наука, 1969)
- Wetherill G W *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **18** 205 (1990)
- Гуди Р, Уолкер Дж *Атмосферы* (М.: Мир, 1975)
- Lewis J S, Prinn R G *Planets and Their Atmospheres: Origin and Evolution* (Orlando: Academic Press, 1984)
- Ahrens T J *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **21** 525 (1993)
- Шмидт О Ю *Четыре лекции о теории происхождения Земли* 3-е изд. (М.: Изд-во АН СССР, 1957)
- Ипатов С И *Миграция небесных тел в Солнечной системе* (М.: Едиториал УРСС, 2000)
- Маров М Я *УФН* **175** 668 (2005)
- Герасимов М В и др. *Вестн. АН СССР* (9) 10 (1985)
- Герасимов М В *Письма в Астрон. журн.* **5** (5) 251 (1979)
- Genda H, Abe Y *Icarus* **164** 149 (2003)
- Pepin R O *Icarus* **92** 2 (1991)
- Pepin R O *Icarus* **126** 148 (1997)
- Hunten D M *Science* **259** 915 (1993)
- Bogard D D et al. *Space Sci. Rev.* **96** 425 (2001)
- Carr M H *Water on Mars* (New York: Oxford Univ. Press, 1996)
- Donahue T M *Icarus* **66** 195 (1986)
- de Bergh C et al. *Science* **251** 547 (1991)
- Meier R et al. *Science* **168** 731 (1988)
- Зеленый Л М и др. *УФН* **175** 643 (2005)
- Sagan C, Mullen G *Science* **177** 52 (1972)
- Мороз В И *Физика планеты Марс* (М.: Наука, 1978)
- Мухин Л М, Мороз В И *Письма в Астрон. журн.* **3** 78 (1977)
- Мороз В И, Мухин Л М *Космич. исслед.* **15** 901 (1978)
- Kasting J F, Ackerman T P *Science* **234** 1383 (1986)
- Ingersoll A P *J. Atmos. Sci.* **26** 1191 (1969)
- Маров М Я, Гальцев А П, Шари В П *Астрон. вестн.* **19** (1) 15 (1985)
- Pollack J V et al. *Icarus* **103** 1 (1993)
- Афанасенко Т С, Родин А В *Астрон. вестн.* (2005) (в печати)
- Мороз В И, Хантресс В Т, Шевалев И Л *Космич. исслед.* **40** 451 (2002)
- Moroz V I *Space Sci. Rev.* **29** 3 (1981)
- Hunten D M et al. (Eds) *Venus* (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1983)
- Bougher S W, Hunten D M, Phillips R J (Eds) *Venus II* (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1997)
- Marov M Ya, Grinspoon D H *The Planet Venus* (New Haven: Yale Univ. Press, 1998)
- Carlson R W et al. *Science* **253** 1541 (1991)
- Golitsyn G S *Icarus* **13** 1 (1970)
- Spinrad H, Münch G, Kaplan L D *Astrophys. J.* **137** 1319 (1963)
- Мороз В И *Астрон. журн.* **41** 350 (1964)
- Kieffer H N et al. (Eds) *Mars* (Tucson, Ariz.: Univ. of Arizona Press, 1992)
- Korablev O I et al. *Icarus* **102** 76 (1993)
- Rodin A V, Korablev O I, Moroz V I *Icarus* **125** 212 (1997)
- Smith M D *Icarus* **167** 148 (2004)
- Smith D E et al. *J. Geophys. Res.* **106** (E10) 23689 (2001)
- Acuna M H et al. *Science* **284** 790 (1999)
- Boynnton W V et al. *Space Sci. Rev.* **110** 37 (2004)
- Mitrofanov I et al. *Science* **297** 78 (2002)
- Tillman J E *J. Geophys. Res.* **93** 9433 (1988)
- Mitrofanov I G et al. *Science* **300** 2081 (2003)
- Clancy R T et al. *Icarus* **122** 36 (1996)
- Родин А В, частное сообщение (2003)
- Richardson M I, Wilson R J *J. Geophys. Res.* **107** (E5) 7 (2002)
- Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **37** 397 (2003)
- Squyres S W, Kasting J F *Science* **265** 744 (1994)
- Owen T et al. *Science* **240** 1767 (1988)
- Head J W et al. *Nature* **426** 797 (2003)
- Morris R V et al. *Science* **305** 833 (2004)
- Korablev O I et al. *Proc. SPIE* **4818** 261 (2002)
- Засова Л В и др. *Космич. исслед.* (2005) (в печати)
- Bertaux J-L et al. *Science* **307** 566 (2005)
- Hansen G et al. *Planet. Space Sci.* (2005) (in press)
- Bertaux J-L et al., in *35th Lunar and Planetary Science Conf., League City, Texas, USA, March 15–19, 2004*, Abstract 2178
- Bibring J-P et al. *Nature* **428** 627 (2004)
- Byrne S, Ingersoll A P *Geophys. Res. Lett.* **30** (13) 29 (2003)
- Bibring J-P et al. *Science* **307** 1576 (2005)
- Langevin Y et al. *Science* **307** 1581 (2005)
- Formisano V et al. *Science* **306** 1758 (2004)
- Krasnopolsky V A, Maillard J P, Owen T C *Icarus* **172** 537 (2004)
- Mumma M J et al. *Am. Astron. Soc. DPS Meeting* **36** 26.02 (2004)
- Max M D, Clifford S M *J. Geophys. Res.* **105** (E2) 4165 (2000)

PACS numbers: 96.30.–t, 96.35.–j, 96.35.Hv

"Внезапная догадка"¹: первые результаты зондирования атмосферы Титана космическим аппаратом "Гюйгенс"

Т. Оуэн, С. Атрейя, Х. Ниман

1. Введение

14 января 2005 г. блестяще сбылась мечта, впервые захватившая наше воображение в 1982 г.: Европейский космический аппарат "Гюйгенс", запущенный американской ракетой-носителем, после семилетнего межпланетного странствия совершил мягкую посадку на гигантском спутнике Сатурна — Титане. Очевидно, сделаны еще далеко не все открытия, которые можно извлечь из анализа обширных данных, полученных этим аппаратом. В этом кратком предварительном отчете мы просуммируем причины, по которым Титан был выбран в качестве объекта такого интенсивного исследования, и приведем наиболее яркие экспериментальные результаты, которые были получены различными группами после первых недель анализа данных.

2. Почему Титан?

Титан стал объектом интенсивных исследований из-за наличия на нем плотной загадочной атмосферы. Намек на существование атмосферы у Титана был получен из оптических наблюдений уменьшения яркости к краю диска, которые проводил опытный каталонский наблюдатель Комас Сола (1908 г.) [1]. Существование атмосферы было окончательно подтверждено Дж. П. Койпером (1944 г.) [2] по наблюдениям полос поглощения метана в спектре Титана. Однако только в 1980 г. атмосфера Титана стала главным объектом исследований, так как при близком пролете космического

¹ "Wild surmise" — слова из сонета Джона Китса "Впечатление от первого прочтения Гомера в переводе Чэпмена". Дэвид Саутвуд, руководитель научных программ Европейского космического агентства, с волнением процитировал отрывок из этого сонета на пресс-конференции по случаю успешной посадки "Гюйгенса", подразумевая, что мы вдруг увидели новый мир, подобно тем европейцам, безмолвно застывшим перед впервые открывшейся перед ними картиной Тихого океана, о которых упоминается в сонете Китса.