

НОВОСТИ

Планетология

Как Марс теряет воду?

Марс, возможно, теряет воду быстрее, чем предполагалось. Наблюдения, проведенные с помощью российского спектрометра АЦС на борту марсианского аппарата ТГО проекта «ЭкзоМарс»¹, показали, что сезонное увеличение содержания водяного пара в верхней части атмосферы планеты может быть гораздо больше, чем предполагалось раньше, и пар, вероятно, находится в перенасыщенном состоянии даже в присутствии облаков.

Вода на современном Марсе сосредоточена в основном в его полярных шапках. Если распределить ее по всей поверхности планеты, то глубина водного слоя составит не более 30 м, а это менее 10% процентов того количества воды, которое, как считается, было раньше, во времена «теплого и влажного» раннего Марса.

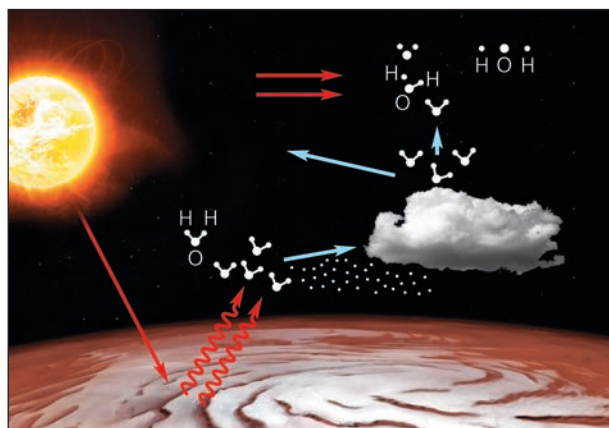
Воды в атмосфере планеты еще меньше: если осадить ее, то толщина слоя составит всего 10 мкм. Но именно через атмосферу Марс постоянно «теряет» воду: молекулы воды распадаются на атомарные кислород и водород, которые поднимаются до больших высот и уже оттуда улетают в межпланетное пространство.

¹ Проект «ЭкзоМарс» — совместный проект Роскосмоса и Европейского космического агентства (ЕКА). Проект реализуется в два этапа. Первый (запуск в 2016 г.) включает два космических аппарата: орбитальный ТГО (Trace Gas Orbiter) для наблюдений атмосферы и поверхности планеты и посадочный модуль «Скиапарелли» для отработки технологий посадки. Научные задачи ТГО — регистрация малых составляющих марсианской атмосферы, в том числе метана; картирование распространенности воды в верхнем слое грунта с высоким (порядка десятков километров) пространственным разрешением; стереосъемка поверхности. На аппарате установлены два прибора, созданные в России: спектрометрический комплекс АЦС (Atmospheric Chemistry Suit) и нейтронный телескоп высокого разрешения ФРЕНД (Fine-Resolution Epithermal Neutron Detector). Второй этап проекта (запуск в 2020 г.) предусматривает доставку на поверхность Марса российской посадочной платформы с европейским автоматическим марсоходом на борту. Для запуска всех аппаратов Россия предоставляет ракеты-носители «Протон» с разгонным блоком «Бриз-М». В рамках обоих этапов в России создается объединенный с ЕКА наземный научный комплекс проекта «ЭкзоМарс» для приема, архивирования и обработки научной информации.

Но такова лишь общая картина, которая до сих пор не была разработана в деталях. Один из нерешенных вопросов состоит в том, насколько быстро молекула воды может пройти весь путь от попадания в атмосферу до ее диссоциации и ухода водорода из атмосферы. Во многом это зависит от того, как высоко могут подниматься молекулы воды. Соответственно, исключительно важными становятся наблюдения за водяным паром, его концентрацией и распределением по высоте. Исследования этого вопроса с помощью данных спектрометрического комплекса АЦС было проведено А.А.Фёдоровой, заведующей лабораторией отдела физики планет Института космических исследований (ИКИ) РАН, и ее коллегами из ИКИ, а также из научных организаций Европы и Австралии².

Комплекс АЦС успешно работает на орбите Марса с весны 2018 г. В его состав входят три инфракрасных спектрометра, чувствительных к ма-

² Fedorova A.A., Montmessin F., Korabiev O. et al. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season. *Science*. 2020; 367(6475): 297–300. DOI:10.1126/science.aay9522.



Схематичное представление об «убегании» воды из атмосферы Марса. Солнечные лучи нагревают полярные шапки, молекулы воды испаряются в атмосферу. Ветер переносит их в более высокие и холодные слои атмосферы. Там они могут конденсироваться в облака («холодные ловушки») и остаться в атмосфере планеты. Но образование облаков на Марсе происходит не всегда, так что атмосфера перенасыщается водяным паром, который может подниматься еще выше и распадаться на атомы водорода и кислорода под действием солнечного ультрафиолета.

лым составляющим марсианской атмосферы. С апреля 2018 г. по март 2019-го (что соответствует примерно половине марсианского года) АЦС провел около 1.7 млн наблюдений в так называемом режиме солнечных затмений. В таком режиме спектрометры комплекса АЦС смотрят на Солнце через атмосферу Марса и регистрируют не просто наличие тех или иных химических соединений, но еще и их концентрацию в зависимости от высоты. Так были получены данные о концентрации молекул воды, а также о температуре и давлении атмосферы и количестве пыли в ней.

На Марсе, как и на Земле, один из важных механизмов, блокирующий воду в нижней атмосфере, — это облака. Они появляются, когда парциальное давление водяного пара превышает некоторое пороговое значение, которое зависит от температуры. Облака, по идее, играют роль «холодной ловушки» для молекул воды, так как не дают им подниматься

выше. Но если комбинация температуры и давления таковы, что порог насыщения повышается, то часть водяных молекул может избежать подобной ловушки. Очень важно, насколько много пыли в атмосфере, так как ее частицы служат ядрами конденсации при формировании облаков.

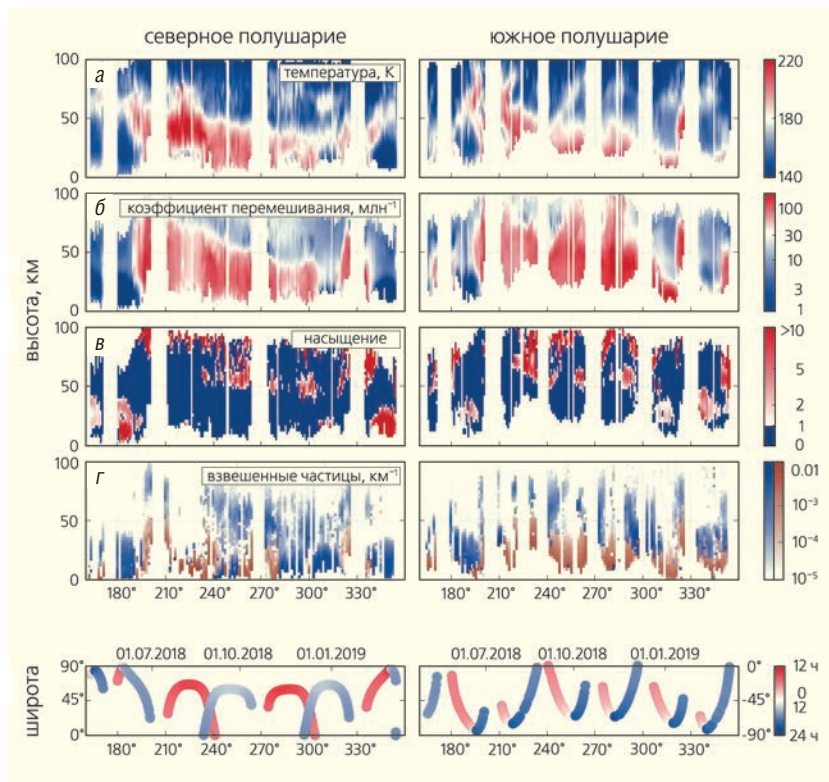
За время наблюдений Марс проходил перигелий орбиты, т.е. находился около ее ближайшей к Солнцу точки, когда в его южном полушарии лето сменило весну и произошли две пылевые бури (в том числе одна глобальная, накрывшая всю планету).

По данным АЦС, в это время в обоих полушариях коэффициент перемешивания водяного пара (он измеряется количеством частиц на миллион) оказался достаточно высоким. Но более влажным оказалось южное полушарие: коэффициент перемешивания водяного пара превысил 50 частиц на миллион на высотах от 50 до 100 км, тогда как в северном полушарии он, скорее, уменьшался со временем.

Кроме того, в южном полушарии наблюдались периодические повышения концентрации пара до высоты 100 км, а в северном полушарии это произошло только во время глобальной пылевой бури. Не обнаружилось и корреляции с локальным повышением температуры. Таким образом, транспорт водяного пара, вероятно, связан с крупномасштабным механизмом атмосферной циркуляции, который затрагивает сразу все южное полушарие.

Важнейшим результатом работы стали наблюдения за водяным паром в состоянии перенасыщения, когда количество пара, которое находится в определенном объеме атмосферных газов, больше значения, максимального для данной температуры. Ранее предполагалось, что в атмосфере Марса в случае перенасыщения «лишняя» вода мгновенно кристаллизуется. При этом выше некоторой высоты в марсианской атмосфере происходит резкое падение парциального давления водяного пара, а содержание водяного пара резко снижается.

В 2011 г. исследователи из лаборатории LATMOS (Франция) и ИКИ, в число которых входила Фёдорова и ее соавторы, исполь-



Результаты исследования содержания водяного пара в атмосфере Марса с помощью спектрометрического комплекса АЦС. Цветом показаны значения различных параметров в зависимости от высоты (по вертикали) и меридиана (по горизонтали): а — температура атмосферы; б — коэффициент перемешивания водяного пара; в — насыщение водяного пара (синий цвет соответствует областям, где водяной пар находится в ненасыщенном состоянии); г — водяной пар (показано синим) и пыль (коричневый цвет) в атмосфере Марса. Внизу — карта наблюдений в режиме солнечных затмений; красным показаны наблюдения во время восхода солнца (утро), синим — при заходе солнца (вечер). По: Science. 2020; 367(6475): Fig.2.

зую данные аппарата «Марс-Экспресс», показали, что водяной пар может существовать в состоянии перенасыщения на высотах около 30 км летом в северном полушарии (в период прохождения Марсом афелия) в узком диапазоне широт. Теперь АЦС обнаружил значительные области подобного перенасыщения и летом в южном полушарии. По новым данным, водяной пар в перенасыщенном состоянии существует в обоих полушариях на высотах от 5 до 30 км, при этом корреляции с наличием или отсутствием облаков не наблюдалось.

В южном полушарии, в частности, наблюдался некоторый «слой» на высотах от 15 до 40 км, содержащий водяной пар в перенасыщенном состоянии. Во время региональной пылевой бури эта особенность исчезла, после бури восстановилась, но потом снова постепенно стала пропадать и исчезла ко времени весеннего равноденствия.

Еще выше, от 70 до 80 км, перенасыщенный водяным паром слой атмосферы существовал, по-видимому, все время, в том числе при наличии облаков. Это можно рассматривать как косвенное подтверждение существования некоторого эффективного механизма, который переносит воду в верхние слои атмосферы. На высоте 50–60 км также время от времени наблюдались перенасыщенные водяным паром «участки» атмосферы, как и на более низких высотах, одновременно с облаками.

В публикации сделаны следующие выводы. На перенос водяного пара в атмосфере, по-видимому, кроме наличия или отсутствия пыли, которая способствует конденсации облаков, а также нагревает атмосферу, влияют и другие обстоятельства. Во время прохождения Марсом перигелия в южном полушарии планеты водяной пар постоянно наблюдался на весьма больших высотах.

Кроме этого, водяной пар находится в состоянии перенасыщения в довольно больших объемах марсианской атмосферы и достаточно спокойно «проходит» через облачный слой, а значит, достигает тех высот, откуда ему проще уйти из атмосферы в межпланетное пространство.

Пар наблюдался в состоянии перенасыщения вместе с частицами льда в атмосфере, следовательно, процесс конденсации не «собирает» весь лишний водяной пар в облака.

Еще один вывод заключается в том, что сезонные изменения во время прохождения перигелия могут иметь большее значение, чем предполагалось ранее. В это время именно в южном полушарии начинается более интенсивный подъем воздушных масс, а вместе с ними и водяного пара. Возможно, в геологических масштабах времени именно этот механизм определяет темпы потери Марсом воды.

Планетология

Загадка Южного полюса Марса разрешается

Диоксид углерода CO_2 составляет более 95% атмосферы Марса, но давление на его поверхности небольшое — всего 0.006 атмосферы. В 1966 г. Роберт Лейтон и Брюс Мюррей из Калифорнийского технологического института предположили, что Марс с тонкой атмосферой из углекислого газа может иметь стабильные полярные отложения льда CO_2 , которые, в свою очередь, могут контролировать его атмосферное давление¹.

Одно из предсказаний теории Лейтона и Мюррея заключалось в том, что атмосферное давление должно значительно колебаться во время эволюции марсианской орбиты вокруг Солнца. Наклон оси вращения Марса к плоскости его орбиты равен 25.2° — почти такой же, как у Земли, но эксцентриситет (0.0934) и наклон плоскости орбиты к эклиптике (1.85°) заметно больше, чем у нашей планеты. Поэтому инсоляция полюсов Марса варьируется сильнее, чем полюсов Земли. Прямой солнечный свет, попадая на лед CO_2 на полюсах, приводит к его сублимации (переходу материала из твердого в газообразное состояние). Лейтон и Мюррей показали, что по мере изменения инсоляции в течение циклов в десятки тысяч лет атмосферное давление может колебаться до одной четверти сегодняшней марсианской атмосферы, что в два раза больше сегодняшних колебаний.

Ныне модель Питера Бюлера и его коллег предоставляет новые доказательства в поддержку этой

¹ Leighton R.B., Murray B.C. Behavior of Carbon Dioxide and Other Volatiles on Mars. Science. 1966; 153: 136–144. DOI:10.1126/science.153.3732.136.



Южный полюс Марса.

Фото Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA)

гипотезы¹. Коллектив авторов (из Калифорнийского технологического института, Лаборатории реактивного движения НАСА и Университета Колорадо в Боулдере) исследовал загадочную особенность на южном полюсе Марса. Полярная шапка содержит огромное количество льда CO₂ и обычного водяного льда в чередующихся слоях, которые простираются до глубины около километра. Сверху находится тонкий слой льда CO₂. Сегодня этот слоеный пирог содержит столько же диоксида углерода, сколько вся марсианская атмосфера. Теоретически, такое наложение не должно существовать, поскольку водяной лед термически более стабилен и темнее, чем лед CO₂. Раньше считалось, что лед CO₂ быстро дестабилизируется, если он захоронен под водяным льдом. Однако новая модель, предложенная Бюлером и его коллегами, показывает, что месторождение могло долго эволюционировать в результате сочетания трех факторов: 1) изменения угла наклона вращения планеты, 2) различия в способе, которым водяной лед и лед CO₂ отражают солнечный свет, 3) увеличения атмосферного давления, которое происходит, когда лед CO₂ оказывается сверху. Как комментирует Бюлер, «обычно, когда вы запускаете модель, вы не ожидаете, что результаты будут так близко соответствовать тому, что вы наблюдаете. Но толщина слоев, определяемая моделью, прекрасно согласуется с радиолокационными измерениями ледяных шапок с орбитальных спутников».

Вот как образовалось это месторождение. Марс в течение последних сотен тысяч лет заметно изменял наклон своей оси вращения, при этом южный полюс накапливал лед CO₂, который образовывался в полярные ночи, когда полюса Марса получали меньше солнечного света, и испарялся в полярные дни. Когда откладывался лед CO₂, небольшое количество водяного льда захватывалось вместе с ним. Когда же CO₂ сублимировался, более стабильный и темный водяной лед оставался и предохранял предыдущие слои диоксида углерода. Но слои воды не полностью их герметизировали. Вместо этого сублимирующий CO₂ повышал атмосферное давление Марса, а слой осадка со льдом CO₂ эволюционировал в равновесии с атмосферой. Когда солнечное освещение полюса снова начинало уменьшаться, поверхность воды успевал образоваться новый слой льда CO₂, и цикл повторялся. Поскольку эпизоды сублимации, как правило, уменьшались по интенсивности, некоторое количество льда CO₂ оставалось между слоями воды — таким образом

и сформировалось чередование слоев. Самый глубокий и, следовательно, самый старый слой CO₂ образовался сотни тысяч лет назад после последнего периода экстремальной полярной инсоляции, когда весь CO₂ возвращался в атмосферу.

«Наше определение истории больших перепадов давления на Марсе имеет основополагающее значение для понимания эволюции Марса, включая историю стабильности и пригодности жидкой воды вблизи поверхности Марса», — говорит Бюлер. Добавим, что этот подход к эволюции климата Марса во многом аналогичен теории сербского ученого Милутина Миланковича, который в начале прошлого века объяснил сто-тысячелетние колебания климата Земли.

¹ Buhler P.B., Ingersoll A.P., Piqueux S. et al. Coevolution of Mars's atmosphere and massive south polar CO₂ ice deposit. *Nature Astronomy*. 2019. DOI:10.1038/s41550-019-0976-8.