

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Пыльное небо Марса

Два типа аэрозолей на Марсе, отличающихся размерами отдельных частиц, обнаружила международная группа исследователей во главе с Анной Фёдоровой, старшим научным сотрудником Института космических исследований РАН.

В ходе масштабного исследования были впервые одновременно проанализированы данные инфракрасного и ультрафиолетового спектрометров эксперимента SPICAM аппарата «Марс-Экспресс» при зондировании атмосферы на лимбе планеты. В итоге ученые восстановили радиусы и концентрацию частиц в атмосфере Марса на высотах от 10 до 50 км. Измерения проводились и в южном и северном полушариях в сезон северного лета.

Первый тип аэрозолей состоит из более крупных частицы водяного льда (средний радиус 1,2 микрона) и пыли (0,7 мкм). Их не очень много: от 0,01 до 10 частиц в кубическом сантиметре. Второй тип — частицы пыли радиусом несколько десятых и сотых долей микрометра, которых гораздо больше: от 1 до 1000 в кубическом сантиметре в зависимости от высоты.

Эти оценки исключительно важны для понимания «климатической машины» Марса и уже сейчас ставят перед исследователями новые вопросы. В частности, более мелкая фракция аэрозоля в присутствии крупных частиц не может стабильно существовать долгое время из-за коагуляции (слипания частиц). Чтобы объяснить, почему их так много, надо предположить, что откуда-то постоянно берутся новые частицы — например, источником может быть или поток микрометеоритов на орбите Марса или пыль с поверхности, поднимаемая пылевыми бурями и маленькими смерчами («пылевыми дьяволами»).

Результаты исследования опубликованы в журнале *Icarus* [1].

Аэрозоли — мелкие частицы в атмосфере — одни из главных «шестерёнок» климатического механизма Марса. Их размеры, количество, распределение и состав определяют, сколько солнечного тепла и как получают атмосфера и поверхность планеты. Благодаря им же вода и углекислый газ конденсируются в облака, которые, в свою очередь, отражают солнечный свет и регулируют тепловой баланс планеты. Изучение аэрозолей — одна из главных задач практически всех миссий на Марс, начиная с самых первых, но по мере совершенствования приборов перед исследователями открываются всё более тонкие детали.

Работа, которую провела международная группа ученых во главе с Анной Фёдоровой, старшим научным сотрудником Института космических исследований РАН, продолжает масштабное изучение атмосферы Красной планеты, где немалая роль принадлежит орбитальной станции «Марс-Экспресс» (*Mars Express*, Европейское космическое агентство). В частности, инфракрасный и ультрафиолетовый спектрометр SPICAM на её борту зондирует атмосферу в двух спектральных каналах, и это даёт возможность различать частицы аэрозолей по размерам. Чтобы понять, как частицы распределены по высоте, эффективны наблюдения методом солнечного просвечивания. Когда Солнце заходит за диск планеты, его лучи, прежде чем попасть на детектор, проходят сквозь слой атмосферы. Из-за этого солнечный спектр особым образом изменяется в зависимости от состава атмосферы, количества различных аэрозолей и размеров их частиц (см. Рис.1).

Из-за поглощения и рассеяния на аэрозолях свет (электромагнитное излучение) ослабляется, и степень этого ослабления называют «коэффициентом экстинкции». Если

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

измерить его, то можно строить предположения и о том, что происходит в атмосфере на разных высотах.

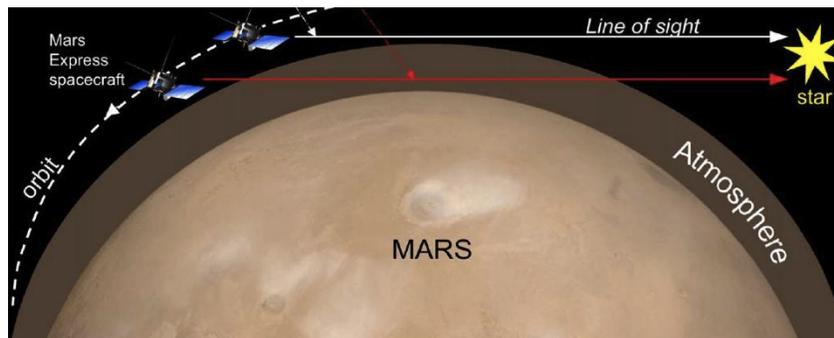


Рис. 1. Зондирование атмосферы Марса методом солнечного просвечивания (с) ESA

Наблюдения, которые стали основой работы, проводились в начале северного лета и захватили как северное (широты 40–50 градусов), так и южное полушария планеты (широты 30–62 градуса). В выборку вошли 20 профилей атмосферы (профиль — информация о её состоянии по высоте): 9 — для севера, 11 — для юга.

Далее началась самая сложная часть. Взяв уже существующие данные об атмосфере Марса, исследователи моделировали варианты ослабления солнечного излучения от взаимодействия с аэрозолями, «меняя» состав, размеры и концентрацию частиц. Некоторые предположения пришлось сделать, используя более ранние данные других марсианских аппаратов, — например, о том, где именно микронные аэрозоли состоят в основном из водяного льда, а где из пыли (данные SPICAM сами по себе не несут этой информации, то есть не могут сказать что-то определенное о природе частиц).

Идея, которую предполагалось проверить, заключалась в том, что аэрозоли в атмосфере Марса состоят из частиц, сильно отличающихся по размерам и присутствующих одновременно на одних и тех же высотах (это называется «бимодальное распределение» аэрозоля). При этом предполагалось, что более крупные частицы состоят из водяного льда и пыли, а мелкие — только из пыли.

Чтобы установить, так ли это, исследователи скрупулезно промоделировали возможные изменения, которые претерпевает солнечный свет после взаимодействия с частицами аэрозоля разных размеров, и «наложили» эти результаты на экспериментальные данные. Исходное предположение подтвердилось, но, что ещё важнее, стали известны более тонкие детали распределения аэрозоля в зависимости от широты и полушария. Последнее — важные подробности, поскольку сезоны в разных «половинках» Марса отличаются (например, северное лето холоднее) и это определяет весь климат на планете.

В северном полушарии в высоких широтах (от 60 градусов) уровень «крупной» фракции аэрозоля простирается до высот 30 км, в средних — поднимается до 40–50 км, причём выше 20 км это, в основном, водяной лёд, а ниже — пыль. Радиусы частиц составляет около 0,76 микрон (пыль) и 1,2 мкм (водяной лёд), а концентрация колеблется соответственно в пределах 0,4–2 и 0,01–0,3 частицы на кубический см.

«Мелкой» пыли гораздо больше: на высоте 10 км количество доходит до 10 тысяч частиц в кубическом см, а уже на 30–35 км — 100 частиц в том же объёме. Её средний размер укрупняется от полюса к экватору: 0,039 мкм на широтах выше 60 градусов и 0,048 — ниже (средняя величина 0,044 мкм).

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

В южном полушарии, как известно по другим наблюдениям, атмосфера в целом достаточно чистая. Средний размер крупных частиц пыли на широтах выше 50 градусов составил 0,75 мкм, а число в кубическом сантиметре меняется от 0,1 до 2. Частицы водяного льда более крупные — радиус приблизительно равен 0,86 мкм, концентрация же меняется от 0,005 до 0,05 в кубическом см. Средний радиус мелкой пыли больше, чем на севере: 0,07 мкм — а концентрация падает с высотой от 100 (на 35 км) до 0,6 частицы (на 70 км) в кубическом см. В низких широтах небо практически чистое, и концентрация аэрозоля мала.

Интересно, однако, что в этой области на высотах 40–50 км в ультрафиолетовом диапазоне обнаружился слой аэрозоля с пока не определенным составом. Если это пыль, то частицы оказывают очень мелкими (0,06 мкм), а их число в кубическом сантиметре очень большим — от 100 до 3000. В случае с частицами водяного льда их размер будет несколько крупнее, а концентрация, напротив, меньше. Своим существованием этот слой может быть обязан глобальному течению теплых воздушных масс из северного (летнего) полушария в южное, где они охлаждаются и опускаются (так называемая ячейка Хедли). Такая циркуляция характерна для сезона, близкого солнцестоянию в обоих полушариях.

Что означают полученные данные для понимания климата Марса? Частицы аэрозолей — центры конденсации водяного пара, источник облаков, которые, в свою очередь, определяют температурный режим на планете. Прежде всего, их интересно сравнить с недавним открытием — в атмосфере Марса обнаружен водяной пар в перенасыщенном состоянии [2, 3]. Последнее означает, если упрощать, что водяного пара в атмосфере больше, чем кажется нормальным при данной температуре. Роль аэрозолей здесь ключевая, поскольку именно вокруг них конденсируются пары воды и мелкие частицы аэрозоля (размерами порядка десятков микрометра и более) — хорошие ядра конденсации.

Мелкая «мода» аэрозолей наблюдалась на всех орбитах (хотя её распределение по высоте и концентрация в двух полушариях менялись), а её предположительные радиусы достаточно хорошо согласуются с тем, когда и при какой температуре наблюдали перенасыщенное состояние марсианской атмосферы в северных высоких широтах. Если спускаться ниже к экватору, то возникают некоторые сложности: хотя здесь достаточно много аэрозоля (больше одной частицы на см³), одновременно наблюдается и водяной пар в перенасыщенном состоянии. Вероятно, в данном случае дело в низкой температуре (около –130– –110 градусов Цельсия), которая затрудняет процесс зародышеобразование частиц новой фазы (нуклеацию) и конденсацию пара. Это же, вероятно, работает и в южном полушарии, где также наблюдалось перенасыщенное состояние пара, несмотря на одновременное присутствие мелкого аэрозоля.

Другой вопрос — почему мелкая мода стабильно наблюдалась на протяжении около 76 марсианских дней. Сами по себе малые частицы аэрозоля живут недолго, особенно в присутствии крупных частиц: они слипаются (коагулируют), опускаются на поверхность планеты либо «превращаются» в облака. Простые оценки, проведенные исследователями, показали, что наличие мелкой моды в северном полушарии требует, чтобы существовала некий постоянный источник «подпитки» мелких частиц — прежде всего, пыль, поднятая с поверхности ветром. При этом встает вопрос, насколько эффективно такая мелкая пыль по сравнению с микронной фракцией может быть поднята с поверхности. В южном полушарии, согласно таким же оценкам, мелкие аэрозоли могут «жить» дольше — порядка 50–100 дней.

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

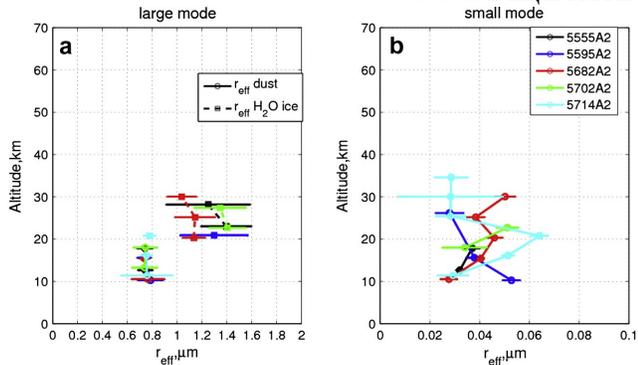


Рис. 2. На диаграммах отражены средние радиусы частиц аэрозолей (вверху слева — крупная мода, вверху справа — мелкая мода) и концентрация (внизу, тремя типами линий отражены три типа частиц — мелкие и крупные пылевые, водяной лед) в зависимости от высоты (по вертикали). Северное полушарие, широты >60 градусов (с) ИКИ РАН

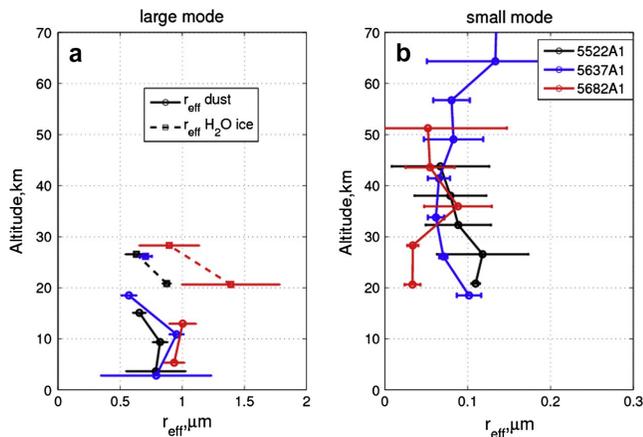
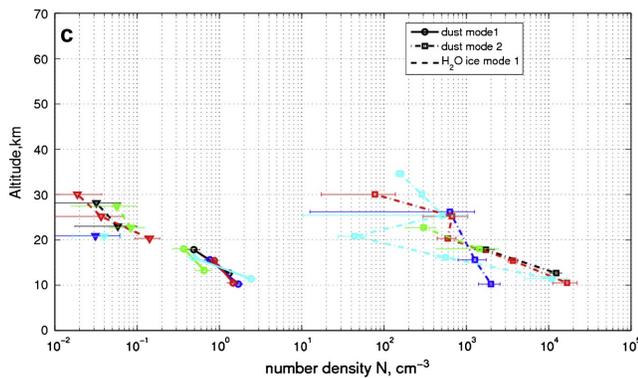
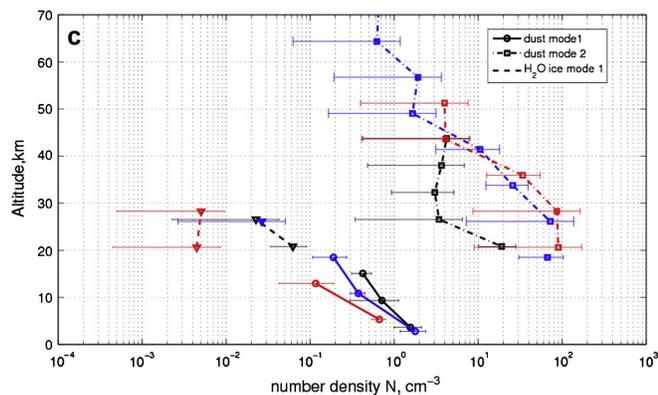


Рис. 3. На диаграммах отражены средние радиусы частиц аэрозолей (вверху слева — крупная мода, вверху справа — мелкая мода) и концентрация (внизу, тремя типами линий отражены три типа частиц — мелкие и крупные пылевые, водяной лед) в зависимости от высоты (по вертикали). Южное полушарие, широты >50 градусов (с) ИКИ РАН



ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Справка: «Марс-Экспресс»

«Марс-Экспресс» (*Mars Express*) — проект Европейского космического агентства [4]. Его задачи — изучение марсианской атмосферы и климата, минералогического состава и геологических структур поверхности, распространенности воды в разных формах на планете. Россия принимает участие в проекте с самого его начала [5]. Важная роль в нём принадлежала Василию Ивановичу Морозу (1931–2004 гг.), тогда руководителю отдела физики планет и малых тел Солнечной системы Института космических исследований (ИКИ) РАН и научному руководителю миссии «Марс-96».

Часть приборов на борту «Марс-Экспресс» были изготовлены с участием России:

- **видимый и инфракрасный картирующий спектрометр OMEGA** (Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activite) предназначен для изучения минерального состава поверхности планеты, а также поиска воды в различных состояниях.

- **планетный Фурье-спектрометр PFS** (Planetary Fourier Spectrometer). Цель эксперимента — изучение атмосферы Марса, в первую очередь, её температуры на разных высотах.

- **инфракрасный и ультрафиолетовый спектрометр SPICAM** (The Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars).

Кроме этого, в большинстве научных групп европейского проекта (по одному на эксперимент) российские ученые работают в качестве соисследователей (co-investigators).

Аппарат был выведен в космос и отправлен на траекторию перелёта к Марсу 2 июня 2003 г. с космодрома Байконур с помощью ракеты-носителя «Союз» с разгонным блоком «Фрегат» (запуск обеспечен европейско-российским предприятием Starsem).

Дополнительная информация:

1. A.A. Fedorova, F. Montmessin, A.V. Rodin, O.I. Korablev, A. Määttänen, L. Maltagliati, J.-L. Bertaux *Evidence for a bimodal size distribution for the suspended aerosol particles on Mars Icarus* Volume 231, 1 March 2014, Pages 239–260

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910351300533>

2. L. Maltagliati, F. Montmessin, A. Fedorova, O. Korablev, F. Forget, and J.-L. Bertaux, *Evidence of Water Vapour in Excess of Saturation in the Atmosphere of Mars* / **Science** 30 September 2011, Vol. 333, #6051.

<http://www.sciencemag.org/content/333/6051/1868.abstract>

3. Вода на Марсе: выше и больше. Сообщение пресс-службы ИКИ РАН

http://www.iki.rssi.ru/events/2011/mars_water.pdf

4. Страница миссии *Mars Express* на сайте Европейского космического агентства

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express

5. Страница миссии *Mars Express* на сайте Института космических исследований РАН

<http://www.planetary-department-iki.ru/projects/current/mars-express/mars-express.html>