

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ
Десятилетие «Марса-Экспресса»

2 июня 2013 года исполнилось десять лет с момента запуска межпланетного космического аппарата «Марс-Экспресс» (Mars Express, Европейское космическое агентство), предназначенного для изучения Марса с орбиты её искусственного спутника.

В проекте принимает участие и Россия; в частности, три из семи приборов, установленных на аппарате, изготовлены с участием российских специалистов. Важнейшие результаты, полученные с их помощью, касаются геохимии и атмосферной химии. По распределению гидратированных минералов на поверхности планеты можно судить о том, когда закончилась эпоха «теплого и влажного» Марса, наиболее благоприятная для возможного зарождения жизни. Данные о составе атмосферы, в частности, о распределении водяного пара и свечениях молекулярного кислорода важны для понимания сегодняшнего Марса и его климата. Интересным оказалось открытие «авроральных сияний» на планете, которые, в отличие от Земли, происходят не на полюсах.

Наконец, с помощью этих инструментов были получены убедительные данные о том, что в атмосфере планеты есть метан в следовых количествах. Этот парниковый газ интересен прежде всего потому, что пока неясен его источник на Марсе: свидетельствует ли он о продолжающейся геологической активности планеты или служит признаком жизни?

За время работы «Марса-Экспресса» российские ученые опубликовали порядка ста статей в российских и международных рецензируемых научных журналах. Работа аппарата, изначально рассчитанная на один марсианский год (687 земных дней) продолжается: в 2012 г. ЕКА одобрило продление миссии до 31 декабря 2014 г.

Самая изученная планета Солнечной системы кроме Земли, Марс по-прежнему остаётся во многом загадочным для специалистов-планетологов. Современные проекты по исследованию Марса, и в том числе «Марс-Экспресс», ставят целью дать ответ на следующие вопросы:

- как устроена планета внутри и как она эволюционировала во времени? Остается ли Марс геологически мёртвым или на нём продолжают идти внутренние процессы, в частности, активный вулканизм?

- что происходило с климатом Марса за время существования планеты (около 4,6–5 миллиардов лет) и как устроена «климатическая машина» сегодня?

- был ли Марс пригодным для возникновения жизни и, если да, смогла ли на нём развиться жизнь?

Три из семи инструментов проекта «Марс-Экспресс», в создании которых принимали участие российские ученые: спектрометры OMEGA, PFS и SPICAM (см. справку) — предназначены в первую очередь для исследования второй и, насколько это возможно, третьей проблем.

Задача картирующего спектрометра OMEGA — понять, как распределены на поверхности планеты различные минералы, в том числе гидратированные, то есть содержащие в связанном виде воду, которые могли образоваться во влажной среде. Кроме этого, OMEGA позволяет наблюдать воду в различных видах, и при этом различать химически связанную воду от свободной, например, в виде льда или вечной мерзлоты.

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Исходя из этого, можно делать выводы об условиях на поверхности Марса в разные периоды его истории. Благодаря более высокому (по сравнению с предшественниками) пространственному разрешению (1,5–5 км, а в некоторых случаях — менее 0,5 км) и специально подобранному спектральному диапазону удалось детально «рассмотреть» состав поверхности и уточнить хронологию событий в истории раннего Марса.

Для изучения «водной истории» Марса интерес представляют гидратированные минералы, а также вода в различных фазовых состояниях. К ним относятся, например, филлосиликаты — сорт глин, для формирования которых необходимо много воды. Их удалось найти только на ограниченных участках, которые совпадают с обнажениями древних кратеров. При этом OMEGA не наблюдала их в окрестностях кратеров, которые должны были, предположительно, вскрывать уровень вечной мерзлоты, а также нет в окрестностях древних русел. Нет их и на более молодых северных вулканических равнинах — это означает, что здесь вода уже не участвовала в процессах выветривания.

Также во многих местах, обычно совпадающих со светлыми и более молодыми отложениями, были обнаружены гидратированные сульфаты, которые образуются в кислой и, скорее всего, уже достаточно сухой среде — соответственно, позднее, чем филлосиликаты. Видимо, в это время в истории Марса произошло нечто, что резко изменило условия на планете: у неё исчезло внутреннее динамо, генерирующее магнитное поле, и прекратилась вулканическая активность. В результате этого Марс стал таким, каким мы его видим сейчас — сухим и холодным.

Благодаря результатам OMEGA в комбинации с другими экспериментами удалось уточнить датировку этих важнейших событий марсианской эволюции. «Классическая» хронология различает три эпохи Марса: ноахийскую (4,6–3,7 млрд лет назад), гесперийскую (3,7–3 млрд лет назад) и нынешнюю амазонийскую. Первые две характеризуют высокая вулканическая активность и следы действия воды на поверхности — в частности, катастрофические наводнения происходили в гесперийскую эпоху. Предполагалось, что катастрофическое событие, изменившее облик планеты, произошло в ходе гесперийской эпохи. Но новые данные по геохимии, полученные OMEGA, заставляют предположить, что период «раннего теплого» Марса, наиболее благоприятный для появления жизни, мог закончиться намного раньше — вместе с концом образования филлосиликатов, 4–3,5 миллиарда лет назад, в конце ноахийской эпохи. После этого Марс оставался сухим и активность воды на его поверхности была сильно ограничена. В дальнейшем облик планеты формировали относительно медленные процессы окисления и выветривания, но уже почти без участия воды.

Jean-Pierre Bibring, et al. Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data Science 312, 400 (2006)

<http://www.sciencemag.org/content/312/5772/400.short>

Открытие **ультрафиолетового и инфракрасного спектрометра SPICAM** касается, в первую очередь, атмосферы Марса. Ему удалось обнаружить довольно необычное явление — авроральные свечения на Марсе. По своей природе они аналогичны полярным сияниям на Земле, но наблюдаются в умеренных широтах; так как у Марса нет собственного магнитного поля, то заряженные частицы «выпадают» в атмосферу и производят свечения в районах магнитных аномалий, где участки коры хранят остаточную намагниченность и сгущаются линии остаточного магнитного поля. Во время аврорального сияния меняется ультрафиолетовый

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

спектр ночной атмосферы Марса: обычно в нём доминируют полосы оксида азота NO, но в этот момент наблюдаются полосы угарного газа CO в возбуждённом состоянии.

Другой вид свечения того же оксида азота NO на ночной стороне планеты также было открыто с помощью SPICAM. Оно помогло прояснить некоторые особенности циркуляции атмосферы Марса. Это свечение появляется в результате соединения ионов кислорода и азота, рождённых на дневной стороне из молекул кислорода, углекислого газа и азота под действием солнечных лучей (процесс фотодиссоциации). Затем, под действием глобальных движений атмосферы, эти ионы переносятся на ночную сторону, где соединяются и порождают специфическое ультрафиолетовое излучение. Это свечение особенно ярко в области полярной ночи южного полушария из-за особенностей циркуляции атмосферы — воздушные массы в этой области опускаются вниз, где, у поверхности, охлаждаются.

Jean-Loup Bertaux, et al. Nightglow in the Upper Atmosphere of Mars and Implications for Atmospheric Transport, Science 28 January 2005: Vol. 307 no. 5709 pp. 566-569

<https://www.sciencemag.org/content/307/5709/566.short?related-urls=yes&legid=sci:307/5709/566>

Jean-Loup Bertaux, et al. Discovery of an aurora on Mars Nature 435, 790-794 (9 June 2005)

<http://www.nature.com/nature/journal/v435/n7043/full/nature03603.html>

Ещё одно ранее не наблюдавшееся явление, уже в инфракрасном диапазоне, было открыто на ночной стороне Марса спектрометром OMEGA и исследовано SPICAM. Это свечение молекулярного кислорода. Оно образуется во многом подобно тому, как образуется оксид азота, о котором говорилось выше. Под действием солнечных лучей на дневной стороне молекулы углекислого газа CO₂ распадаются на угарный газ и атомы кислорода. Это происходит на высоте примерно 80 км, после чего полученные атомы переносятся на ночную сторону, где рекомбинируют — атомарный кислород превращается в молекулярный O₂. Это происходит в полярных областях и на более низких высотах: наиболее интенсивное излучение наблюдалось на высотах 38–49 км.

A.A. Fedorova, et al. The O₂ nightglow in the martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express, Icarus, Volume 219, Issue 2, June 2012, Pages 596–608

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103512001248>

По наблюдениям свечений молекулярного кислорода на дневной стороне планеты (их проводил SPICAM в ИК- и УФ-диапазонах) появилась возможность оценить, сколько озона содержится в марсианской атмосфере. Озон — важнейший компонент атмосферы, поскольку он активно поглощает ультрафиолетовое излучение Солнца.

В ходе этих измерений, в частности, было установлено, что максимум интенсивности излучения молекулярного кислорода на дневной стороне (и, как следствие, максимальное содержание озона) приходится на зиму — раннюю весну в полярных широтах в обоих полушариях. Летом озон почти исчезает, а в экваториальных областях его стабильно мало. Кроме этого, весной в северном полушарии содержание озона сильно меняется, что связано с особенностями циркуляции атмосферы. Кроме этого, на содержание озона также влияет рельеф.

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Наблюдения также проводились и на ночной стороне, где удалось обнаружить два озоновых слоя: ближний к поверхности (его верхняя граница находится примерно на 30 км) и более высокий (от 30 до 60 км). Особенности последнего довольно сильно меняются в зависимости от широты и времени года.

Fedorova, A. et al. (2006), Observation of O₂ 1.27 μm dayglow by SPICAM IR: Seasonal distribution for the first Martian year of Mars Express, J. Geophys. Res., 111, E09S07

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JE002694/abstract>

Perrier, S. et al. (2006), Global distribution of total ozone on Mars from SPICAM/MEX UV measurements, J. Geophys. Res., 111, E09S06

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JE002681/abstract>

Важнейшая задача спектрометра SPICAM — исследование процессов переноса воды в атмосфере. Хотя её очень мало: если осадить всю атмосферную воду, то полученный слой не превысит 50 мкм, — она очень важна в общем круговороте воды на Марсе. Основные резервуары воды на планете — вечная мерзлота, реголит (гидратированные минералы), полярные шапки и, конечно, атмосфера. Изучая, как распределен водяной пар в атмосфере, можно понять, как устроена «климатическая машина» Марса, что определяет перенос воды между различными областями планеты и как он связан с наклоном марсианской оси.

Именно «Марс-Экспресс» впервые после кратких измерений на советском аппарате «Фобос-2» (1988 г.) детально изучил вертикальное распределение атмосферной воды. Кроме SPICAM, эти измерения проводят приборы OMEGA и PFS. В 2004 г. европейский аппарат несколько месяцев работал одновременно с похожим экспериментом на американском аппарате *Mars Global Surveyor*, а также с соответствующими экспериментами американских аппаратов «Викинг», которые наблюдали климат Марса более 40 лет назад, в 1972 г. Сравнение данных и методов изучения этих трех экспериментов заставило исследователей пересмотреть результаты «Викингов» — скорее всего, из-за неточностей методики количество воды, которые они зарегистрировали, следует уменьшить в два раза. Это также согласуется с данными, полученными «Марсом-Экспресс», но значительно ниже того, что наблюдал аппарат MGS, что может быть связано с особенностями измерений.

A.A. Fedorova, et al. Viking observation of water vapor on Mars: Revision from up-to-date spectroscopy and atmospheric models, Icarus, Volume 208, Issue 1, July 2010, Pages 156–164

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910351000028X>

Вероятно, самой громкой новостью SPICAM в изучении марсианской атмосферы стало открытие водяного пара в перенасыщенном состоянии. Этот термин означает, что количество водяного пара, которое находится в определенном объеме атмосферных газов, превышает нормальное для данной температуры. Предполагалось, что в атмосфере Марса в случае перенасыщения «лишняя» вода мгновенно кристаллизуется. Как следствие, на высоте около 25 километров образуется так называемая «гигропауза» (в зависимости от времени года и температуры, она может находиться и ниже). Ниже водяной пар присутствует в атмосфере в «нормальных» концентрациях, выше — его содержание резко падает.

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Однако по данным прибора SPICAM, на высоте от 20 до 50 км объёмная пропорция водяного пара в атмосфере может превышать величину в 20 частиц на миллион, что значительно выше, чем предполагали существующие модели (около 1 частицы на миллион). Прибор также зарегистрировал большое количество воды выше гигропаузы. Более того, оказалось, что водяной пар в состоянии перенасыщения есть практически во всём северном полушарии — по крайней мере, во время наблюдений. В южном полушарии такое состояние обнаружилось только у самого полюса. Состояние перенасыщения можно объяснить малым давлением марсианской атмосферы, которое препятствует конденсации воды, или отсутствием пылевых частиц, которые могли бы стать центрами конденсации.

Это открытие важно для понимания сегодняшнего круговорота воды на Марсе в последний миллиард лет, поскольку прямо связано с процессами формирования облаков (конденсацией воды на аэрозолях). Кроме этого, если водяной пар находится достаточно высоко, то он хорошо распадается под действием солнечного света на ионы водорода и кислорода, которые потом «убегают» в космос. Это, в свою очередь, позволяет понять, как Марс терял воду в ходе своей истории.

В целом, наблюдения SPICAM свидетельствуют о том, что в существующих моделях глобальной циркуляции марсианской атмосферы недооценивается роль взаимодействия водяного пара с аэрозолями, а также плохо учитывается взаимодействие нижней атмосферы с поверхностью планеты.

Fedorova, A. et al. (2006), Mars water vapor abundance from SPICAM IR spectrometer: Seasonal and geographic distributions, J. Geophys. Res., 111, E09S08
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JE002695/abstract>

A.A. Fedorova et al. Mars-Express: Simultaneous measurements of the vertical distributions of H₂O, CO₂ and aerosol, Icarus, Volume 200, Issue 1, March 2009, Pages 96–117
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910350800393X>

L. Maltagliati et al. Evidence of Water Vapour in Excess of Saturation in the Atmosphere of Mars / Science 30 September 2011: Vol. 333 no. 6051 pp. 1868–1871
<http://www.sciencemag.org/content/333/6051/1868.abstract>

L. Maltagliati et al. Annual survey of water vapor vertical distribution and water–aerosol coupling in the martian atmosphere observed by SPICAM/MEx solar occultations, Icarus, Volume 223, Issue 2, April 2013, Pages 942–962
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103512005064>

Планетный Фурье-спектрометр PFS предназначен, в первую очередь, для определения температуры марсианской атмосферы на разных высотах, что важно для понимания современного климата планеты. В комбинации с данными других космических аппаратов получается, что непрерывный мониторинг марсианской погоды и её вариаций ведется уже с 1998 г. — более семи марсианских лет. Однако самым главным — и самым спорным — на сегодня открытием PFS считается обнаружение метана в атмосфере Марса.

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Метан — один из основных парниковых газов, который, однако, на Марсе не может жить долго: он распадется под действием солнечного УФ-излучения примерно за 300 лет. Таким образом, если в марсианской атмосфере найдется хотя бы малое его количество, это будет означать, что где-то на планете находится его постоянный источник.

Метан на Земле генерируют живые организмы, а также вулканы. Другие возможные источники этого газа — метеориты и кометы. Наконец, не исключено, что в атмосферу выходит ископаемый метан, образовавшийся в результате магматических процессов. В любом случае, этот газ свидетельствует об исключительно интересных процессах, которые происходили на планете — а может быть, и происходят сегодня.

Свидетельства наличия метана на Марсе впервые были получены с помощью наземных телескопов в начале 2000-х гг., но инструментам на Земле очень мешает собственный земной метан. В 2004 г. появились статьи, в которых метан был обнаружен с помощью космических инструментов и, в частности, PFS. Количество газа в атмосфере составило около 10 частиц на миллиард. Это очень мало, но это достаточно для того, чтобы задаться вопросом, почему он сохраняется.

Проблема, однако, состоит в том, что все наблюдения метана, из-за его малого количества, находятся на пределе детектирования. Кроме того, существенно влияет его высокая переменность: по данным PFS, его содержание колеблется от 10 до 30 частиц на миллиард, в зависимости от района. Но по существующим представлениям, из-за перемешивания метан должен быть распределен в атмосфере планеты более или менее равномерно. Из-за этого даже возникли сомнения в наличии метана на Красной планете, которые подкрепляются и тем фактом, что этот газ пока не удалось обнаружить и приборам на американском марсоходе *Curiosity*.

Тем не менее, интерес к метану на Марсе столь велик, что его поиски стали одной из целей будущих марсианских миссий: американской MAVEN (запуск должен состояться в конце 2013 г.) и европейского орбитального аппарата TGO (сокращение от *Trace Gas Orbiter*), первого этапа проекта «ЭкзоМарс» (запуск в 2016 г.), в котором принимает участие и Россия. В частности, на борту орбитального аппарата TGO будет установлен российский спектрометрический комплекс ACS, предназначенный для изучения химии атмосферы, в том числе — её малых составляющих, к которым относится и метан.

Vittorio Formisano et al. Detection of Methane in the Atmosphere of Mars, Science 3 December 2004: Vol. 306 no. 5702 pp. 1758-1761

<http://www.sciencemag.org/content/306/5702/1758.abstract>

Справка: «Марс-Экспресс» — российский вклад

Европейская миссия «Марс-Экспресс» (Mars Express) была задумана после неудачи российского проекта «Марс-96» как его прямой наследник. В «Марсе-96» участвовали многие европейские организации, и новая миссия задумывалась для повторения экспериментов, которые планировалось провести на российском орбитальном аппарате.

В итоге задачи «Марса-Экспресс» включили изучение марсианской атмосферы и климата, минералогического состава и геологических структур поверхности, распространенности воды в разных формах на планете. Кроме этого, в рамках миссии на Марс планировалось доставить

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

посадочный аппарат «Бигль-2» (Beagle 2, в память о корабле, на котором совершил путешествие Чарльз Дарвин), но при посадке на планету он был потерян.

Россия принимает участие в проекте с самого его начала. 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».

В.И. Мороз был участником спектроскопических экспериментов PFS, OMEGA и SPICAM на борту «Марса-Экспресса», инструмент для которых 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. Прибор был разработан и создан для проекта «Марс-96» во Франции под руководством Ж.-П. Бибринга (J.-P. Bibring, Институт космической астрофизики, Франция); сканер и прибора и входная оптика изготовлены и поставлены ИКИ. Научные руководители с российской стороны — д.ф.-м.н. Л.В. Засова (ИКИ РАН) и к.ф.-м.н. Р.О. Кузьмин (ИКИ РАН, ГЕОХИ).

- планетный Фурье-спектрометр PFS (Planetary Fourier Spectrometer), также первоначально разработанный для миссии «Марс-96». Цель эксперимента — изучение атмосферы Марса, в первую очередь, её температуры на разных высотах. Прибор был изготовлен в Италии под руководством В. Формизано (V. Formisano). Научный руководитель эксперимента — М. Джуранна (M. Giuranna, Национальный институт астрофизики, Италия). Российские ученые и специалисты принимали участие в разработке прибора ПФС, в наземной калибровке, обработке и интерпретации данных, полученных на орбите. Детектирующие модули, включая чувствительные элементы обоих каналов прибора, изготовлены в России. Руководитель российской группы участников до 2004 г. — проф. В.И. Мороз, с 2004 г. — д.ф.-м.н. Л.В. Засова (ИКИ РАН).

- инфракрасный и ультрафиолетовый спектромер SPICAM (The Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars). Прибор был задуман для «Марса-96», но для европейской миссии пришлось почти на порядок уменьшить его массу, поэтому для нового SPICAM использовались совершенно новые технические подходы. Он был изготовлен во Франции с участием Бельгии, ИКИ РАН поставил ИК-спектрометр, полностью изготовленный в России. Нынешний научный руководитель эксперимента — Ф. Монмессан (F. Montmessin, лаборатория LATMOS, Франция). Соруководитель проекта с российской стороны — д.ф.-м.н. О.И. Кораблёв (ИКИ РАН).

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

Наконец, сам 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:

Проект «Марс-Экспресс» на сайте ИКИ РАН

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

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СООБЩЕНИЕ ПРЕСС-СЛУЖБЫ

Сайт миссии «Марс-Экспресс» (ЕКА)

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

Новость о десятилетии «Марса-Экспресс» (ЕКА)

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

Буклет ЕКА *Mars-Express. A Decade of Observing the Red Planet*

<http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/BR-312/>