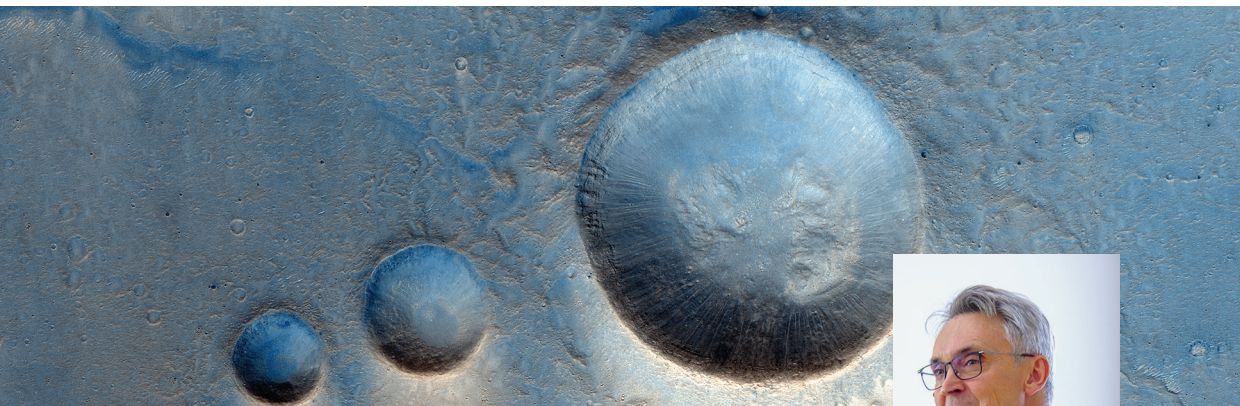


ТАИНСТВЕННЫЙ МАРС: АТМОСФЕРА КАК ЗЕРКАЛО ВОЗМОЖНОЙ ЖИЗНИ



КОРАБЛЁВ Олег Игоревич,

член-корреспондент РАН

Институт космических исследований РАН



DOI: 10.7868/S00044394825010025

Поступила в редакцию: 18.04.2025

Принята к публикации: 18.04.2025

Если на планете есть жизнь, она обязательно оставит след. Причем этот след не обязательно искать на поверхности или в древних породах – достаточно заглянуть в атмосферу. Этот подход впервые был четко сформулирован в 1960-х гг. известными учеными Д. Хичкоком и Дж. Лавлоком, предложившими анализировать состав атмосферы в поисках жизни: “Knowledge of the composition of the Martian atmosphere may similarly reveal the presence of life there” («Знание состава марсианской атмосферы может в то же время открыть присутствие там жизни») [1]. Идея оказалась удивительно плодотворной. На Земле биологические процессы радикально изменили атмосферу: в атмосфере около 3.5 млрд лет назад появился кислород (O_2), получающийся из углекислого газа (CO_2) и воды в процессе фотосинтеза. Содержание кислорода достигло примерно 21% около 200 млн лет назад и с тех пор почти не меняется. Кроме того, в атмосфере Земли присутствует еще и метан (CH_4) – неравновесная окислительно-восстановительная пара O_2 – CH_4 считается образцовым биомаркером. Время жизни метана в атмосфере Земли около 10 лет, и его содержание поддерживается в основном процессами анаэробного сбраживания. Энергию, необходимую для поддержания дисбаланса O_2 – CH_4 , в конечном итоге извлекают из солнечного света морские микроорганизмы.

Замечательно, что тот же принцип можно применять не только для исследований планет Солнечной системы, но и экзопланет. Крайне слабые спектральные особенности атмосферы планеты можно заметить в спектре ее звезды во время транзита, т. е. прохождения планеты между звездой и наблюдателем на Земле. И если «подозрительного», т. е. неравновесного, несвойственного основному составу атмосферы газа достаточно, лучшие телескопы могут его засечь [2].

На заставке изображение: ESA/Roscosmos/CaSSIS

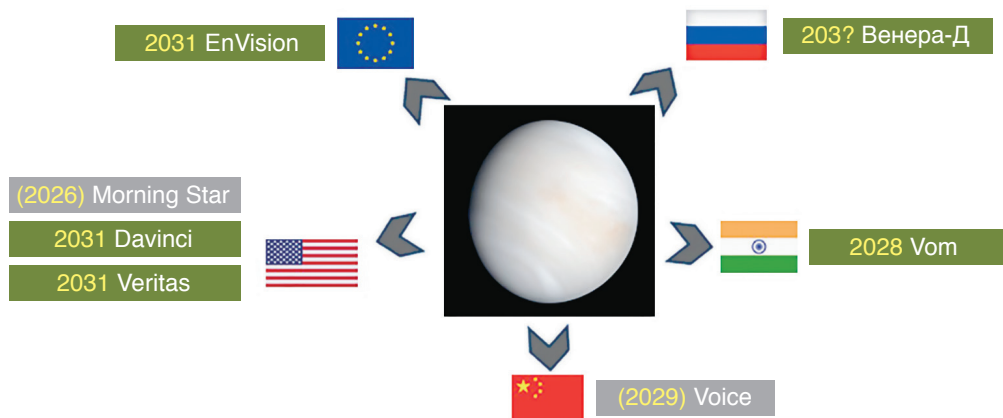


Рис. 1. В начале 2030-х гг. к отправке на Венеру планируется «флотилия» космических аппаратов различных космических агентств

Но особенно интересно искать следы активности в атмосфере Марса – первого кандидата на наличие жизни, как прошлой, так и, возможно, современной. В центре внимания находится метан, так как на Земле он является преимущественно продуктом деятельности микроорганизмов.

ФОСФИН НА ВЕНЕРЕ: ХИМИЧЕСКИЙ СЛЕД ВОЗМОЖНОЙ ЖИЗНИ

Не только Марс вызывает интерес у астробиологов. В сентябре 2020 г. в атмосфере Венеры, по данным наземного телескопа ALMA, был обнаружен фосфин (PH_3) – газ, который на Земле связан с анаэробной биологической активностью [3]. В атмосфере Венеры, состоящей преимущественно из углекислого газа, существование фосфина невозможно объяснить простыми химическими процессами. Это открытие вызвало масштабную дискуссию: часть ученых усомнилась в корректности интерпретации, ссылаясь на возможное смешение сигнала с диоксидом серы SO_2 , другие же настаивали на необходимости пересмотра моделей. Данные вызывают сомнения, а независимых подтверждений пока не последовало [4].

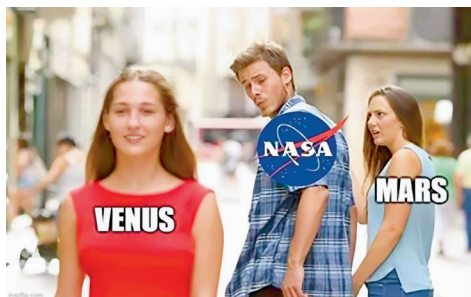


Рис. 2. «Космический вариант» популярной мем-картинки появился после «открытия» фосфина в атмосфере Венеры: NASA резко теряет интерес к Марсу и говорит о необходимости экспедиции к Венере

Тем не менее реакция научного сообщества и космических агентств была мгновенной. NASA обозначило Венеру как приоритетное направление, и в 2021 г. два проекта для исследования Венеры, спутник VERITAS

и спускаемый зонд DAVINCI+, были выбраны в рамках программы *Discovery*. Европейское и Индийское космические агентства также запланировали запуск научных спутников. «Окно» для запуска – конец 2020-х – начало 2030-х гг.

ПРОГРАММА EXOMARS И TRACE GAS ORBITER: ПРИЦЕЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД НА АТМОСФЕРУ МАРСА

Но вернемся к Марсу. Совместная программа Европейского космического агентства (ESA) и ГК «Роскосмос» – *ExoMars* («ЭкзоМарс») – стала одной из наиболее амбициозных и долгосрочных в истории исследования Марса. Она состоит из двух этапов: первый – орбитальный аппарат TGO (*Trace Gas Orbiter*) и спускаемый модуль «Скиапарелли», запущенные в 2016 г.; второй этап – марсоход, запуск которого неоднократно переносился и был, к сожалению, прекращен весной 2022 г. Сейчас, уже без участия России, проект планируется к запуску в 2028 г.

Цель миссии TGO – изучение атмосферы Марса с целью поиска малых газов, которые могут быть маркерами геологической или биологической активности. В первую очередь это метан, но также и другие соединения – фосфин, хлороводород, озон и даже редкие изотопы водорода и кислорода.

TGO оснащен четырьмя научными приборами, два из которых – российские. Исследованиям малых атмосферных составляющих посвящен эксперимент *Atmospheric Chemistry Suite* (ACS), разработанный в ИКИ РАН [5]. Он включает три спектрометра: эшелле-спектрометры ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазона и Фурье-спектрометр, работающий вплоть до теплового ИК. Используется метод солнечного просвечивания: наблю-

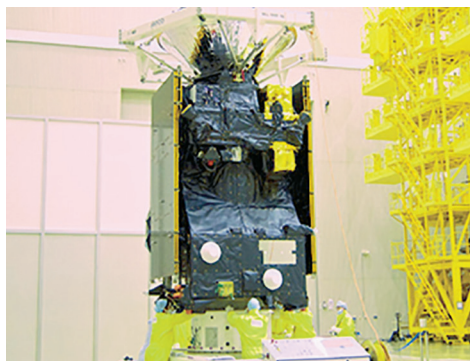


Рис. 3. TGO и российские приборы в золотой экранно-вакуумной теплоизоляции на заводе в Каннах, Франция. Фотография: Роскосмос/ЕКА/ЭкзоМарс/

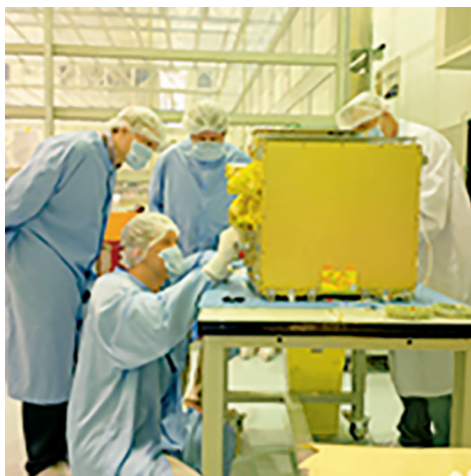


Рис. 4. Сотрудники отдела физики планет ИКИ РАН в цехе Thales Alenia Space перед установкой комплекса АЦС/ACS («Комплекс для изучения химии атмосферы»/Atmospheric Chemistry Suite) на борт. Фотография: Роскосмос/ЕКА/ЭкзоМарс/АЦС/ИКИ РАН

дение за атмосферой во время затмения Солнца Марсом. Исключительная яркость источника и большой оптический путь в атмосфере при затмениях позволяют обнаруживать или измерять атмосферные газы с беспрецедентной точностью и чувствительностью.

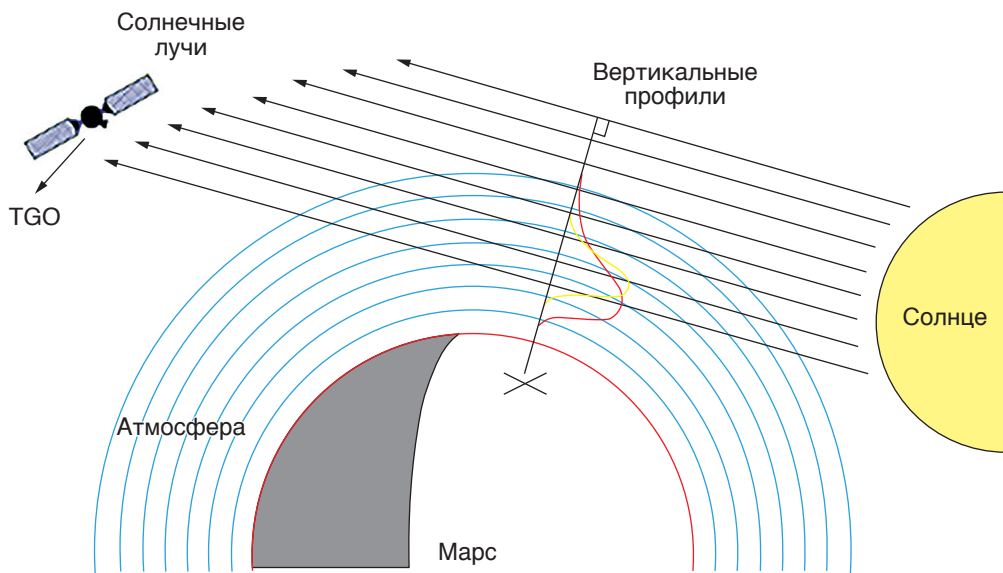


Рис. 5. Схема наблюдений аппаратом TGO миссии «ЭкзоМарс-2016» в режиме солнечных просвечиваний. Рисунок: K. Olsen

С марта 2018 г., когда была окончательно сформирована круговая околополярная орбита спутника, ACS успешно работает на орбите. За это время было проведено множество наблюдений и получены уникальные данные, опубликованные в ведущих научных журналах. В центре внимания – метан.

ЗАГАДКА МАРСИАНСКОГО МЕТАНА: ОН ЕСТЬ, НО ЕГО НЕТ

Метан – это молекула, которая сразу привлекает внимание астробиологов. На Земле его основным источником являются анаэробные микроорганизмы. Логично предположить, что так происходит и на Марсе, где на глубине более 1–2 м вполне вероятно существование микроорганизмов. Но не исключены и другие возможности – например, вулканизм, гидротермальные процессы или просачивание из гипотетических ископаемых залежей

метаногидратов. В атмосфере Марса метан нестабилен: под действием солнечного ультрафиолета он разрушается за 100–300 лет. Поэтому если на Марсе есть метан, значит, есть и его современный источник.

Дистанционно обнаружить метан можно по его специфическому поглощению в ИК-диапазоне – характерному спектру. Как и большинство других газов, метан не поглощает в видимом диапазоне спектра (воздух прозрачен) и лучше всего его «видно» в так называемой фундаментальной полосе среднего ИК-диапазона, на 3.3 мкм.

История поиска метана на Марсе восходит к пионерским астрономическим наблюдениям в инфракрасном диапазоне в середине XX в. и ранним космическим экспедициям 1960–70-х гг., но убедительные сигналы появились лишь к 2003–2004 гг. Три независимые группы объявили о его обнаружении – по данным прибора PFS на борту марсианской станции *Mars Express* (ЕКА)

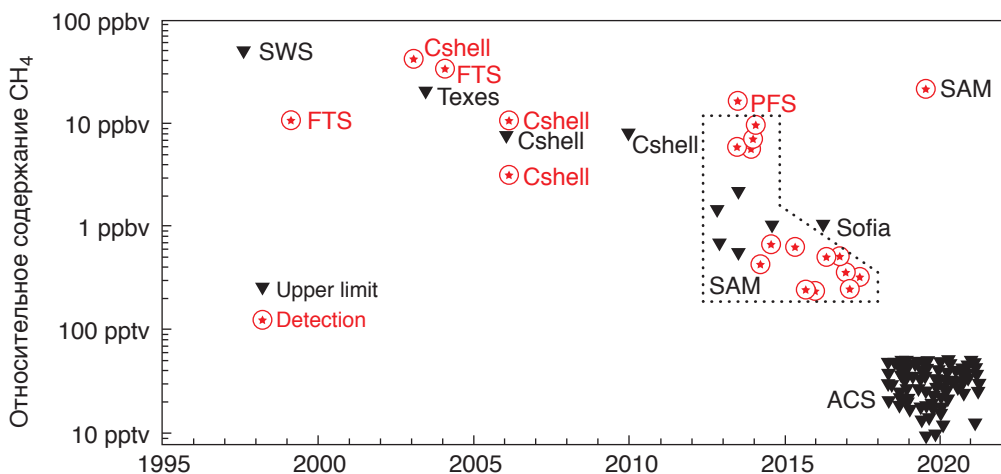


Рис. 6. Верхний предел на содержание метана в атмосфере Марса по данным ACS на 2–3 порядка меньше, чем заявленные детектирования по данным других экспериментов. Рисунок по данным: Lellouch et al. 2000; Krasnopolsky et al. 2004, 2012; Formisano et al. 2004; Encenraz et al. 2005; Mumma et al. 2009; Villanueva et al., 2013; Webster et al. 2015; 2018; Giuranna et al. 2019; Korablev et al., 2019; Moores et al., 2019; Montmessin et al., 2021

и по наземным ИК-наблюдениям [6]. Эти результаты вызвали сенсацию, и именно тогда появился первый проект специализированного спутника для поиска малых составляющих при наблюдениях солнечных затмений – претеча TGO.

В 2011 г. на Марс высадился марсоход *Curiosity* (НАСА) с мощным аналитическим комплексом SAM, в составе которого – специализированный прибор для измерения метана в атмосферной пробе – TLS. Первые включения TLS показали отрицательные результаты, но затем были зафиксированы всплески до 20 ppbv (объемных частей на миллиард). Измерения с обогащением, когда из пробы удаляется почти весь углекислый газ (95% атмосферы), показали меньшие, так называемые фоновые значения (0.2–0.6 ppbv) [7].

Однако данные TGO поставили под сомнение существование метана. Уже первые наблюдения с помощью ACS

MIR дали верхний предел ≤ 0.05 ppbv [8]. NOMAD, другой спектрометр TGO, подтвердил результат – ≤ 0.06 ppbv [9]. Последующие измерения ACS за два марсианских года снизили предел до ≤ 0.02 ppbv (20 pptv, т. е. частей на триллион) [10]. Это на порядок ниже минимальных фоновых значений, регистрируемых *Curiosity*. Может ли быть, что ACS просто не в состоянии увидеть метан в таких низких концентрациях? Такое полностью исключено. Прибор универсален, и качество получаемых спектров говорит само за себя: в том же спектральном диапазоне вместо метана и рядом с ним ACS видит очень слабые линии других газов, водяного пара, CO_2 , озона (см. ниже).

Такое расхождение пока не находит удовлетворительного объяснения. Одно из предположений – локальное накопление метана в ночное время, когда приземный слой атмосферы в кратере Гейла слабо перемешивается с остальной атмосферой. Дневные измерения

SAM-TLS действительно показывают только верхние пределы (≤ 0.2 ppbv) [11]. Однако атмосфера Марса перемешивается за 1–3 месяца, а фотохимическое время жизни метана – около 300 лет. Даже если единственный источник метана на Марсе расположен где-то в кратере Гейла – трудно себе представить, что *Curiosity* так удачлив, – за несколько десятков лет в атмосфере должно накопиться достаточно метана, чтобы его «увидел» TGO. Для того чтобы объяснить несоответствие между *Curiosity* и TGO, необходим неизвестный пока механизм быстрого разрушения метана.

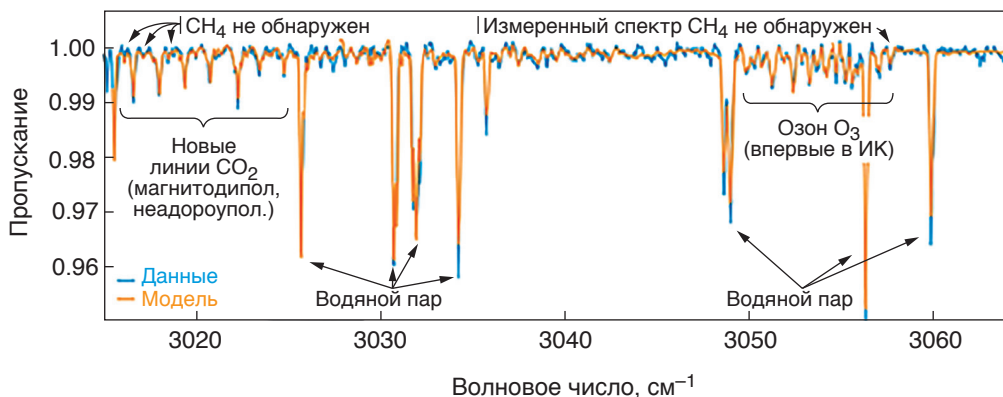
Это фундаментальное противоречие разделило научное сообщество: одни ученые считают, что метан есть, другие – что его нет. На фоне десятков исследований, пытающихся объяснить противоречие, рассматривая, например, очень слабый источник рядом с марсоходом и ветра в его окрестности, только что вышла статья, впервые прямо поднимающая вопрос о недостоверности измерений SAM TLS [12].

В ПОИСКАХ ДРУГИХ ГАЗОВ

Хотя метан в атмосфере найти не удалось, в том же спектральном диапазоне прибор ACS неожиданно открыл новые атмосферные компоненты. Среди них – ранее не наблюдавшаяся магнитодипольная полоса CO_2 и инфракрасная полоса озона [13]. Их регистрация стала возможной благодаря высокой чувствительности ACS и особенностям метода солнечного просвечивания. Эти открытия не только расширяют наше понимание состава атмосферы Марса, но и помогают уточнить спектры, в которых может скрываться метан. Были установлены ряд строгих верхних пределов на другие возможные атмосферные газы, в том числе на фосфин (PH_3) – еще один потенциальный биомаркер.

Но главное, в спектрах ACS была обнаружена новая молекула хлороводорода (HCl) – впервые за 20 лет после метана на Марсе обнаружен новый газ [14]. Ранее поиски HCl средствами наземной

Рис. 7. Вместо метана... ACS открыл новые полосы поглощения углекислого газа CO_2 и не наблюдавшуюся на Марсе полосу озона O_3 . По Trokhimovskiy et al. *A&A*, 2020; Olsen et al. *A&A*, 2020; Perevalov et al. *IQSRT*, 2021; Yachmenev et al. *J.Chem Phys*, 2021. Рисунок из пресс-релиза ESA 27.07.2020



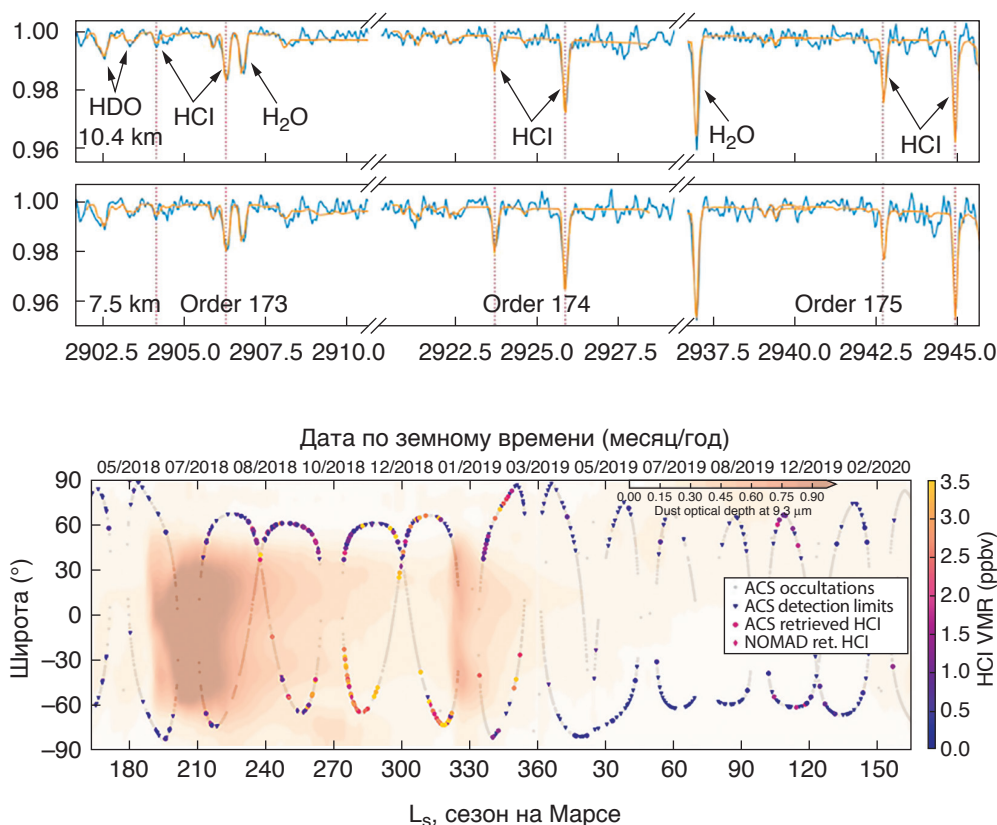


Рис. 8. Вверху: содержание хлороводорода HCl (до 4 ppbv), по 12 линиям в спектрах ACS MIR измерено отношение $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$. Внизу: хлороводород на Марсе в течение марсианского года по данным спектрометрического комплекса ACS на борту КА TGO. По горизонтали указано положение Марса на орбите (солнечная долгота), которое соответствует сезону; по вертикали – широта. Кружками обозначены результаты ACS, ромбами – NOMAD. Цвет кружков и ромбов соответствует количеству HCl в атмосфере (шкала справа, ppbv). Градациями коричневого цвета показана интенсивность глобальной пылевой бури. HCl появляется, когда в атмосфере много пыли. Он может разрушать метан, уменьшая время его жизни с ≥ 100 лет до дней. По данным Korablev et al. SciAdv, 2021; Olsen et al. A&A, 2021; Trokhimovskiy et al. A&A, 2021; Aoki et al. GRL, 2021

и внеатмосферной астрономии были безрезультатны и давали лишь верхние пределы. Оказалось – искали не в тот сезон. Измеренная ACS концентрация хлороводорода достигала 4 ppbv и проявлялась главным образом в теплый сезон лета в южном полушарии, когда в атмосфере много пыли. Возможный источник – соли хлора, поднимаемые в атмосферу вместе с пылью,

и химические реакции с участием пылевых и ледяных частиц. Предполагается, что исчезновение хлороводорода тоже связано с аэрозолями – возможно, он взаимодействует с водяным льдом, как это происходит в атмосфере Земли, и в конечном итоге возвращается на поверхность. Эти выводы подтверждаются сильной корреляцией между концентрацией HCl и водяным паром.

Также была измерена доля «тяжелого» хлора – изотопа ^{37}Cl в газе. Она оказалась практически идентична земной, что говорит о том, что хлору несвойственно обогащение тяжелыми изотопами, разделение, приобретаемое другими летучими элементами в результате атмосферных потерь. Следовательно, наблюдаемый хлор находился в резервуаре, связанном с атмосферой сравнительно недолго (на геологических масштабах времени) [15].

Интересно, что в следующий марсианский год HCl появился вновь, хотя пылевая активность была ниже, а в некоторых случаях газ фиксировался и в афелии, когда пыли меньше всего, а лето в северном полушарии холодное и сухое. Это говорит о сложной природе происхождения и разрушения HCl и позволяет предположить, что могут быть и другие источники газа, не связанные с атмосферой и пылью. В любом случае открытие хлороводорода ставит новые вопросы о фотохимии атмосферы Марса и требует пересмотра существующих моделей.

Так, в одной из появившихся недавно фотохимических моделей, включающей цикл хлора и соответствующие гетерогенные реакции (т. е. реакции с участием и газов, и твердых частиц – пыли, облаков), был также рассмотрен цикл разрушения метана. Оказалось, что в результате взаимодействия метана со свободным хлором темп его разрушения ускоряется до 200 раз, снижая время жизни метана в атмосфере с ≥ 100 лет до 1–10 лет в афелии (летом в северном полушарии). В сезон перигелия при большом количестве пыли метан также живет не дольше 10 лет [16]. Такие теоретические прогнозы уже позволяют приблизиться к согласованию измерений метана SAM TLS на поверхности с крайне низкими пределами, установленными ACS с орбиты.

Следует ли ждать, что рано или поздно ACS сможет увидеть метан, например после какого-нибудь особенно сильного выброса? Вероятно, но надо иметь в виду, что до правильного описания цикла хлора впереди еще много работы. Пока теоретические модели атмосферы Марса вынуждены использовать скорости ряда реакций, в частности гетерогенных, измеренных или оцененных для условий, далеких от реальных. Для обоснованных оптимистичных прогнозов потребуются еще множество лабораторных исследований и дальнейшее совершенствование теоретических моделей.

ПЕРСПЕКТИВЫ И НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ

Помимо перечисленных исследований малых газов при интерпретации данных прибора ACS миссии *ExoMars* получено множество других важнейших результатов. Измерено вертикальное распределение водяного пара, изотопов водорода, кислорода и углерода, угарного газа (CO) и аэрозолей, пыли и водяного льда. Например, впервые удалось проследить распределение водяного пара до высоты 120 км. Никто не предполагал, что водяной пар в атмосфере Марса не обязательно вымерзает, а регулярно достигает высот, где молекула воды легко распадается под действием солнечного ультрафиолета. Таким образом, предложен новый механизм потерь водорода, лучше согласующийся с общим темпом атмосферных потерь за всю историю Марса. Работа продолжается, к уже восьми десяткам статей в ведущих научных журналах по результатам эксперимента ACS прибавляются новые – в печати или подготовке.

Миссия *ExoMars* и прибор ACS показали, насколько эффективным может быть анализ атмосферы с орбиты. С каждым новым измерением, с каждым новым газом атмосфера Марса говорит нам больше. Но пока ее голос звучит загадочно. Распутать эти атмосферные тайны – задача для будущих миссий и новых поколений исследователей.

Будущее исследований выглядит многообещающим. В ближайшие годы в фокус внимания попадает Венера. Индийским космическим агентством ISRO одобрен к запуску на индийском спутнике Венеры *Venus Orbiter Mission* российский прибор VIRAL. В 2026 г. всерьез начнется проект «Венера-Д», масштабная российская инициатива, направленная на комплексное изучение Венеры. Он предполагает запуск орбитального и посадочного аппаратов, а также аэростатного зонда. В числе задач – исследование химического состава атмосферы, включая малые газы-биомаркеры, а также аэрозольных частиц. Особое внимание будет уделено возможности существования экстремофильной жизни в облаках. Миссия, несомненно, откроет новую главу в исследовании биомаркеров в атмосфере ближайшей к нам планеты.

Литература

1. *Hitchcock, Lovelock* (1967) Life detection by atmospheric analysis. *Icarus* 7, 149
2. *Madhusudhan et al.* (2023) Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere *ApJL* 956 L13
3. *Greaves et al.* (2021) Phosphine gas in the cloud decks of Venus *NatAs* 5, 655
4. *Villanueva et al.* (2021) No evidence of phosphine in the atmosphere of Venus from independent analyses *NatAs* 5, 631; *Cordiner et al.* (2022) Phosphine in the Venusian Atmosphere: A Strict Upper Limit From SOFIA GREAT Observations *GeoRL* 49, e2022GL101055
5. *Korablev et al.* (2018). The Atmospheric Chemistry Suite (ACS). *Space Sci. Rev.* 214, 7.
6. *Formisano et al.* (2004) Detection of Methane in the Atmosphere of Mars. *Science* 306, 1758; *Krasnopolsky et al.* (2004) Detection of methane in the martian atmosphere: evidence for life? *Icarus* 172, 537; *Mumma et al.* (2009) Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003. *Science* 323, 1041.
7. *Webster et al.* (2015) Mars methane detection and variability at Gale crater. *Sci* 347, 415; *Webster et al.* (2018) Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations. *Sci* 360, 1093.
8. *Korablev et al.* (2019). No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations *Nature* 568, 517.
9. *Knutsen et al.* (2021). Comprehensive investigation of Mars methane and organics with ExoMars/NOMAD. *Icarus* 357, 114266.
10. *Montmessin et al.* (2021). A stringent upper limit of 20 pptv for methane on Mars and constraints on its dispersion outside Gale crater. *A&A* 650, A140.
11. *Webster et al.* (2021). Day-night differences in Mars methane suggest nighttime containment at Gale crater *A&A* 650, A166.
12. *Viscardy et al.* (2025). Questioning the reliability of methane detections on Mars by the Curiosity rover. *JGRE* 130, e2024JE008441.
13. *Trokhimovskiy et al.* (2020) First observation of the magnetic dipole CO₂ absorption band at 3.3 μ m in the atmosphere of Mars by the ExoMars Trace Gas Orbiter ACS instrument. *Astron. Astrophys.* 639, A142; *Olsen et al.* (2020) First detection of ozone in the mid-infrared at Mars: implications for methane detection *A&A* 639, A141.
14. *Korablev et al.* (2021) Transient HCl in the atmosphere of Mars. *SciAdv* 7, eabe4386; *Olsen et al.* (2021) Seasonal reappearance of HCl in the atmosphere of Mars during the Mars year 35 dusty season. *A&A* 647, A161.
15. *Trokhimovskiy et al.* (2021). Isotopes of chlorine from HCl in the Martian atmosphere *A&A* 651, A32
16. *Taysum et al.* (2024) Observed seasonal changes in Martian hydrogen chloride explained by heterogeneous chemistry *A&A* 687, A191.