

УДК 523.4535.338;551.51

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР В 2019–2022 гг.

© 2023 г. О. И. Кораблев*

Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Профсоюзная 84/32, Москва, 117997 Россия

**e-mail: korab@cosmos.ru*

Поступила в редакцию 31.08.2023 г.

После доработки 08.11.2023 г.

Принята к публикации 15.11.2023 г.

Представлен обзор исследований атмосфер планет Солнечной системы, выполненных российскими учеными за 2019–2022 гг., подготовленный в Комиссии по атмосферам планет Национального геофизического комитета для Национального доклада по метеорологии и атмосферным наукам на 28-й Генеральной Ассамблее Международного союза геодезии и геофизики (IUGG-2023) в Берлине.

Ключевые слова: атмосфера, метеорология, планета, состав атмосферы, циркуляция атмосферы, су-перротация, перенасыщение, атмосферные потери, метан, озон, малые составляющие атмосферы, пыль, облака, Венера, Марс, Сатурн, Титан, Плутон, спектроскопия

DOI: 10.31857/S0002351523070052, **EDN:** LGFVOZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящий обзор основан на материалах, подготовленных Комиссией по атмосферам планет Национального геофизического комитета для Национального доклада по метеорологии и наукам об атмосфере для XXXVIII Генеральной ассамблеи Международного союза геодезии и геофизики (IUGG) в Берлине, Германия, июль 11–20, 2023 [Национальный отчет России, 2023]. Он включает исследования атмосфер планет, выполненные в 2019–2022 гг. Четырехлетний период, дольше обычного, отмечен массовой публикацией результатов работ по данным проекта ESA – Роскосмоса ExoMars Trace Gas Orbiter (TGO). Этот спутник достиг Марса и завершил кампанию по формированию орбиты с аэродинамическим торможением в марте 2018 г. С тех пор он выполняет регулярные измерения состава атмосферы и ведет мониторинг климата Марса с помощью российского прибора Atmospheric Chemistry Suite (ACS). [Korablev et al., 2018]. Недавно в Journal of Geophysical Research (Planets) опубликован соответствующий сборник статей (Topical collection) [ExoMars Trace Gas Orbiter, 2023]. Как и прежде [Korablev, 2016; Кораблев, 2020], многие результаты получены по данным космических аппаратов ЕКА Mars Express и Venus Express, в состав которых входили приборы с российским участием. Mars Express работает уже более 19 лет; космический аппарат Venus Express эксплуатировался в 2006–2014 гг., и его длинные ряды данных продолжают вдохновлять на новые публикации.

Обзор основан на работах, касающихся нейтральных планетных атмосфер и планетных климатов, авторами или соавторами которых являются ученые, работающие в российских научных учреждениях, и опубликованные в рецензируемой литературе. Части обзора разделены по планетам и включает краткое описание спектроскопии, связанной с атмосферой планет. Последние достижения в области внесолнечных планет, понимании их природы и атмосфер часто соприкасаются с моделированием атмосфер тел Солнечной системы, которые служат хорошо изученным эталоном [напр., Forget et al., 2021]. Это новая, быстро развивающаяся область наук об атмосферах. Тем не менее, на данный момент мы решили оставить эти исследования за рамками обзора.

Исследования, связанные с атмосферной циркуляцией и химией мезосферы Венеры, рассмотрены в разделе 2; разноплановые исследования атмосферы Марса, включая измерения водяного пара и изотопных отношений и их связь с атмосферными потерями, структура и циркуляция атмосферы, аэрозоли объединены в разделе 3; несколько результатов по циркуляции и составу атмосфер Сатурна, Титана и Плутона представлены в разделе 4. Некоторые результаты из области молекулярной спектроскопии, связанные с атмосферами планет или инициированные измерениями планетных атмосфер сведены в разделе 5.

2. ВЕНЕРА

2.1. Циркуляция атмосферы

Ретроградная суперротация наблюдается как вращение всего толстого облачного слоя Венеры в западном направлении со скоростью около 100 м/с на высотах 65–70 км (верхний уровень облаков) [напр., Imamura et al., 2020]. Был продолжен анализ ветров на разных высотах методом отслеживания облачных деталей, перемещающихся от снимка к снимку. Khatuntsev et al., [2022b] проанализировали $\geq 250\,000$ векторов ветра, полученных из видимых (VIS; 513 нм) изображений камеры наблюдения Венеры (VMC) на борту Venus Express. Этот спектральный диапазон соответствует уровню высоты 60 ± 3 км, находящемуся между рассмотренными ими ранее данными VMC ультрафиолетового (УФ) (365 нм; 70 ± 2 км) и ближнего инфракрасного (NIR; 965 нм; 55 ± 2 км) диапазонов [Khatuntsev et al., 2013, 2017]. На высоте 60 км, в среднем и нижнем облачном слое зональный ветер уменьшался с 76.5 до 61.5 м/с на 30° – 65° ю.ш. Направление меридионального ветра было противоположно полученному из УФ-наблюдений в верхней части облаков, до 7 м/с в сторону экватора.

Анализ изображений VMC в УФ-диапазоне (365 нм) был дополнен аналогичным набором данных со спутника Akatsuki JAXA. Их совместный анализ [Khatuntsev et al., 2022a] позволил охарактеризовать циркуляцию на уровне верхней границы облаков за период 2006–2021 гг. с разрывом в ~ 2.5 года между миссиями Venus Express и Akatsuki в 2014–2016 гг. Над экваториальными широтами (0 – 20° ю.ш.) среднегодовой зональный ветер -98.6 ± 1.3 м/с менялся с периодом 12.5 ± 0.5 лет и амплитудой ~ 10 м/с. Средняя меридиональная скорость ветра -2.3 ± 0.2 м/с (в направлении полюса) также варьировалась с амплитудой ~ 3 м/с. В качестве причин наблюдаемой периодичности [Khatuntsev et al., 2022a] предложили коррелированные периодические изменения УФ-альбедо и 11-летний солнечный цикл. Оба фактора могут влиять на радиационный баланс, а солнечный цикл – также на химию мезосферы.

Наблюдения теплового излучения (ближнего ИК-диапазона) от горячей подоблачной атмосферы и поверхности на ночной стороне позволяет наблюдать самые нижние слои облаков. По перемещению облачных деталей в спектральном окне 1.74 мкм по данным прибора VIRTIS-M (Venus Express) [Gorinov et al., 2021] определили ветер на высотах 44–48 км. На 0 – 60° ю.ш. наблюдалась суперротация со средней скоростью 60–63 м/с в западном направлении. Меридиональная составляющая ветра была значительно слабее: 0 –2 м/с к экватору на $\geq 20^\circ$ ю.ш. и, немного больше, к полюсу на 0 – 20° ю.ш.

[Губенко и др., 2021] проанализировали мелкомасштабные (~ 1 км по вертикали) флуктуации

сигнала нескольких радиозатменных профилей космических аппаратов “Венера-15” и “Венера-16”. Выше 61.5 км спектр этих возмущений позволил отождествить вертикально распространяющиеся внутренние гравитационные волны (или волны плавучести) (ГВ). Были определены их собственные частоты, $(3.5$ – $9.5) \times 10^{-4}$ рад/с и отношение горизонтальной длины волны к вертикальной (21–57).

Подводя итог, изображения облаков в разных диапазонах дали данные на четырех уровнях в облачном слое Венеры, примерно 48 (1.74 мкм), 55 (NIR), 60 (VIS) и 70 км (УФ). Высота между слоями VIS и NIR менялась за время работы Venus Express, от ≤ 1 км в начале миссии (минимум солнечного цикла) до 8.5 км с ростом солнечной активности. Движение наблюдаемых деталей облаков можно связать с динамикой атмосферы на этих высотах. Зональный поток (скорость суперротации) зависит от местного солнечного времени и широты, а также от крупномасштабной топографии [Bertaux et al., 2016; Patsaeva et al., 2019; Khatuntsev et al., 2022a]. Влияние поверхности наиболее заметно в УФ и NIR данных. В самом нижнем слое существенной корреляции с топографией поверхности не наблюдалось. Меридиональное направление и скорость ветра могут указывать на конфигурацию циркуляции Хэдли на уровне облаков, однако для формального описания данных еще недостаточно. В Южном полушарии полярная (прямая) ветвь ячейки Хэдли в основном облачном слое наблюдалась на высоте 70 км. Обратная ветвь (в сторону экватора) была около нижней границы облачности (55 км). Возможно, в низких широтах на 1.74 мкм мог наблюдаться фрагмент нижней ветви ячейки Хэдли, обращенной к полюсу.

2.2. Состав и химия мезосферы

Вслед за первым обнаружением озона (O_3) на высотах 90–100 км ночной стороны Венеры [Montmessin et al., 2011], [Marcq et al., 2019], на основе анализа всех надирных наблюдений SPICAV-UV/Venus Express, сообщили об еще одном, постоянном озоновом слое. Озон обнаружен в высоких широтах ($\geq 50^\circ$ в обоих полушариях) на верхнем уровне облаков (70 км). Относительное содержание O_3 достигало 10–20 ppbv, что сравнимо с атмосферой Марса. Моделирование с использованием 3D-фотохимической модели LMD [Lebonnois et al., 2010] (называемой с 2022 г. PCM, Planetary Climate Model) показало, что наблюдаемый озон мог образоваться в результате меридионального переноса O_2 над полюсами.

Тот же набор данных SPICAV-UV был обработан повторно с целью получить содержание SO_2 в верхнем облачном слое (70 км) в течение всей

миссии Venus Express (2006–2014 гг.) [Marcq et al., 2020]. Это исследование подтвердило и расширило предыдущий анализ [Marcq et al., 2013]. Наблюдались сильные долговременные изменения содержания SO_2 в низких широтах, от ~ 100 ppbv (2007, 2009) до ≤ 10 ppbv (2014) (см. также рис. 2 в [Кораблев, 2016]). Содержание диоксида серы уменьшалось к полюсу и около подсолнечной точки, отражая конкурирующие процессы адвекции и фотохимического разрушения. Было отмечено увеличение SO_2 и УФ-излучения над Землей Афродиты, подтверждая механизм поступления SO_2 через орографические гравитационные волны [Bertaux et al., 2016]. Однако наблюдаемую корреляцию с поверхностью можно спутать с долговременной изменчивостью из-за наблюдательной селекции, связанной с орбитой спутника.

На основе новых калибровок звездных затмений SPICAV-UV [Evdokimova et al., 2020], [Evdokimova et al., 2021] получили вертикальные профили ночного озона и SO_2 на протяжении всей миссии. После открытия озонового слоя в мезосфере [Montmessin et al., 2011], за 8-летний период наблюдений было зарегистрировано 132 новых обнаружения. В редких обнаружениях пиковое содержание O_3 составляло от 10^7 до 10^8 молек см^{-3} на 85–110 км. Средний профиль озона менялся с 10–30 ppbv на 85–90 км до ~ 100 ppbv на 100 км. Эта работа продолжила и расширила предыдущее исследование профилей диоксида серы в мезосфере [Belyaev et al., 2017]. В среднем содержание SO_2 составляло 135 ± 21 ppbv между 85 и 100 км. Широкий разброс измеренных профилей не позволяет судить о каких-либо временных или пространственных особенностях распределения SO_2 .

Фотохимическое моделирование [Pinto et al., 2021] направлено на изучение распространенности димеров $\text{SO}(\text{SO})_2$ в верхних слоях атмосферы Венеры как потенциальной составляющей неизвестного ультрафиолетового поглотителя. Форма спектрального поглощения $(\text{SO})_2$ соответствовала неизвестному поглотителю, однако их содержание оказалось незначительным. Были рассмотрены продукты фотолиза и/или реакции димеров, такие как S_2O , разновидности S_nO более высокого порядка и аллотропы серы, S_n . Все эти соединения в аэрозольной или газовой фазе поглощают в нужном диапазоне. Обсуждались также перспективы идентификации ультрафиолетового поглотителя различными методами на будущих спускаемых аппаратах.

3. МАРС

3.1. Водяной пар и потери водорода

Судьба воды — ключевой вопрос в истории Марса. Ее потери в результате фотодиссоциации

и последующей диссипации водорода зависят от интенсивности солнечного излучения сверху и подъема воды снизу. Чем выше молекула воды поднимается в атмосфере, тем легче она покидает атмосферу. Солнечно-затменные наблюдения марсианской атмосферы российскими приборами SPICAM-IR и ACS на борту космических аппаратов Mars Express и Exo Mars TGO, охватывающие восемь марсианских лет и две глобальные пылевые бури (ГПБ), позволили изучить распределение воды до высот 100–120 км [Fedorova et al., 2020; 2021; 2023; Belyaev et al., 2021].

Данные SPICAM (2005 г. — март 2019 г.) охватывают восемь марсианских лет (MY), с 27 по 35 MY. Летом в южном полушарии водяной пар достигал высот 70–90 км ($L_s = 240\text{--}300^\circ$; сезон перигелия). В этом сезоне в годы без ГПБ наблюдался повышенный уровень воды, примерно 100 ppmv в южном полушарии. Реакция водяного пара на два наблюдаемых пылевых события в 28 и 34 MY существенно отличалась. Буря 28 MY, совпавшая с южным летним солнцестоянием, вызвала больший подъем воды в обоих полушариях на высоты > 80 км [Fedorova et al., 2021].

Данные ACS были проанализированы за два марсианских года, от $L_s = 163^\circ 34$ MY до $L_s = 170^\circ 36$ MY. Одновременно были восстановлены профили водяного пара, температурные профили атмосферы, пыли и облаков. Используя температуру, полученную из плотности CO_2 в гидростатическом равновесии, [Fedorova et al., 2020, 2023] обнаружили повсеместное и глубокое перенасыщение водяного пара над слоями аэрозоля, часто наблюдаемое одновременно с облаками (см. рис. 1). В афелии относительное содержание водяного пара на высоте выше 40 км было меньше 3 ppmv, при этом он наблюдался в состоянии перенасыщения. В перигелии вода в количестве 30–50 ppmv была перенасыщена выше 60 км. Между вечерними и утренними терминаторами насыщение менялось в ответ на термические приливы. Данные ACS показали, что перенасыщение наблюдается практически повсеместно, особенно в период сезона с повышенным содержанием пыли в атмосфере, что увеличивает среднегодовую диссипацию воды.

Измерения методом солнечных затмений проходят на терминаторе, где на состояние насыщения могут влиять особые температурные условия. Чтобы лучше понять перенасыщение и потери воды, глобальное распределение воды было исследовано с помощью ассимиляционного анализа, объединяющего данные о воде, температуре и пыли полученные приборами на нескольких космических аппаратах, включая два прибора TGO, ACS и NOMAD [Aoki et al., 2021]. Анализ был проведен за 34 MY с использованием модели общей циркуляции [Holmes et al., 2022]. Во время

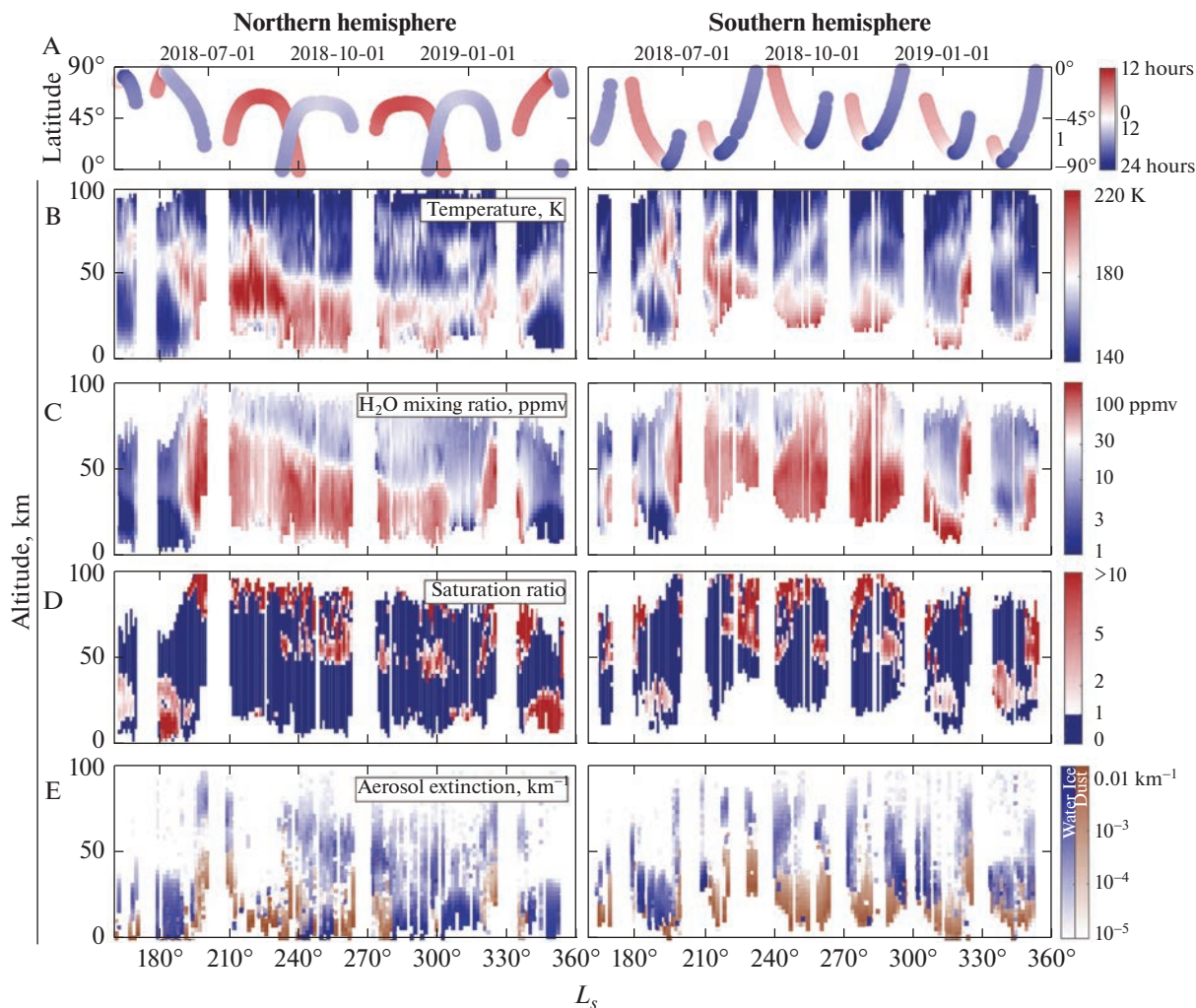


Рис. 1. Профили свойств атмосферы (температура, относительное содержание водяного пара, коэффициент насыщения, поглощение за счет пыли и облаков), полученные в перигелии 34 МУ на основе данных затмений ACS/TGO. На верхней панели показаны широты и местное время затмений. Рисунок из [Fedorova et al., 2020].

пыльного сезона 34 МУ модель показала существенное перенасыщение выше 60 км на всех широтах. Ниже наблюдались более выраженные суточные колебания, приводивших к образованию дискретных слоев перенасыщения. [Holmes et al., 2022] также обнаружили свидетельства проникновения перенасыщенного водяного пара в северный зимний полярный вихрь. Во время ГПБ МУ34 и региональной бури южным летом того же года водяной пар на всех широтах был перенасыщен до высот 60–90 км, откуда легче всего идет диссипация.

Эффективность диссоциации водяного пара на этих высотах была впервые подтверждена одновременными наблюдениями водородной короны с космического аппарата MAVEN во время регионального пылевого события 34 МУ [Chaffin et al., 2021]. Отсутствие затмений, наблюдаемых с TGO, совпало с пиком этого пылевого события. Пробел

был заполнен с использованием модели общей циркуляции с ассимиляцией [Holmes et al., 2021]. Вслед за первыми наблюдениями сезонной переменности свечения Н-Лайман-альфа при помощи SPICAM UV и HST [Chaffin et al., 2014], наборы данных MAVEN и TGO подтвердили новую парадигму потерь водорода с Марса. В традиционной схеме предполагалось, что водяной пар не проникает выше холодной мезопаузы и поступление Н в верхние слои атмосферы регулируется медленной диффузией H_2 . В новой схеме сезонные или региональные изменения содержания пыли, повышая температуры и разгоняя циркуляцию, позволяют воде подниматься выше, где она диссоциирует напрямую, увеличивая потери.

Обсуждаемые наблюдения линии Н-Лайман-альфа и повышенного водяного пара дали толчок многочисленным попыткам моделирования. Краснопольский [Krasnopolsky, 2019] использовал одно-

мерную фотохимическую модель нейтрального и ионного состава на 80–300 км при различной солнечной активности. В перигелии скорость выхода водорода с высоты 250 км составила $\approx 1.9 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Среднесуточное содержание воды, соответствующее наблюдаемой в перигелии увеличенной скорости потерь водорода ($10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), составляло ≤ 60 частей на миллион по объему (ppmv) на высоте 80 км, в согласии с наблюдениями SPICAM и ACS. Фотолиз H_2O наиболее эффективен при 160–180 нм и слабо зависит от солнечной активности. Этот процесс идет на высоте около 100 км, откуда может диссипировать лишь небольшая часть образующегося водорода. Поток водорода с высоты 250 км можно аппроксимировать как $\Phi_{\text{H}} (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) = 1.6 \times 10^8 + 1.4 \times 10^7 f_{\text{H}_2\text{O}}$ (ppmv), где $f_{\text{H}_2\text{O}}$ — относительное содержание H_2O на высоте 80 км.

Монтмессин [Monmessin et al., 2021] построили упрощенную одномерную модель с аппроксимацией вертикального переноса, чтобы показать, что помимо образования атомарного водорода в результате фотолиза воды выше 80 км, основная часть экзосферного водорода образуется на высотах ~ 60 км и затем напрямую переносится в верхние слои атмосферы. Сравнивая подачу воды во время глобальной пыльной бури, периодов перигелия и региональной бури, зафиксированную наблюдениями ACS/TGO [Belyaev et al., 2021], они пришли к выводу, что на длительном масштабе времени основную роль играет сезонный эффект, южная весна/лето наиболее эффективна в производстве H и его подъеме в верхние слои атмосферы.

В [Шапошников и др., 2022] использовали модель MAOAM GCM (известную также как Mars GCM Института Макса Планка) для моделирования гидрологического цикла Марса во время сезонов пылевых бурь 28 и 34 МУ. Рассматривая фотодиссоциацию воды на длине волны Лайман-альфа, они отметили влияние пыльных бурь как на общее содержание водяного пара, так и на его вертикальное распределение. Поступление водяного пара в верхние слои атмосферы во время пыльных бурь приводит к интенсивной фотодиссоциации (до 6.5 т/с для всей атмосферы). Фотодиссоциация достигла максимума на высоте 50–80 км во время бури 34 МУ и 70–80 км в 28 МУ. Результаты моделирования сравнивались с профилями воды ACS/TGO.

Шапошников [Shaposhnikov et al., 2019, 2021] также использовали MAOAM, чтобы исследовать, как динамика средних и верхних слоев атмосферы влияет на подъем водяного пара. В статье 2019 г. они ввели эффект сезонного водяного “насоса”. В результатах моделирования особенно сильна восходящая ветвь меридиональной циркуляции, расположенная в перигелии выше 60°

ю.ш. Там сочетание среднего вертикального потока и возмущений солнечных приливов позволило воде проникнуть через минимум мезопаузы на высоте примерно 60 км. Затем меридиональная циркуляция переносит воду на север. Интенсивность циркуляции зависит от количества пыли, и содержание воды в верхних слоях атмосферы сильно увеличивалось во время пылевых явлений. Шапошников [Shaposhnikov et al., 2022] более подробно рассмотрели работу водяного “насоса” под воздействием гравитационных волн. Было найдено, что молекулярная диффузия играет сравнительно слабую роль в переносе воды в средней атмосфере и через мезопаузу, и изучено влияние гравитационных волн во время ГПБ и периодов равноденствий.

Новые исследования попадания водяного пара на большие высоты и ее последующей диссипации позволяют сделать вывод, что наблюдения Mars Express и TGO в течение нескольких марсианских лет подтвердили эффективность пыльных бурь в подъеме воды. Показано, что в южном полушарии атмосферная вода достигает больших высот в течение всего сезона перигелия. Изолирующий эффект тропопаузы, препятствующая попаданию воды в верхние слои атмосферы на Земле, почти не работает на Марсе, и вода покидает планету намного легче, чем считалось ранее.

Еще в одной работе, посвященной исследованию водяного пара в атмосфере Марса, использованы надирные данные Mars Express, полученные в ближней ИК (1.38 мкм) и тепловой ИК (20–40 мкм) областях спектра [Knutsen et al., 2022]. Поглощение водяным паром на этих длинах волн формируется на разных уровнях атмосферы, и их совместный анализ позволяет не только выявить число молекул в атмосферном столбе, но и наложить ограничения на вертикальное распределение. Синергия позволяет различать приповерхностное содержание, ниже 5 км, и остальную часть столба. В среднем, найдено что вода сильно прижата к поверхности и неравномерно перемешана в планетном пограничном слое. Полученное распределение отличается от базы данных климата Марса (MCD) LMD, особенно в низких и средних широтах, где синергия показала большую концентрацию вблизи поверхности. Современные представления о распределении воды в самом нижнем слое атмосферы опираются на предсказания моделей, и значительные расхождения между MCD и измерениями показывают, что механизмы, формирующие вертикальное распределение, понятны не до конца.

3.2. Отношения изотопов и атмосферные потери

Отношения изотопов накладывают важные ограничения на стабильность и эволюцию планетных атмосфер: в долгосрочной перспективе

они могут указывать на полные потери летучих из атмосферы или других резервуаров, обменивающихся с атмосферой. С другой стороны, на измеренные изотопные отношения влияют физические и химические процессы в современной атмосфере (фракционирование за счет диффузии, конденсации или фотолиза). Отношение дейтерия к водороду (D/H) широко используется для оценки запаса воды на Марсе в прошлом и ее эволюции, однако механизмы, контролирующие современное поведение HDO, плохо изучены. Содержание изотопов в марсианской атмосфере в основном известно из наземной спектроскопии и сравнительно редких измерений на поверхности. Спектрометры ECHO Mars TGO, наблюдающие за затмениями Солнца в атмосфере с высоким спектральным разрешением, позволили впервые получить профили изотопологов воды и CO₂ в зависимости от высоты, чтобы выяснить процессы фракционирования на разных уровнях атмосферы.

В первой публикации по данным TGO, посвященной профилю отношения HDO/H₂O [Vandaele et al., 2019] описаны измерения пыли, воды и полутяжелой воды (HDO) в начале ГПБ 34 МУ с помощью приборов NOMAD и ACS. Вертикальное распределение отношения HDO/H₂O (D/H) получено от планетного пограничного слоя до ~80 км. Это было одним из первых свидетельств резкого увеличения содержания H₂O и HDO на высотах 40–80 км в результате более высоких температур во время ГПБ (см. раздел 3.1). Анализируя более полный ряд измерений ACS, от начала научных наблюдений TGO (Ls = 174° 34 МУ) до конца 35 МУ, [Alday et al., 2021a] восстановили профили HDO и H₂O в диапазоне высот 0–80 и 0–100 км соответственно (рис. 2). Сравнивая измеренные профили с ожидаемыми скоростями фотолиза, было установлено, что атомы H и D на высотах диссипации образуются преимущественно в сезон перигелия. Хотя фракционирование, вызванное конденсацией, является основным фактором изменения D/H в водяном паре, на изотопное содержание продуктов диссоциации D и H больше влияют различия в скорости фотолиза HDO и H₂O. Результаты позволяют уточнить оценки общей потери воды с Марса на основе отношения дейтерия к водороду.

При помощи инструмента CSHELL на НАСА IRTF, [Krasnopolsky, 2021] наблюдали широтные изменения отношения HDO/H₂O в Северном полушарии Марса в середине лета. По данным семи наблюдений построена карта сезонно-широтных вариаций HDO/H₂O. Отмечена корреляция между отношением HDO/H₂O и средней температурой в самой нижней шкале высоты, что можно объяснить температурно-зависимым фракционированием изотопов. Однако количественно оценить эту связь трудно, и авторы пришли к вы-

воду, что изменчивость HDO/H₂O по диску Марса сложнее, чем дает описание лишь с помощью энергии активации.

Измерения соотношений изотопов кислорода в H₂O еще сложнее, учитывая слабость соответствующих спектральных линий и высокое спектральное разрешение, необходимое для их разделения в плотной полосе поглощения H₂O. Отношения определяются несколькими процессами фракционирования, от диссипации атмосферы до взаимодействия с поверхностью и позволяют ограничить параметры эволюции системы летучих компонентов Марса. В спектрах канала MIR ACS/TGO можно выделить несколько линий поглощения H₂¹⁶O, H₂¹⁸O, и H₂¹⁷O, что позволило впервые измерить вертикальные профили отношений ¹⁸O/¹⁶O и ¹⁷O/¹⁶O в водяном паре [Alday et al., 2019]. Наблюдалось обогащение до $\delta^{18}\text{O} = 200 \pm \pm 80\%$ и $\delta^{17}\text{O} = 230 \pm 110\%$ по отношению к Венскому стандарту средней океанской воды (VSMOW). Вертикальные профили отношений не показали каких-либо особенностей.

По данным солнечных затмений MIR ACS/TGO также проведен мониторинг изотопного состава кислорода и углерода в CO₂ на высотах от 70 до 130 км в течение более половины марсианского года [Alday et al., 2021b]. Вертикальные тренды изотопных отношений в целом соответствовали диффузионному разделению изотопологов выше гомопаузы ($\delta^{13}\text{C} = -3 \pm 37\%$; $\delta^{18}\text{O} = -29 \pm 38\%$; and $\delta^{17}\text{O} = -11 \pm 41\%$). Ниже этого уровня отношения соответствовали земным. Авторы предложили нижний предел диссипации первичного углерода на Марсе $\geq 20\text{--}40\%$. Общие потери углерода из атмосферы из-за образования карбонатов или других стоков, безусловно, были больше. Кроме того, для объяснения более сильного наблюдаемого обогащения ¹⁸O/¹⁶O в водяном паре по отношению к CO₂, они предложили фотохимический перенос легкого O от H₂O к CO₂.

Обсуждаемые наблюдения, в частности получение первых разрешенных по высоте профилей D/H, инициировали усилия по совершенствованию климатических моделей. Значительные колебания отношения D/H, более низкие отношения HDO/H₂O в холодных регионах, связанные с конденсационным фракционированием, были впервые предсказаны на основе трехмерной климатической модели [Montmessin et al., 2005] и были подтверждены наземными наблюдениями [напр., Krasnopolsky, 2021]. По данным TGO была обновлена модель MGCM LMD (или PCM), в которой были усовершенствованы блоки, отвечающие за формирование облаков из водяного льда и конденсационное фракционирование [Vals et al., 2022]. Сравнение с наблюдениями ACS/TGO [Rossi et al., 2022] показало, что модель хорошо вос-

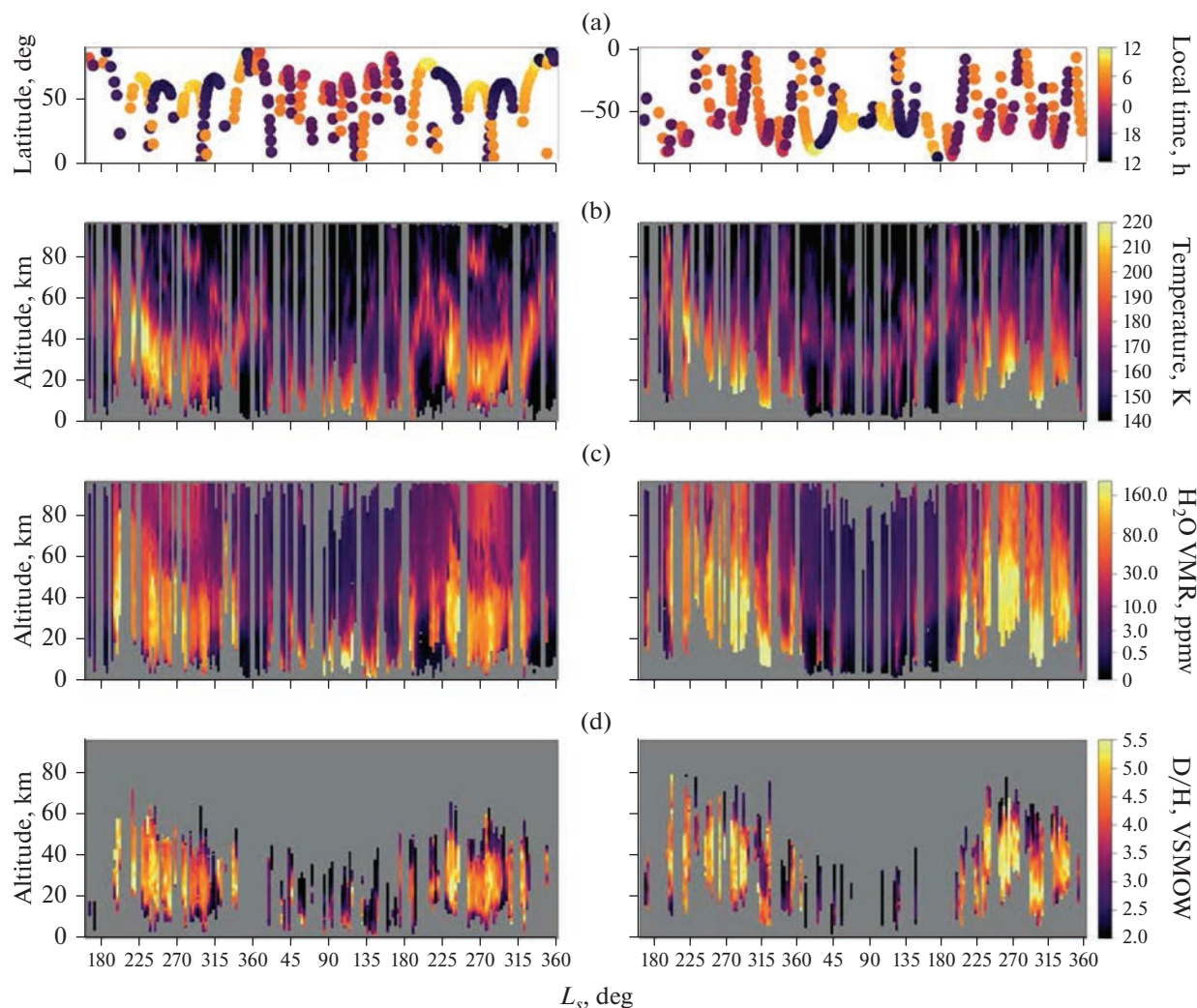


Рис. 2. Вертикальные профили, полученные по данным ACS/TGO, в зависимости от высоты и солнечной долготы для Северного (левые панели) и Южного (правые панели) полушарий Марса: (a) широты и местное время наблюдений солнечного затмения; (b) температура воздуха; (c) объемное соотношение водяного пара (VMR); (d) отношение D/H в водяном паре по Венскому стандарту средней океанской воды (VSMOW) с погрешностями меньше 1. Рисунок из [Alday et al., 2021a].

производит температуру, поля водяного пара и HDO [Fedorova et al., 2020; Alday et al., 2021a], давая хорошую основу описания цикла D/H. Сравнение также подчеркнуло важность учета перенасыщения (см. раздел 3.1), возникающего в результате микрофизических процессов в облаках водяного льда, для правильного моделирования водяного пара и отношения D/H. [Rossi et al., 2021] использовали эту модель для изучения влияния ГПБ 34 MY на HDO. В их результатах содержание HDO на высоте 100 км во время пыльной бури было в среднем на 40% больше, чем обычно в это время года, что позволяет уточнить оценки общих потерь воды.

Следующий блок исследований связан с переходной областью атмосферы из термосферы в экзосферу и потерями кислорода. Шематович [Ше-

матович, 2021] рассмотрел процессы образования, кинетики и транспорта надтепловых атомов кислорода во время протонных сияний на Марсе. Такие спорадические события, вызванные выпадением энергичных атомов водорода, наблюдались приборами MAVEN. Для определения источников надтеплого кислорода они учли проникновение протонов в дневную атмосферу за счет перезарядки в водородной короне. Столкновения как дополнительный источник горячих атомов кислорода учитывались и в работах [Шематович и др., 2019, 2021; Шематович и Калиничева, 2020]. Оценки потери атомарного кислорода во время протонных сияний были в пределах $(3.5\text{--}5.8) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что сравнимо с потерями кислорода за счет фотохимических реакций. Сле-

довательно, поток выходящих горячих атомов кислорода, вызванный выпадением протонов, может стать доминирующим во время экстремальных солнечных явлений, солнечных вспышек или корональных выбросов, и способствовать потерям атмосферы в долгосрочном масштабе.

3.3. Структура и циркуляция атмосферы

Прибор ACS на борту EхоMars TGO способен также измерять температуру и плотность атмосферы Марса различных участках инфракрасного спектра. Тепловой инфракрасный канал ACS названный в честь проф. В.И. Мороза (ACS TIRVIM) измерял спектры в надир в спектральном диапазоне 7.7–16.7 мкм ($600\text{--}1300\text{ см}^{-1}$) с марта 2018 г. по декабрь 2019 г., охватив практически полный марсианский год. Преимуществом орбиты TGO является возможность наблюдать суточный цикл за сравнительно короткий период 54 суток (сол – марсианский день). Из измеренных спектров можно восстановить вертикальные профили температуры от поверхности до 60 км (по полосе CO_2 15 мкм), температуры поверхности и оптические толщины столба аэрозоля (пыль поглощает в диапазоне ~9 мкм и водяной лед ~12 мкм). Власов [Vlasov et al., 2022] сообщили о термической структуре атмосферы и запыленности столба во время ГПБ 34 МУ, мониторинг которой осуществлялся при $L_s = 182\text{--}212^\circ$. Они зафиксировали эволюцию ГПБ и реакцию атмосферы на изменение содержания пыли. Шторм вызвал асимметричный нагрев атмосферы, преимущественно в южном полушарии, и изменил суточный контраст термической структуры. Также на пике ГПБ было отмечено снижение суточного контраста поверхностной температуры.

Авторы [Guerlet et al., 2021] описали альтернативный алгоритм восстановления параметров атмосферы из спектров ACS TIRVIM. Аналогичным образом они получили вертикальный профиль температуры атмосферы на высотах до 50 км, температуру поверхности и общую оптическую толщину пыли и водяного льда. Отмечена неоднозначность оценок атмосферных параметров в зависимости от времени суток: 54-суточный цикл наблюдений смешивал суточный сигнал с сезонными изменениями. Алгоритм восстановления был протестирован на предмет его надежности и различных ошибок, в частности, связанных с содержанием аэрозолей. Была проведена перекрестная проверка данных о температуре атмосферы и оптической толщине пыли с тысячами совмещенных профилей Mars Climate Sounder (MCS/MRO). Небольшие расхождения между температурами TIRVIM и MCS могут объясняться разницей вертикального разрешения двух методов измерения. Днем оптическая толщина пыли, измеренная с помощью TIRVIM и MCS сов-

падала хорошо, в то время как над холодной поверхностью (при низком температурном контрасте между поверхностью и атмосферой), верную оптическую толщину из данных TIRVIM восстановить не удается.

В [Fan et al., 2022] использовали профили атмосферы, разрешенные относительно местного времени из [Guerlet et al., 2021], для изучения тепловых приливов. Были отобраны данные вблизи северного летнего солнцестояния при $L_s = 75^\circ\text{--}105^\circ$ 35 МУ. Разложение суточных аномалий температуры на моды показало выраженный суточный прилив, заметный полусуточный прилив и суточную волну Кельвина с амплитудами 5, 3 и 2.5 К, соответственно, в диапазоне давлений от десятков до сотен Па. Результаты в целом согласуются с PCM, но с заметными более ранними фазами суточных (~1 ч) и полусуточных (~3 ч) приливов.

В [Young et al., 2022] использовали надирные данные ACS TIRVIM для ассимиляции в PCM. Период ассимиляции составил $L_s = 182^\circ\text{--}211^\circ$ МУ 34, начало и пик ГПБ 2018 г. Сначала они ассимилировали температурные профили TIRVIM для обновления профилей температуры и пыли, а затем оптические толщины пыли для обновления общего содержания пыли в столбе. В пределах выборки ассимиляция показала разумное согласие с наблюдениями TIRVIM, профилями температуры и пыли MCS, а также с суточным циклом приземного давления, измеренным Curiosity. Ассимиляция позволила реалистично восстановить ветры. В пик шторма усилилась меридиональная циркуляция, в среднеширотных зональных струях развилась асимметрия 125 м/с, суточный прилив ослаб на экваторе и усилился до 10–15 К в средних широтах, повсеместно усилился полусуточный прилив.

Спектроскопия солнечных затмений в инфракрасных полосах поглощения CO_2 так же позволяет восстанавливать профили давления и температуры. Один из способов получения профиля состоит в том, чтобы из концентрации молекул CO_2 получить гидростатическую аппроксимацию профиля атмосферы, как это было сделано [Alday et al., 2021a] со спектрами ACS/TGO в диапазоне 2.7 мкм. Более точную оценку профиля использовали [Fedorova et al., 2020, 2023] по данным в диапазоне 1.43 мкм и [Belyaev et al., 2021, 2022] – на 2.7 мкм. В этих работах вначале был получен профиль плотности на основе поглощения, одновременно температура оценивалась на основе вращательной структуры полос CO_2 . Из этих данных строился профиль атмосферного давления и затем давление, определенное на уровне с наименьшими погрешностями, использовалось для построения профиля в предположении гидростатического равновесия. Средняя молекулярная масса атмосферы была взята из MCD 5.3.

Используя сильную полосу поглощения CO_2 в диапазоне 2.7 мкм, измеренную с высоким разрешением спектрометром ACS MIR, [Belyaev et al., 2022] получили тепловую структуру атмосферы в беспрецедентном диапазоне высот, от 20 до 180 км, в течение 1.5 МУ, с середины 34 МУ до конца 35 МУ. Они представили широтную и сезонную климатологию структуры атмосферы, изучили сезонный ход минимума мезопаузы (на высотах 70–145 км) и гомопаузы, изменяющийся от 90–100 км в афелии до 120–130 км в перигелии. Высота гомопаузы оценивалась в предположении постоянного вихревого перемешивания $10^7 \text{ см}^2/\text{с}$ на высоте 35 км.

В [Starichenko et al., 2021] разработали метод извлечения внутренних гравитационных волн (волн плавучести, ГВ) из базы данных температурных профилей ACS MIR. Впервые обнаружены волновые эффекты с характерным затуханием ГВ в области гомопаузы вдоль всего столба атмосферы.

В двух исследованиях рассмотрено влияние ГПБ 34 МУ на динамику марсианской атмосферы посредством моделирования MGCM с ассимиляцией температурных полей ACS. В [Streeter et al., 2021] изучали поведение полярных вихрей, мощных западных струй, изолирующих холодную полярную атмосферу от пыли, воды и химических трейсеров. Они ассимилировали температурные профили MCS/MRO и ACS/TGO [Fedorova et al., 2020] в MGCM. Воздействие пыльной бури было асимметричным, с существенно более слабым южным вихрем. Такая конфигурация усиливает перенос в южную полярную область Марса и меняет распределение пыли и химических трейсеров по долготам. Ражендран [Rajendran et al., 2021] моделировали влияние ГПБ МУ34 на суперротацию атмосферы Марса. Это явление определяет динамику атмосфер медленно вращающихся планет, таких как Венера или Титан (см. разделы 2.1 и 5), но и марсианская атмосфера также проявляет суперротацию, в частности, соответствующую струю может возбудить вызываемый пылью нагрев. При моделировании MGCM, в том числе с ассимиляцией температурных профилей MCS и ACS, они обнаружили, что в пике ГПБ суперротация увеличилась в два раза по сравнению с тем же периодом в предыдущем МУ. Интересно, что усиление циркуляции началось за 40 суток до наступления ГПБ. Подъем пыли в южных средних широтах и тропиках вызвал сильные восточные ветры на высоте выше 60 км за счет переноса импульса тепловыми приливами.

3.4. Состав и химия атмосферы

Метан

Основные результаты ACS/TGO по метану и обнаружению малых составляющих рассмотрены

[Korablev, 2021]. Сообщения об обнаружении метана в марсианской атмосфере послужили поводом для многочисленных исследований, направленных на подтверждение или объяснение его присутствия на планете, где этот газ мог бы иметь биогенное или геофизическое происхождение. В целом, обнаружения показывают относительное содержание метана в диапазоне от 0.2 (измерения в кратере Гейла, SAM-TLS/Curiosity [Webster et al., 2018]) до 45 частей на миллиард по объему, ppbv, (наземные наблюдения [Mumma et al., 2009]) и сильно изменчивы. В частности, для Гейла сформировалось понятие о кратере, в котором происходят периодические выбросы, или через который время от времени проходят струи метана, в сочетании с непрерывным выделением газа [напр., Moores et al., 2019]. Однако ни одна из частей этой глобальной картины метана пока не подтверждается измерениями TGO.

Благодаря спектральной разрешающей силе $\lambda/\Delta\lambda \approx 30000$ и отношению сигнал/шум для неослабленных солнечных спектров $\geq 10\,000$, канал ACSMIR предлагает уникальные характеристики для обнаружения малых газов. Первые же спектры канала MIRACS в диапазоне длин волн, где должны быть наиболее сильные особенности метана (рис. 3), снизили верхний предел на порядок ниже фоновых значений SAM-TLS. В спектрах видны слабые линии поглощения водяного пара и других компонентов атмосферы (см. ниже), но не соседние детали метана. Первая публикация ACS установила верхний предел в 0.05 ppbv [Korablev et al., 2019]; затем предел 0.06 ppbv был установлен по данным NOMAD/TGO [Knutsen et al., 2021]. Более длинный ряд данных ACS, охватывающий два марсианских года 34–35 МУ, привел к улучшению верхнего предела до 0.02 ppbv [Montmessin et al., 2021]. Измерения TGO в районе кратера Гейла был присвоен наивысший приоритет. К сожалению, на низких широтах аэрозоли (пылевые и конденсационные облака) затрудняют измерения методом солнечных затмений на высотах, где достигается максимальная чувствительность. Наиболее строгие верхние пределы ACS вблизи кратера Гейла, установленные в сезон афелия, когда активность пыли на Марсе минимальна, составили 0.065–0.2 ppbv.

Основная трудность проблемы метана заключается в явном противоречии между “фоновым” уровнем метана, зафиксированным Curiosity, и верхними пределами TGO, на порядок ниже. При времени жизни 100–300 лет метан должен накапливаться в атмосфере, где атмосферное перемешивание за несколько месяцев полностью распределяет его по планете. Полагая кратер Гейла единственным источником, маловероятно подобный сценарий, и только фоновый метан (0.41 ppbv в среднем), [Korablev et al., 2019] оценили время накопления, после которого TGO сможет обнару-

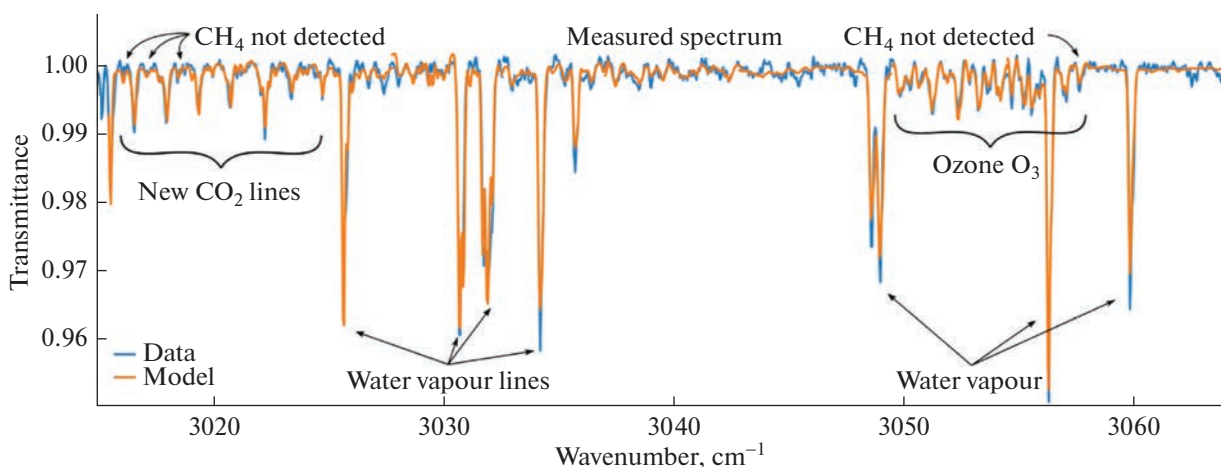


Рис. 3. Спектр ACSMIR/TGO, включающий нескольких порядков дифракции, показывающий отсутствие метана и вновь обнаруженные линии CO₂ и озона. По [Olsen et al., 2020; Trokhimovskiy et al., 2020]. Графика ESA.

жить метан, в 24 года. Принимая во внимание возможность многих источников, выбросы, зафиксированные Curiosity [Webster et al., 2018, 2021], и улучшенный верхний предел TGO [Montmessin et al., 2021], время накопления метана сократится еще больше. Мезомасштабное моделирование процесса разноса метана при условии верхнего предела TGO показало, что не только Гейл должен быть единственным источником на планете, но и этот источник должен занимать в кратере строго определенное место, чтобы удовлетворительно объяснить наблюдаемый фон и выбросы [Webster et al., 2021; Luo et al., 2021]. Другая гипотеза [Moore et al., 2019] объясняет накопление метана в кратере уменьшением высоты планетарного пограничного слоя в ночное время (когда проводились измерения SAM-TLS/Curiosity), что ограничивает перемешивание. Такой сценарий в принципе подтверждают недавние (35 МУ) дневные измерения TLS [Webster et al., 2021], показавшие только верхние пределы. На временном масштабе десятков лет это может увеличить время накопления метана или допустимую площадь просачивания. Тем не менее, чтобы соответствовать верхним пределам TGO, необходим до сих пор неясный механизм быстрого разрушения метана, который, в то же время, не влиял бы на химические превращения других активных составляющих марсианской атмосферы (CO, O₃, см. ниже). В целом вопрос о метане на Марсе остается открытым.

Озон и CO

Озон (O₃) является важным индикатором химии марсианской атмосферы. Ранние измерения показали, что в атмосфере наблюдается значительный дефицит продуктов диссоциации CO₂

(CO, O₂, O₃, O), распадающегося под действием солнечного света на длинах волн ≤ 200 нм. Фотохимическое моделирование показало, что рекомбинация углекислого газа контролируется следовыми количествами воды, различными формами нечетного водорода (H, OH, HO₂). Тем не менее, уравновесить рекомбинацию углекислого газа оказалось непросто, оставляя потенциально важным вклад гетерогенной химии. Современные модели [напр., Daerden et al., 2019; Lefèvre et al., 2021] требуют детальных данных по составу атмосферы, одновременных и совмещенных измерений продуктов диссоциации (O₃, CO) и водяного пара. Такие данные появились в результате работы SPICAM/MarsExpress и ACS/TGO.

Озон образуется в результате фотолиза CO₂ и разрушается радикалами водорода (HO_x), выделяющимися в результате фотолиза и окисления водяного пара, предполагая антикорреляцию между озоном и водяным паром. [Lefèvre et al., 2021] сравнили одновременные наблюдения обеих составляющих SPICAM (в надири) в течение четырех МУ с результатами РСМ. В высоких широтах обнаружена явная антикорреляция содержания O₃ и H₂O в столбе атмосферы, но вблизи экватора такая зависимость исчезала. Модель, учитывающая лишь химию газовой фазы, занижала наблюдаемый озон примерно в 2 раза, и устранить ошибку не помогли ни учет низкотемпературных сечений поглощения CO₂ ни корректировка скоростей реакций. Введение гетерогенных процессов потери HO_x на ледяных облаках существенно улучшило совпадение в высоких северных широтах.

Для изучения вертикального распределения O₃ использованы наблюдения звездных и солнечных затмений УФ-спектрометром SPICAM в течение четырех МУ [Määttä et al., 2022]. Звезд-

ные затмения проводились на ночной стороне, тогда как солнечные затмения относятся к терминатору, что позволяет изучать суточные изменения этого фотохимически-активного компонента атмосферы. Озоновый слой низких и средних широт, формирующийся северной весной, картирован в обоих полушариях, исследована разница между ночными и терминаторными измерениями. Зимой в южном полярном вихре обнаружены следы средневисотного озонового слоя, который уже наблюдался ранее в данных SPICAM. Во время северной полярной весны SPICAM наблюдал верхнюю часть нижнего озонового слоя на высоте ≥ 10 км.

Эта самая нижняя часть профиля озона систематически изучена по данным спектрометра ACS/TGO MIR, который зарегистрировал инфракрасное поглощение O_3 на длине волны 3.3 мкм (рис. 3; впервые опубликовано [Olsen et al., 2020]). [Olsen et al., 2022] представили климатологию профилей озона, охватывающую вторую половину 34 МУ, весь 35 МУ и начало 36 МУ. В период равноденствия в обоих полушариях и южной зимой содержание O_3 ниже 30 км было 200–500 ppbv. Во время более теплого и влажного южного лета, в перигелии, O_3 не обнаружен. Северным летом уровень водяного пара был ограничен высотой ≤ 10 км, и O_3 наблюдался выше, на высотах 20–30 км. Сравнение O_3 с профилями водяного пара и температуры подтвердило антикорреляцию H_2O и O_3 . Как и в работе [Lefèvre et al., 2021], наблюдаемое содержание O_3 превышает РСМ в 2–6 раз, указывая на существенные погрешности в скоростях фотохимических реакций с нечетным водородом. Недостаток озона в модели означает, что каталитическое действие HO_x переоценено, что перекликается с давней проблемой недооценки СО в фотохимических моделях Марса. Аналогичные трудности возникают при моделировании O_3 и HO_x в верхней стратосфере и мезосфере Земли.

По данным ACS/TGO получены первые профили СО в зависимости от высоты. Угарный газ не конденсируется, и его относительное содержание меняется по мере того, как основная компонента атмосферы (CO_2) сезонно конденсируется на полярных шапки и сублимирует из них. Фотохимическая продукция СО уравнивается реакцией с ОН, в результате которой СО преобразуется в CO_2 . Таким образом, СО является чувствительным индикатором катализируемого ОН химического процесса, стабилизирующего CO_2 -атмосферу. До этого измерялся только вертикально интегрированный столб СО, без информации о верхних слоях атмосферы, где производится СО. Профили СО по данным канала ACS MIR в диапазоне 2.35 мкм на высотах от 10 до 120 км до и во время ГПБ МУ 34 показали заметное снижение СО, что объясняется его окислением в более влажных

условиях ГПБ, способствующих увеличению содержания ОН на больших высотах [Olsen et al., 2021a].

Полная климатология вертикального распределения СО от 0 до 80 км была получена в ближнем ИК-диапазоне по данным ACS NIR в более слабой полосе на 1.6 мкм [Fedorova et al., 2022]. Впервые изучены сезонные и широтные изменения распределения СО по высоте. Были отмечены следующие новые особенности: 1) обогащенный слой СО на высоте 10–20 км в южных полярных районах в конце зимы, указывающий на активный процесс конденсации CO_2 ; 2) увеличение относительного содержания в 4–5 раз выше 50 км в период равноденствия, свидетельство переноса СО; 3) снижение выбросов СО в период ГПБ 34 МУ, связанное с влиянием водяного пара на скорость потерь СО и его преобразование в CO_2 . Среднее содержание СО составило ~950 ppmv, выше, чем измерено Curiosity, и ближе к другим результатам дистанционного зондирования.

Открытие хлороводорода (HCl) и другие малые составляющие

Впервые с момента обнаружения метана в атмосфере Марса обнаружено новое химическое соединение. Хлороводород (HCl) уверенно идентифицирован по 12 линиям в спектрах ACS/TGO MIR (рис. 4) [Korablev et al., 2021]. Обнаружение было подтверждено по данным NOMAD/TGO. Относительное содержание HCl достигает 4 ppmv, значительно превышая верхние пределы, установленные ранее средствами наземной и внеатмосферной астрономии (≤ 0.3 ppmv). Хлороводород появился после ГПБ 34 МУ; вне пылевого сезона его содержание оставалось ниже 0.1 ppmv, разрешая кажущееся противоречие.

Хлор обилен на поверхности Марса в форме NaCl или перхлоратов, он был также обнаружен в составе поверхностной пыли. Обе формы могут достигать нижних слоев атмосферы во время пыльной бури, и быть источником Cl. Возможные механизмы образования HCl могут включать 1) процессы окисления на поверхности пылевого аэрозоля при увеличении содержания окислителей, таких как ОН и HO_2 , в процессе ГПБ; 2) выделение хлора из пыли в результате окисления кислотами, аналогично земным процессам; 3) мобилизация пылевых частиц, ранее не подвергавшихся воздействию УФ, процессами сальтации во время ГПБ; 4) волатилизация хлоридных минералов электрическими разрядами.

Более длительный мониторинг HCl с помощью ACS, охватывающий два сезона перигелия 34–35 МУ [Olsen et al., 2021b], показал, что HCl вновь появился в аналогичных количествах в течение следующего марсианского года 35 МУ, хотя

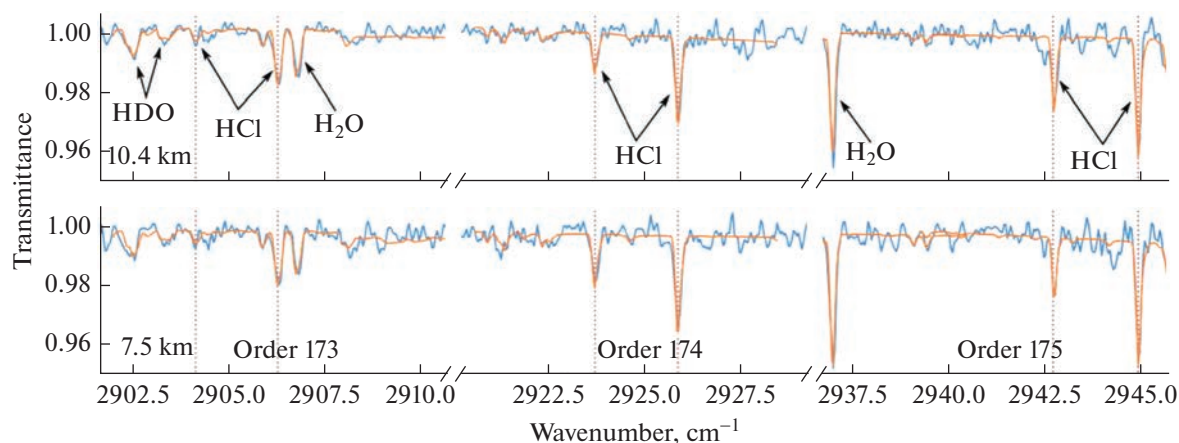


Рис. 4. Спектры ACS/TGO на двух высотах, демонстрирующие обнаружение линий HCl. Адаптировано из [Korablev et al., 2021].

активность пыли была значительно ниже и ГПБ не наблюдалась. Кроме того, несколько достоверных обнаружений в афелии ($L_s = 120^\circ$, при небольшом количестве пыли) подвергают сомнению корреляцию с пылью и гипотетически могут быть объяснены дегазацией поверхности. Данные NOMAD показали аналогичное сезонное поведение, но не обнаружения в афелии [Aoki et al., 2021]. С точки зрения газовой химии HCl должен быть стабильным резервуаром хлора в нижних слоях атмосферы Марса [Krasnopolsky, 2022]. Наблюдаемая изменчивость предполагает пока необъясненную потерю хлороводорода путем химических или физических процессов. Возможно, это связано с поглощением HCl на поверхности частиц облаков из водяного льда, присутствующих на протяжении всего запыленного периода, когда наблюдалась HCl ([Luginin et al., 2020]; см. раздел 3.5). Пиковые концентрации HCl на Марсе сопоставимы с концентрациями в верхней стратосфере и мезосфере Земли. Цикл разрушения озона, хорошо известный в стратосфере Земли, должен работать и на Марсе. В целом, источники и стоки HCl, а также его роль в химии марсианской атмосферы остаются гипотетическими. Открытие хлороводорода предлагает пересмотр фотохимии Марса, описание новых гетерогенных реакций. Для количественной оценки скорости образования и разрушения HCl необходимы новые лабораторные исследования и моделирование.

Высокое качество измеренных спектров ACS/TGO позволило оценить соотношение изотопологов H^{37}Cl и H^{35}Cl [Trokhimovskiy et al., 2021]. В отличие от других летучих веществ на Марсе, отношение $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ оказалось близко к земному значению. В среднем атмосфера Марса может быть слегка обеднена ^{37}Cl ($-7 \pm 20\%$), как и поверхность Марса. Этот результат поддерживает гипотезу образования HCl из хлорсодержащей

пыли, и позволяет предположить, что изотопы хлора не задействованы в долговременных циклах обмена между поверхностью и атмосферой.

Спектры высокого разрешения ACS/TGO MIR в диапазоне 2.2–4.2 мкм были проанализированы с целью поиска новых составляющих атмосферы Марса. Поиски серосодержащих газов, в том числе SO_2 , которые могли бы указывать на вулканическую дегазацию в 34–35 МУ, дали отрицательный результат [Braude et al., 2021]. Верхние пределы их концентраций по 1σ , установленные для наиболее оптимальных условий чувствительности, составили: $\text{SO}_2 \leq 20$ ppbv (диапазон 2481–2492 cm^{-1}), $\text{H}_2\text{S} \leq 15$ ppbv (3827–3833 cm^{-1}) и $\text{OCS} \leq 0.4$ ppbv (3460–3500 cm^{-1}), последний результат заметно улучшает предыдущие попытки обнаружения. Кроме того, установлен верхний предел содержания фосфина на Марсе. Недавнее обнаружение этого газа на Венере привлекло большое внимание и вызвало жаркие споры. Спектральный диапазон ACS захватывает несколько линий поглощения PH_3 , интенсивность которых сравнима с линиями CH_4 . Особенность PH_3 в диапазоне 2395–2406 cm^{-1} не была обнаружена в течение года, верхние пределы составили 0.1–0.6 ppbv [Olsen et al., 2021c].

3.5. Пыль и облака

Глобальная пылевая буря Марса 2018 г (МУ 34) наблюдалась шестью орбитальными аппаратами и двумя марсоходами. Ряд исследований, посвященных этой особенности марсианского климата, собраны в специальном выпуске журнала JGR-Planets под редакцией, в числе других, А.А. Федоровой [Guzewich et al., 2020]. Данные ACS/TGO дополняют эти исследования, предоставляя климатологию профилей облаков пыли и водяного льда из наблюдений солнечных затмений всеми кана-

лами (см. рис. 1) [Fedorova et al., 2020; Stcherbinine et al., 2020], свойства пылевых и ледяных частиц [Luginin et al., 2020] и мониторинг развития ГПБ из надирных наблюдений ACS TIRVIM [Vlasov et al., 2022].

Федорова [Fedorova et al., 2020] получили концентрации аэрозолей из данных солнечных затмения ACS TIRVIM с добавлением, где возможно, данных каналов NIR и MIR. Профили экстинкции были получены на 19 длинах волн в спектральном диапазоне 2–6 мкм, вне полос сильного газового поглощения. Характерная 3-микронная спектральная полоса водяного льда позволила разделить конденсационные облака и минеральную пыль или наложить ограничения на промежуточное состояние и определить одномодовое или бимодальное распределение частиц по размерам (в приближении Ми). Во время ГПБ пыль достигала высот более 60 км, а облака наблюдались на высотах до 100 км, перекрывая пыль. В [Stcherbinine et al., 2020] использовали спектры солнечных затмений ACS MIR, включая диапазон 3 мкм, где поглощает водяной лед, до и во время ГПБ MY 34. ACS MIR чувствителен к среднему размеру частиц (≤ 2 мкм). Отмечено смещение максимальной высоты облаков из водяного льда с ~ 60 км до ГПБ до ≥ 90 км во время шторма. На этих экстремальных высотах чаще наблюдались частицы небольшого размера (< 0.3 мкм). В целом размер частиц уменьшался с высотой, тогда как во время ГПБ на высотах 50–70 км были обнаружены более крупные частицы водяного льда (≥ 1.5 мкм). Чтобы ограничить распределение частиц обоих типов аэрозоля по размерам, [Luginin et al., 2020] использовали более широкий спектральный диапазон 0.7–6 мкм, сочетая данные солнечных затмений от всех трех каналов ACS. Были определены эффективный радиус, эффективная дисперсия, концентрация частиц и их массовая концентрация за период ГПБ. Эффективный радиус частиц пыли и водяного льда был в пределах 0.1–3.5 мкм и 0.1–5.5 мкм соответственно. Самые крупные аэрозольные частицы (> 2.5 мкм для пыли и > 3.5 мкм для водяного льда) были обнаружены ниже 10 км до начала и во время фазы затухания ГПБ. Во время пика ГПБ пыль достигла 85 км, эффективный радиус составлял 1–2 мкм при концентрации 0.1–1 см⁻³ и эффективной дисперсии 0.1. На высотах 50–100 км часто наблюдались изолированные слои из частиц водяного льда размером 0.1–1 мкм. Ниже 50 км пыль была смешана со льдом. Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что ГПБ существенно меняет процессы формирования и свойства высотных облаков водяного льда, по сравнению с обычной пылевой активностью в перигелии.

Наряду с температурой атмосферы и поверхности (см. раздел 3.3) [Vlasov et al., 2022] картировали содержание пыли в атмосфере по поглоще-

нию в полосе силикатов на 9 мкм в надирных спектрах ACS TIRVIM, наблюдая развитие ГПБ (рис. 5). Максимальная оптическая толщина пыли в тепловом диапазоне превысила 3. Шторм распространялся до 60° как на север, так и на юг.

Мониторинг аэрозолей в течение более длительного периода, охватывающего два MY, был продолжен в работах по перенасыщению водяного пара и облакам водяного льда. Щербинин [Stcherbinine et al., 2022] расширили анализ данных ACS MIR на период от начала миссии $L_s = 163^\circ 34$ MY до $L_s = 180^\circ 36$ MY. Типичная высота облаков летом и зимой различается на 20–40 км. Летом в средних широтах они достигли 80 км. Используя быстрый широтный дрейф солнечных затмений в некоторые периоды наблюдений, установлено, что облака в полярных регионах наблюдались как правило на 20–40 км ниже, чем в средних широтах. Сравнение ГПБ 34 MY с тем же сезоном 35 MY показало более высокие облака во время ГПБ и их более равномерное распределение по широте. Сравнение с РСМ показало, что модель недооценивает вертикальную протяженность облаков на 10–20 км. Федорова [Fedorova et al., 2023] для поддержки своего исследования перенасыщения водяного пара (см. Раздел 3.1) построили профили оптической толщины пылевых и ледяных облаков в зависимости от широты. Сечения были получены по той же методике, что и в [Fedorova et al., 2020] для 30° бинов L_s от $L_s = 180^\circ 34$ MY до конца 35 MY.

Ряд исследований касается проблемы пылевых вихрей на Марсе, включая теоретические оценки, интерпретацию данных посадочных аппаратов и статистический анализ. Курганский [Kurgansky, 2019] связали статистику перепадов давления, наблюдаемую метеостанцией на поверхности, с фактической статистикой центральных перепадов давления в конвективных вихрях, чтобы оценить распределение всей популяции вихрей. Применение этой статистики к метеорологическим данным (измерения давления) спускаемого аппарата InSight выявило беспрецедентно высокое количество конвективных вихрей на км² в районе посадки InSight [Kurgansky, 2021]. [Kurgansky, 2020] рассмотрели радиальную протяженность конвективного вихря/пылевого дьявола на основе записей давления одной станции и построили полное частотно-размерное распределение вихрей, наблюдаемых Curiosity. Теоретически обоснованы экспоненциальные и степенные аналитические представления распределений конвективных вихрей в координатах размер-частота и интенсивность-частота и рассмотрено их применение к Земле и Марсу [Kurgansky, 2022]. Связь диаметра вихря с обуховским масштабом длины в пограничном слое планеты позволила описать всплеск конвективной вихревой активности, наблюдавшийся северной осенью в районе

реносу тепла из авроральных зон и перераспределению энергии по широтам. Результаты помогают объяснить, почему термосфера Сатурна (и других внешних планет) горячее, чем следует из радиационного баланса.

Краснопольский [Krasnopolsky, 2020a] адаптировал модель, разработанную для атмосферы и ионосферы Титана, к Плутону, который наблюдался во время пролета New Horizons. Входными данными были поверхностное давление 11.5 мкбар и средний температурный профиль по данным радио-затмений и солнечных/звездных затмений в УФ-диапазоне. Модель учитывала более 400 реакций и охватывала высоты вплоть до экзобазы на 1600 км. Результаты включают влияние дневной ионосферы на нейтральный состав, оценки потерь водорода и метана, конденсации и полимеризации углеводородов и нитрилов. Обнаружено, что сезонные колебания метана существенно влияют на фотохимию Плутона и Тритона. Следующая работа [Krasnopolsky, 2020b] позволила привести фотохимическую модель в соответствие с обнаружением метилацетилена C_3H_4 и объяснить измеренное отношение $^{14}N/^{15}N$ в HCN, гораздо большее значение которого $HC^{14}N/HC^{15}N > 125$ на Плутоне выглядело странно по сравнению с 60 на Титане. Анализ подтвердил, что основным процессом фракционирования изотопов азота является предиссоциация N_2 на длине волны 80–100 нм. Наблюдаемая двукратная разница может быть обусловлена диффузионным обеднением тяжелого изотопа HCN и предиссоциацией N_2 . На Плутоне оба процесса происходят значительно выше гомопаузы на высоте ~ 100 км, тогда как на Титане $HC^{14}N/HC^{15}N$ наблюдались на высоте 100–500 км, предиссоциация происходит ≤ 1000 км, и то и другое ниже гомопаузы на высоте 1000 км, и диффузионного обеднения не происходит. [Krasnopolsky, 2020b] также оценили время жизни N_2 в атмосфере Плутона и скорость его современной диссипации, главным образом, за счет фоторазложения. Вычислено фракционирование изотопов во N_2 льде, с учетом образования и конденсации нитрилов, диффузионного разделения и фракционирования при тепловом выходе.

5. СПЕКТРОСКОПИЯ, СВЯЗАННАЯ С ПЛАНЕТАРНЫМИ АТМОСФЕРАМИ

Атмосфера Марса, наблюдаемая с высоким спектральным разрешением, может выступать как гигантская лабораторная кювета, помогающая углубить знания в области CO_2 -спектроскопии. В спектральном диапазоне, используемом для поиска метана в спектрах ACS/TGO MIR (2900–3300 cm^{-1} ; см. раздел 3.4) были обнаружены новые поглотители. Особенности, препятствующие обнаружению метана, были отнесены к озону

[Olsen et al., 2020] и линиям CO_2 , отсутствующим в спектроскопических базах данных [Trokhimovskiy et al., 2020], см. рис. 3.

Частоты 30 наблюдаемых линий совпали с теоретически рассчитанными Р-, Q- и R-ветвями магнитодипольной или электроквадрупольной полосы основного изотополога CO_2 [Perevalov et al., 2021]. Эта полоса $\nu_2 + \nu_3$, запрещенная для электрического дипольного поглощения, ранее никогда не наблюдалась и численно не рассчитывалась. Относительная глубина ветвей говорит о магнитно-дипольной природе полосы [Trokhimovskiy et al., 2020]. Открытие запрещенной системы положило начало дальнейшим исследованиям. [Yachmenev et al., 2021] опубликовали дополнительные теоретические предсказания для электроквадрупольной полосы и приписали электроквадрупольным линиям две слабые особенности в спектрах ACSMIR. [Borkov et al., 2021] нашли, что интенсивности линий обнаруженной полосы в лабораторных спектрах в ~ 2 раза меньше, чем в марсианских данных. Аналогичные измерения были выполнены группой из Гренобля [Fleurbaye et al., 2021], измеривших в лаборатории интенсивности как магнитодипольной, так и электроквадрупольной систем и обнаруживших хорошее согласие с [Borkov et al., 2021] относительно магнитного диполя. По итогам этих исследований магнитодипольная система $\nu_2 + \nu_3$ включена в последнюю версию HITRAN 2020 [Karlavets et al., 2021; Gordon et al., 2022].

Рассмотрев колебательный магнетизм в симметричной линейной молекуле, [Kazakov, Vigasin, 2021] поставили под сомнение магнитно-дипольную природу полосы, измеренной в атмосфере Марса или в лаборатории, поскольку ее интегральная интенсивность превышала теоретически ожидаемое значение. [Chistikov, 2023] разрешили кажущееся противоречие, приписав избыточную интенсивность электроквадрупольной системе, многие линии которой перекрываются с линиями магнитного диполя.

Отметим также многочисленные улучшения введенные в HITRAN 2020 в отношении атмосфер планет, включая параметры уширения линий в CO_2 , H_2 и He, обновление столкновительного поглощения [Karman et al., 2019; см. также Finenko et al., 2022], внесение изменений в списки линий этана, фосфина, SO и других важных для планетных атмосфер молекул, улучшение описания для высоких температур и т. д.

Другие спектроскопические исследования включают [Deichuli et al., 2022], измеривших параметры линий H_2O в ближнем ИК-диапазоне в CO_2 , и уже использованных для анализа воды в атмосфере Марса [Fedorova et al., 2023]. [Gamache et al., 2022] представили расчет внутренних колебательных и вращательных статистических сумм, необ-

ходимых для NLTE-анализа девяти молекул, которые часто наблюдаются в условиях нарушения локального термодинамического равновесия в планетных атмосферах: H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , CH_4 , NO , NO_2 и OH .

6. ВЫВОДЫ

Исследования атмосфер планет за период 2019–2022 гг. во многом опирались на результаты космических проектов EхоMars TGO, Mars Express, Venus Express и Акацуки. Ряд из них, под руководством или при решающем вкладе российских ученых, были отмечены как наиболее важные результаты Института космических исследований (ИКИ) РАН или Научного совета по астрономии РАН. Мы приводим эти результаты ниже, цитируя также некоторые последующие исследования:

– Динамика атмосферы Венеры на нескольких уровнях по данным многоволновых наблюдений Venus Express и Акацуки [Patsaeva et al., 2019; Gorinov et al., 2021; Khatuntsev et al., 2022a, 2022b]. Отслеживание облаков позволило получить поля ветра на четырех уровнях внутри облачного слоя Венеры, соответствующих примерно 48, 55, 60 и 70 км. Перепад высот между уровнями менялся в зависимости от широты и за время измерений. Было обнаружено, что скорость суперротации зависит от местного солнечного времени и широты и отражает крупномасштабную топографию. Меридиональное направление и скорость ветра могут указывать на конфигурацию циркуляции Хэдли на уровне облаков, однако для ее формального описания еще недостаточно данных. В южном полушарии на высоте 70 км наблюдалась полярная (прямая) ветвь ячейки Хэдли главного облачного слоя. Обратная ветвь находилась в районе нижней границы облаков (55 км). В низких широтах данные в диапазоне 1.74 мкм (48 км) позволяют различить фрагмент полярной ветви ячейки Хэдли нижнего облачного слоя.

– Низкий верхний предел содержания метана в марсианской атмосфере, установленный по данным наблюдений EхоMars TGO и противоречащий измерениям Curiosity на поверхности [Korablev et al., 2019; Montmessin et al., 2021]. По наблюдениям ACS/TGO верхний предел содержания метана составил 0.02–0.05 частей на миллиард, что на порядок ниже установленных Curiosity фоновых значений (в среднем 0.48 ppbv). Солнечные затмения TGO зондируют высоты выше 3–15 км, а лучшие верхние пределы достигаются в полярных районах, где атмосфера чище. Измерения в районе кратера Гейла (около экватора) затруднены аэрозольным поглощением, там получены лучшие верхние пределы составляли 0.065–0.2 ppbv. Время перемешивания в атмосфере составляет 1–3 месяца, а время жизни ме-

тана ≥ 300 лет, метан накапливается, и в конечном итоге его должен обнаружить TGO. Единственный способ согласовать два источника данных — это пока неясный процесс быстрого разрушения метана, который не затрагивал бы другие химически-активные соединения атмосферы.

– Распределение и перенасыщение атмосферной воды на Марсе по данным наблюдений EхоMars TGO и Mars Express и выводы относительно диссипации воды в истории планеты [Fedorova et al., 2020, 2021, 2023; Belyaev et al., 2021; Montmessin et al., 2022; Shaposhnikov et al., 2019, 2022]. Потеря воды с Марса происходит в результате ее фотодиссоциации с последующей диссипацией водорода. Чем выше поднимается молекула воды, тем эффективнее идет этот процесс. Наблюдения ACS/TGO впервые документировали вертикальное распределение воды до больших высот (≤ 120 км). Одновременные измерения температуры, пыли и облаков позволили изучить состояние насыщения водяного пара. В южном полушарии вода достигала больших высот в течение всего сезона перигелия, включая глобальную пыльную бурю и региональный шторм. Обнаружено повсеместное перенасыщение водяного пара, часто наблюдаемое одновременно с облаками. Это значит, что холодная область тропопаузы, препятствующая попаданию воды в верхние слои атмосферы на Земле, на Марсе не работает, и диссипация воды с Марса идет легче, чем считалось ранее.

– Обнаружение и исследование хлористого водорода в атмосфере Марса по наблюдениям EхоMars TGO [Korablev et al., 2021; Olsen et al., 2021b; Trokhimovskiy et al., 2021]. В спектрах ACS/TGO уверенно идентифицированы 12 линий хлористого водорода (HCl) — нового газа в атмосфере Марса. HCl зарегистрирован в количестве 1–4 ppbv в течение ГПБ 34 MY и постепенно исчез после ее окончания. Газ вновь появился в следующем, 35 MY, хотя глобальной пыльной бури не было. Вне пыльного сезона верхние пределы были ≤ 0.1 ppbv, в согласии с прежними верхними пределами по данным наземных и космических обсерваторий. HCl производится ежегодно в пыльный сезон, вероятно, в результате гетерогенных реакций с участием пыли и водяного пара. Не исключены и источники на поверхности. В отличие от других газов, обогащенных тяжелыми изотопами в процессе атмосферных потерь, изотопное соотношение $\text{H}^{37}\text{Cl}/\text{H}^{35}\text{Cl}$ на Марсе оказалось близко к земному, что позволяет предположить, что хлор в HCl не участвует в каких-либо длительных процессах атмосфера-поверхность.

– Распределение и химические взаимодействия угарного газа (CO), а также вертикальная структура атмосферы Марса по данным EхоMars TGO [Olsen et al., 2021a; Fedorova et al., 2022; Belyaev et al., 2022; Starichenko et al., 2021]. По измере-

ниям ACS TGO впервые составлена климатология вертикального распределения окиси углерода (CO) в марсианской атмосфере. Относительное содержание CO меняется, по мере того как сезонно конденсируется и сублимируется основной компонент марсианской атмосферы (CO₂). Впервые наблюдались следующие особенности: 1) обогащенный слой CO толщиной 10–20 км в южных полярных районах в конце зимы, указывающий на активную атмосферную конденсацию, 2) увеличение относительного содержания в 4–5 раз выше 50 км в момент равноденствия, свидетельство переноса воздуха, обогащенного CO, 3) уменьшение содержания CO во время ГПБ 34 МУ, связанное с увеличением содержания водяного пара, влияющим на скорость потери CO и его преобразования в CO₂. Вертикальное распределение плотности и температуры атмосферы было восстановлено в рекордном диапазоне высот 10–180 км. Получены сезонные изменения высот мезопаузы и гомопаузы. Впервые вдоль всего столба атмосферы исследованы волновые эффекты, в том числе характерное затухание волн плавучести в области гомопаузы.

Сотрудничество ЕКА и Роскосмоса по посадочной платформе и роверу ExoMars 2022 было прекращено в 2022 г. по причинам, далеким от научных или технических вопросов. Это большая потеря для российской космической науки в целом и планетной метеорологии в частности. Судьба российских научных приборов этого проекта еще решается. Положительным моментом является то, что сотрудничество по первой части проекта, ExoMars TGO продолжается, и миссия обещает продлиться долго. В июне 2023 г. проект Mars Express отметил 20-летие запуска, и в настоящее время готовится серия статей, обобщающих результаты миссии за эти годы. Операции Mars Express недавно были одобрены до 2026 года с возможным продлением. Помимо этих двух текущих проектов, подтвержденных исследований, имеющих отношение к планетным атмосферам, до 2029–2031 гг. не планируется. В эти сроки возможен запуск амбициозной миссии Роскосмоса “Венера-Д” [Zasova et al., 2020], включающей орбитальный аппарат с научными приборами, спускаемый аппарат с возможностью проведения атмосферных измерений во время спуска на поверхность и аэростатные зонды, ставящие, среди других задач, оценку обитаемости облачного слоя Венеры [Limaye et al., 2021].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Губенко В.Н., Кириллович И.А., Губенко Д.В., Андреев В.Е., Губенко Т.В. Активность мелкомасштабных внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры путем использования радиозатменных измерений интенсивности сигналов ($\Lambda = 32$ см) со спутников Венера-15 и -16 // *Астр. Вестн.* 2021. Т. 55. № 1. С. 3–12.
- Извекова Ю.Н., Попель С.И., Извеков О.Я. К вопросу о расчете параметров вихрей в приповерхностной атмосфере Марса // *Астр. Вестн.* 2019. Т. 53. № 6. С. 415–422.
<https://doi.org/10.1134/S0038094619050058>
- Кораблев О.И. Российские исследования планетных атмосфер в 2015–2018 гг. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2020. Т. 56. № 2. С. 158–169.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820020061>
- Мингалев И.В., Родин А.В., Орлов К.Г. Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Титана для условий равноденствия // *Астр. Вестн.* 2019. Т. 53. № 4. С. 291–308.
<https://doi.org/10.1134/S0038094619040051>
- Национальный отчет России по метеорологии и атмосферным наукам в 2019–2022 гг.: XXXVIII Генеральная Ассамблея Международного союза геодезии и геофизики (Берлин, Германия, 11–20 июля 2023 г.) / Ред.: И.И. Мохов, А.А. Криволуцкий. Москва: МАКС Пресс, 2023. 440 с.
<https://doi.org/10.29003/m3460.978-5-317-07017-5>
- Шапошников Д.С., Медведев А.С., Родин А.В. Моделирование фотодиссоциации водяного пара в сезон пылевых бурь на Марсе // *Астр. Вестн.* 2022. Т. 56. № 1. С. 27–35.
<https://doi.org/10.1134/S0038094622010051>
- Шематович В.И. Атмосферные потери атомарного кислорода при протонных авроральных событиях на Марсе // *Астр. Вестн.* 2021. Т. 55. № 4. С. 322–333.
<https://doi.org/10.1134/S0038094621040079>
- Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жерар Ж.-К., Хубер Б. Кинетическая Монте-Карло модель высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями в атмосферу Марса с учетом измеренного магнитного поля // *Астр. Ж.* 2019. Т. 96. № 10. С. 836–846.
<https://doi.org/10.1134/S1063772919100056>
- Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жилкин А.Г. Влияние вариаций протяженной водородной короны Марса на эффективность перезарядки с протонами солнечного ветра // *Астр. Ж.* 2021. Т. 98. № 3. С. 232–238.
<https://doi.org/10.1134/S1063772921030033>
- Шематович В.И., Калиничева Е.С. Убегание атомов кислорода из атмосферы при протонных полярных сияниях на Марсе // *Астр. Ж.* 2020. Т. 97. № 7. С. 608–616.
<https://doi.org/10.1134/S1063772920080089>
- Alday J., Trokhimovskiy A., Irwin P.G.J., et al. Isotopic fractionation of water and its photolytic products in the atmosphere of Mars // *Nature Astron.* 2021a.V. 5. P. 943–950.
<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01389-x>
- Alday J., Wilson C.F., Irwin P.G.J., et al. Isotopic Composition of CO₂ in the Atmosphere of Mars: Fractionation by Diffusive Separation Observed by the ExoMars Trace Gas Orbiter // *J. Geophys. Res. (Planets).* 2021b. V. 126. id. e06992.
<https://doi.org/10.1029/2021JE006992>
- Alday J., Wilson C.F., Irwin P.G.J., et al. Oxygen isotopic ratios in Martian water vapour observed by ACS MIR on

- board the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Astron. Astrophys.* 2019. V. 630. id. A91.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936234>
- Aoki S., Daerden F., Viscardy S., et al. Annual Appearance of Hydrogen Chloride on Mars and a Striking Similarity With the Water Vapor Vertical Distribution Observed by TGO/NOMAD // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. id. e92506.
<https://doi.org/10.1029/2021GL092506>
- Aoki S., Vandaele A.C., Daerden F., et al. Global Vertical Distribution of Water Vapor on Mars: Results From 3.5 Years of ExoMars-TGO/NOMAD Science Operations // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07231
<https://doi.org/10.1029/2022JE007231>
- Belyaev D.A., Fedorova A.A., Trokhimovskiy A., et al. Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars From ACS/TGO CO₂ Spectroscopy // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e2022JE007286.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007286>
- Belyaev D.A., Fedorova A.A., Trokhimovskiy A., et al. Revealing a High Water Abundance in the Upper Mesosphere of Mars With ACS Onboard TGO // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. id. e93411.
<https://doi.org/10.1029/2021GL093411>
- Bertaux J.-L., Khatuntsev I.V., Hauchecorne A., et al. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2016. V. 121. P. 1087–1101.
<https://doi.org/10.1002/2015JE004958>
- Borkov Y.G., Solodov A.M., Solodov A.A., Perevalov V.I. Line intensities of the 01111–00001 magnetic dipole absorption band of 12C16O2: Laboratory measurements // *J. Molec. Spectr.* 2021. V. 376. id. 111418.
<https://doi.org/10.1016/j.jms.2021.111418>
- Braude A.S., Montmessin F., Olsen K.S., et al. No detection of SO₂, H₂S, or OCS in the atmosphere of Mars from the first two Martian years of observations from TGO/ACS // *Astron. Astrophys.* 2022. V. 658. id. A86.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142390>
- Brown Z.L., Medvedev A.S., Starichenko E.D., et al. Evidence for Gravity Waves in the Thermosphere of Saturn and Implications for Global Circulation // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. id. e97219.
<https://doi.org/10.1029/2021GL097219>
- Chaffin M.S., Chaufray J.-Y., Stewart I., et al. Unexpected variability of Martian hydrogen escape // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 314–320.
<https://doi.org/10.1002/2013GL058578>
- Chaffin M.S., Kass D.M., Aoki S., et al. Martian water loss to space enhanced by regional dust storms // *Nature Astron.* 2021. V. 5. P. 1036–1042.
<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01425-w>
- Chistikov D.N. Magnetic dipole and quadrupole transitions in the v₂ + v₃ vibrational band of carbon dioxide // *J. Chem. Phys.* 2023. V. 158. id. 134307.
<https://doi.org/10.1063/5.0144201>
- Daerden F., Neary L., Viscardy S., et al. Mars atmospheric chemistry simulations with the GEM-Mars general circulation model // *Icarus*. 2019. V. 326. P. 197–224.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.030>
- Deichuli V.M., Petrova T.M., Solodov A.M., et al. Water vapor absorption line parameters in the 6760–7430 cm⁻¹ region for application to CO₂-rich planetary atmosphere // *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.* 2022. V. 293. P. 108386.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2022.108386>
- Evdokimova D., Belyaev D., Montmessin F., et al. Improved calibrations of the stellar occultation data accumulated by the SPICAV UV onboard Venus Express // *Planet. Space Sci.* 2020. V. 184. id. 104868.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104868>
- Evdokimova D., Belyaev D., Montmessin F., et al. The Spatial and Temporal Distribution of Nighttime Ozone and Sulfur Dioxide in the Venus Mesosphere as Deduced From SPICAV UV Stellar Occultations // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2021. V. 126. id. e06625.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006625>
- ExoMars Trace Gas Orbiter. One Martian Year of Science. Topical collection // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2023. [https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/\(ISSN\)2169-9100.ExoMarsTGO1](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.ExoMarsTGO1).
- Fan S., Guerlet S., Forget F., et al. Thermal Tides in the Martian Atmosphere Near Northern Summer Solstice Observed by ACS/TIRVIM Onboard TGO // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. id. e97130.
<https://doi.org/10.1029/2021GL097130>
- Fedorova A.A., Montmessin F., Korablev O., et al. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season // *Science*. 2020. V. 367. P. 297–300.
<https://doi.org/10.1126/science.aay9522>
- Fedorova A., Montmessin F., Korablev O., et al. Multi-Annual Monitoring of the Water Vapor Vertical Distribution on Mars by SPICAM on Mars Express // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2021. V. 126. id. e06616.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006616>
- Fedorova A., Montmessin F., Trokhimovskiy A., et al. A Two-Martian Years Survey of the Water Vapor Saturation State on Mars Based on ACS NIR/TGO Occultations // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2023. V. 128. id. e2022JE007348.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007348>
- Fedorova A., Trokhimovskiy A., Lefèvre F., et al. Climatology of the CO Vertical Distribution on Mars Based on ACS TGO Measurements // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07195.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007195>
- Fleurbaey H., Grilli R., Mondelain D., Kassi S., Yachmenev A., Yurchenko S. N., Campargue A. Electric-quadrupole and magnetic-dipole contributions to the v₂+ v₃ band of carbon dioxide near 3.3 μm // *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.* 2021. V. 266. id. 107558.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107558>
- Forget F., Korablev O., Venturini J., et al. Editorial: Topical Collection on Understanding the Diversity of Planetary Atmospheres // *Space Sci. Rev.* 2021. V. 217. id. 51.
<https://doi.org/10.1007/s11214-021-00820-z>
- Gamache R.R., Vispoel B., Rey M., et al. Partition sums for non-local thermodynamic equilibrium conditions for nine molecules of importance in planetary atmospheres // *Icarus*. 2022. V. 378. id. 114947.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.114947>

- Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2022. V. 277. id. 107949. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>
- Gorinov D.A., Zasova L.V., Khatuntsev I.V., et al. Winds in the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 μm Images // Atmosphere. 2021. V. 12. id. 186. <https://doi.org/10.3390/atmos12020186>
- Guerlet S., Ignatiev N., Forget F., et al. Thermal Structure and Aerosols in Mars' Atmosphere From TIR-VIM/ACS Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter: Validation of the Retrieval Algorithm // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07062. <https://doi.org/10.1029/2021JE007062>
- Guzewich S.D., Fedorova A.A., Kahre M.A., Toigo A.D. Studies of the 2018/Mars Year 34 Planet-Encircling Dust Storm // J. Geophys. Res. (Planets). 2020. V. 125. id. e06700. <https://doi.org/10.1029/2020JE006700>
- Holmes J.A., Lewis S.R., Patel M.R., et al. Enhanced water loss from the martian atmosphere during a regional-scale dust storm and implications for long-term water loss // Earth Planet. Sci. Lett. 2021. V. 571. id. 117109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117109>
- Holmes J.A., Lewis S.R., Patel M.R., et al. Global Variations in Water Vapor and Saturation State Throughout the Mars Year 34 Dusty Season J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e2022JE007203. <https://doi.org/10.1029/2022JE007203>
- Imamura T., Mitchell J., Lebonnois S., et al. Superrotation in Planetary Atmospheres // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. id. 87. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00703-9>
- Karlovets E.V., Gordon I.E., Rothman L.S., et al. The update of the line positions and intensities in the line list of carbon dioxide for the HITRAN2020 spectroscopic database // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2021. V. 276. id. 107896. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107896>
- Karman T., Gordon I. E., van der Avoird A., et al. Update of the HITRAN collision-induced absorption section // Icarus. 2019. V. 328. P. 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.02.034>
- Kazakov K.V., Vigin A.A. Vibrational magnetism and the strength of magnetic dipole transition within the electric dipole forbidden $v_2 + v_3$ absorption band of carbon dioxide // Molec. Phys. 2021. V. 119:12. id. e1934581. <https://doi.org/10.1080/00268976.2021.1934581>
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // Icarus. 2013. V. 226. P. 140–158. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., et al. Twelve-Year Cycle in the Cloud Top Winds Derived from VMC/Venus Express and UVI/Akatsuki Imaging // Atmosphere. 2022b. V. 13:12. id. 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos13122023>
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., et al. Winds in the Middle Cloud Deck From the Near-IR Imaging by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // J. Geophys. Res. (Planets). 2017. V. 122. P. 2312–2327. <https://doi.org/10.1002/2017JE005355>
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Zasova L.V., et al. Winds From the Visible (513 nm) Images Obtained by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // J. Geophys. Res. (Planets). 2022a. V. 127. id. e07032. <https://doi.org/10.1029/2021JE007032>
- Knutsen E.W., Montmessin F., Verdier L., et al. Water Vapor on Mars: A Refined Climatology and Constraints on the Near-Surface Concentration Enabled by Synergistic Retrievals // J. Geophys. Res. (Planets). 2022. V. 127. id. e07252. <https://doi.org/10.1029/2022JE007252>
- Knutsen E.W., Villanueva G.L., Liuzzi G., et al. Comprehensive investigation of Mars methane and organics with ExoMars/NOMAD // Icarus. 2021. V. 357. id. 114266. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114266>
- Korablev O.I. Studies of planetary atmospheres in Russia (2011–2014) // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2016. V. 52. P. 483–496. <https://doi.org/10.1134/S0001433816050066>
- Korablev O.I. Trace species in planetary atmospheres: Some results of TGO ExoMars // Astron. Astrophys. Trans. 2021. V. 32. P. 289–304.
- Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., et al. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. id. 7. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>
- Korablev O., Olsen K.S., Trokhimovskiy A., et al. Transient HCl in the atmosphere of Mars // Science Advances. 2021. V. 7. id. eabe4386. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe4386>
- Korablev O., Vandaale A.C., Montmessin F., et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations // Nature. 2019. V. 568. P. 517–520. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1096-4>
- Krasnopolsky V.A. A photochemical model of Pluto's atmosphere and ionosphere // Icarus. 2020a. V. 335. id. 113374. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.07.008>
- Krasnopolsky V.A. On the methylacetylene abundance and nitrogen isotope ratio in Pluto's atmosphere // Planet. Space Sci. 2020b. V. 192. id. 105044. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.105044>
- Krasnopolsky V.A. Photochemistry of HCl in the martian atmosphere // Icarus. 2022. V. 374. id. 114807. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114807>
- Krasnopolsky V.A. Photochemistry of water in the martian thermosphere and its effect on hydrogen escape // Icarus. 2019. V. 321. P. 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.10.033>
- Krasnopolsky V.A. Seasonal and latitudinal variations of the HDO/H₂O ratio in the martian atmosphere // Planet. Space Sci. 2021. V. 208. id. 105345. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2021.105345>
- Kurgansky M.V. An estimate of convective vortex activity at the InSight landing site on Mars // Icarus. 2021. V. 358. id. 114200. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114200>

- Kurgansky M.V.* On determination of the size-frequency distribution of convective vortices in pressure time-series surveys on Mars // *Icarus*. 2020. V. 335. id. 113389. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113389>
- Kurgansky M.V.* On the statistical distribution of pressure drops in convective vortices: Applications to Martian dust devils // *Icarus*. 2019. V. 317. P. 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.08.004>
- Kurgansky M.V.* Statistical Distribution of Atmospheric Dust Devils on Earth and Mars // *Boundary-Layer Meteorol.* 2022. V. 184. P. 381. <https://doi.org/10.1007/s10546-022-00713-w>
- Lebonnois S., Hourdin F., Eymet V., et al.* Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2010. V. 115. id. E06006. <https://doi.org/10.1029/2009JE003458>
- Lefèvre F., Trokhimovskiy A., Fedorova A., et al.* Relationship Between the Ozone and Water Vapor Columns on Mars as Observed by SPICAM and Calculated by a Global Climate Model // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2021. V. 126. id. e06838. <https://doi.org/10.1029/2021JE006838>
- Limaye S.S., Zelenyi L., Zasova L.* Introducing the Venus Collection—Papers from the First Workshop on Habitability of the Cloud Layer // *Astrobiology*. 2021. V. 21. P. 1157–1162. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0142>
- Luginin M., Fedorova A., Ignatiev N., et al.* Properties of Water Ice and Dust Particles in the Atmosphere of Mars During the 2018 Global Dust Storm as Inferred From the Atmospheric Chemistry Suite // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2020. V. 125. id. e06419. <https://doi.org/10.1029/2020JE006419>
- Luo Y., Mischna M.A., Lin J.C., et al.* Mars Methane Sources in Northwestern Gale Crater Inferred From Back Trajectory Modeling // *Earth Space Sci.* 2021. V. 8. id. e01915. <https://doi.org/10.1029/2021EA001915>
- Määttänen A., Lefèvre F., Verdier L., et al.* Ozone vertical distribution in Mars Years 27–30 from SPICAM/MEX UV occultations // *Icarus*. 2022. V. 387. id. 115162. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115162>
- Marcq E., Baggio L., Lefèvre F., et al.* Discovery of cloud top ozone on Venus // *Icarus*. 2019. V. 319. P. 491–498. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.10.006>
- Marcq E., Lea Jessup K., Baggio L., et al.* Climatology of SO₂ and UV absorber at Venus' cloud top from SPICAV-UV nadir dataset // *Icarus*. 2020. V. 335. id. 113368. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.07.002>
- Montmessin F., Belyaev D.A., Lefèvre F., et al.* Reappraising the Production and Transfer of Hydrogen Atoms From the Middle to the Upper Atmosphere of Mars at Times of Elevated Water Vapor // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07217. <https://doi.org/10.1029/2022JE007217>
- Montmessin F., Bertaux J.-L., Lefèvre F., et al.* A layer of ozone detected in the nightside upper atmosphere of Venus // *Icarus*. 2011. V. 216. P. 82–85. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.08.010>
- Montmessin F., Korabiev O.I., Trokhimovskiy A., et al.* A stringent upper limit of 20 pptv for methane on Mars and constraints on its dispersion outside Gale crater // *Astron. Astrophys.* 2021. V. 650. id. A140. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140389>
- Montmessin F., Fouchet T., Forget F.* Modeling the annual cycle of HDO in the Martian atmosphere. // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110:E3. id. E10004. <https://doi.org/10.1029/2004JE002357>
- Moores J.E., King P.L., Smith C.L., et al.* The Methane Diurnal Variation and Microseepage Flux at Gale Crater, Mars as Constrained by the ExoMars Trace Gas Orbiter and Curiosity Observations // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 9430–9438. <https://doi.org/10.1029/2019GL083800>
- Mumma M.J., Villanueva G.L., Novak R.E., et al.* Strong Release of Methane on Mars in Northern Summer 2003 // *Science*. 2009. V. 323. P. 1041–1045. <https://doi.org/10.1126/science.1165243>
- Olsen K.S., Fedorova A.A., Trokhimovskiy A., et al.* Seasonal Changes in the Vertical Structure of Ozone in the Martian Lower Atmosphere and Its Relationship to Water Vapor // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e2022JE007213. <https://doi.org/10.1029/2022JE007213>
- Olsen K.S., Lefèvre F., Montmessin F., et al.* First detection of ozone in the mid-infrared at Mars: implications for methane detection // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 639. id. A141. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038125>
- Olsen K.S., Lefèvre F., Montmessin F., et al.* The vertical structure of CO in the Martian atmosphere from the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Nature Geosci.* 2021a. V. 14. P. 67–71. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00678-w>
- Olsen K.S., Trokhimovskiy A., Braude A.S., et al.* Upper limits for phosphine (PH₃) in the atmosphere of Mars // *Astron. Astrophys.* 2021c. V. 649. id. L1. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140868>
- Olsen K.S., Trokhimovskiy A., Montabone L., et al.* Seasonal reappearance of HCl in the atmosphere of Mars during the Mars year 35 dusty season // *Astron. Astrophys.* 2021b. V. 647. id. A161. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140329>
- Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., et al.* Solar-Related Variations of the Cloud Top Circulation Above Aphrodite Terra From VMC/Venus Express Wind Fields // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2019. V. 124. P. 1864–1879. <https://doi.org/10.1029/2018JE005620>
- Perevalov V.I., Trokhimovskiy A.Y., Lukashevskaya A.A., et al.* Magnetic dipole and electric quadrupole absorption in carbon dioxide // *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.* 2021. V. 259. id. 107408. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107408>
- Pinto J.P., Li J., Mills F.P., Marcq E., Evdokimova D., Belyaev D., Yung Y.L.* Sulfur monoxide dimer chemistry as a possible source of polysulfur in the upper atmosphere of Venus // *Nature Comm.* 2021. V. 12:1. P. 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20451-2>
- Rajendran K., Lewis S.R., Holmes J.A., et al.* Enhanced Super-Rotation Before and During the 2018 Martian Global Dust Storm // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. id. e94634. <https://doi.org/10.1029/2021GL094634>

- Rossi L., Vals M., Alday J., et al. The HDO Cycle on Mars: Comparison of ACS Observations With GCM Simulations // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07201.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007201>
- Rossi L., Vals M., Montmessin F., et al. The Effect of the Martian 2018 Global Dust Storm on HDO as Predicted by a Mars Global Climate Model // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. id. e09062.
<https://doi.org/10.1029/2020GL090962>
- Shaposhnikov D.S., Medvedev A.S., Rodin A.V., et al. Martian Dust Storms and Gravity Waves: Disentangling Water Transport to the Upper Atmosphere // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07102.
<https://doi.org/10.1029/2021JE007102>
- Shaposhnikov D.S., Medvedev A.S., Rodin A.V., Hartogh P. Seasonal Water “Pump” in the Atmosphere of Mars: Vertical Transport to the Thermosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 4161–4169.
<https://doi.org/10.1029/2019GL082839>
- Starichenko E.D., Belyaev D.A., Medvedev A.S., et al. Gravity Wave Activity in the Martian Atmosphere at Altitudes 20–160 km From ACS/TGO Occultation Measurements // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2021. V. 126. id. e06899.
<https://doi.org/10.1029/2021JE006899>
- Stcherbinine A., Montmessin F., Vincendon M., et al. A Two Martian Years Survey of Water Ice Clouds on Mars With ACS Onboard TGO // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e2022JE007502.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007502>
- Stcherbinine A., Vincendon M., Montmessin F., et al. Martian Water Ice Clouds During the 2018 Global Dust Storm as Observed by the ACS-MIR Channel Onboard the Trace Gas Orbiter // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2020. V. 125. id. e06300.
<https://doi.org/10.1029/2019JE006300>
- Streeter P.M., Lewis S.R., Patel M.R., et al. Asymmetric Impacts on Mars’ Polar Vortices From an Equinoctial Global Dust Storm // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2021. V. 126. id. e06774.
<https://doi.org/10.1029/2020JE006774>
- Trokhimovskiy A., Fedorova A.A., Olsen K.S., et al. Isotopes of chlorine from HCl in the Martian atmosphere // *Astron. Astrophys.* 2021. V. 651. id. A32.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140916>
- Trokhimovskiy A., Perevalov V., Korablev O., et al. First observation of the magnetic dipole CO₂ absorption band at 3.3 μm in the atmosphere of Mars by the ExoMars Trace Gas Orbiter ACS instrument // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 639. id. A142.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038134>
- Vals M., Rossi L., Montmessin F., et al. Improved Modeling of Mars’ HDO Cycle Using a Mars’ Global Climate Model // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07192.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007192>
- Vandaele A. C., Korablev O., Daerden F., et al. Martian dust storm impact on atmospheric H₂O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter // *Nature*. 2019. V. 568. P. 521–525.
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1097-3>
- Vlasov P., Ignatiev N., Guerlet S., et al. Martian Atmospheric Thermal Structure and Dust Distribution During the MY 34 Global Dust Storm From ACS TIRVIM Nadir Observations // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07272.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007272>
- Webster C.R., Mahaffy P.R., Atreya S.K., et al. Background levels of methane in Mars’ atmosphere show strong seasonal variations // *Science*. 2018. V. 360. P. 1093–1096.
<https://doi.org/10.1126/science.aag0131>
- Webster C.R., Mahaffy P.R., Pla-Garcia J., et al. Day-night differences in Mars methane suggest nighttime containment at Gale crater // *Astron. Astrophys.* 2021. V. 650. id. A166.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040030>
- Yachmenev A., Campargue A., Yurchenko S.N., et al. Electric quadrupole transitions in carbon dioxide // *J. Chem. Phys.* 2021. V. 154. id. 211104.
<https://doi.org/10.1063/5.0053279>
- Young R.M.B., Millour E., Guerlet S., et al. Assimilation of Temperatures and Column Dust Opacities Measured by ExoMars TGO-ACS-TIRVIM During the MY34 Global Dust Storm // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2022. V. 127. id. e07312.
<https://doi.org/10.1029/2022JE007312>
- Zasova L.V., Gorinov D.A., Eismont N.A., et al. Venera-D: A Design of an Automatic Space Station for Venus Exploration // *Solar Syst. Res.* 2020. V. 53. P. 506.
<https://doi.org/10.1134/S0038094619070244>

Planetary Atmosphere Studies in Russia in 2019–2022

O. I. Korablev*

Space Research Institute RAS (IKI), Profsoyuznaya 84/32, Moscow, 117997 Russia

*e-mail: korab@cosmos.ru

A review of the studies on planetary atmospheres performed by Russian scientists in 2019–2022 prepared in the Commission on planetary atmospheres of the National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Science to the 28 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics in Berlin, July 11–20, 2023, is presented.

Keywords: atmosphere, meteorology, planet, atmosphere composition, atmosphere circulation, superrotation, supersaturation, escape, methane, ozone, trace gases, dust, clouds, Venus, Mars, Saturn, Titan, Pluto, spectroscopy