

Новая спектроскопия полосы водяного пара 1,38 мкм для CO₂-атмосфер: измерение содержания H₂O в атмосфере Марса в экспериментах SPICAM/MEX и ACS NIR/TGO

А. А. Федорова¹, А. Ю. Трохимовский¹, Т. М. Петрова², В. М. Дейчули²,
А. М. Солодов², А. А. Солодов², Ф. Монтмессан³, О. И. Кораблев¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: fedorova@cosmos.ru

² Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055 Россия

³ Лаборатория атмосфер, сред и космических наблюдений (LATMOS)
Гайанкур, 78280, Франция

Полоса H₂O 1,38 мкм используется для измерения водяного пара в атмосфере Марса, начиная с эксперимента MAWD (*англ.* Mars Atmospheric Water Detector) на космических аппаратах Viking-1, -2. В настоящее время два эксперимента на орбите Марса — SPICAM IR (*англ.* SPectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars InfraRed) на орбитальном аппарате Mars-Express и ACS NIR (*англ.* Atmospheric Chemistry Suite Near InfraRed) на орбитальном аппарате Trace Gas Orbiter — проводят измерения водяного пара в этом диапазоне. Спектрометры обеспечивают мониторинг сезонного цикла интегрального содержания водяного пара и его вертикального распределения на протяжении уже нескольких марсианских лет. В качестве спектроскопической информации при восстановлении водяного пара в этих экспериментах использовалась база данных HITRAN (*англ.* High Resolution Transmission). При этом для учёта уширения линий водяного пара в углекислой атмосфере Марса был принят масштабный коэффициент 1,7 относительно уширения воздухом, представленного в HITRAN. Это могло привести к систематической неопределённости результатов, даже несмотря на низкое давление в атмосфере Марса. Недавние лабораторные измерения уширения линий водяного пара в CO₂ для линий трёх колебательных полос $\nu_1 + \nu_3$, $2\nu_2 + \nu_3$ и $2\nu_1$ в области спектра 6760–7430 см⁻¹ позволили улучшить спектроскопические параметры для углекислой атмосферы. Мы провели восстановление водяного пара с новой спектроскопией в диапазоне 1,38 мкм для надирных измерений SPICAM IR и затменных измерений ACS NIR. В случае SPICAM IR изменения, связанные со спектроскопией, оказались ниже чувствительности прибора из-за низкого разрешения и отношения сигнала к шуму. Для измерений спектрометра высокого разрешения ACS NIR новая спектроскопия привела к систематическим отклонениям 2–5 % в зависимости от высоты измерений, превышающим случайные ошибки прибора.

Ключевые слова: Марс, атмосфера, водяной пар, спектроскопические измерения

Одобрена к печати: 29.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-325-339

Введение

Измерения содержания водяного пара на Марсе входили в научные задачи космических экспериментов, начиная с самых ранних миссий (Montmessin et al., 2017). Водяной пар на Марсе можно измерить в нескольких сильных полосах в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне в областях спектра, относительно свободных от поглощения другими газами, особенно углекислым газом (CO₂), который является основной составляющей атмосферы. Для расчёта спектров поглощения атмосферных газов обычно используется спектроскопическая база данных HITRAN (*англ.* High Resolution Transmission) (Gordon et al., 2022), содержащая информацию о колебательно-вращательных переходах молекул. База была изначально создана для моделирования поглощения в земной атмосфере, поэтому уширения линий газов в ней представлены в двух вариантах: самоуширение и уширение воздухом. Но если речь идёт о CO₂-атмосфере, уширение линий других газов будет существенно отличаться от уширения воздухом. В ранних работах по измерениям на ночной стороне Венеры был рекомендован

масштабный фактор 1,3 при переходе от уширения воздухом к CO₂ (Pollack et al., 1993). На сегодняшний момент существует несколько работ, исследовавших уширение линий водяного пара в CO₂ (Brown et al., 2007; Deichuli et al., 2022; Gamache et al., 1995, 2016; Lavrentieva et al., 2015; Régalia et al., 2019). Но большинство из них сделано для сильных полос водяного пара в спектральных интервалах 2,6 и 6 мкм.

Между тем, ещё в ранних исследованиях Марса, в эксперименте MAWD (*англ.* Mars Atmospheric Water Detector) на орбитальных аппаратах Viking-1, -2, для измерения содержания водяного пара на планете использовалась более слабая полоса 1,38 мкм (Fedorova et al., 2004; Jakosky, Farmer, 1982) (*таблица*). С 2004 г. на космическом аппарате (КА) Mars-Express (MEX) на орбите Марса работает спектрометр SPICAM IR (*англ.* SPectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars InfraRed). В течение многих лет он ведёт измерения сезонного цикла водяного пара, общего содержания и вертикального распределения, в той же полосе 1,38 мкм (Fedorova et al., 2021; Trokhimovskiy et al., 2015a). С 2018 г. на орбите вокруг Марса начал работу ещё один спектрометр ближнего инфракрасного (ИК) диапазона ACS NIR (*англ.* Atmospheric Chemistry Suite Near InfraRed) в составе комплекса ACS на КА Trace Gas Orbiter (TGO), который впервые проводит измерения вертикального распределения водяного пара в диапазоне 1,38 мкм с разрешающей способностью порядка 28 000 (Fedorova et al., 2020, 2023).

Марсианские спектрометры для измерения водяного пара в полосе 1,38 мкм

Спектрометр	Миссия	Режимы наблюдений	Спектральный диапазон	Разрешающая способность	Сигнал/шум
MAWD	Viking-1, -2	Надир	5 каналов: 7223,14; 7224,5; 7232,2; 7238,5; 7242,74 см ⁻¹	>7500	
Интерференционно-поляризационный фотометр ИВ-2	«Марс-3», «Марс-5»	Надир	1378,8; 1380,7; 1382,7 нм		
SPICAM IR	Mars-Express	Надир, солнечные затмения	1–1,7 мкм	~2000	~100
ACS NIR	ExoMars Trace Gas Orbiter	Надир, солнечные затмения	0,75–1,65 мкм	~28000	>1000

Неточная спектроскопия, применяемая для моделирования спектров атмосферы, способна приводить к систематическим ошибкам в восстанавливаемых значениях содержания атмосферных газов. Этот вопрос широко исследуется для земной атмосферы. Так, в работе (Chesnokova et al., 2020) показано, что использование разных баз данных по параметрам линий поглощения H₂O может привести к неопределённости до 5 % в измерениях водяного пара, выполненных в ближнем ИК-диапазоне наземным фурье-спектрометром с разрешением 0,02 см⁻¹. Спектры высокого разрешения показали, что база данных GEISA 2015 (*фр.* Gestion et Etude des Informations Spectroscopiques Atmosphériques) даёт лучшее согласие измеренных и модельных спектров по сравнению с HITRAN 2016, поскольку содержит новые спектральные данные, неучтённые в HITRAN.

В работе (Fedorova et al., 2006) исследовалось влияние баз данных HITRAN 2000 (Rothman et al., 2003) и HITRAN 2004 (Rothman et al., 2005) на восстановление водяного пара в атмосфере Марса по полосе 1,38 мкм. Было показано, что спектроскопия полосы значительно изменилась в версии 2004 г.: количество переходов увеличилось почти в два раза — с 1500 в HITRAN 2000 до 3000 в HITRAN 2004. Были также скорректированы интенсивность линий и коэффициенты температурной зависимости полуширины линий в случае уширения воздухом. Обнаружилось, что количество водяного пара, восстановленное с HITRAN 2004, в среднем на 20–25 % меньше, чем с HITRAN 2000. При этом версия 2004 г. оказалась близ-

ка к лабораторным измерениям этой полосы, выполненным в исследовании (Gamache et al., 1995). Масштабный коэффициент для параметра уширения линий H₂O давлением CO₂ был взят 1,3 и было показано, что его эффект значительно меньше, чем от различия в версиях HITRAN, использованных для восстановления содержания водяного пара в этом эксперименте. HITRAN 2004–2008 также использовался для повторной обработки данных эксперимента MAWD/Viking-1, -2 (Fedorova et al., 2010). Сезонный цикл водяного пара по переобработанным данным MAWD 1977–1979 гг. стал лучше согласован с измерениями SPICAM IR в 2004–2007 гг. В работе также была исследована чувствительность к коэффициенту уширения и показано, что его изменение от 1,3 до 1,7 ведёт к уменьшению восстановленного количества водяного пара на величину до 10 %.

В отличие от диапазонов 2,5–4 и 6 мкм, лабораторных измерений уширения спектральных линий водяного пара в CO₂ в диапазоне 1,38 мкм до недавнего времени почти не проводилось, за исключением исследований (Gamache et al., 1995; Langlois et al., 1994). Вслед за работой (Brown et al., 2007) для учёта уширения линий в CO₂ обычно принимался коэффициент 1,7 относительно уширения воздухом. Если для SPICAM IR при среднем спектральном разрешении (см. таблицу) ошибки, связанные с полушириной линий, могут быть незначительными, то для спектрометра ACS NIR неточная спектроскопия может привести к систематическим отклонениям в содержании водяного пара.

Недавние лабораторные измерения уширения линий водяного пара в CO₂ для трёх колебательных полос $\nu_1 + \nu_3$, $2\nu_2 + \nu_3$ и $2\nu_1$ в области 6760–7430 см⁻¹ (Deichuli et al., 2022) позволили уточнить спектроскопические параметры. В настоящей работе мы исследуем, насколько новая спектроскопия полосы 1,38 мкм может повлиять на результаты восстановления содержания водяного пара из данных работающих экспериментов SPICAM IR и ACS NIR.

Эксперименты на орбите Марса

SPICAM IR/Mars-Express

Акустооптический спектрометр SPICAM IR является частью эксперимента SPICAM на борту космического аппарата Mars-Express, начавшего научную программу на орбите Марса в 2004 г. (Кorablev и др., 2006; Korablev et al., 2006). Спектрометр работает в диапазоне от 1 до 1,7 мкм со спектральным разрешением 3,5–4 см⁻¹. Он может наблюдать Марс в надир, на лимбе и в солнечных затмениях. Отношение сигнал/шум спектрометра при надирных наблюдениях в полосе 1,38 мкм в среднем составляет ~100, что соответствует эквивалентной яркости шума ~0,15 Вт·м⁻²·мкм⁻¹·ср⁻¹. Спектрометр проводит непрерывный мониторинг водяного пара в полосе 1,38 мкм с 2004 г. по настоящее время. Им получены карты сезонного распределения водяного пара в столбе атмосферы и его межгодовых вариаций (Fedorova et al., 2006; Knutsen et al., 2022; Trokhimovskiy et al., 2015a), а также первые многолетние наблюдения вертикального распределения H₂O в атмосфере Марса (Fedorova et al., 2021).

ACS NIR/TGO

Эшелле-спектрометр NIR ближнего инфракрасного диапазона является частью комплекса ACS на борту KA Trace Gas Orbiter, начавшего научную программу на орбите Марса в апреле 2018 г. (Korablev et al., 2018). Селекция дифракционных порядков происходит с помощью акустооптического фильтра, выделяющего полосу пропускания на определённой длине волны, ширина которой соответствует свободному спектральному диапазону решётки эшелле, работающей в высоких порядках. ACS NIR работает в диапазоне 0,76–1,7 мкм, используя порядки дифракции со 101 по 49 (Trokhimovskiy et al., 2015b). Разрешающая способность спектрометра меняется от 20 000 до 28 000 в зависимости от спектрального диапазона. Спектрометр функционирует как в режиме надирных наблюдений, так и в солнечных затмениях. Из-за слабого сигнала в надир основные измерения проходят в солнечных затмениях. Мгновенное поле

зрения в направлении, перпендикулярном лимбу, невелико ($\sim 0,02^\circ$) и ограничено по ширине щели. Поле зрения соответствует мгновенному вертикальному разрешению 500–600 м. Время измерения одного порядка дифракции составляет 0,2 с, что соответствует эффективному вертикальному разрешению лучше 1 км для каждого порядка дифракции. Горизонтальное разрешение (вдоль щели) составляет 1,5–5 км и определяется количеством линий детектора, которые могут суммироваться. Количество линий можно выбирать от 6 до 30; верхняя граница ограничена размером изображения Солнца на детекторе. Отношение сигнал/шум для отдельного пикселя при наблюдении Солнца в максимуме функции отклика спектрометра составляет ~ 600 . При усреднении 6–25 линий с максимальным сигналом, исключая края изображения Солнца, отношение сигнал/шум достигает 800–3000 в зависимости от затмения.

Во время затмения ACS NIR каждые 2 с измеряет десять заранее выбранных порядков дифракции, включая полосы поглощения H₂O и CO₂ (Korablev et al., 2018). Водяной пар в полосе 1,38 мкм измеряется в порядках 54 (6960–7040 см⁻¹), 55 (7089–7170 см⁻¹) и 56 (7218–7300 см⁻¹).

Моделирование спектров Марса в полосе 1,38 мкм с использованием различных версий базы данных HITRAN

Для анализа данных SPICAM IR были использованы две версии базы данных HITRAN: версия 2004 г. (Rothman et al., 2005) в работах (Fedorova et al., 2006, 2009; Trokhimovskiy et al., 2015a) и версия 2012 г. (Rothman et al., 2013) в работах (Fedorova et al., 2021; Knutsen et al., 2022). Для ACS NIR (Fedorova et al., 2020, 2023) использовали версию HITRAN 2016 (Gordon et al., 2017).

На *рис. 1* (см. с. 329) представлены расчёты пропускания в атмосфере Марса в полосе водяного пара 1,38 мкм в диапазоне от 7000 до 7400 см⁻¹ при наблюдениях в надир для угла падения солнечных лучей 30°. Расчёты проводились методом line-by-line без учёта рассеяния света в атмосфере. Профили температуры и давления были взяты из MCD5.3 (*англ.* Martian Climate Database) (Millour et al., 2022) для экваториальных широт летом в северном полушарии для относительного содержания водяного пара 100 ppmv (объёмный коэффициент перемешивания в единицах частей на миллион, *англ.* parts per million by volume). Коэффициент уширения в CO₂-атмосфере был принят равным 1,7 для всех версий HITRAN. Спектры поглощения были свёрнуты с разрешением $\sim 0,3$ см⁻¹, что соответствует разрешающей силе 25 000.

Как показано в работе (Fedorova et al., 2006), спектроскопическая база данных HITRAN претерпела существенные изменения в полосе 1,38 мкм от версии 2000 г. к версии 2004 г. Начиная с HITRAN 2004 вплоть до версии 2016 г. изменений в эту полосу не вносилось. В версии 2016 г. была проведена коррекция параметров линий воды, добавлены новые линии изотопов и новый изотополог D₂O, но на изменения в пропускании марсианской атмосферы это повлияло несущественно. Дальнейшие изменения были внесены в HITRAN 2020 в соответствии с новыми вычислениями (Conway et al., 2020; Mikhailenko et al., 2020), что для Марса привело к систематической разнице в пропускании $\sim 0,5$ %.

Авторы работы (Deichuli et al., 2022) провели измерения спектров поглощения смеси водяного пара и углекислого газа в области спектра 6760–7430 см⁻¹ для пяти парциальных давлений обоих газов с помощью FTIR-спектрометра (*англ.* Fourier Transform Infrared) Bruker IFS 125 HR. Для восстановления параметров спектральных линий использовалась процедура мультиспектральной аппроксимации, в которой нелинейный метод наименьших квадратов был применён одновременно к спектрам, записанным в различных экспериментальных условиях. В качестве спектрального профиля линии использовался не традиционный профиль Фойгта, а более современный и точный профиль qSDV (*англ.* quadratic Speed-Dependent Voigt) (Tran et al., 2013). В результате были получены коэффициенты уширения 192 линий водяного пара в CO₂ и сдвига линий основного изотополога водяного пара для трёх колебательных полос $\nu_1 + \nu_3$, $2\nu_2 + \nu_3$ и $2\nu_1$. Кроме того, были уточнены силы несколь-

ких сильных линий внутри диапазона. Мы ассимилировали данные из работы (Deichuli et al., 2022) в HITRAN 2020, используя новую информацию для измеренных линий и данные HITRAN 2020 для остальных (в дальнейшем эта версия будет называться D2022). В области 7140–7350 см⁻¹ различия между HITRAN 2004 и D2022 превышают 1 % и заметно выше разницы между HITRAN 2004 и HITRAN 2020.

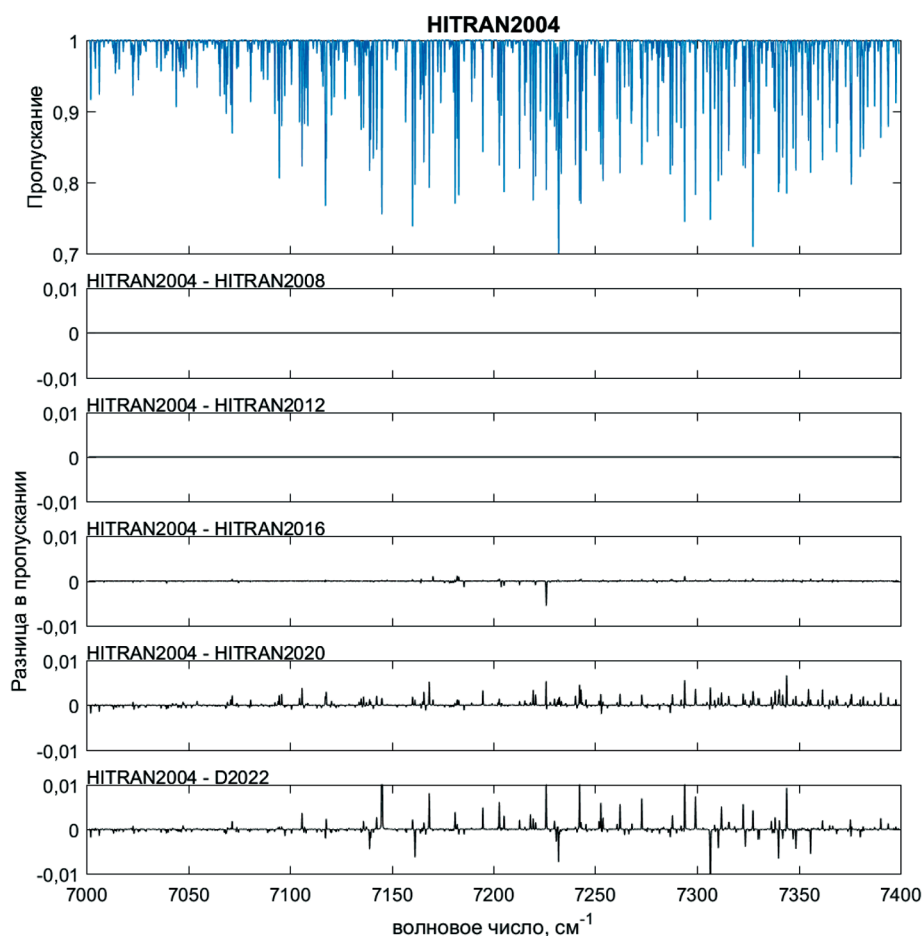


Рис. 1. Полоса поглощения водяного пара в атмосфере Марса в диапазоне 7000–7400 см⁻¹ (1,38 мкм), рассчитанная для надириной геометрии и угла падения солнечных лучей 30° и разница в атмосферном пропускании, вычисленная для водяного пара для различных версий базы данных HITRAN и работы (Deichuli et al., 2022)

Измерения содержания водяного пара на Марсе

SPICAM IR

SPICAM IR проводит измерения водяного пара в надир и в режиме солнечных затмений. Поскольку SPICAM IR имеет невысокое разрешение, наибольшая чувствительность к полуширинам линий ожидается в надириной геометрии, где эффективное давление максимально. На рис. 2 (см. с. 330) представлены спектры поглощения водяного пара в атмосфере Марса в диапазоне 7040–7350 см⁻¹ (полоса 1,38 мкм), рассчитанные для наблюдения в надир и угла падения солнечных лучей 30°. Предполагалось, что водяной пар равномерно перемешан в атмосфере со значением 100 ppmv. Профили температуры и давления соответствуют экваториальным широтам и лету в северном полушарии из MCD5.3. Расчёты проводились для базы данных HITRAN 2012, используемой для обработки данных эксперимента SPICAM, и HITRAN 2020, в обоих случаях коэффициент уширения был принят 1,7, а также

с HITRAN 2020, где параметры сильных линий были обновлены в соответствии с работой D2022 (см. рис. 2). Изменения в спектре между HITRAN 2012 и HITRAN 2020 в несколько раз меньше, чем между HITRAN 2012 и D2022, причём наибольшая разница наблюдается в двух линиях около 7310 и 7145 см⁻¹.

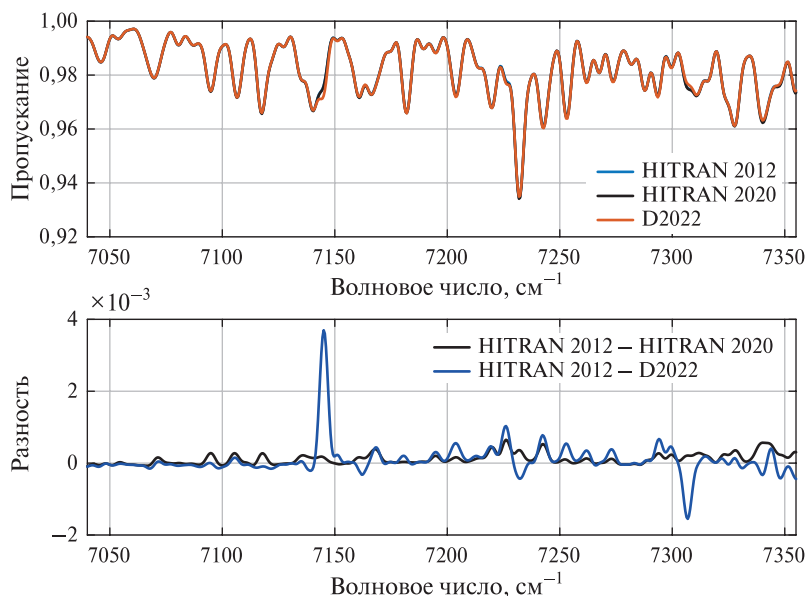


Рис. 2. Моделирование полосы H₂O 1,38 мкм с использованием двух спектроскопических наборов данных HITRAN 2012 и HITRAN 2020 с коэффициентами уширения линий H₂O давлением CO₂ относительно воздуха 1,7 и из работы (Deichuli et al., 2022) с HITRAN 2020. Спектры свёрнуты со спектральным разрешением SPICAM IR

Для определения содержания водяного пара по данным SPICAM IR использовался диапазон 7120–7300 см⁻¹, содержащий наиболее сильные линии поглощения воды и свободный от поглощения CO₂. При восстановлении водяного пара брались температура и давление, соответствующие географическому положению, местному времени и дате наблюдений, взятые из Марсианской климатической базы данных (MCD), базирующейся на модели общей циркуляции Марса лаборатории LMD (*фр.* Laboratoire de Météorologie Dynamique) (Millour et al., 2022). Солнечный спектр в диапазоне 1,38 мкм вносит основные неопределённости, поскольку измерений высокого разрешения вне земной атмосферы в этой области спектра нет, а наземные наблюдения затруднены из-за сильного поглощения водяного пара. Использовался спектр Солнца, представляющий собой комбинацию спектра из работы (Fiorenza, Formisano, 2005) и спектра, измеренного в эксперименте MAWD при перелёте к Марсу (Farmer et al., 1977) в диапазоне 1379–1386 нм (7215–7251 см⁻¹) со спектральным разрешением 1,2 см⁻¹. Между тем, вне этого диапазона солнечный спектр определён недостаточно хорошо. Алгоритм решения обратной задачи заключался в поиске интегрального содержания водяного пара в столбе атмосферы в осаждённых микронах методом золотого сечения и минимизации χ^2 . Также проводилась подгонка спектральной зависимости альбедо в диапазоне фитирования, поскольку край диапазона попадал на полосы поглощения углекислотного и водяного льда. Алгоритм полностью описан в работе (Trokhimovskiy et al., 2015a). Из-за низкого отношения сигнал/шум при восстановлении данных усреднялось от 8 до 12 спектров. На рис. 3 (см. с. 331) представлен пример подгонки спектра Марса, измеренного SPICAM IR для двух моделей, основанных на HITRAN 2012 и D2022. Хотя расхождения между разными базами данным видны в разности спектров в ожидаемых диапазонах 7145 и 7230 см⁻¹, среднеквадратичные отклонения рассчитанного спектра от измеренного приблизительно равны 0,072 для HITRAN 2012 и 0,073 для D2022. Это связано с тем, что другие неопределённости, например связанные с солнечным спектром, значительно превышают эффект от спектроскопии.

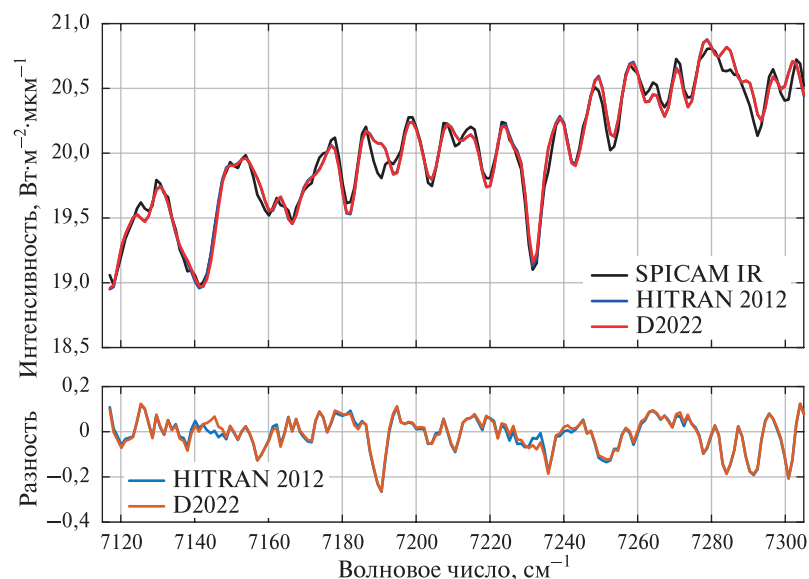


Рис. 3. Спектр водяного пара, полученный SPICAM IR на широте 30° ю.ш. и ареоцентрической долготе Солнца $L_s = 166^\circ$. Вверху: чёрная кривая — данные наблюдений (усреднение 10 спектров); синяя кривая — рассчитанный спектр с HITRAN 2012; красная кривая — рассчитанный спектр с D2022. Внизу — расхождение данных и модели для двух случаев

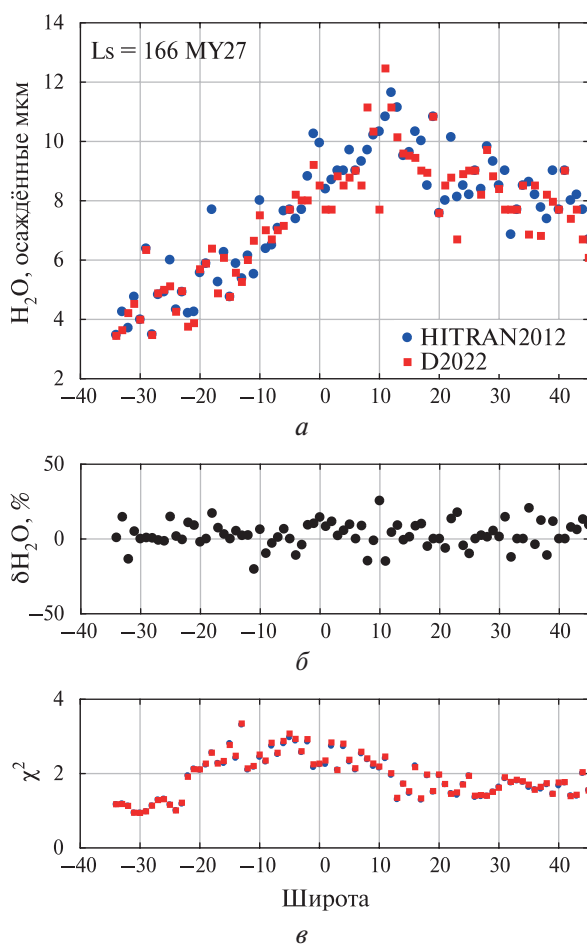


Рис. 4. Изменение содержания водяного пара в зависимости от широты по данным прибора SPICAM IR, полученное при использовании различной спектроскопической информации (а); различие в процентах между количеством водяного пара в осажжённых микронах, полученное с разными базами данных (HITRAN 2012 — D2022) (б); изменения χ^2 при восстановлении содержания водяного пара HITRAN 2012 и D2022 (в)

Мы провели восстановление водяного пара для серии измерений в сезон, близкий к осеннему равноденствию в северном полушарии (ареоцентрическая долгота Солнца, соответствующая сезону на Марсе $L_s = 166^\circ$), в марсианский год 27 в диапазоне широт от 40° ю. ш. до 45° с. ш. (рис. 4, см. с. 331). Систематических отличий в содержании водяного пара и в значениях критерия χ^2 не наблюдается. Относительные изменения флуктуируют около нуля. Интересно, что значение χ^2 для новой спектроскопии систематически немного больше (на $\sim 1,5\%$).

ACS NIR

Спектрометр ACS NIR проводит измерения водяного пара методом солнечных просвечиваний. Метод является самокалибруемым, поскольку в процессе измерения наблюдается также чистый спектр Солнца вне атмосферы. В результате пропускание определяется простым делением атмосферного спектра на солнечный. Вертикальный профиль исследуемого газа получается путём зондирования атмосферы в диапазоне высот от поверхности до порядка 100 км (Korablev et al., 2018). Эшелле-спектрометр ACS NIR регистрирует поглощение водяным паром в полосе 1,38 мкм в нескольких дифракционных порядках (54–56), соответствующих диапазонам 6960–7040, 7090–7170 и 7218–7300 см^{-1} . На рис. 5 (см. с. 333) изображены модельные спектры пропускания водяного пара в диапазоне 7218–7300 см^{-1} , соответствующие порядку 56, который содержит наиболее сильные линии воды и рутинно используется для восстановления вертикальных профилей H₂O. На рисунке также представлены различия спектров по отношению к SNR (англ. signal-to-noise ratio) ~ 600 , соответствующему единичному измерению (без усреднения по линиям детектора). Для затменных наблюдений это отношение может меняться от 100 до 3000 в зависимости от положения максимума функции пропускания АОПФ (акустооптический перестраиваемый фильтр) на детекторе, количества усреднений линий на детекторе и поглощения атмосферным аэрозолем. Рисунок демонстрирует, что измерения в нижних слоях атмосферы должны быть более чувствительны к спектроскопии, поскольку давление растёт. Различия в спектре на высоте 10 км могут достигать 4 % для отдельных линий, а на 30 км — $\sim 0,5\%$. Более того, из-за низкой плотности атмосферы Марса у поверхности планеты отношение полуширины Лоренца к доплеровской полуширине не превышает 0,3 для волнового числа 7000 см^{-1} . А на высотах более 30–40 км профиль фактически полностью становится доплеровским. Таким образом, эффект полуширины линий будет заметен только у поверхности Марса. В случае солнечных затмений задача усложняется тем, что в нижних слоях непрозрачность атмосферы из-за постоянного присутствия пыли уменьшает сигнал в несколько раз. Так, на рис. 5 для прицельной высоты 10 км SNR может уменьшиться на порядок и соответствовать значениям разницы 0,02, а не 0,002, как показано на рисунке. В результате влияние уширения может быть ещё менее заметно по сравнению с изменениями, связанными с силами линий.

Мы провели восстановление вертикального распределения водяного пара в атмосфере Марса в 34-м марсианском году (2018–2019) для двух спектроскопических баз данных HITRAN 2016 и D2022. На рис. 6 (см. с. 333) показано вертикальное распределение относительного содержания водяного пара в частях на миллион в период с $L_s = 160^\circ$ до $L_s = 360^\circ$ для северного и южного полушария. Всего было обработано ~ 1000 профилей. На рисунке также приведены величины относительного изменения водяного пара в процентах, которые превышали случайную ошибку эксперимента. Несмотря на то, что карты распределения почти не различаются, их разность показывает систематические отклонения от 2 до 5 % во всём диапазоне высот от 20 до 60 км, зависящие и от содержания водяного пара, и от температуры атмосферы. При этом содержание H₂O, восстановленное с новой спектроскопией, систематически меньше. Широкий диапазон высот, на которых заметны отклонения, говорит о том, что они вызваны, скорее, изменениями в силах линий, чем полушириной. Изменения в нижней атмосфере даже меньше, чем в средней.

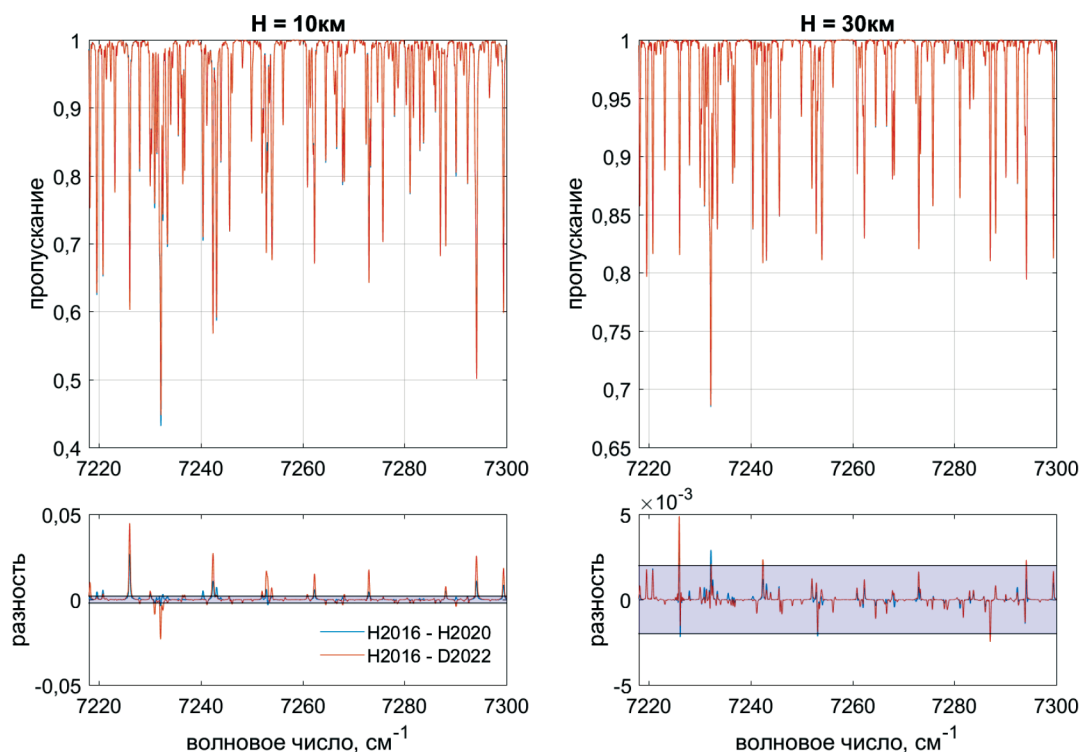


Рис. 5. Синтетические спектры марсианской атмосферы в полосе поглощения водяного пара для измерений методом солнечного затмения на прицельных высотах 10 и 30 км. Спектры свёрнуты со спектральным разрешением ACS NIR. Для каждой высоты показана разница между спектрами, рассчитанными по базам данных HITRAN 2016 (что соответствует стандартному алгоритму обработки), HITRAN 2020 и (Deichuli et al., 2022). Заштрихованные области обозначают пределы детектирования, соответствующие отношению SNR ≈ 600 спектрометра ACS NIR

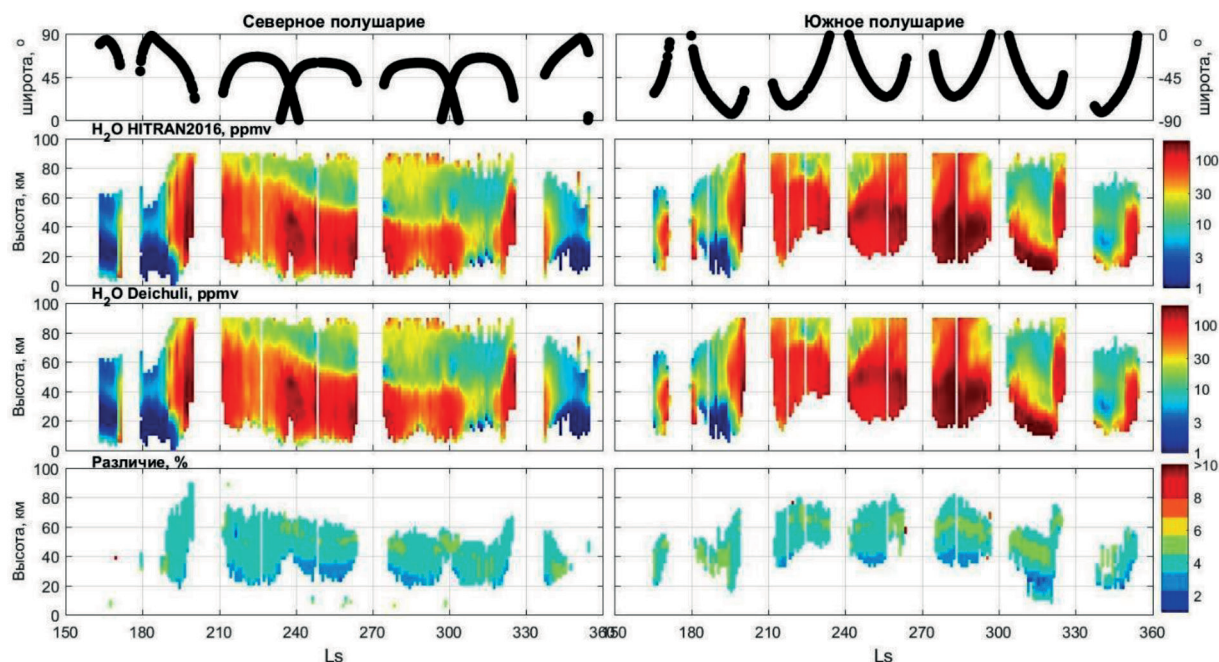


Рис. 6. Сезонные изменения вертикального распределения водяного пара в северном (слева) и южном (справа) полушариях Марса за период от Ls = 163° до Ls = 360° MY34, полученные из данных ACS с использованием HITRAN 2016 и (Deichuli et al., 2022). Карты усреднены в бинах 1° по широте и 2 км по высоте. На верхних графиках показана широта измерений

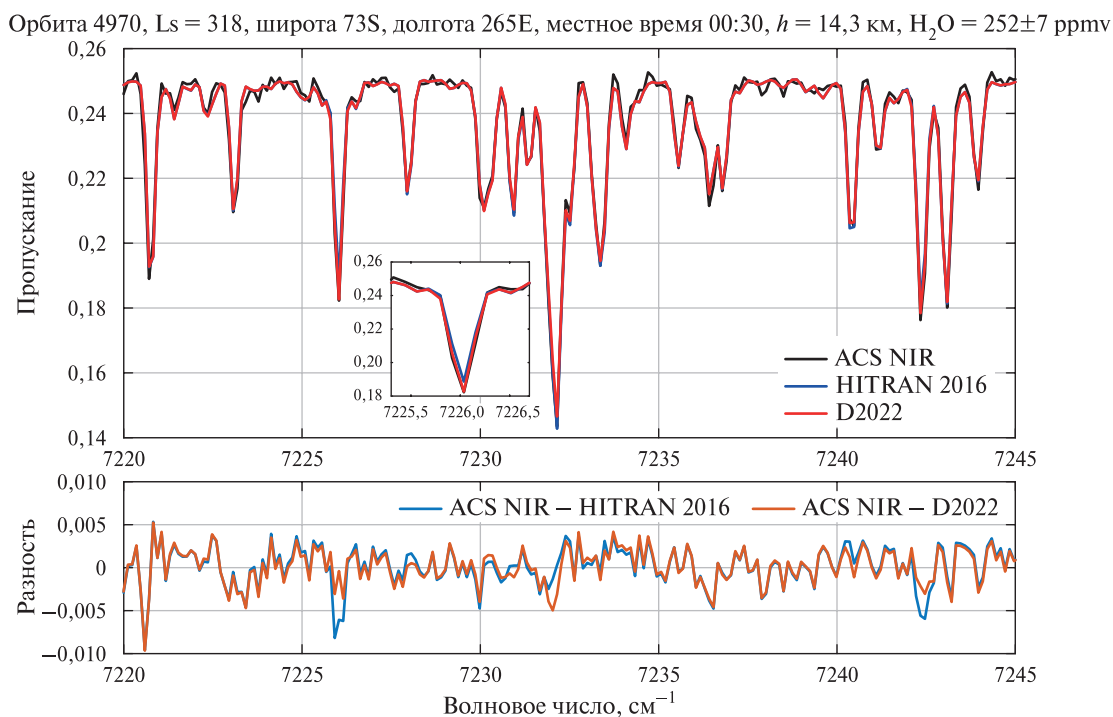


Рис. 7. Сравнение спектра ACS NIR, измеренного на высоте 14 км в геометрии солнечных затмений (орбита 4970), с модельными спектрами, полученными при решении обратной задачи на основе HITRAN 2016 и (Deichuli et al., 2022)

На рис. 7 показан пример подгонки спектра поглощения водяного пара на высоте 12 км, полученного на орбите № 4970 на широте 73° ю. ш. и Ls = 318°. Подгонка была выполнена для спектроскопии HITRAN 2016, используемой в настоящее время при обработке данных, и D2022. Отклонение модельных спектров от измеренных демонстрирует заметное улучшение для линий на 7226 и 7242,5 см⁻¹.

Заключение

Несовершенство спектроскопических данных является одним из важных источников ошибок при восстановлении содержания различных газов в атмосферах планет. Особенно это относится к атмосферам Марса и Венеры, где уширение линий происходит не в воздухе, а в углекислоте. А основная спектроскопическая информация нацелена на исследования в земной атмосфере.

В работе рассмотрено влияние новых измерений параметров уширения спектральных линий трёх колебательных полос водяного пара ($\nu_1 + \nu_3$, $2\nu_2 + \nu_3$ и $2\nu_1$) в диапазоне 6760–7430 см⁻¹ в CO₂ на восстановление водяного пара в атмосфере Марса по данным спектрометров SPICAM IR на КА Mars -Express и ACS NIR на КА TGO.

1. Для SPICAM IR показано, что модельные спектры водяного пара в полосе 1,38 мкм, свёрнутые с аппаратной функцией прибора и рассчитанные с использованием баз данных HITRAN 2012 и HITRAN 2020, фактически совпадают. Различия между HITRAN 2012 и HITRAN 2020, модифицированной с использованием измерений из работы (Deichuli et al., 2022), более существенны, но в целом остаются в пределах погрешностей измерений. Интегральное содержание водяного пара в столбе по данным SPICAM IR, рассчитанное на основе HITRAN 2012 и (Deichuli et al., 2022), не показало систематических отклонений. Незначительные различия восстановленных значений связаны с флуктуациями, вызванными низким разрешением и отношением сигнал/шум прибора, а также неточным солнечным спектром.

2. Проведено сравнение восстановления вертикальных профилей водяного пара по спектрам высокого разрешения ACS NIR с использованием базы данных HITRAN 2016 и D2022 в диапазоне 7220–7230 см⁻¹. Показано, что D2022 обеспечивает лучшее согласие спектров в определённых линиях. Различие между новой спектроскопией и HITRAN 2016 составило от 2 до 5 % в средней и нижней атмосфере (10–60 км) в зависимости от количества водяного пара и температуры атмосферы и в большинстве случаев превышало ошибки измерений. При этом содержание H₂O, восстановленное с новой спектроскопией, систематически меньше.

Несмотря на низкое давление у поверхности Марса, новая спектроскопия показала изменения в восстановленном содержании водяного пара, превышающие случайные ошибки измерений в эксперименте ACS NIR. Необходимо отметить, что существенная доля отмеченных различий связана, скорее, с коррекцией сил линий, чем с уширением в CO₂-атмосфере.

Значительно больший эффект ожидается для атмосферы Венеры, где надирные наблюдения на дневной стороне зондируют надоблачную атмосферу в области давлений от 300 до 10 мбар. В проекте «Венера-Д» для дистанционных исследований атмосферы планируется спектрометр высокого разрешения ближнего ИК-диапазона, аналогичный ACS NIR, в том числе для измерений водяного пара на верхней границе облаков в полосе 1,38 мкм. Влияние спектроскопии на точность измерений этого эксперимента — тема отдельного исследования. При этом параметры линий, полученные в работе (Deichuli et al., 2022), на сегодняшний момент являются наилучшими для моделирования полосы поглощения водяного пара 1,38 мкм в атмосфере Венеры.

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда, грант № 22-22-00800.

Литература

1. *Brown L. R., Humphrey C. M., Gamache R. R.* CO₂-broadened water in the pure rotation and ν₂ fundamental regions // *J. Molecular Spectroscopy*. 2007. V. 246. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.jms.2007.07.010.
2. *Chesnokova T. Y., Chentsov A. V., Firsov K. M.* Impact of spectroscopic information on total column water vapor retrieval in the near-infrared spectral region // *J. Applied Remote Sensing* 2020. V. 14. Article 034510. DOI: 10.1117/1.JRS.14.034510.
3. *Conway E. K., Gordon I. E., Kyuberis A. A. et al.* Calculated line lists for H₂¹⁶O and H₂¹⁸O with extensive comparisons to theoretical and experimental sources including the HITRAN 2016 database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. V. 241. Article 106711. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.106711.
4. *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. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. V. 293. Article 108386. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108386.
5. *Farmer C. B., Davies D. W., Holland A. L. et al.* Mars: Water vapor observations from the Viking orbiters // *J. Geophysical Research*. 1977. V. 82. P. 4225–4248. DOI: 10.1029/JS082i028p04225.
6. *Fedorova A. A., Rodin A. V., Baklanova I. V.* MAWD observations revisited: seasonal behavior of water vapor in the Martian atmosphere // *Icarus*. 2004. V. 17. P. 54–67. DOI: 10.1016/j.icarus.2004.04.017.
7. *Fedorova A., Korablev O., Bertaux J.-L. et al.* Mars water vapor abundance from SPICAM IR spectrometer: Seasonal and geographic distributions // *J. Geophysical Research: Planets*. 2006. V. 111. Article E09S08. DOI: 10.1029/2006je002695.
8. *Fedorova A. A., Korablev O. I., Bertaux J. L. et al.* Solar infrared occultation observations by SPICAM experiment on Mars-Express: Simultaneous measurements of the vertical distributions of H₂O, CO₂ and aerosol // *Icarus*. 2009. V. 200. P. 96–117. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.11.006.
9. *Fedorova A. A., Trokhimovsky S., Korablev O., Montmessin F.* Viking observation of water vapor on Mars: Revision from up-to-date spectroscopy and atmospheric models // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 156–164. DOI: 10.1016/j.icarus.2010.01.018.
10. *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. DOI: 10.1126/science.aay9522.

11. 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. Geophysical Research: Planets*. 2021. V. 126. Article e2020JE006616. DOI: 10.1029/2020JE006616.
12. 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. Geophysical Research: Planets*. 2023. V. 128. Article e2022JE007348. DOI: 10.1029/2022JE007348.
13. Fiorenza C., Formisano V. A solar spectrum for PFS data analysis // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. P. 1009–1016. DOI: 10.1016/j.pss.2004.12.008.
14. Gamache R. R., Neshyba S. P., Plateaux J. J. et al. CO₂-Broadening of Water-Vapor Lines // *J. Molecular Spectroscopy*. 1995. V. 170. P. 131–151. DOI: 10.1006/jmsp.1995.1060.
15. Gamache R. R., Faresse M., Renaud C. L. A spectral line list for water isotopologues in the 1100–4100 cm⁻¹ region for application to CO₂-rich planetary atmospheres // *J. Molecular Spectroscopy*. 2016. V. 326. P. 144–150. DOI: 10.1016/j.jms.2015.09.001.
16. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. et al. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. V. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
17. Gordon I. E., Rothman L. S., Hargreaves R. J. et al. The HITRAN 2020 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. V. 277. Article 107949. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.
18. Jakosky B. M., Farmer C. B. The seasonal and global behavior of water vapor in the Mars atmosphere: Complete global results of the Viking Atmospheric Water Detector Experiment // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1982. V. 87. P. 2999–3019. DOI: 10.1029/JB087iB04p02999.
19. 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. Geophysical Research: Planets*. 2022. V. 127. Article e2022JE007252. DOI: 10.1029/2022JE007252.
20. Korablev O. I., Bertaux J. L., Kalinnikov Y. K. et al. Exploration of Mars in SPICAM-IR experiment onboard the Mars-Express spacecraft: 1. Acousto-optic spectrometer SPICAM-IR // *Cosmic Research*. 2006. V. 44. P. 278–293. DOI: 10.1134/s0010952506040022.
21. Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A. et al. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // *Space Science Reviews*. 2018. V. 214. Article 7. DOI: 10.1007/s11214-017-0437-6.
22. Langlois S., Birbeck T. P., Hanson R. K. Temperature-Dependent Collision-Broadening Parameters of H₂O Lines in the 1.4-μm Region Using Diode Laser Absorption Spectroscopy // *J. Molecular Spectroscopy*. 1994. V. 167. P. 272–281. DOI: 10.1006/jmsp.1994.1234.
23. Lavrentieva N. N., Voronin B. A., Fedorova A. A. H₂¹⁶O line list for the study of atmospheres of Venus and Mars // *Optics and Spectroscopy*. 2015. V. 118. P. 11–18. DOI: 10.1134/s0030400x15010178.
24. Mikhailenko S., Kassi S., Mondelain D., Campargue A. Water vapor absorption between 5690 and 8340 cm⁻¹: accurate empirical line centers and validation tests of calculated line intensities // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. V. 245. Article 106840. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106840.
25. Millour E., Forget F., Spiga A. et al. The Mars Climate Database (Version 6.1) // *Europlanet Science Congress 2022*. Granada, Spain, 18–23 Sep. 2022. V. 16. Article EPSC2022-786. <https://doi.org/10.5194/epsc2022-786>.
26. Montmessin F., Korablev O., Lefèvre F. et al. SPICAM on Mars-Express: A 10 year in-depth survey of the Martian atmosphere // *Icarus*. 2017. V. 297. P. 195–216. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.06.022>.
27. Pollack J. B., Dalton J. B., Grinspoon D. et al. Near-Infrared Light from Venus' Nightside: A Spectroscopic Analysis // *Icarus*. 1993. V. 103. P. 1–42. DOI: 10.1006/icar.1993.1055.
28. Régalia L., Cousin E., Gamache R. R. et al. Laboratory measurements and calculations of line shape parameters of the H₂O–CO₂ collision system // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2019. V. 231. P. 126–135. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.04.012.
29. Rothman L. S., Barbe A., Chris Benner D. et al. The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2003. V. 82. P. 5–44. DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00146-8.
30. Rothman L. S., Jacquemart D., Barbe A. et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2005. V. 96. P. 139–204. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.10.008.
31. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y. et al. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2013. V. 130. P. 4–50. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.
32. Tran H., Ngo N. H., Hartmann J.-M. Efficient computation of some speed-dependent isolated line profiles // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2013. V. 129. P. 199–203. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.06.015.

33. Trokhimovskiy A., Fedorova A., Korablev O. et al. (2015a) Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five Martian years of observations // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 50–64. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.007.
34. Trokhimovskiy A., Korablev O., Kalinnikov Y. K. et al. (2015b) Near-infrared echelle-AOTF spectrometer ACS-NIR for the ExoMars Trace Gas Orbiter // *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII: Proc. SPIE*. 2015. V. 9608. Article 960809. DOI: 10.1117/12.2190369.

New 1.38 μm water vapor band spectroscopy for the CO₂-atmosphere: H₂O measurements in the Martian atmosphere in the SPICAM/MEX and ACS NIR/TGO experiments

A. A. Fedorova¹, A. Yu. Trokhimovskiy¹, T. M. Petrova², V. M. Deichuli²,
A. M. Solodov², A. A. Solodov², F. Montmessin³, O. I. Korablev¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: fedorova@cosmos.ru

² *V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia*

³ *Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales (LATMOS)*
Guyancourt 78280, France

The H₂O 1.38 μm band has been used to measure water vapor in the Martian atmosphere since the MAWD (Mars Atmospheric Water Detector) experiment on Viking-1, -2. Currently, two experiments in orbit around Mars — SPICAM IR (SPectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars InfraRed) on Mars-Express and ACS NIR (Atmospheric Chemistry Suite Near InfraRed) on Trace Gas Orbiter — are measuring water vapor in this spectral range. The spectrometers provide monitoring of the seasonal cycle of the column water vapor abundance and its vertical distribution over several Martian years. The HITRAN (High Resolution Transmission) database was used as a spectroscopic information for water vapor retrievals in these experiments. To take into account the broadening of water vapor lines in the carbon dioxide atmosphere of Mars, a scaling factor of 1,7 was adopted relative to the broadening by air, presented in HITRAN. This could lead to systematic uncertainty in the results, even despite the low pressure in the Martian atmosphere. Recent laboratory measurements of the broadening of water vapor lines in CO₂ for the lines of three vibrational bands $\nu_1 + \nu_3$, $2\nu_2 + \nu_3$ and $2\nu_1$ in the spectral region 6760–7430 cm^{-1} have improved the spectroscopic parameters for the carbon dioxide atmosphere. We performed water vapor retrievals with new spectroscopy at 1.38 μm for SPICAM IR nadir measurements and ACS NIR occultation measurements. In the case of SPICAM IR, changes due to spectroscopy were below the sensitivity of the instrument due to the low resolution and signal-to-noise ratio. For the ACS NIR, which is a high resolution spectrometer, the new spectroscopy resulted in systematic deviations of 2–5 % depending on the height in the atmosphere, exceeding the random errors of the instrument.

Keywords: Mars, atmosphere, water vapor, spectroscopic measurements

Accepted: 29.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-325-339

References

1. Brown L. R., Humphrey C. M., Gamache R. R., CO₂-broadened water in the pure rotation and ν_2 fundamental regions, *J. Molecular Spectroscopy*, 2007, Vol. 246, pp. 1–21, DOI: 10.1016/j.jms.2007.07.010.
2. Chesnokova T. Y., Chentsov A. V., Firsov K. M., Impact of spectroscopic information on total column water vapor retrieval in the near-infrared spectral region, *J. Applied Remote Sensing*, 2020, Vol. 14, Article 034510, DOI: 10.1117/1.JRS.14.034510.

3. Conway E. K., Gordon I. E., Kyuberis A. A. et al., Calculated line lists for H₂¹⁶O and H₂¹⁸O with extensive comparisons to theoretical and experimental sources including the HITRAN 2016 database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, Vol. 241, Article 106711, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.106711.
4. 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. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, Vol. 293, Article 108386, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108386.
5. Farmer C. B., Davies D. W., Holland A. L. et al., Mars: Water vapor observations from the Viking orbiters, *J. Geophysical Research*, 1977, Vol. 82, pp. 4225–4248, DOI: 10.1029/JS082i028p04225.
6. Fedorova A. A., Rodin A. V., Baklanova I. V., MAWD observations revisited: seasonal behavior of water vapor in the Martian atmosphere, *Icarus*, 2004, Vol. 17, pp. 54–67, DOI: 10.1016/j.icarus.2004.04.017.
7. Fedorova A., Korablev O., Bertaux J.-L. et al., Mars water vapor abundance from SPICAM IR spectrometer: Seasonal and geographic distributions, *J. Geophysical Research: Planets*, 2006, Vol. 111, Article E09S08, DOI: 10.1029/2006je002695.
8. Fedorova A. A., Korablev O. I., Bertaux J. L. et al., Solar infrared occultation observations by SPICAM experiment on Mars-Express: Simultaneous measurements of the vertical distributions of H₂O, CO₂ and aerosol, *Icarus*, 2009, Vol. 200, pp. 96–117, DOI: 10.1016/j.icarus.2008.11.006.
9. Fedorova A. A., Trokhimovsky S., Korablev O., Montmessin F., Viking observation of water vapor on Mars: Revision from up-to-date spectroscopy and atmospheric models, *Icarus*, 2010, Vol. 208, pp. 156–164, DOI: 10.1016/j.icarus.2010.01.018.
10. 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, Vol. 367, pp. 297–300, DOI: 10.1126/science.aay9522.
11. 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. Geophysical Research: Planets*, 2021, Vol. 126, Article e2020JE006616, DOI: 10.1029/2020JE006616.
12. 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. Geophysical Research: Planets*, 2023, Vol. 128, Article e2022JE007348, DOI: 10.1029/2022JE007348.
13. Fiorenza C., Formisano V., A solar spectrum for PFS data analysis, *Planetary and Space Science*, 2005, Vol. 53, pp. 1009–1016, DOI: 10.1016/j.pss.2004.12.008.
14. Gamache R. R., Neshyba S. P., Plateaux J. J. et al., CO₂-Broadening of Water-Vapor Lines, *J. Molecular Spectroscopy*, 1995, Vol. 170, pp. 131–151, DOI: 10.1006/jmsp.1995.1060.
15. Gamache R. R., Faresse M., Renaud C. L., A spectral line list for water isotopologues in the 1100–4100 cm⁻¹ region for application to CO₂-rich planetary atmospheres, *J. Molecular Spectroscopy*, 2016, Vol. 326, pp. 144–150, DOI: 10.1016/j.jms.2015.09.001.
16. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. et al., The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, Vol. 203, pp. 3–69, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
17. Gordon I. E., Rothman L. S., Hargreaves R. J. et al., The HITRAN 2020 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, Vol. 277, Article 107949, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.
18. Jakosky B. M., Farmer C. B., The seasonal and global behavior of water vapor in the Mars atmosphere: Complete global results of the Viking Atmospheric Water Detector Experiment, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, Vol. 87, pp. 2999–3019, DOI: 10.1029/JB087iB04p02999.
19. 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. Geophysical Research: Planets*, 2022, Vol. 127, Article e2022JE007252, DOI: 10.1029/2022JE007252.
20. Korablev O. I., Bertaux J. L., Kalinnikov Y. K. et al., Exploration of Mars in SPICAM-IR experiment onboard the Mars-Express spacecraft: 1. Acousto-optic spectrometer SPICAM-IR, *Cosmic Research*, 2006, Vol. 44, pp. 278–293, DOI: 10.1134/s0010952506040022.
21. Korablev O. I., Montmessin F., Trokhimovskiy A. et al., The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter, *Space Science Reviews*, 2018, Vol. 214, Article 7, DOI: 10.1007/s11214-017-0437-6.
22. Langlois S., Birbeck T. P., Hanson R. K., Temperature-Dependent Collision-Broadening Parameters of H₂O Lines in the 1.4-μm Region Using Diode Laser Absorption Spectroscopy, *J. Molecular Spectroscopy*, 1994, Vol. 167, pp. 272–281, DOI: 10.1006/jmsp.1994.1234.
23. Lavrentieva N. N., Voronin B. A., Fedorova A. A., H₂¹⁶O line list for the study of atmospheres of Venus and Mars, *Optics and Spectroscopy*, 2015, Vol. 118, pp. 11–18, DOI: 10.1134/s0030400x15010178.
24. Mikhailenko S., Kassi S., Mondelain D., Campargue A., Water vapor absorption between 5690 and 8340 cm⁻¹: accurate empirical line centers and validation tests of calculated line intensities, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, Vol. 245, Article 106840, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.106840.

25. Millour E., Forget F., Spiga A. et al., The Mars Climate Database (Version 6.1), *Europlanet Science Congress 2022*, Granada, Spain, 18–23 Sep. 2022, Vol. 16, Article EPSC2022-786, <https://doi.org/10.5194/epsc2022-786>, 2022.
26. Montmessin F., Korablev O., Lefèvre F. et al., SPICAM on Mars-Express: A 10 year in-depth survey of the Martian atmosphere, *Icarus*, 2017, Vol. 297, pp. 195–216, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.06.022>.
27. Pollack J. B., Dalton J. B., Grinspoon D. et al., Near-Infrared Light from Venus' Nightside: A Spectroscopic Analysis, *Icarus*, 1993, Vol. 103, pp. 1–42, DOI: 10.1006/icar.1993.1055.
28. Régalia L., Cousin E., Gamache R. R. et al., Laboratory measurements and calculations of line shape parameters of the H₂O–CO₂ collision system, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, Vol. 231, pp. 126–135, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.04.012.
29. Rothman L. S., Barbe A., Chris Benner D. et al., The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, Vol. 82, pp. 5–44, DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00146-8.
30. Rothman L. S., Jacquemart D., Barbe A. et al., The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, Vol. 96, pp. 139–204, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.10.008.
31. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y. et al., The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, Vol. 130, pp. 4–50, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.
32. Tran H., Ngo N. H., Hartmann J.-M., Efficient computation of some speed-dependent isolated line profiles, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, Vol. 129, pp. 199–203, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.06.015.
33. Trokhimovskiy A., Fedorova A., Korablev O. et al. (2015a), Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five Martian years of observations, *Icarus*, 2015, Vol. 251, pp. 50–64, DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.007.
34. Trokhimovskiy A., Korablev O., Kalinnikov Y. K. et al. (2015b), Near-infrared echelle-AOTF spectrometer ACS-NIR for the ExoMars Trace Gas Orbiter, *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII: Proc. SPIE*, 2015, Vol. 9608, Article 960809, DOI: 10.1117/12.2190369.