

## Аннотация (цикл работ)

### 1. Авторы

Кораблев О.И., Федорова А.А., Трохимовский А.Ю., Беляев Д.А., Игнатьев Н.И., Лугинин М.С.

### 2. Название

Исследования атмосферы Марса по данным приборов комплекса АЦС.

### 3. Ссылки на публикацию

Trokhimovskiy A., Fedorova A., Lefèvre F., et al. Icarus 2023

Revised upper limits for abundances of NH<sub>3</sub>, HCN and HC<sub>3</sub>N in the Martian atmosphere.  
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115789>

Alday J., Trokhimovskiy A., Patel M., et al. Nat Astron 2023

Photochemical depletion of heavy CO isotopes in the Martian atmosphere.  
<https://doi.org/10.1038/s41550-023-01974-2>

Fedorova A., Montmessin M., Trokhimovskiy A., et al. JGRE 2023

A Two-Martian Years Survey of the Water Vapor Saturation State on Mars Based on ACS NIR/TGO Occultations. <https://doi.org/10.1029/2022JE007348>

Belyaev D., Fedorova A., Trokhimovskiy A., et al. JGRE 2022

Thermal Structure of the Middle and Upper Atmosphere of Mars from ACS/TGO CO<sub>2</sub> Spectroscopy. <https://doi.org/10.1029/2022JE007286>

Fedorova A., Trokhimovskiy A., Lefèvre F., et al. JGRE 2022

Climatology of the CO Vertical Distribution on Mars Based on ACS TGO Measurements.  
<https://doi.org/10.1029/2022JE007195>

Olsen K., Fedorova A., Trokhimovskiy A., et al. JGRE 2022

Seasonal Changes in the Vertical Structure of Ozone in the Martian Lower Atmosphere and Its Relationship to Water Vapor. <https://doi.org/10.1029/2022JE007213>

Montmessin F., Belyaev D., Lefevre F., et al. JGRE 2022

Reappraising the Production and Transfer of Hydrogen Atoms from the Middle to the Upper Atmosphere of Mars at Times of Elevated Water Vapor. <https://doi.org/10.1029/2022JE007217>

Guerlet S., Ignatiev I., Forget F., et al. JGRE 2022

Thermal Structure and Aerosols in Mars' Atmosphere from TIRVIM/ACS Onboard the ExoMars Trace Gas Orbiter: Validation of the Retrieval Algorithm. <https://doi.org/10.1029/2021JE007062>

Belyaev D., Fedorova A., Trokhimovskiy A., et al. GRL 2021

Revealing a High Water Abundance in the Upper Mesosphere of Mars with ACS Onboard TGO. <https://doi.org/10.1029/2021GL093411>

Olsen K., Trokhimovskiy A., Braude A., et al., A&A 2021

Upper limits for phosphine (PH<sub>3</sub>) in the atmosphere of Mars. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140868>

#### 4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Многоплановые исследования структуры и состава атмосферы Марса важны с точки зрения сравнительной планетологии, эволюции планет земной группы и их атмосфер, оценки современной обитаемости Марса. Работы выполнены на основе данных российских приборов, входящих в состав спектрометрического комплекса АЦС, созданного в ИКИ РАН для исследования атмосферы Марса с орбитального аппарата TGO миссии ЭкзоМарс 2016.

#### 5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение

Исследование климата, вертикальной структуры и состава атмосферы Марса, а также поиск малых составляющих.

#### 6. Используемый подход, его новизна и оригинальность

Установка высокоточной аппаратуры на борту орбитального космического аппарата позволяет проводить непрерывный мониторинг атмосферы Марса. До настоящей

миссии и этого спектрометрического комплекса измерений подобного уровня не проводилось. Прибор АЦС МИР (средний ИК-диапазон 2.3–4.2 микрометра) представляет собой эшелле-спектрометр со скрещенной дисперсией для работы в режиме солнечных просвечиваний. Угловая дисперсия эшелле-решетки и сканирующей дифракционной решетки ориентируются во взаимно перпендикулярных направлениях, при этом на детекторе спектры соседних порядков эшелле располагаются друг над другом, обеспечивая одновременное измерение спектра в широком диапазоне с высоким спектральным разрешением. Прибор МИР имеет высокую спектральную разрешающую способность (~30 000) и хорошее отношение сигнал/шум (~5000 без учета усреднения), что позволяет при наблюдении солнечных затмений достичь предела детектирования газов рекордных для Марса 20–50 частей на триллион.

Канал ближней ИК-области АЦС НИР – универсальный эшелле-спектрометр с акустооптическим фильтром, охватывающий спектральный диапазон от 0,7 до 1,6 мкм с разрешающей способностью ~23000. Измерения проводятся в режимах «надир» и солнечных затмений для исследования водяного пара, угарного газа, кислорода и восстановления температур.

Третий канал фурье-спектрометр теплового инфракрасного диапазона АЦС ТИРВИМ охватывает спектральный диапазон 1,7-17 мкм с разрешением от 0,2 до 1,3 см<sup>-1</sup>. Этот прибор обеспечивает информацию о климате на Марсе: карты и профили температуры атмосферы, содержание пыли, температура поверхности.

Научная группа ИКИ РАН использует самостоятельно разработанные алгоритмы переноса излучения в атмосферах планет и алгоритмы восстановления атмосферных параметров из экспериментальных данных.

## 7. Полученные результаты и их значимость

ACS ведет измерения с апреля 2018-го. На регулярной основе проводится регистрация спектров поглощения и излучения атмосферы в широком спектральном диапазоне. На основе полученных данных проводятся восстановления атмосферных параметров, аэрозолей, концентраций основных составляющих и поиск новых малых составляющих. Так, в частности, были установлены строгие верхние пределы содержаний (без детектирования) ряда нитрилов – органических веществ с функциональной группой –CN (Trokhimovskiy et al. 2023). Также в виду предполагаемого обнаружения фосфина на Венере, по данным АЦС был исследован верхний предел содержания этого газа на Марсе (Olsen et al. 2021).

Озон и угарный газ являются важными индикаторами химии марсианской атмосферы, в которой имеется значительный дефицит продуктов диссоциации CO<sub>2</sub> (CO, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O), распадающегося под действием солнечного света. Рекомбинация углекислого газа контролируется следовыми количествами воды, различными формами нечетного водорода (H, OH, HO<sub>2</sub>). Чтобы сбалансировать диссоциацию и рекомбинацию CO<sub>2</sub>, нужно учитывать гетерогенные (с участием газа и аэрозольных

частиц) реакции. Современные модели требуют одновременных и совмещенных измерений продуктов диссоциации ( $O_3$ ,  $CO$ ) и водяного пара. Такие данные появились в результате измерений ACS/TGO. Полученные АЦС данные и их объем позволяют исследовать сезонные и пространственные вариации водяного паракратно лучше предыдущих работ. Чувствительность аппаратуры позволяет впервые восстанавливать профили содержания до высоты 120 км (Belyaev et al. 2022). Результаты этой работы в дальнейшем использованы для развития моделей диссипацией атмосферы (Montmessin et al. 2022). Показано, что южная весна/лето наиболее эффективна в производстве  $H$  и его подъеме в верхние слои атмосферы и на длительном масштабе времени наибольший вклад в потери воды с Марса дает сезонный эффект. Используя одновременные измерения температур и концентраций водяного пара были получены карты перенасыщения водяного пара в атмосфере (Fedorova et al. 2023), расширяющие ранее начатые исследования этого явления на несколько марсианских лет. Показано, что перенасыщение водяного пара в атмосфере Марса наблюдается практически повсеместно, особенно в сезон с повышенным содержанием пыли, что должно увеличивать среднегодовую диссипацию воды. Цикл водяного пара в свою очередь тесно связан и взаимно определяет цикл содержания озона, также изученного по данным АЦС (Olsen et al. 2022). Наблюдаемое содержание  $O_3$  больше в 2–6 раз по сравнению с моделями общей циркуляции, указывая на проблемы со скоростями реакций с участием нечетного водорода. Недостаток озона в модели означает, что каталитическое действие  $HO_x$ , переоценено, что перекликается с давней проблемой недооценки  $CO$  в фотохимических моделях Марса. Аналогичные трудности возникают при моделировании  $O_3$  и  $HO_x$  в верхней стратосфере и мезосфере Земли.

Детальный анализ тепловой структуры Марса в широком диапазоне высот в различные сезоны опубликован в работах (Belyaev et al. 2023) и (Guerlet et al. 2022). Belyaev et al. (2022) получили профили атмосферы в беспрецедентном диапазоне высот, от 20 до 180 км. Они представили широтную и сезонную климатологию структуры атмосферы в течение полутора марсианских лет, 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. Преимуществом орбиты TGO является возможность наблюдать суточный цикл за период в 54 сола (марсианских дней). Из спектров ТИРВИМ восстановлены вертикальные профили температуры от поверхности до 60 км, температуры поверхности и оптическая толщина аэрозоля (пыль и водяной лед) (Guerlet et al. 2022). Эти данные дали начало серии работ по исследованию атмосферных приливов, ассимиляции в модели общей циркуляции и др.

Впервые в истории исследований Марса получена полная климатология вертикального распределения угарного газа от 0 до 80 км (Fedorova et al. 2022) и проведен анализ изотопного состава углерода в  $CO$  (Alday et al. 2023). До этого измерялся только вертикально интегрированный столб  $CO$ , без информации о верхних слоях атмосферы, где производится  $CO$ . Данные работы очень важны для уточнения фотохимических реакций в атмосфере Марса, в том числе в термосфере. Измерения отношений изотопов углерода в углекислом газе и угарном газе  $CO$ ,

содержание которого растёт с высотой, показали что для CO<sub>2</sub> отношения падают с высотой из-за диффузионного разделения, в то время как CO обеднен тяжелыми изотопами С и О из-за фотохимических процессов. Сделан вывод, что потери углерода в истории Марса не столь существенны, как считалось ранее. Результаты позволяют уточнить оценки полных потерь воды и летучих с Марса, опирающиеся на отношения изотопов.