РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР В 2015–2018 гг.

© 2020 г. О. И. Кораблев*

Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия *e-mail: korab@iki.rssi.ru Поступила в редакцию 27.09.2019 г. После доработки 12.11.2019 г. Принята к публикации 20.11.2019 г.

Представлен обзор результатов исследований планетных атмосфер в 2015–2018 гг. российскими учеными, подготовленный в Комиссии по планетным атмосферам Национального геофизического комитета для Национального отчета по метеорологии и атмосферным наукам к XXVII Генеральной ассамблее Международного союза геодезии и геофизики¹ (г. Монреаль, 8–18 июня 2019 г.).

Ключевые слова: атмосфера, планета, Марс, Венера, планеты-гиганты, спектроскопия, аэрозоль, динамика атмосферы, диссипация атмосферы

DOI: 10.31857/S0002351520020066

1. ВВЕДЕНИЕ

Статья основана на главе в Российский национальный доклад по метеорологии и атмосферным наукам за 2019г [1] и включает исследования атмосфер планет, выполненные в 2015–2018 гг. Как и ранее [2], значительная доля результатов получена путем анализа данных европейских космических аппаратов Mars Express и Venus Express, оснащенными приборами с российским участием. Космический аппарат Mars Express работает на орбите около Марса уже более 15 лет и продолжает наблюдения. После десяти лет успешной работы космического аппарата (КА) были опубликованы несколько работ, обобщающих долгосрочные наблюдения. КА Venus Express завершил научные наблюдения в 2014 г., после почти девяти лет успешной работы. 2015-2018 гг. были временем подведения итогов длительных наблюдений и публикации результатов трех скоординирован-

ных рабочих групп, посвященных атмосфере Венеры и проведенных в Международном институте космических наук (ISSI) в Берне в 2013—2014 гг. Результаты, полученные *Venus Express* в значительной степени способствовали завершению работы над новой книгой *Venus III*, главы которой также опубликованы как серия статей в журнале Space Science Reviews [3]. Наконец, прогрессу исследований планетных атмосфер в России способствовало создание лаборатории "Планеты земной группы и обитаемые экзопланеты: прошлое, настоящее и будущее" во главе с Ж.-Л. Берто в Институте космических исследований (ИКИ РАН) ("Мегагрант", 2017–2019).

Данный обзор Комиссии по планетным атмосферам Национального геофизического комитета основан на результатах, связанных с нейтральной атмосферой и с климатом планет и опубликованных в рецензируемой литературе в 2015—2018 гг. Результаты в обзоре сгруппированы по планетам, включая, при необходимости, краткий отчет о текущих или будущих космических экспериментах с участием России.

2. BEHEPA

2.1. Состав атмосферы

В 2017 г. опубликованы результаты работы Международной группы ISSI, посвященной диоксиду серы (SO₂) в атмосфере, [4, 5]. Основным источником экспериментальных данных послужили результаты эксперимента SPICAV/SOIR на борту KA *Venus Express*, но в статьях собраны все доступные на сегодняшний день данные. SO₂ является ключевым компонентом круговорота серы в атмосфере Венеры. Это соединение тесно связано с глобальным облачны слоем, в основном состоящем из капельной концентрированной серной кислоты. Наблюдения диоксида серы дают информацию о химических превращениях в атмосфере

¹ Russian National Report. Meteorology and Atmospheric Sciences: 2015–2018 for the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Montreal, Canada, July 8–18, 2019)/ Ed.: Mokhov I.I., Krivolutsky A.A. – Moscow: MAKS Press, 2019. 332 p. DOI 10.29003/m662.978-5-317-06182-1



Рис. 1. Вертикальное распределение относительного содержания SO₂ в атмосфере Венеры (компиляция всех доступных данных; ссылки см. в [3]). Представлено Д.А. Беляевым на симпозиуме 6MS3, IKI, Москва, 5–9 октября 2015 г.

Венеры, динамике атмосферы и возможном вулканизме. Недавние наблюдения серосодержащих соединений (SO₂, SO, OCS, and H_2SO_4) в мезосфере Венеры содержат немало противоречий, в частности между космическими и наземными наблюдениями. Наблюдаемое распределение и пространственно-временную изменчивость пока не удается объяснить в рамках существующих моделей.

В работе [4] основное внимание уделено вертикальному распределению SO₂ (см. также [6]). Наиболее заметной особенностью вертикального профиля содержания SO₂ в атмосфере Венеры является инверсионный слой на высоте 70-75 км, с увеличением относительного содержания выше (рис. 1). Для объяснения инверсии необходим дополнительно еще один резервуар серы (в дополнение к SO₂ и SO) во всем диапазоне высот 70-100 км. Ни одна из фотохимических моделей пока не объясняет такое поведение. Модели общей циркуляции указывают на существенную роль динамики при образовании инверсии, но не дают четкого объяснения ее причины при различных широтах и солнечном времени. В работе [5], на основе наблюдений Venus Express, наземных телескопов и космического телескопа Хаббла, рассматривается горизонтальная и временная изменчивость SO₂ на различных масштабах времени. Для долгосрочных трендов содержания SO₂ на

уровне верхней кромки облаков характерна череда быстрых всплесков, сопровождаемых медленным уменьшением содержания. С этим связана гипотеза, объясняющая всплески возмущениями динамики вследствие вулканических извержений (см. [2] и ссылки в этой работе). Видимо, важную роль играет транспорт воздуха с более низких высот. Природа быстрой переменности содержания SO_2 с большей амплитудой пока однозначно не установлена. Она может быть связана с изменениями в вертикальном переносе SO_2 , изменениями в его содержании, или, возможно, в производстве и потерях H_2O , H_2SO_4 и S_x .

Атмосфера Венеры практически лишена водяного пара, но вода в следовых количествах играет важную роль в общем радиационном балансе планеты. Измерения содержания H_2O над облаками с помощью спектрометра SPICAV (канал VIS-IR) получены за все время работы KA *Venus Express* с 2006 по 2014 г. Прибор измерял содержание H_2O в отраженном солнечном свете в полосе поглощения при 1.38 мкм. Линии поглощения воды образуются на высотах 59–66 км. Относительное содержание H_2O составляет ≈6 ррт в низких широтах, 5.5 ррт в средних широтах и увеличивается до 7 ррт в высоких широтах в обоих полушариях. Наблюдались быстрые изменения водяного пара в 2–3 раза, заметно превышающие ошибки

измерения. Они могут быть объяснены как реальным изменением отношения смеси, так и изменениями прозрачности облаков. Максимум воды в низких широтах позволяет предположить конвекцию и поставку воды из нижних слоев атмосферы [7]. Вертикальный градиент воды внутри облачного слоя хорошо коррелирует с увеличением общего содержания воды и понижением облаков около полюсов (высота над уровнем моря, полученная по поглощению СО₂, 1.4–1.6 мкм). В течение 8.5 лет наблюдений долговременных изменений содержания водяного пара или высоты облачного слоя не установлено. Также, не прослеживаются зависимости от местного времени. Относительное содержание H₂O по данным SPICAV, как правило, выше, чем то же содержание, полученное в диапазоне 2.56 мкм по данным VIRTIS-H [8].

В одномерной модели облаков Венеры [9] обновлены термодинамические параметры и уменьшено фотохимическое производство серной кислоты. Модель использовалась для моделирования вертикального профиля паров H₂O и H₂SO₄ и концентрации серной кислоты. Для глобально-средних условий модель предсказывает нижнюю границу облачности (НГО) на высоте 47.5 км, пиковое содержание H_2SO_4 на уровне 7.5 ppm на НГО и соотношения смешивания H₂O 7 ppm на 62 км и 3.5 ppm на 67 км выше 67 км. Эти результаты находятся в разумном согласии с наблюдениями, за исключением концентрации серной кислоты в нижних облаках [10]. Фотохимическая модель атмосферы Венеры на 47-112 км [11] обновлена с учетом новых данных о содержании S_2O_2 , H_2O_3 , OCS и H₂ [12]. Показано, что изменчивость соединений серы может быть вызвана незначительными изменениями в динамике атмосферы, и для ее объяснения не требуется вулканизм. Содержание S₂O₂, установленное путем моделирования слишком мало, чтобы отвечать за поглощение в ближней УФ-области (неизвестный УФ-поглотитель).

На основе данных астрономических наблюдений установлен верхний предел содержания HBr в атмосфере Венеры. Наиболее сильную линию HBr при 2605.8 см⁻¹ наблюдали с использованием IRTF NASA и длиннощелевого спектрографа высокого разрешения CSHELL с разрешающей способностью 4×10^4 . По усредненному спектру Венеры получен верхний предел относительного содержания HBr ~1 ppb на верхней кромке облаков (78 км) [13]. Упрошенное описание фотохимии брома включено в модель [12]. Моделирование показывает, что реакции с участием бромистых соединений на Венере могут проходить даже при их содержании меньше наблюдаемого верхнего предела. Однако, если принять, что отношение Cl/Br в атмосфере Венеры соответствует этому отношению в Солнечной системе, то содержание НВг в нижней атмосфере составит ≈1 ppb. Тогда химией брома можно пренебречь.

2.2. Аэрозоли

Ряд исследований посвящен составу облаков Венеры, в частности неизвестному УФ-поглотителю. Гало, возникающее при рассеянии сферическими частицами под малыми фазовыми углами, часто присутствует на изображениях Венеры. Сравнение фазовых профилей при наблюдениях гало, полученных с помощью Venus Monitoring Camera (VMC), Venus Express, и светорассеивающих характеристик капель серной кислоты, содержащих примеси с более высоким показателем преломления, помогает выбрать кандидатов для так называемого неизвестного поглотителя УФизлучения. Неизвестный УФ-поглотитель вызывает контрасты верхнего облачного слоя Венеры (высота 70-90 км), наблюдаемые при 0.365 мкм. Установлено, что часто рассматриваемая сера плохо подходит на роль поглотителя, поскольку она не смачивается серной кислотой. Частицы серы прилипают к каплям H₂SO₄, но не обволакиваются ими. Рассеяние на частицах с серными каплями полностью искажает или размывает характерную картину гало. Другие подходящие поглотители УФ-излучения, такие как, например, хлорид железа, легко внедряются в капли H₂SO₄ и поэтому соответствуют наблюдениям гало [14-18]. Систематические наблюдения гало с помощью ИК-спектрополяриметра SPICAV, Venus Express в ближней ИК-области (0.65–1.7 мкм) подтверждают, что сферические частицы составляют большую часть облачного слоя на планете [19].

Присутствие хлорида железа FeCl₃ в среднем и нижнем облачных слоях рассмотрено в работе [20]. Хлорид железа, как кандидат на роль УКФпоглотителя в облаках Венеры, обсуждается уже три десятилетия. Это соединение наблюдалось прямым методом рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. Его наличие объясняет отражательную способностью Венеры в ближней ультрафиолетовой и синей области спектра, объясняет высотные профили первой моды аэрозоля в среднем и нижнем облачных слоях, а также объясняет уменьшение поглощения в ближней УФ-области ниже 60 км. Кроме того, доставка FeCl₃ в верхний облачный слой и производство серной кислоты находятся в пропорции 1:100 по массе, что как раз соответствует наблюдаемому альбедо в ближней ультрафиолетовой области. Также удовлетворяют этой пропорции размеры частиц мод 1 и 2. Вычислено относительное содержание Fe₂Cl₆ в атмосфере, 17 ppbv, и мольная доля $FeCl_3$ в поверхностных породах, 19 ррву.

Еще один кандидат на роль УФ-поглотителя, аэрозоль серы рассмотрен в работе [21]. Фотохи-

мическая модель [11] предсказывает аэрозоль серы как продукт фотолиза OCS на 55-60 км. Рассчитанная массовая доля намного меньше, чем у частиц первой моды в верхнем облачном слое. Химико-кинетическое моделирование [22] дает постоянное относительное содержание OCS + + XSX 20 ppm, и относительное содержание S_{∞} 2.5 ppm на ~47 км. Это составляет ~10% от общей массовой доли аэрозоля в нижнем облачном слое, ограничивая расчетный профиль аэрозоля серы на нижней границе мод 2 и 3. Поэтому содержание S_8 на верхней кромке облаков слишком мало, а аэрозоль серы не может служить УФ-поглотителем, подтверждая выводы [14, 20]. Также, расчетный профиль аэрозоля серы не согласуется с профилем поглотителя, измеренным посадочным аппаратом Венера 14.

В работе [7] была дана оценка высоты облаков по надирным измерениям SPICAV IR/Venus Express в полосе CO₂. Высота, на которой оптическая глубина аэрозоля в надире при 1.48 мкм равна единице, варьируется от 68 до 73 км при $40^{\circ}-40^{\circ}$ с.ш. при среднем значении 70.2 ± 0.8 км, принимая высоту аэрозольной шкалы 4 км (см. ниже). В высоких северных широтах верхняя кромка облаков опускается до 62–68 км.

Верхний облачный слой Венеры важен для энергетического баланса мезосферы. Радиационное воздействие, обусловленное облаками, существенно меняющиеся в зависимости от широты, изучено с использованием радиозатмений KA Venus Express и модели трехмерного переноса излучения [23]. Высота верхней кромки облаков контролирует исходящий тепловой поток. Резкая граница облаков может привести к ярко выраженному пику как солнечного нагрева, так и охлаждения, свидетельствуя о радиационной природа температурных инверсий в холодном полярном воротнике. Значительная суточная изменчивость радиационного эффекта облаков в низких широтах может объяснить конвективные ячейки, наблюдаемые на ультрафиолетовых изображениях. Широтные контрасты в радиационном воздействии в мезосфере могут управлять меридиональной циркуляцией типа Хэдли с меридиональными ветрами порядка нескольких м/с и вертикальными движениями со скоростью порядка нескольких см/с.

Вертикальная структура и свойства верхнего облачного слоя были изучены с помощью наблюдений солнечных затмений на лимбе Венеры с помощью ИК-спектрометра SPICAV. Проанализированы данные на протяжении всей миссии (с мая 2006 г. по ноябрь 2014 г.). Вертикальные профили поглощения на десяти длинах волн ближнего ИК-диапазона (в диапазоне 0.65–1.7 мкм) на высотах 70–95 км позволяют исследовать микрофизические свойства мезосферной дымки. У экватора дымка выше, чем на полюсах. Шкала высоты аэрозоля в верхней дымке составляет 3.3 ± 0.7 км. На высотах 70–90 км часто наблюдались изолированные слои дымки. Свойства аэрозольных частиц согласуются с одномодовым или бимодальным распределением. Для показателя преломления H_2SO_4 , размеры частиц для бимодального распределения составляют 0.12 и 0.84 мкм, или ~0.5 мкм для одной моды. Размер частиц меняется на масштабе времени в несколько месяцев; также, частицы в полярных областях в 1.5–2 раза меньше [24, 25].

Уже упомянутые поляризационные данные ИК-наблюдений SPICAV IR (0.65–1.7 мкм) были проанализированы за период 2006-2010 гг. Данные в основном охватывают северное полушарие [19]. Степень поляризации, измеренная на нескольких орбитах, согласуется с данными наземных наблюдений и КА Pioneer Venus. Получено среднее значение эффективного радиуса частиц $r_{\rm eff} \approx 1$ мкм с узким распределением (эффективная дисперсия $v_{eff} \approx 0.07$) и показатель преломления 1.42 при 1 мкм. Сравнение с данными солнечных затмений SPICAV позволяет сделать вывод, что поляриметрические измерения в ИК-диапазоне наиболее чувствительны к большей моде частиц. Глобальные наблюдения показывают значительную поляризацию. Резкое увеличение ветви положительной поляризации с увеличением широты подтверждает наличие частиц субмикронного размера в полярных областях. Также, в высоких широтах удваивается оптическая толщина этой субмикронной дымки. Следует ожидать более систематического подхода к анализу большого объема поляризационных данных SPICAV, что позволит провести долгосрочный обзор параметров облачности, и провести сравнение с результатами поляризационных наблюдений Pioneer Venus [26].

Опубликована глава в книге *Venus III* и обзорная статья, посвященные облакам и дымке на Beнере [27].

2.3. Структура и динамика атмосферы

Термическая структура верхней атмосферы Венеры (90–140 км) исследована с использованием звездных затмений SPICAV UV/Venus Express [28]. Профили концентраций молекул CO₂ измерялись на ночной стороне (18:00–06:00 ч местного времени); профили температуры в гидростатическом приближении доступны с вертикальным разрешением 7 км как в южном, так и в северном полушариях. В мезопаузе (90–100 км) постоянно наблюдается слой теплого воздуха. С увеличением высоты температура снижается, достигая минимума около 125 км. На этих высотах в структуре атмосферы Венеры доминируют изменения, связанные с местным временем: температура повышается на 20 К на утренней стороне по сравнению с вечерней. Высота гомопаузы колеблется между 119 км на вечерней стороне и 138 км на утренней.

Опубликован обзор современных наблюдений термической структурой атмосферы Венеры, в частности, сравнение данных КА Venus Express и наземных наблюдений, а также обновление Международной эталонной атмосферы Венеры (VIRA) [29]. Наблюдения Venus Express значительно расширили наши знания о термической структуре атмосферы Венеры выше 40 км и дали новую информацию выше 100 км. Вклад новых данных КА Venus Express в VIRA также рассмотрен в работах [23, 30].

Достижения в области исследования молекулярных поглощений при высоком давлении (неисчерпывающий список литературы [31–36]) привели к лучшему пониманию переноса излучения в атмосфере Венеры и обновлениям для спектроскопических баз данных [37, 38].

Большое количество изображений Венеры в ультрафиолетовом и ближнем ИК-диапазонах, полученных с помощью VMC/Venus Express за время работы миссии использованы для отслеживания видимых движений облаков. Это позволило исследовать ветры и скорость суперротации на уровне облаков [39-41]. В низких широтах облака наблюдаются в ультрафиолетовом диапазоне на высоте около 67 км. Средний и нижний уровень облаков (49-57 км) видны в ближнем ИК-диапазоне. Средняя зональная скорость ретроградного ветра на этих уровнях составляет ~90 и 68-70 м/с соответственно. Максимум скорости ветра ~100 м/с наблюдается на верхней кромке облаков при 40°-50° ю.ш., уменьшаясь с широтой к полюсу. Средний меридиональный ветер к полюсу медленно изменяется от нулевого значения на экваторе до примерно 10 м/с при 50° ю.ш., а затем возвращается к нулю на полюсе. Средняя меридиональная скорость в облаках имеет положительный знак при $5^{\circ}-65^{\circ}$ ю.ш., указывая на экваториальное течение. Вместе с полярным течением на верхней кромке облаков это позволяет предположить замкнутую ячейку Хэдли на высотах 55-65 км.

Обнаружена корреляция между зональной низкоширотной картиной ветра и топографией земли Афродиты [42], которая интерпретируется как результат стационарных гравитационных волн, возникающих на уровне поверхности вблизи гор. Долгосрочный (2006—2012 гг.) тренд зональной скорости ветра в низких широтах, предложенный ранее [39], не подтверждается [41, 42]. Кажущийся тренд скорости ветра объясняется наблюдательной селекцией, связанной с влиянием рельефа поверхности.

Циркуляция атмосферы Венеры также исследована в области мезосферы (90–110 км) с помощью слежения за видимыми движениями "облаков" ночного свечения (1.27 мкм) синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ [43]. Изображения свечения получены прибором VIRTIS-M/Venus Express в течение более 2 лет, охватывая ночное южное полушарие планеты. Наблюдаются два противоположных потока от терминаторов до полуночи. Восточный (с утренней стороны) ветер превышает западный (вечерний) на 20-30 м/с. Два потока встречаются при $\approx 22:30$. Удивительно, но на этих высотах тоже угадывается влияние топографии поверхности: над горными районами потоки как будто сталкиваются с препятствием, иногда смещенным на несколько градусов. Этих высот могут достигать стационарные гравитационные волны, берущие начало на поверхности. Были обнаружены случаи кругового движения, охватывающие области 1500-4000 км. Средняя горизонтальная циркуляция на высоте 100 км не является ни суперротацией, ни циркуляцией от подсолнечной к антисолнечной (SS-AS), ни их комбинацией. Как зональная, так и меридиональная составляющие движения имеют разные величины и направления до и после полуночи.

Интересно, что влияние поверхности на циркуляцию подтверждается моделированием общей циркуляции, хотя эффект проявляется только выше 80 км [44]. Опубликованы обзорные работы по суперротации и турбулентности в атмосфере Венеры [45, 46].

2.4. Будущие миссии к Венере

Несмотря на огромный прогресс, достигнутый в последние годы, и успех орбитальных аппаратов Venus Express и "Акацуки", много фундаментальных вопросов, касающихся истории, эволюции Венеры и текущих геологических и атмосферных процессов остаются без ответов. В поисках приоритетов среди этих научных вопросов, с 2015 г. работает объединенная группа России и США по определению научных задач для новой космической миссии к Венере - "Венера-Д". Планируется, что проект будет включать орбитальный аппарат и ряд модулей для исследований на месте, в том числе классический посадочный аппарат типа ВеГа, долгоживущие элементы на поверхности и атмосферный элемент, обеспечивающий мобильность [47]. Опубликован ряд вспомогательных исследований, включая систему термозащиты для посадки на поверхность Венеры [48] и оценку видимости поверхности Венеры сквозь облака на ночной стороне [49]. Начиная с 2019 г., практическая реализация проекта "Венера-Д" рассматривается Роскосмосом и НАСА.

3. MAPC

3.1. Состав атмосферы

Эксперимент SPICAM на борту *Mars Express* с 2004 г. накопил множество наблюдений, позволяющих детально охарактеризовать состав и ак-



Рис. 2. Пять марсианских лет наблюдений SPICAM/*Mars Express* в режиме надира [51]. Зонально-усредненные значения в зависимости от солнечной долготы (Ls, марсианский сезон) для (сверху вниз): водяного пара, озона, синглетной дельта-эмиссии молекулярного кислорода в ближней инфракрасной области, оптической толщины пыли и водяного льда в УФ (на 250 нм).

тивность атмосферы от приповерхностного слоя до экзосферы. Климатология SPICAM, одна из самых длинных на сегодняшний день, полученных с орбиты Марса. дает возможность изучать судьбу основных летучих составляющих в атмосфере Марса в течение многих марсианских лет (МҮ). Двумя каналами, ультрафиолетовым (УФ) и инфракрасным, SPICAM наблюдает за атмосферными газами, от обильных (СО₂) до следовых (H₂O, O₃) [50-52]. Многолетние наблюдения за атмосферным водяным паром [52], свечениями [53], озоном, облаками и пылью, углекислым газом, экзосферным водородом [52] охватывают период МҮ27–МҮ31 (рис. 2). Мониторинг в УФ прекратился в конце 2014 г. (МУЗ0) из-за отказа УФ-канала, в то время как ИК-канал продолжает наблюдать.

Конкретный вывод, вытекающий из многолетних наблюдений SPICAM — эффективный массоперенос между нижней и верхней атмосферой. Это лучше всего иллюстрируется водой и молекулярным водородом; в течение трех марсианских лет SPICAM позволил измерять оба соединения. Связь между ними, по-видимому, происходит на сезонных временных масштабах, намного короче, чем теоретические прогнозы (см. ниже). Была предпринята неудачная попытка обнаружения SO₂, с верхним пределом выше ранее опубликованного. В работе [53] проведено сравнение измерений синглетной дельта-эмиссии молекулярного кислорода SPICAM с профилями атомарного кислорода, полученными в результате одномерного моделирования химического состава атмосферы Марса.

Относительное содержание CO на Марсе меняется с сезоном, так как доля неконденсируемых газов возрастает при конденсации CO₂-атмосферы. Вариации CO изучались с помощью наземной спектроскопии высокого разрешения [54]. Точность результатов была улучшена при использовании линий ¹³CO и CO₂ с низкой температурной зависимостью и хорошими известными спектроскопическими параметрами. Соотношение ¹³CO/CO в 1.023 раза превышающее земное, рассчитано с использованием отношения ¹³CO₂/CO₂ = 1.046, измеренного *MSL Curiosity*, с учетом фракционирования изотопов при фотолизе CO₂ и в реакции между CO и OH. Наблюдения охватывают максимум CO в южном полушарии в течение северного ле-

та. Обогащение СО в южных полярных областях наблюдалось, в основном, на высоких широтах, что согласуется с предсказаниями модели Mars Climate Database (MCD от LMD, Париж), но противоречит другим наблюдениям, демонстрируя существенные широтные градиенты и сезонные колебания. Получено глобальное среднее содержание СО на Марсе, 700 ррт, что меньше других измерений примерно в 1.4 раза.

Вопрос об изотопологах CO₂, измеренных MSL Curiosity, также рассмотрен в работе [55]. Соотношения смешивания N₂, Ar, O₂ и CO, точно измеренные квадрупольным масс-спектрометром MSL Curiosity, были скорректированы с учетом сезонных колебаний атмосферного давления, чтобы выяснить их среднегодовые относительные содержания на Марсе [56]. Поправки вычислены с использованием измерений давления в течение первого года работы посадочных аппаратов Viking 1 и 2 и базы MCD. Полученные среднегодовые относительные содержания (1.83 ± 0.03)% для N₂, (1.8 ± 0.02)% для Ar, (1.56 ± 0.06) × 10^{-3} для O₂ и 673 ± 2.6 ppm для CO.

Обзор современного понимания атмосферной фотохимии на Марсе представлен как глава книги *Atmosphere and Climate of Mars* [57].

3.2. Сезонный цикл воды и диссипация атмосферы

Прогресс в исследованиях круговорота воды постепенно приводит к пониманию того, что вода в нейтральной нижней атмосфере тесно связана с водородной короной и потерей воды с Марса. Поэтому мы рассмотрели эти вопросы вместе.

Текущее состояние понимания круговорота воды на Марсе представлено в книге Atmosphere and Climate of Mars [58]. Климатология атмосферного водяного пара в течение нескольких марсианских лет приведена в работе [50]; см. также [51] и рис. 2.

Новая схема гидрологического цикла была внедрена в модель общей циркуляции атмосферы Марса Института Макса Планка (MAOAM) [59, 60]. Схема включает более точную параметризацию микрофизических процессов между водяным паром и ледяными облаками, включая процессы насыщения, образование ядер конденсации, роста частиц, сублимации и осаждения, применяя переменное распределение частиц по размерам. Результаты моделирования, межгодовые колебания, горизонтальное и вертикальное распределение водяного пара и ледяных облаков сравниваются с имеющимися наблюдениями. В частности, изучены мономодальное и бимодальное распределения ядер конденсации льда.

Наблюдения Марса в УФ излучении водорода Лайман-альфа при помощи космического телескопа Хаббла и SPICAM/*Mars Express* [52] пока-

зывают изменения водородной короны с марсианским сезоном, и ее значительное увеличение в перигелии (см. также [61]). В 2007 г (МУ28) наблюдалось увеличение свечения короны на порядок в течение нескольких месяцев, что совпало с глобальной пыльной бурей. Наблюдаемое увеличение Лайман-альфа интерпретируется как связь между нижней и верхней атмосферой. Разогрев нижней атмосферы в сезон перигелия, вызываемый увеличенным содержанием пыли, побуждает пары воды достигать больших высот. Там молекулы воды диссоциируют под воздействием солнечного света, обеспечивая источник водорода для верхних слоев атмосферы. Такая схема позволяет поставлять водород в верхнюю атмосферу намного быстрее, чем принятая с 70-х гг. традиционная схема с участием молекулярного водорода Н₂. Вертикальное распределение водяного пара во время глобальной пыльной бури 2007 г. исследовано по данным солнечных затмений SPICAM [62]. В северном полушарии при $Ls = 268^{\circ} - 285^{\circ}$ плотность H₂O на 60-80 км увеличилась на порядок. Во время пыльной бури профили достигли 80 км с плотностью H_2O , превышающей 10^{10} молекул см⁻³ (относительное содержание волы ≥200 ррт). Наибольшие значения плотности Н₂О, наблюдаемые выше 60° с.ш. при Ls = $269^{\circ} - 275^{\circ}$, непосредственно не коррелируют с аэрозолем. Это увеличение, вероятно, связано с нисходящей ветвью меридиональной циркуляции, переносящей воду из южного полушария в высокие северные широты, усилившейся во время пыльной бури. Сравнение со спокойным марсианским годом МУ32, когда содержание H₂O в северном полушарии не превышало 2×10^{10} молекул см⁻³ и 50 ppm на 60 км, показало, что глобальная пыльная буря была уникальным событием. В южном полушарии увеличение воды во время пылевого шторма было более умеренным (в 4-5 раз; сопоставимое увеличение (в 2–3 раза) также наблюдалось в МУ32, что предполагает сезонную повторяемость. Наблюдаемое количество воды на больших высотах в обоих полушариях может привести к значительному увеличению скорости выхода Н, на масштабе нескольких недель. Для разделения эффектов сезонности и пылевых бурь необходимы дальнейшие наблюдения и моделирование. Процессы диссипации атмосферы Марса также рассмотрены в работах [63, 64].

В работе [65] приведены результаты измерения соотношения HDO/H_2O в марсианской атмосфере по данным наземных спектроскопических наблюдений с высоким разрешением на обсерватории IRTF HACA в 2007—2014 гг. Такие наблюдения трудны, потому что содержание воды в земной атмосфере превышает марсианскую воду на два порядка даже в исключительно благоприятных условиях на Мауна-Кеа (Гавайи, высота 4.2 км). Линии

HDO и H₂O сравнимой эквивалентной ширины наблюдались при близких волновых числах 2722 и 2994 см⁻¹, сводя к минимуму влияние поглощения и рассеяния аэрозоля на получающиеся отношение HDO/H₂O. В четырех наблюдениях получена слабая зависимость в широком диапазоне широт, как и предсказывает модель общей циркуляции. Два других наблюдения отклоняются от модельных предсказаний, показывая корреляцию между HDO/H₂O и температурой на высоте ≈7 км над поверхностью. Измерено глобальное среднее отношение HDO/H₂O в 4.6 ± 0.7 раза превышающее земное отношение; отношение паров, выходящих из северной полярной шапки, составляет 6.2 ± 1.4 . Соотношение в ледяном покрове северной полярной шапки, полученное с помощью оценки модели общей циркуляции, составляет 7.1 ± 1.6 .

3.3. Верхняя нейтральная атмосфера

Усовершенствованная физическая модель и методы расчета для задачи переноса излучения при нарушениях локального термодинамического равновесия опубликованы в работах [66, 67]. Рассмотрены колебательные состояния и заселенность уровней в молекулярных полосах CO_2 и CO в ближнем инфракрасном диапазоне (1–5 мкм) в дневной атмосфере Марса.

Хотя марсианская мезосфера и термосфера, область выше примерно 60 км, не является основной целью миссии ExoMars 2016 г., Trace Gas Orbiter (TGO), будет ее исследовать и может ответить на многие важные вопросы [68].

3.4. Проект ExoMars

Значительное продвижение в понимании атмосферы, климата и метеорологии Марса ожидается с приходом данных проекта ESA и Роскосмоса ExoMars. Первая часть проекта – спутник Trace Gas Orbiter (TGO), запущенный российским ракетой-носителем "Протон" в 2016 г., вышла на окончательную научную орбиту в марте 2018 г и проводит полномасштабные научные наблюдения с 21 апреля 2018 г. Орбита спутника оптимизирована для исследований атмосферы и климата: почти на каждом витке она позволяет проводить наблюдения солнечных затенений, обеспечивая наиболее чувствительное зондирование малых атмосферных составляющих. Надирные треки позволяют проводить систематические наблюдения при различном местном времени. Полный обзор по местному времени требует 60 дней. Два из четырех приборов спутника, российский ACS [69, 70] и европейский NOMAD [71-73], предназначены для измерения малых составляющих атмосферы и мониторинга основных климатических параметров. Два прибора провели поиск малых атмосферных газов и наблюдали глобальную пыльную бурю 2018 г., и региональную пыльную бурю в начале 2019 г.

ExoMars 2020, вторая часть проекта, состоит из ровера-марсохода Розалинд Франклин и неподвижной посадочной платформы. В научный комплекс стационарной посадочной платформы со сроком службы не менее одного марсианского года входит ряд приборов для метеорологических и атмосферных исследований [74]. Полномасштабный метеорологический комплекс, опирающийся на предыдущие разработки [75, 76], по состоянию на сентябрь 2019 г. находится в процессе изготовления. Планируется, что комплекс позволит провести измерения атмосферного профиля во время спуска десантного аппарата. Марсоход ExoMars 2020 [77] также несет ряд приборов, которые будут давать информацию, связанную с метеорологией Марса, напр. [78]. Изготовление марсохода и его научных приборов завершено; они проходят испытания.

4. ВНЕШНИЕ ПЛАНЕТЫ И ИХ СПУТНИКИ

Исследованиям атмосферой планет-гигантов посвящено лишь несколько работ с участием российских ученых. Здесь мы ограничимся их перечислением. Это анализ данных миссии JUNO [79], критические замечания относительно интерпретации наблюдений атмосферы Плутона приборами проекта *New Horizons* [80], фотохимическое моделирование атмосферы Титана [81], исследование экзосфер Галилеевых спутников Юпитера [82–84].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промежуток времени, который охватывает данный обзор, совпал с пиком интереса к исследованиям атмосферы Венеры. Комплексный подход к ряду задач позволяет сделать несколько обобщающих выводов:

1) По совокупности данных, наиболее вероятным кандидатом на роль "неизвестного УФ-поглотителя" в облачном слое Венеры следует признать хлорное железо FeCl₃. Его наличие объясняет отражательную способностью Венеры в синей и ближней УФ-областях спектра, высотный профиль первой моды аэрозоля в среднем и нижнем облачных слоях, а также объясняет уменьшение поглошения в ближней УФ-области ниже 60 км. Это соединение было обнаружено прямым методом рентгеновской флуоресцентной спектроскопии. Хлорное железо хорошо смачивается и обволакивается серной кислотой, образуя сферические частицы. Сферичность частиц верхнего облачного слоя подтверждается формой индикатрисы рассеяния. Кинетическое моделирование дает соотношение 1 : 100 по массе между $FeCl_3$ и серной кислотой в верхнем облачном слое, что соответствует наблюдаемому альбедо в ближней УФобласти. Также удовлетворяют этой пропорции размеры частиц мод 1 и 2. Другой часто упоминаемый кандидат на роль УФ-поглотителя, аэрозоль серы, не смачивается серной кислотой, а его содержание в верхнем облачном слое, по данным кинетического моделирования, недостаточно для объяснения УФ-поглотителя.

2) Установлен профиль содержания SO₂ в мезосфере Венеры (70–100 км), где это соединение подвергается интенсивному фотолизу. Установленное с помощью спектроскопии солнечного просвечивания относительное содержание ~0.1 рртv, с минимумом профиля на 80 км, позволяет согласовать данные микроволновых наблюдений (~100 км) и УФ-измерения в верхнем облачном слое.

3) В атмосфере Венеры на уровне верхнего облачного слоя и выше, уверенно обнаружен сигнал топографии поверхности. Возмущения объясняются стационарными гравитационными волнами, возникающими на поверхности, в частности под воздействием гор Афродиты. На уровне облаков волна образует препятствие, влияющее на скорость зонального ветра. Также, меняется УФальбедо и содержание водяного пара, что говорит о подъеме воздушных масс в области возмущения. Сигнал поверхности заметен и в полосе синглетного кислорода, свечения, наблюдаемого на высотах 90-110 км. Ранее влияние поверхности на атмосферу облачного слоя лишь подозревалось, по данным радиопросвечивания Магеллан, и по радиоинтерферометрии одного из аэростатных зондов ВеГа.

Автор благодарен Ж.Л. Берто и В.А. Краснопольскому за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Мохов И.И. Российские исследования в области атмосферных наук и метеорологии в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана 2019. Т. XX. № X. С. 3–5.
- Кораблев О.И. Российские исследования планетных атмосфер (2011–2014 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 546–560.
- Bézard B., Russell C. T., Satoh T., Smrekar S.E., Wilson C.F. Editorial: Topical Collection on Venus // Space Science Reviews. 2018. V. 214. P. 128–131. https://doi.org/10.1007/s11214-018-0564-8
- Vandaele A.C. et al. Sulfur dioxide in the Venus atmosphere: I. Vertical distribution and variability // Icarus. 2017. V. 295. P. 16–33. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.05.003
- Vandaele A.C. et al. Sulfur dioxide in the Venus Atmosphere: II. Spatial and temporal variability // Icarus. 2017. V. 295. P. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.05.001

 Belyaev D.A., Evdokimova D.G., Montmessin F., Bertaux J.L., Korablev O.I., Fedorova A.A., Marcq E., Soret L., Luginin M.S. Night side distribution of SO₂ content in Venus' upper mesosphere // Icarus. 2017. V. 294. P. 58–71.

https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.05.002

- Fedorova A., Marcq E., Luginin M., Korablev O., Bertaux J.-L., Montmessin F. Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus' mesosphere from SPICAV/VEx observations // Icarus. 2016. V. 275. P. 143–162.
- 8. *Cottini V., Ignatiev N.I., Piccioni G., Drossart P.* Water vapor near Venus cloud tops from VIRTIS-H/Venus express observations 2006–2011 // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 219–225.
- Krasnopolsky V., Pollack J. H₂O-H₂SO₄ system in Venus clouds and OCS, CO, and H₂SO₄ profiles in Venus troposphere // Icarus. 1994. V. 109. P. 58–78. https://doi.org/10.1006/icar.1994.1077
- Krasnopolsky V.A. Vertical profiles of H₂O, H₂SO₄, and sulfuric acid concentration at 45–75 km on Venus // Icarus. 2015. V. 252. P. 327–333.
- Krasnopolsky V.A. A photochemical model for the Venus atmosphere at 47–112 km // Icarus. 2012. V. 218. P. 230–246.
- Krasnopolsky V.A. Disulfur dioxide and its near-UV absorption in the photochemical model of Venus atmosphere // Icarus. 2018. V. 299. P. 294–299. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.013
- Krasnopolsky V.A., Belyaev D.A. Search for HBr and bromine photochemistry on Venus // Icarus. 2017. V. 293. P. 114–118. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.04.016
- Petrova E.V. Glory on Venus and selection among the unknown UV absorbers // Icarus. 2018. V. 306. P. 163– 170.

https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.02.016

- Markiewicz W.J., Petrova E.V., Shalygina O.S. Aerosol properties in the upper clouds of Venus from glory observations by the Venus Monitoring Camera (Venus Express mission) // Icarus. 2018. V. 299. P. 272–293. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.011
- 16. *Petrova E.V., Shalygina O.S., Markiewicz W.J.* The VMC/VEx photometry at small phase angles: Glory and the physical properties of particles in the upper cloud layer of Venus // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 120–134.
- Shalygina O.S., Petrova E.V., Markiewicz W.J., Ignatiev N.I., Shalygin E.V. Optical properties of the Venus upper clouds from the data obtained by Venus Monitoring Camera on-board the Venus Express // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 135–158.
- Petrova E.V., Shalygina O.S., Markiewicz W.J. UV contrasts and microphysical properties of the upper clouds of Venus from the UV and NIR VMC/VEx images // Icarus. 2015. V. 260. P. 190–204.
- Rossi L., Marcq E., Montmessin F., Fedorova A., Stam D., Bertaux J.-L., Korablev O. Preliminary study of Venus cloud layers with polarimetric data from SPICAV/VEx // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 159–168.

- Krasnopolsky V.A. On the iron chloride aerosol in the clouds of Venus // Icarus. 2017. V. 286. P. 134–137. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.10.00
- Krasnopolsky V.A. Sulfur aerosol in the clouds of Venus // Icarus. 2016. V. 274. P. 33–36.
- Krasnopolsky V.A. S3 and S4 abundances and improved chemical kinetic model for the lower atmosphere of Venus // Icarus. 2013. V. 225. P. 570–580.
- Lee Y.J., Titov D.V., Ignatiev N.I., Tellmann S., Pätzold M., Piccioni G. The radiative forcing variability caused by the changes of the upper cloud vertical structure in the Venus mesosphere // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 298–308.
- Luginin M., Fedorova A., Belyaev D., Montmessin F., Wilquet V., Korablev O., Bertaux J.-L., Vandaele A. C. Aerosol properties in the upper haze of Venus from SPICAV IR data // Icarus. 2016. V. 277. P. 154–170.
- Luginin M., Fedorova A., Belyaev D., Montmessin F., Korablev O., Bertaux J.-L. Scale heights and detached haze layers in the mesosphere of Venus from SPICAV IR data // Icarus. 2018. V. 311. P. 87–104.
- Esposito L. W. Sulfur dioxide Episodic injection shows evidence for active Venus volcanism // Science. 1984. V. 223. P. 1072–1074.
- Titov D.V., Ignatiev N.I., McGouldrick K., Wilquet V., Wilson C.F. Clouds and Hazes of Venus // Space Science Reviews. 2018. V. 214. P. 126–187. https://doi.org/10.1007/s11214-018-0552-z
- Piccialli A., Montmessin F., Belyaev D., Mahieux A., Fedorova A., Marcq E., Bertaux J.-L., Tellmann S., Vandaele A.C., Korablev O. Thermal structure of Venus nightside upper atmosphere measured by stellar occultations with SPICAV/Venus Express // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 321–335.
- Limaye S.S. et al. The thermal structure of the Venus atmosphere: Intercomparison of Venus Express and ground based observations of vertical temperature and density profiles // Icarus. 2017. V. 294. P. 124–155.
- Vandaele A.C. et al. Contribution from SOIR/VEX to the updated Venus International Reference Atmosphere (VIRA) // Advances in Space Research. 2016. V. 57. P. 443–458.
- Fedorova A., Bézard B., Bertaux J.-L., Korablev O., Wilson C. The CO₂ continuum absorption in the 1.10- and 1.18-μm windows on Venus from Maxwell Montes transits by SPICAV IR onboard Venus express // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 66–77.
- 32. Игнатьев Н.И., Мингалев И.В., Родин А.В., Федотова Е.А. Новый вариант метода дискретных ординат для расчета собственного излучения в горизонтально-однородной атмосфере // Журн. вычислительной математики и математической физики. 2015. Т. 55. № 10. С. 1741.
- 33. Mondelain D., Campargue A., Cermak P., Gamache R.R., Kassi S., Tashkun S.A., Tran H. The CO₂ absorption continuum by high pressure CRDS in the 1.74 mu m window // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 530–537. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.02.019
- 34. Vasilchenko S., Konefal M., Mondelain D., Kassi S., Čermák P., Tashkun S.A., Perevalov V.I., Campargue A. The CO₂ absorption spectrum in the 2.3 μm transpar-

ency window by high sensitivity CRDS: (I) Rovibrational lines // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. V. 184. P. 233–240.

- Gamache R.R. et al. Total internal partition sums for 166 isotopologues of 51 molecules important in planetary atmospheres: Application to HITRAN2016 and beyond // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 70–87. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.03.045
- 36. Лаврентьева Н.Н., Воронин Б.А., Федорова А.А. Список линий H₂₁₆O для исследования атмосфер Венеры и Марса // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 1. С. 13.
- Gordon I.E. et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 3–69. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.06.038
- Tashkun S.A., Perevalov V.I., Gamache R.R., Lamouroux J. CDSD-296, high-resolution carbon dioxide spectroscopic databank: An update // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2019. V. 228. P. 124–131. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.03.001
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Turin A.V., Limaye S.S., Markiewicz W.J., Almeida M., Roatsch T., Moissl R. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // Icarus. 2013. V. 226. P. 140–158.
- Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Patsaev D.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Markiewicz W.J., Rodin A.V. The relationship between mesoscale circulation and cloud morphology at the upper cloud level of Venus from VMC/Venus Express // Planetary and Space Science. 2015. V. 113. P. 100–108.
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Turin A.V., Fedorova A.A., Markiewicz W.J. Winds in the middle cloud deck from the near-IR imaging by the Venus Monitoring Camera onboard Venus Express // J. Geophysical Research 2017. V. 122. P. 2312–2327. https://doi.org/10.1002/2017je005355
- Bertaux J.-L., Khatuntsev I.V., Hauchecorne A., Markiewicz W.J., Marcq E., Lebonnois S., Patsaeva M., Turin A., Fedorova A. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // J. Geophysical Research. 2016. V. 121. P. 1087–1101.
- 43. Gorinov D.A., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., Turin A.V., Piccioni G. Circulation of venusian atmosphere at 90– 110 km based on apparent motions of the O₂ 1.27 μm nightglow from VIRTIS-M (Venus Express) data // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. P. 2554– 2562. https://doi.org/10.1002/2017GL076380
- 44. Мингалев И.В., Родин А.В., Орлов К.Г. Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Венеры. Влияние рельефа поверхности и режима нагрева излучением // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2015. Т. 49. № 1. С. 27–45.
- 45. *Cirilo-Lombardo D.J., Mayochi M., Minotti F.O., Vigh C.D.* About superrotation in Venus // Solar System Research. 2018. V. 52. P. 223–233.

2020

Nº 2

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56

- 46. Изаков М.Н. Турбулентность, суперротация и модели глобальной циркуляции атмосферы Венеры // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2016. Т. 50. № 5. С. 321–335.
- 47. Ксанфомалти Л.В., Экономов А.П. О системах теплозащиты спускаемых аппаратов для исследований Венеры // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы 2018. Т. 52. № 1. С. 43–50.
- 48. Экономов А.П. Разрешение деталей на поверхности Венеры при съемке с аэростата или спускаемого аппарата методом компьютерного моделирования // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы 2015. Т. 49. № 2. С. 117–120.
- Glaze L.S., Wilson C.F., Zasova L.V., Nakamura M., Limaye S. Future of Venus research and exploration // Space Science Reviews. 2018. V. 214(5). P. 89.
- Trokhimovskiy A., Fedorova A., Korablev O., Montmessin F., Bertaux J.-L., Rodin A., Smith M.D. Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five martian years of observations // Icarus. 2015. V. 251. P. 50–64.

https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.10.007

- Guslyakova S., Fedorova A., Lefèvre F., Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Bertaux J.L. Longterm nadir observations of the O₂ dayglow by SPICAM IR // Planetary and Space Science. 2016. V. 122. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.12.006
- 52. *Montmessin 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
- 53. Куликов Ю.Н. Моделирование химического состава атмосферы Марса. предварительные результаты сравнения высотного профиля атомарного кислорода с данными измерений спектрометра SPICAM // Труды Кольского научного центра РАН (Геофизика). 2018. Т. 9. № 4–5-4. С. 202–216. https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.5.202-216
- Krasnopolsky V.A. Variations of carbon monoxide in the martian lower atmosphere // Icarus. 2015. V. 253. P. 149–155.
- 55. Швед Г.М. О содержании изотопологов углекислого газа в атмосферах Марса и Земли // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2016. Т. 50. № 2. С. 172–174.
- 56. Krasnopolsky V.A. Annual mean mixing ratios of N-2, Ar, O-2, and CO in the martian atmosphere // Planetary and Space Science. 2017. V. 144. P. 71–73. https://doi.org/10.1016/j.pss.2017.05.009
- Lefèvre F., Krasnopolsky V., Clancy R.T., Forget F., Smith M.D., Zurek R.W. Atmospheric Photochemistry // The Atmosphere and Climate of Mars / Ed. Haberle R.M. Cambridge. 2017. P. 374–404.
- Montmessin F., Smith M.D., Langevin Y., Mellon M.T., Fedorova A., Haberle R.M., Clancy R.T., Forget F., Smith M.D., Zurek R.W. The Water Cycle // The Atmosphere and Climate of Mars / Ed. Haberle R.M. Cambridge. 2017. P. 338–373.
- 59. Шапошников Д.С., Родин А.В., Медведев А.С. Гидрологический цикл в численной модели общей циркуляции атмосферы Марса // Астрономический

вестник. Исследования Солнечной системы 2016. Т. 50. № 2. С. 100–111.

- Shaposhnikov D.S., Rodin A.V., Medvedev A.S., Fedorova A.A., Kuroda T., Hartogh P. Modeling the hydrological cycle in the atmosphere of Mars: Influence of a bimodal size distribution of aerosol nucleation particles // J. Geophysical Research-Planets. 2018. V. 123. P. 508–526. https://doi.org/10.1002/2017je005384
- Krasnopolsky V.A. On the hydrogen escape from Mars: Comments to "Variability of the hydrogen in the martian upper atmosphere as simulated by a 3D atmosphere-exosphere coupling" by J.Y. Chaufray et al. (2015, Icarus 245, 282–294) // Icarus. 2017. V. 281. P. 262–263.
- Fedorova A., Bertaux J.-L., Betsis D., Montmessin F., Korablev O., Maltagliati L., Clarke J. Water vapor in the middle atmosphere of Mars during the 2007 global dust storm // Icarus. 2018. V. 300. P. 440–457. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.09.025
- 63. Шематович В.И., Маров М.Я. О нетепловой диссипации верхней атмосферы Марса // Докл. АН. 2015. Т. 460. № 6. С. 660–674.
- 64. Шематович В.И., Маров М.Я. Диссипация планетных атмосфер: физические процессы и численные модели // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 3. С. 233–265.
- 65. *Krasnopolsky V.A.* Variations of the HDO/H₂O ratio in the martian atmosphere and loss of water from Mars // Icarus. 2015. V. 257. P. 377–386.
- 66. Огибалов В.П., Швед Г.М. Усовершенствованная модель переноса излучения при нарушении ЛТР в БИК-полосах молекул СО₂ и СО в дневной атмосфере Марса. 1. Исходные данные и метод расчета // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2016. Т. 50. № 5. С. 336–348.
- 67. Огибалов В.П., Швед Г.М. Усовершенствованная модель переноса излучения при нарушении ЛТР в БИК-полосах молекул СО и СО в дневной атмосфере Марса. 2. Населенность колебательных состояний молекул // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2017. Т. 51. № 5. С. 404–416.
- Lopez-Valverde M.A. et al. Investigations of the Mars upper atmosphere with ExoMars Trace Gas Orbiter // Space Science Reviews. 2018. V. 214(1). P. 29. https://doi.org/10.1007/s11214-017-0463-4
- Korablev O.I., Montmessin F, Fedorova A.A., Ignatiev N.I., Shakun A.V., Trokhimovskiy A.V., Grigoriev A.V., Anufreichik K.A., Kozlova T.O. ACS experiment for atmospheric studies on "ExoMars-2016" Orbiter // Solar System Research 2015. V. 49(7). P. 529–537. https://doi.org/10.1134/S003809461507014X
- Korablev O. et al. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // Space Science Reviews. 2018. V. 214. P. 7.
- Vandaele A. C. et al. Science objectives and performances of NOMAD, a spectrometer suite for the ExoMars TGO mission // Planetary and Space Science. 2015. V. 119. P. 233–249. https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.10.003

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАНЕТНЫХ АТМОСФЕР

- 72. Robert S. et al. Expected performances of the NOMAD/ExoMars instrument // Planetary and Space Science. 2016. V. 124. P. 94–104. https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.03.003
- Vandaele A.C. et al. NOMAD, an integrated suite of three spectrometers for the ExoMars Trace Gas mission: Technical description, science objectives and expected performance // Space Science Reviews. 2018. V. 214. P. 5.
- 74. Zelenyi L.M., Korablev O.I., Rodionov D.S., Novikov B.S., Marchenkov K.I., Andreev O.N., Larionov E.V. Scientific objectives of the scientific equipment of the landing platform of the ExoMars-2018 mission // Solar System Research. 2015. V. 49(7). P. 509–517.
- Harri A.-M. et al. The MetNet vehicle: a lander to deploy environmental stations for local and global investigations of Mars // Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems. 2017. V. 6(1). P. 103–124.
- Евланов Е.Н., Завьялов М.А., Подколзин С.Н., Родионов Д.С., Тюрюканов П.М., Липатов А.Н., Экономов А.П. Газоразрядный анемометр // Датчики и системы. 2015. № 3(190). С. 47–50.
- 77. *Vago J.L. et al.* Habitability on early Mars and the search for biosignatures with the ExoMars rover // Astrobiology. 2017. V. 17. P. 471–510.
- Korablev O.I. et al. Infrared spectrometer for ExoMars: a mast-mounted instrument for the rover // Astrobiology. 2017. V. 17. P. 542–564.

- Grassi D. et al. Analysis of IR-bright regions of Jupiter in JIRAM-Juno data: Methods and validation of algorithms // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 202. P. 200–209. https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.08.008
- Krasnopolsky V.A. Some problems in interpretation of the New Horizons observations of Pluto's atmosphere // Icarus. 2018. V. 301. P. 152–154. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.08.021
- Krasnopolsky V.A. Isotopic ratio of nitrogen on Titan: Photochemical interpretation // Planetary and Space Science. 2016. V. 134. P. 61–63. https://doi.org/10.1016/j.pss.2016.10.008
- 82. Plainaki C., Cassidy T.A., Shematovich V.I., Milillo A., Wurz P., Vorburger A., Roth L., Galli A., Rubin M., Blöcker A., Brandt P.C., Crary F., Dandouras I., Jia X., Grassi D., Hartogh P., Lucchetti A., McGrath M., Mangano V., Mura A., Orsini S., Paranicas C., Radioti A., Retherford K.D., Saur J., Teolis B. Towards a Global Unified Model of Europa's Tenuous Atmosphere // Space Science Reviews. 2018. V. 214(1). P. 40.
- Lucchetti A., Plainaki C., Cremonese G., Milillo A., Cassidy T., Jia X., Shematovich V. Loss rates of Europa's tenuous atmosphere // Planetary and Space Science. 2016. V. 130. P. 14–23.
- 84. Шематович В.И. Нейтральная атмосфера вблизи ледяной поверхности спутника Юпитера Ганимед // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2016. Т. 50. № 4. С. 280–299.

Studies of Planetary Atmospheres in Russia in 2015–2018

O. I. Korablev*

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya, 84/32, Moscow, 117997 Russia *e-mail: korab@iki.rssi.ru

A review of the results of planetary atmospheres studies performed by Russian scientists in 2015–2018 prepared in the Commission on planetary atmospheres of the National Geophysical Committee for the National Report on Meteorology and Atmospheric Sciences to the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Montreal, June 8–18, 2019) is presented.

Keywords: atmosphere, planet, Mars, Venus, giant planets, spectroscopy, aerosol, atmospheric dynamics, atmospheric escape