

УДК 541.11

СВЕЧЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА $O_2(a^1\Delta_g)$ В ПОЛОСЕ 1.27 МКМ И ДИНАМИКА ВЕРХНЕЙ МЕЗОСФЕРЫ НА НОЧНОЙ СТОРОНЕ ВЕНЕРЫ

© 2023 г. **А. В. Шакун^а, Л. В. Засова^а, Д. А. Горинов^{а, *}, И. В. Хатунцев^а, Н. И. Игнатьев^а, М. В. Пацаева^а, А. В. Тюрин^а**

^аИнститут космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*E-mail: dmitry_gorinov@rssi.ru

Поступила в редакцию 18.01.2023 г.

После доработки 25.01.2023 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Работа посвящена изучению распределения ночного свечения кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ в полосе 1.27 мкм с целью изучения динамики атмосферы. При расчетах исключались факторы, которые могли искажать результат: тепловое излучение нижней атмосферы, отражение от облаков. Показано, что отклонение от SS-AS циркуляции, проявляющееся в смещении области, где сходятся потоки с дневной стороны от терминаторов, и где в нисходящем потоке кислород рекомбинирует и высвечивает, смещено от противосолнечной точки к 22–23 ч. Такое смещение – проявление влияния солнечного термического прилива на атмосферу на ночной стороне Венеры. Сделаны выводы о характере динамики в области верхней мезосферы Венеры.

Ключевые слова: Венера, атмосфера Венеры, инфракрасная спектроскопия, свечение кислорода, циркуляция атмосферы Венеры

DOI: 10.31857/S0320930X23030088, **EDN:** IIIMXX

ВВЕДЕНИЕ

Ночное свечение кислорода на Венере (линии Герцберга II/HzII) было впервые открыто в 1975 г. с помощью спектрометров, установленных на борту аппаратов Венера-9 и Венера-10 (Краснопольский и др., 1976). Позже это открытие было подтверждено данными, полученными с аппарата Pioneer Venus (Bougher, Borucki, 1994). Инфракрасные эмиссии кислорода в полосе 1.27 мкм, связанные с электронным переходом $O_2(a^1\Delta_g - X^3\Sigma_g^-)$, были обнаружены почти сразу после открытия полос HzII с наземными телескопами (Connes и др., 1979). Исследование свечения с Земли продолжалось в последующие годы (Crisp и др., 1996; Ohtsuki и др., 2008; Bailey и др., 2008); результаты показали существенные вариации абсолютных величин и пространственного распределения свечения.

Прорыв в исследовании кислородных эмиссий возник благодаря миссии ESA Venus Express (2004–2015) (Titov и др., 2006; Svedhem и др., 2009). Картирующий спектрометр VIRTIS-M (Visible and InfraRed Thermal Imaging Spectrometer) получал изображения Венеры в диапазоне 1–5 мкм в надирном и лимбовом режиме с апреля 2006 по ок-

тябрь 2008 гг. Первые работы были посвящены обнаружению свечения кислорода (Drossart и др., 2007), определению характерных значений интенсивности и построению карт распределения свечения по надирным изображениям (Gérard и др., 2008a), а также по лимбовым изображениям (Piccioni и др., 2009). При спектральном разрешении около 14 нм невозможно отделить неравновесное излучение молекулярного кислорода верхней атмосферы от теплового излучения нижней атмосферы. При надирных наблюдениях области эмиссии O_2 выглядят как клочковатые структуры, не покрывающие диск полностью. Таким образом, для исключения теплового излучения нижней атмосферы для сравнения выбирались участки поверхности, где излучение O_2 не наблюдалось, и спектр был полностью тепловым.

Шакун и др. (2010) по частичному анализу данных VIRTIS-M с учетом влияния теплового излучения нижней атмосферы показали, что в среднем пик излучения $O_2(a^1\Delta_g)$ находится в 23 часа местного времени, а не в полночь, как было бы в случае симметричной SS-AS циркуляции, что следовало из предыдущих работ (Gérard и др., 2008a; Piccioni и др., 2009).

Дальнейшие исследования касались изучения свечения кислорода в видимой области спектра. По данным VIRTIS-M были обнаружены системы линий Чемберлена (560, 605 и 657 нм) и Герцберга II (410–720 нм), проанализированы их свойства и вертикальная структура (Migliorini и др., 2013; Gérard и др., 2010; 2014). В горизонтальном распределении свечения $a^1\Delta_g$ были обнаружены временные вариации интенсивности (Soret и др., 2014; Gérard и др., 2014): так, интенсивность может вырасти или упасть на величину до 1 МРл на временном отрезке в 10 ч. Попытки обнаружения корреляции свечения кислорода $a^1\Delta_g$ с динамикой верхней мезосферы, в отличие от работы (Шакун и др., 2010), не увенчались успехом (Soret, Gérard, 2015).

Вертикальные профили свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) были получены по лимбовым измерениям VIRTIS-M (Piccioni и др., 2009). Согласно результатам, источник эмиссии был обнаружен в диапазоне высот от 90 до 110 км, что соответствует области верхней мезосферы, мезопаузы Венеры. Средняя высота пика свечения оказалась равной 97.4 ± 2.5 км при полуширине 7.6 ± 2.2 км. В некоторых случаях пики имели более сложную форму, были двойными. Altieri и др. (2014) показали, что моделирование воспроизводит появление двойных пиков благодаря распространению гравитационных волн с вертикальной длиной волны, соответствующей ширине пика вертикального профиля O_2 . Венерианские ночные свечения, такие как свечение O_2 ($a^1\Delta_g$) 1.27 мкм, являются маркерами циркуляции в верхней мезосфере Венеры и одним из способов изучения динамики в так называемой “переходной области” между режимом суперротации (ниже 90 км) и режимом циркуляции SS-AS (subsolar-to-antisolar, от подсолнечной к противосолнечной точке).

Впервые скорости ветра по перемещению деталей свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) в полосе 1.27 мкм были получены в результате анализа нескольких серий изображений (Hueso и др., 2008). Было обнаружено сходство средней циркуляции с режимом SS-AS. Анализ полной базы данных VIRTIS-M (Gorinov и др., 2018) подтвердил преимущественное направление основного потока с дневной стороны в сторону полуночи. Несмотря на наблюдаемую разнонаправленность, была обнаружена асимметрия, так что область нулевых зональных скоростей (область нисходящего атмосферного потока) оказалась расположенной на 22–23 ч местного времени, совпадая с максимумом свечения, обнаруженного в работе (Шакун и др., 2010).

С помощью трехмерной модели циркуляции верхней атмосферы Венеры VTGCM (Venus Ther-

mospheric General Circulation Model) (Brecht и др., 2011) было показано доминирование режима SS-AS в переходной области высот. Модель общей циркуляции IPSL (Navarro и др., 2021) смогла воспроизвести короткопериодические изменения свечения кислорода на 1.27 мкм, включая смещение максимума к 23 или 1 ч местного времени от полуночи.

Таким образом, существует противоречие между работами, использующими одни и те же измерения, так что, с одной стороны, в части работ (Gérard и др., 2008a; Soret и др., 2010) показывается, что распределение свечения на ночной стороне Венеры соответствует гипотезе симметричной SS-AS циркуляции (т.е. приходящие с дневной стороны потоки атомарного кислорода рекомбинируют в нисходящем потоке и излучают в полночь, с другой стороны (Шакун и др., 2010) — рекомбинация и излучение смещены к 23 ч. Это смещение не соответствует направлению суперротации. Хотя следует отметить, что на высоте 120–140 км, в термосфере, циркуляция представляет собой наложение зональной суперротации и SS-AS: положение максимума эмиссии NO смещено в направлении после полуночи (Gérard и др., 2008b).

В настоящей статье приводятся результаты расчета интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры с корректным учетом вклада теплового излучения нижней атмосферы и отражения от облаков, имеющих сферическое альбедо 0.8, с использованием всех доступных данных прибора VIRTIS-M.

МЕТОДЫ

Для расчета интенсивности излучения были взяты надирные данные, полученные изображающим спектрометром VIRTIS-M. Главной задачей было исключение теплового излучения и учет отражения от облаков для получения интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на длине волны 1.27 мкм.

В спектре ночной стороны атмосферы Венеры на длинах волн 3 мкм и далее доминирует тепловое излучение верхнего облачного слоя, имеющего температуру 220–250 К. Это излучение в ближнем ИК-диапазоне (<3 мкм) имеет низкую интенсивность, за исключением нескольких пиков, представляющих собой излучение нижней атмосферы и поверхности, проходящее сквозь “окна” между полосами поглощения CO_2 , и рассеиваемое облаками. Пики в “окнах прозрачности” расположены на длинах волн 1.02, 1.1, 1.18, 1.28, 1.31, 1.74 и 2.3 мкм. Особенностью окна 1.28 мкм является присутствие нетеплового излучения O_2 с центром

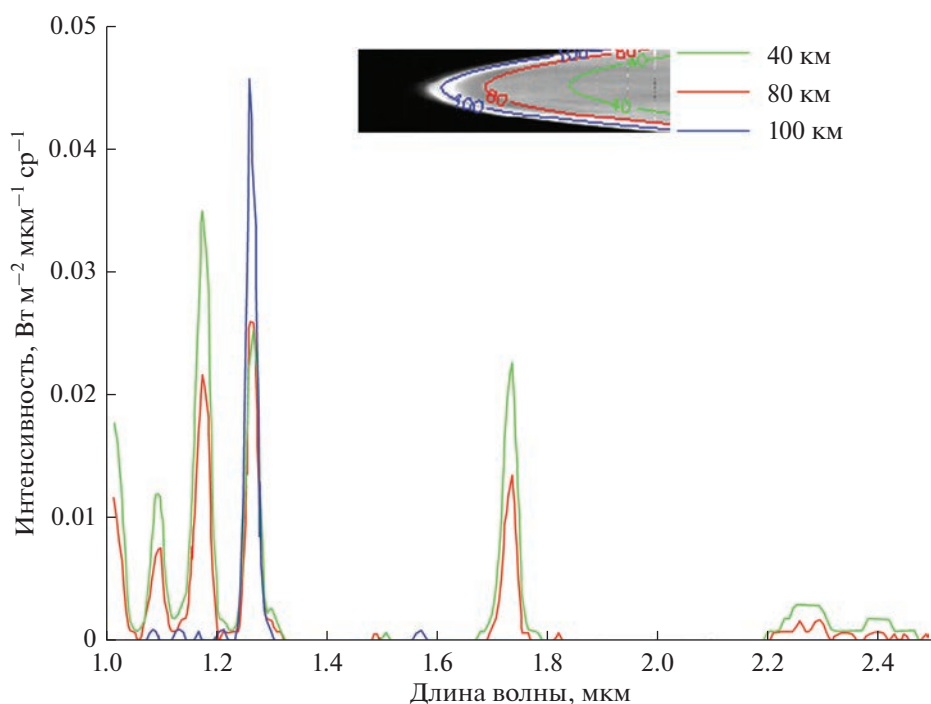


Рис. 1. Пример инфракрасного спектра ночной стороны Венеры, полученного прибором VIRTIS-M для лимбового изображения Венеры № 320_05 (расположен в верхней части графика) на разных высотах. Цветом на спектре и на лимбовом изображении обозначены разные высоты, которым соответствуют спектры: 40 км — зеленая линия, 80 км — красная линия, 100 км — синяя линия. В спектрах 40 и 80 км присутствует излучение в пяти окнах прозрачности, в лимбовом спектре 100 км, наблюдается сильный пик излучения O_2 ($a^1\Delta_g$) в ночном свечении на 1.27 мкм (1-0) и слабый на 1.58 мкм (2-0), а также слабые пики теплового излучения.

пика на 1.27 мкм, которое и исследуется в настоящей работе (рис. 1).

Пик свечения O_2 на 1.27 мкм и тепловое излучение не разрешаются друг относительно друга при среднем спектральном разрешении VIRTIS-M, составляющим 14 нм (1.269 мкм — пик O_2 , и 1.277 мкм — максимум теплового излучения). Таким образом, чтобы получить истинную интенсивность излучения O_2 , необходимо исключить из измеренного значения тепловое излучение нижней атмосферы. Это можно сделать, выбрав спектральное окно, где физические параметры близки к параметрам окна 1.28 мкм. В спектральных окнах 1.02 и 1.1 мкм альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц серной кислоты близко к единице, кроме того, в окне 1.02 мкм слабое поглощение малыми составляющими (Haus и др., 2014). В этих окнах, при практически полностью рассеивающих облаках, излучение поверхности в результате многократного рассеяния проходит сквозь облака, создавая значительный тепловой вклад. В окнах 1.74 и 2.3 мкм облачный аэрозоль имеет меньшее альbedo однократного рассеяния, чем в 1.28 мкм, и существенное поглощение малыми составляющими,

поэтому высотные уровни, с которых приходит тепловое излучение в этих окнах, находятся выше, чем уровни излучения в 1.28 мкм. Из пяти окон прозрачности в диапазоне 1.04–2.3 мкм самым подходящим является окно 1.18 мкм, однако существуют различия между окнами: альbedo однократного рассеяния облачных частиц в нем выше, чем в окне 1.28 мкм, существует вклад излучения поверхности (в 1.18 мкм он может достигать 40%), кроме того, в окне 1.18 мкм дает вклад поглощение H_2O . Эти факторы надо учесть, чтобы получить тепловую составляющую в окне 1.18 мкм.

Чтобы скорректировать измеряемую интенсивность излучения на 1.27 мкм, требуется найти отношение тепловых интенсивностей $k = (I_{1.27})/(I_{1.18})$ путем расчета переноса излучения в атмосфере, затем умножить измеренную интенсивность излучения на 1.18 мкм на этот коэффициент. Таким способом можно рассчитать значение теплового излучения на 1.28 мкм, после чего вычесть его из наблюдаемого значения и получить истинную величину нетепловой эмиссии ночного свечения. Далее мы обсуждаем процедуру определения параметра k .

В предыдущих работах (Piccioni и др., 2009; Шакур и др., 2010) для определения k применялся

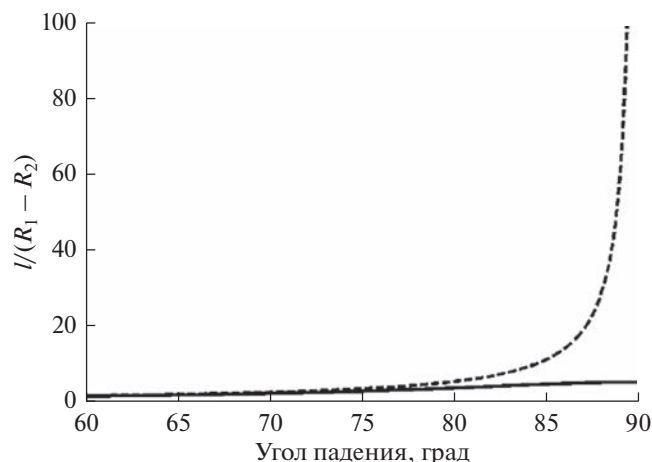


Рис. 2. Зависимость $I/\Delta R$ от угла падения: пунктирная линия для плоскопараллельного слоя, сплошная линия для сферического слоя с толщиной l ; $R_1 = 6142$ км, $R_2 = 6160$ км (высота 90 и 108 км, соответственно).

следующий метод: вначале для определенных температуры поверхности и отражения от облаков рассчитывались синтетические спектры, затем рассчитывался параметр k и его вариации. Полученное среднее значение k применялось ко всем данным. Такой метод способен определить k с точностью 15–20%. Более точный метод определения k описывается ниже.

Как правило, наземные наблюдения Венеры имеют более высокое спектральное разрешение, чем данные, полученные с космических аппаратов (Crisp и др., 1996; Ohtsuki и др., 2008; Krasnopolsky, 2010), и не требуют коррекции за тепловое излучение; необходима лишь геометрическая коррекция по углу падения излучения при отражении от облаков. Для получения горизонтального распределения свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) по надирным данным, полученным с VIRTIS-M, необходимо также осуществить коррекцию по геометрическим параметрам и по обратному рассеянию находящимися ниже облаками. С этой целью использовались уравнения 12–16 из статьи (Crisp и др., 1996).

Изображения, полученные с прибором VIRTIS-M, были усреднены на прямоугольной сетке местное время (LT) — широта (ϕ) с шагом $\Delta LT = 0.024$ ч и $\Delta\phi = 0.36^\circ$. Для получения интенсивности на длинах волн 1.18 и 1.27 мкм была проинтегрирована интенсивность в диапазонах 1.13–1.22 и 1.23–1.3 мкм, соответственно.

С учетом всех вышеизложенных факторов формула для расчета истинной интенсивности излучения O_2 записывается следующим образом:

$$B = \kappa_{MR} \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) d\lambda - k(h, \tau_{cl}, n_{H_2O}) \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} I(\lambda) d\lambda}{(I/\Delta R) + 2a}, \quad (1)$$

где κ_{MR} — коэффициент перевода размерности в МРл (1 Рл равен излучению 10^{10} фотонов в столбе сечением 1 м^2 за 1 с в телесном угле $4\pi \text{ ср}$), $\kappa_{MR} = 6.39 \times 10^2 \text{ м}^2 \text{ мкм}^{-1} \text{ Вт}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для $\lambda = 1.27 \text{ мкм}$, $\kappa_{MR} = 5.94 \times 10^2 \text{ м}^2 \text{ мкм}^{-1} \text{ Вт}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для $\lambda = 1.18 \text{ мкм}$ (Crisp и др., 1996); $I(\lambda)$ — измеряемая VIRTIS-M интенсивность в полосе 1.27 мкм ; $k(h, \tau_{cl}, n_{H_2O})$ — отношение интенсивности на 1.27 мкм к интенсивности на 1.18 мкм ; h — высота подстилающей поверхности, τ_{cl} — оптическая толщина облаков; n_{H_2O} — концентрация водяного пара; $a = 0.875$ — ламбертово альbedo облаков (Crisp и др., 1996); l — длина оптического пути излучающего слоя при угле падения $\theta \neq 0^\circ$, ΔR — длина пути при $\theta = 0^\circ$ (наблюдение в надир). Длина оптического пути рассчитывается с использованием теоремы синусов и теоремы косинусов:

$$\sin \theta_1 = \frac{R_0}{R_1} \sin \theta, \quad (2)$$

$$\ell = \sqrt{R_2^2 - R_0^2 \sin^2 \theta} - \sqrt{R_1^2 - R_0^2 \sin^2 \theta}, \quad (3)$$

$$\Delta R = R_2 - R_1, \quad (4)$$

где R_0 — радиус Венеры на топографической высоте 0 км (6052 км), R_1 и R_2 — радиусы нижней и верхней границы излучающего слоя, θ_1 — угол между лучом зрения и нормалью к поверхности.

По результатам лимбовых наблюдений прибором VIRTIS-M было обнаружено, что пик излучения O_2 ($a^1\Delta_g$) находится на высоте $97.4 \pm 2.5 \text{ км}$ (Piccioni и др., 2009). Среднее значение ширины пика на половине максимума оказалось равно $7.6 \pm 2.2 \text{ км}$. Варьируя значение θ , можно построить зависимость отношения $I/\Delta R$ от угла падения (рис. 2).

Для углов падения больше 70° должна использоваться сферическая геометрия. Для меньших углов между сферической и плоскопараллельной геометрией разница незначительна. Значение $I/\Delta R$ не зависит от толщины слоя.

Расчет коэффициента k

Для вычисления k как функции высоты подстилающей поверхности (h), оптической толщины (τ_{cl}) облаков и концентрации водяного пара (n_{H_2O}), т.е. $k(h, \tau_{cl}, n_{H_2O})$, производился расчет монокроматических синтетических спектров в диапазоне 1.0 – 1.4 мкм с варьируемыми параметрами h , τ_{cl} , n_{H_2O} . Для расчета интенсивности излучения

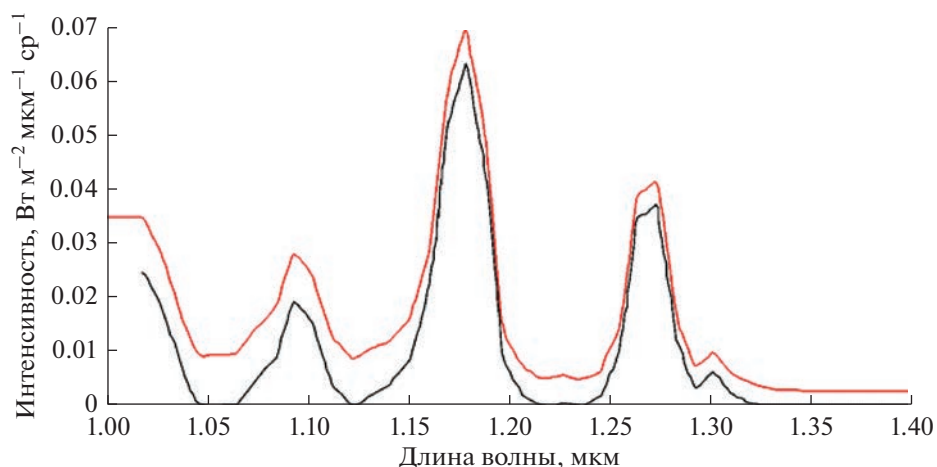


Рис. 3. Примеры измеренных спектров (красная линия) и спектров после удаления вклада рассеянного света (черная линия) на ночной стороне Венеры (изображение № 60_00, широта -37.3° , долгота 308.4° , местное время 23.8 ч, угол наблюдения $\theta = 43^\circ$).

использовался метод дискретных ординат в реализации DISORT (Stamnes и др., 1988). Для расчета газового поглощения CO_2 и H_2O использовались базы данных CDSD (Tashkun и др., 2003) и HITRAN04 (Rothman и др., 2005), соответственно. Использовался фойгтовский контур спектральных линий, обрезанный на 150 см^{-1} от центра линии.

Для описания структуры облаков использовалась модель с 4-модовым распределением частиц по размерам (Zasova и др., 2006; 2007). Средняя оптическая толщина облаков принималась равной 35 ± 10 . Рассчитанные монохроматические спектры свертывались с функцией отклика прибора VIRTIS-M.

Коррекция по рассеянному солнечному свету

В инфракрасные спектры, получаемые с VIRTIS-M, так же попадает рассеянное солнечное излучение, влияние которого необходимо удалить (рис. 3). Для этой цели использовались спектральные интервалы 1.06, 1.12, 1.23 и 1.43 мкм (Arnold и др., 2008). В этих интервалах поглощение CO_2 велико, и тепловое излучение нижней атмосферы и поверхности полностью поглощаются под облачным слоем, а слабое детектируемое излучение приходит от верхнего облачного слоя с яркостной температурой 220–250 К. Примеры удаления вклада рассеянного солнечного света показаны на рис. 3.

Коррекция по H_2O , континууму и влиянию поверхности

Профиль концентрации H_2O для расчетов синтетических спектров показан на рис. 4. Для

высот 0–50 км использовалось значение 35 ppm, а его вариации рассматривались в пределах 0.7–1.3 от этого значения, или 25–45 ppm (Meadows, Crisp, 1996; Ignatiev и др., 1997; Marcq и др., 2008; Bézard и др., 2009). База данных HITRAN не идеальна для использования для моделирования пропускания H_2O при высоких температурах (Bailey, 2009), однако в приведенных выше работах профили концентрации были получены с использованием баз HITRAN и GEISA. Поэтому при использовании этих профилей приемлемо использовать соответствующие базы данных для моделирования.

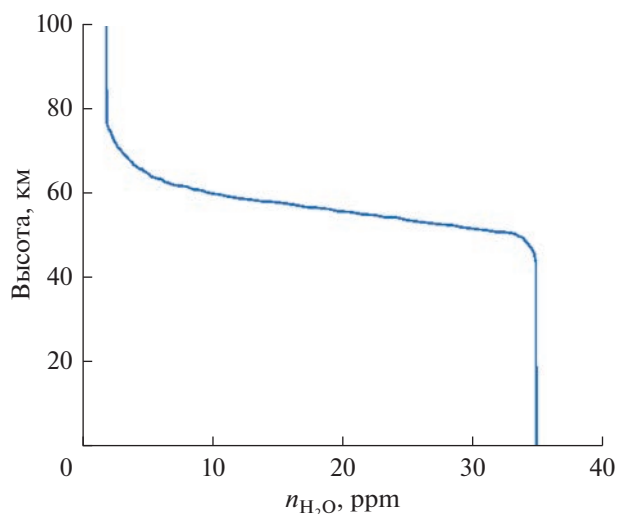


Рис. 4. Профиль водяного пара в атмосфере Венеры, используемый в моделировании.

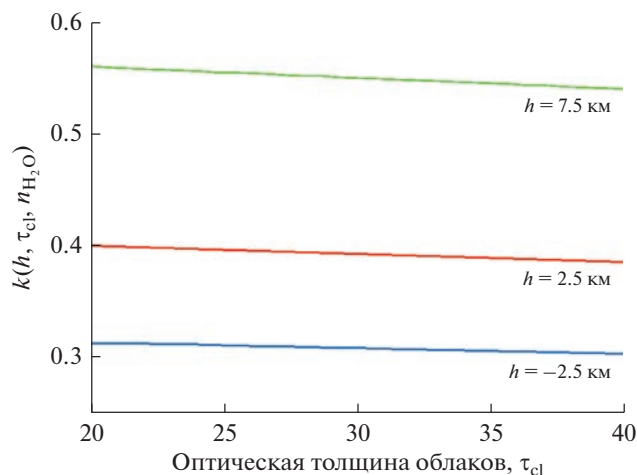


Рис. 5. Параметр k как функция оптической толщины облаков для трех значений высоты подстилающей поверхности. Линии для -2.5 и 7.5 км показаны для сравнения.

Топографические высоты на Венере варьируются от -2.5 до 11 км относительно нулевой высоты, соответствующей радиусу Венеры 6051.8 км. Однако около 98% поверхности в широтном диапазоне 90° ю.ш.— 40° с.ш. находится в пределах от -1.5 до 2.5 км. В базе данных, полученных VIRTIS-M, не существует изображений, для которых оба следующих утверждения верны: а) высота подстилающей поверхности не находится в диапазоне от -1.5 до 2.5 км; б) свечение O_2 ($a^1\Delta_g$) не наблюдается. Как следствие, параметр k рассчитывался только для диапазона топографических высот от -1.5 до 2.5 км.

Были выбраны 27 спектров для областей, где свечение O_2 ($a^1\Delta_g$) на 1.27 мкм не было обнаружено. С целью определения $k(h, \tau_{cl}, n_{H_2O})$ эти спектры подгонялись синтетическими спектрами. На рис. 5 показано, что изменение оптической толщины в 2 раза приводит к ошибке значения k в 2–3%. Поэтому, поскольку оптическая толщина, полученная при подгонке измеренных спектров синтетическими, варьируется от 20 до 36, для расчетов k было взято значение 28.

Результаты аппроксимации экспериментальных данных модельными расчетами показаны на рис. 6. Три зависимости на диаграмме (обозначены синим, красным и черным цветом) были получены для значений концентрации H_2O 0.7, 1 и 1.3 (где 1 соответствует $n_{H_2O} = 35$ ppm). Наилучший результат аппроксимации показан зеленой линией, уравнение для которой записывается следующим образом:

$$k = ah^2 + bh + c, \quad (5)$$

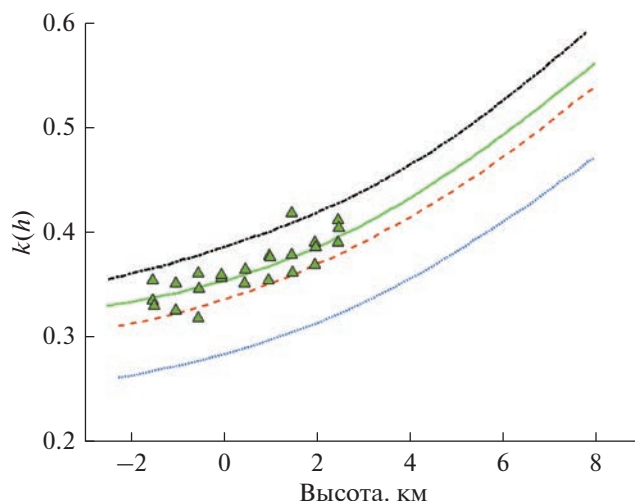


Рис. 6. Параметр k как функция высоты подстилающей поверхности в результате аппроксимации экспериментальных данных. Синяя (точки), красная (длинный штрих) и черная (штрих-точка) линии — модельный расчет, основанный на синтетических спектрах, для концентрации H_2O , $n_{H_2O} = 25 \times 10^{-6}$, 35×10^{-6} и 45×10^{-6} соответственно. Оптическая толщина облаков τ_{cl} принята равной 28, а угол наблюдения θ равным 45° для всех линий. Зеленые треугольники обозначают экспериментальные измерения. Зеленая линия (сплошная) используется для расчета интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$).

где $a = 0.0016 \text{ км}^{-2}$, $b = 0.0133 \text{ км}^{-1}$, $c = 0.355$.

Для вычисления истинной интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры параметры $k(h, \tau_{cl}, n_{H_2O})$ рассчитывались с использованием уравнения (5), учитывая влияние поверхности (варьируемую высоту h подстилающей поверхности) и постоянные значения концентрации водяного пара $n_{H_2O} = 35$ ppm и оптической толщины облаков $\tau_{cl} = 28$ (зеленая линия на рис. 6). Максимальная погрешность не превышает $\Delta k_{\max} = \pm 0.06$, соответствующее 15% абсолютного значения. Соответствующая Δk вариация интенсивности свечения определяется уравнением

$$\Delta B = \frac{B(k + \Delta k, \theta, h) - B(k, \theta, h)}{B(k, \theta, h)}, \quad (6)$$

где B — интенсивность свечения (в МРл), Δk — вариация параметра k .

Теоретические ошибки метода в абсолютных величинах даны в работе (Шакун и др., 2010).

Важность использования описанного выше подхода наглядно иллюстрирует следующий пример. Коррекция изображения ночной стороны Венеры, полученного прибором VIRTIS-M в полосу 1.27 мкм 8 ноября 2007 г. (орбита 567, изобра-

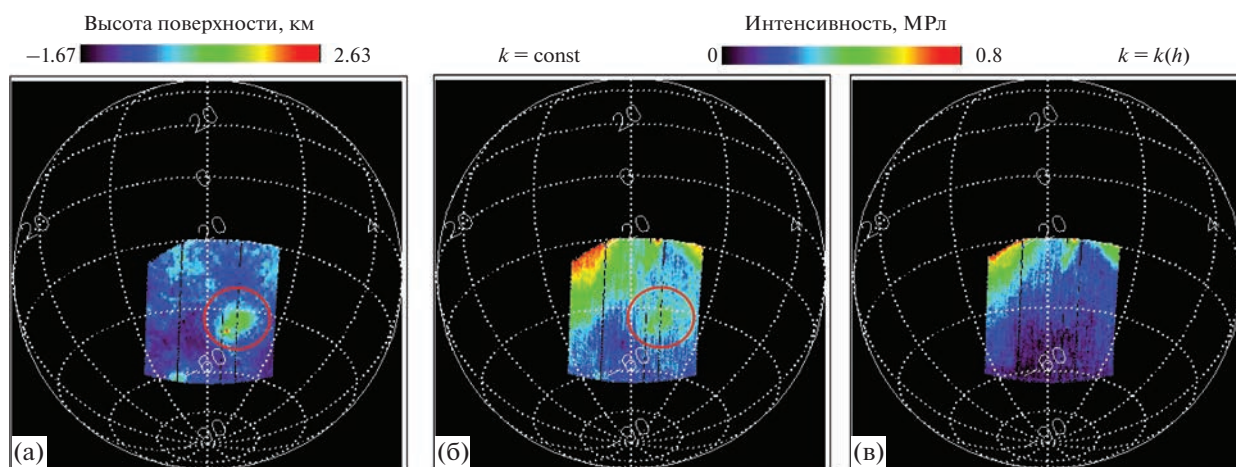


Рис. 7. Пример коррекции изображения VIRTIS-M в полосе 1.27 мкм с учетом теплового излучения нижней атмосферы (орбита 567, изображение 04): а) фрагмент топографической карты Венеры с альтиметрией Magellan, красным овалом отмечена Область Имдр; б) распределение эмиссии O_2 при использовании $k = \text{const}$, красным овалом обозначен артефакт; в) распределение эмиссии O_2 при использовании $k = k(h)$.

жение 04), с учетом влияния теплового излучения нижней атмосферы, показана на рис. 7. Оригинальное изображение полностью покрывает вулканическую Область Имдр с горой Идунн (рис. 7а, обведено красным овалом), известную своей высокой яркостью в ближнем ИК-диапазоне (D’Incecco и др., 2021). Коррекция, использующая постоянный коэффициент k , не удаляет артефакт от поверхности (рис. 7б, красный овал). В то время как использование коэффициентов $k(h)$ при построении карт распределения свечения кислорода для ночной стороны Венеры позволяет исключить данный вид артефактов (рис. 7в).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вышеописанный алгоритм обработки данных был применен к 718 изображениям, полученным с VIRTIS-M, на которых наблюдалось свечение кислорода в полосе 1.27 мкм. Изображения с экспозицией менее 3 с не вошли в это число, так как отношение сигнал-шум для них не позволяло достоверно рассчитать интенсивность свечения. Из-за особенностей орбиты аппарата Venus Express надирные измерения ночной стороны Венеры покрывают в основном южное полушарие и лишь небольшую часть северного в низких широтах. Покрывание по широте составляет от 80° ю.ш. до 25° с.ш., причем 90% данных лежат в широтном интервале 70° – 30° ю.ш.

Примеры горизонтального распределения свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) по единичным орбитам после обработки показаны на рис. 8. Рисунок иллюстрирует значительную изменчивость структуры свечения и положения максимумов. Так, макси-

мум свечения может наблюдаться как в противосолнечной точке, так и до и после полуночи. Нередко в распределении наблюдаются два и более выраженных максимума, расположенных с утренней и с вечерней стороны.

Для построения глобальной карты распределения свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры 718 изображений были усреднены (с весами для каждой орбиты) в координатах местное время—широта и долгота—широта с шагом 0.36° (или 1.4 мин). Результат усреднения в координатах местное время—широта приведен на рис. 9а. Покрывание ночной стороны данными показано на рис. 9б.

Наиболее важной особенностью усредненного распределения является асимметрия свечения относительно полуночи. Абсолютный максимум ~ 1.7 МРл находится на 22–23 ч местного времени и 10° с.ш., тогда как абсолютный минимум обнаруживается на 2–4 ч на широтах южнее 20° ю.ш. Таким образом, максимум свечения смещен на 1 ч на восток, т.е. против направления зональной суперротации. В целом же не только абсолютный максимум, но и средние значения интенсивности почти в любой выбранной широтной ячейке выше до полуночи, чем после полуночи. Это иллюстрирует рис. 10, где изображены профили интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) от местного времени в широтных ячейках шириной 10° . Так, в ячейке 10° – 20° с.ш. между 22 и 23 ч находится абсолютный максимум ~ 1.7 МРл, откуда как в сторону вечернего, так и утреннего терминатора, интенсивность резко снижается до величин ниже 0.5 МРл. В широтных ячейках 0° – 10° с.ш. и 0° – 10° ю.ш.

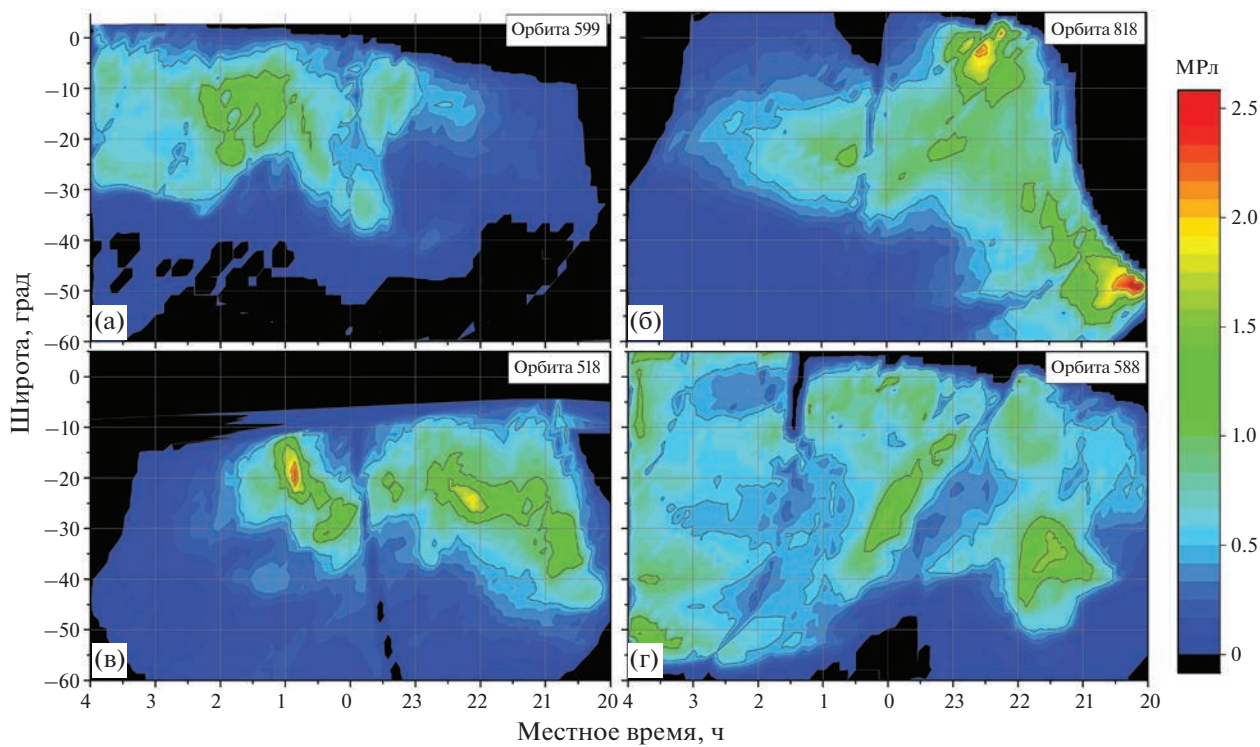


Рис. 8. Примеры распределения свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры в координатах местное время—широта. Интенсивность излучения рассчитана с учетом удаления вклада нижней атмосферы и поверхности, отражения от облаков, поглощения парами воды: а) — орбита 599 (изображения 00-07): максимум эмиссии наблюдается на 1–2 ч, а большая ее часть находится на утренней половине ночной стороны; б) орбита 818 (изображения 00-10): два максимума на вечерней стороне, один из которых находится вблизи экватора, другой — в средних широтах; в) орбита 518 (изображения 00-01): два максимума с разных сторон от полуночного меридиана, более интенсивный, но и более компактный из которых находится на 1 ч, более слабый, но более протяженный — на 22 ч; г) орбита 588 (изображения 00-06): несколько локальных максимумов на 22.5, 0 и 3–4 ч местного времени.

наблюдаются двойные максимумы на 22.5 и 0.5 ч. В среднеширотных ячейках значение интенсивности до полуночи может превышать значение в области, равноудаленной от полуночи, на утренней стороне, в 1–3 раза.

В таблице сравниваются результаты настоящей работы с результатами предыдущих измере-

ний и обработок данных VIRTIS-M. Более низкие средние значения по сравнению с предыдущей обработкой данных VIRTIS-M объясняются использованием непостоянного параметра k и удалением артефактов, вызванных влиянием поверхности. Отличие значений от результатов наземных наблюдений может быть вызвано сразу

Таблица 1. Средние значения интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$), полученные с помощью наземных наблюдений и при обработке данных VIRTIS-M методами, не учитывающими влияние излучения поверхности

Автор(ы)	Годы наблюдений	Прибор	Среднее значение интенсивности свечения O_2 , МРл	Максимальное значение интенсивности свечения O_2 , МРл
Crisp и др. (1996)	1991–1994	Canada-France Hawaii Telescope	1	6
Ohtsuki и др. (2008)	2002–2007	CSHELL	0.28	5
Krasnopolsky (2010)	2009	CSHELL	0.52	1.2
Piccioni и др. (2009)	2006–2008	VIRTIS-M	0.52 ± 0.4	1.2
Настоящая работа	2006–2008	VIRTIS-M	$0.35 \pm 0.3^*$	6

Примечание: * среднее значение (0.46 до полуночи, 0.23 после полуночи).

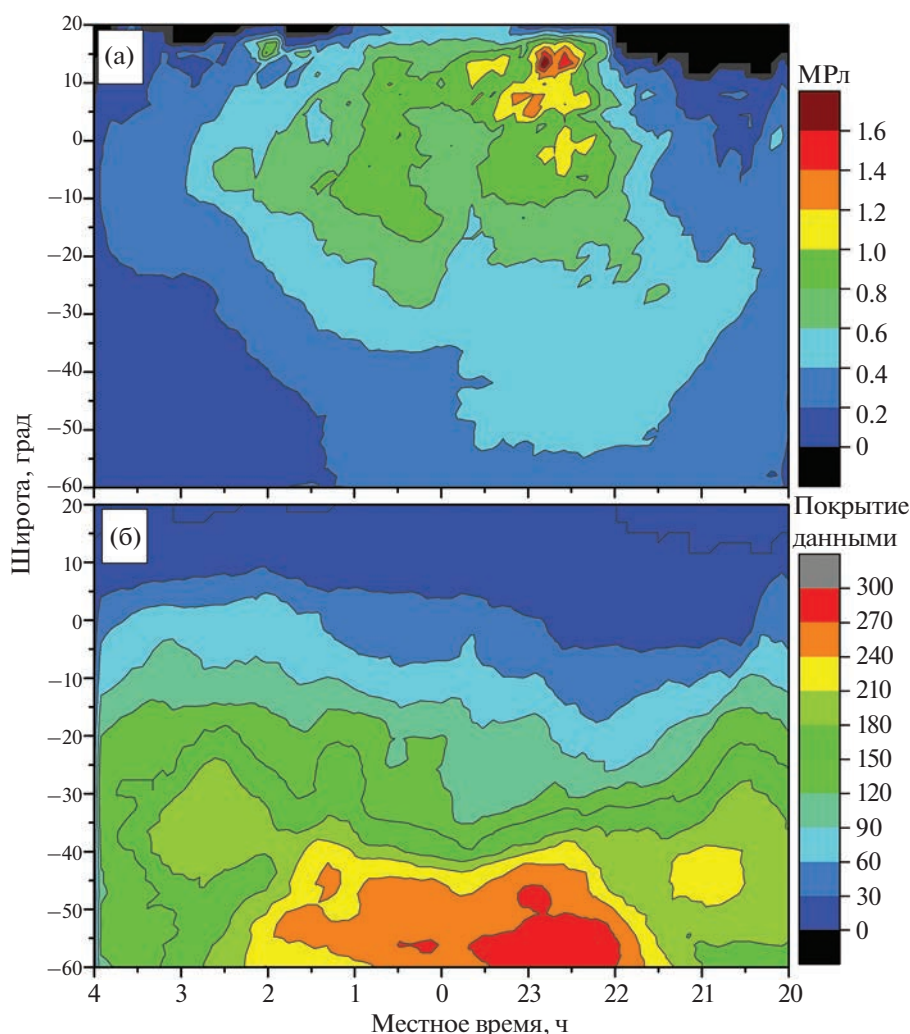


Рис. 9. Карта свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры и статистика данных в координатах местное время—широта: а) распределение свечения O_2 ($a^1\Delta_g$), построенное по результатам обработки и усреднения 718 изображений, полученных с VIRTIS-M в канале 1.27 мкм; б) соответствующее (а) покрытие данными.

несколькими факторами, такими, как разница в покрытии данных, методике измерений, нестабильность свечения.

Как уже говорилось выше, в результате усреднения была также получена глобальная карта распределения интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) в координатах долгота—широта. Рис. 11б показывает неравномерность покрытия данными южного полушария. Подавляющее большинство данных находится в средних широтах от 180° E до 90° E. Поскольку интенсивность свечения сильно зависит от местного времени, для исследования долготной зависимости брались только данные в пределах местного времени 22.5 — 1.5 ч, где интенсивность наиболее велика. Наиболее яркая область оказалась расположенной на 0° N; 200° E — строго над вулканом Маат, имеющим высоту око-

ло ~ 8000 м. Ранее в работе (Gorinov и др., 2018) по результатам анализа свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) и динамике верхней мезосферы было выдвинуто предположение о влиянии топографических структур на циркуляцию атмосферы на высоте 95 — 100 км. Помимо вулкана Маат, в экваториальных широтах важной возвышенностью является Земля Афродиты (60° — 180° E), влияние которой на циркуляцию верхнего облачного слоя было продемонстрировано ранее (Bertaux и др., 2016; Fukuhara и др., 2017; Khatuntsev и др., 2017; Patsaeva и др., 2019). К сожалению, покрытие ночными наблюдениями VIRTIS-M над этой областью практически отсутствует, и сделать выводы о наличии или отсутствии влияния рельефа подстилающей поверхности на распределение свечения невозможно.

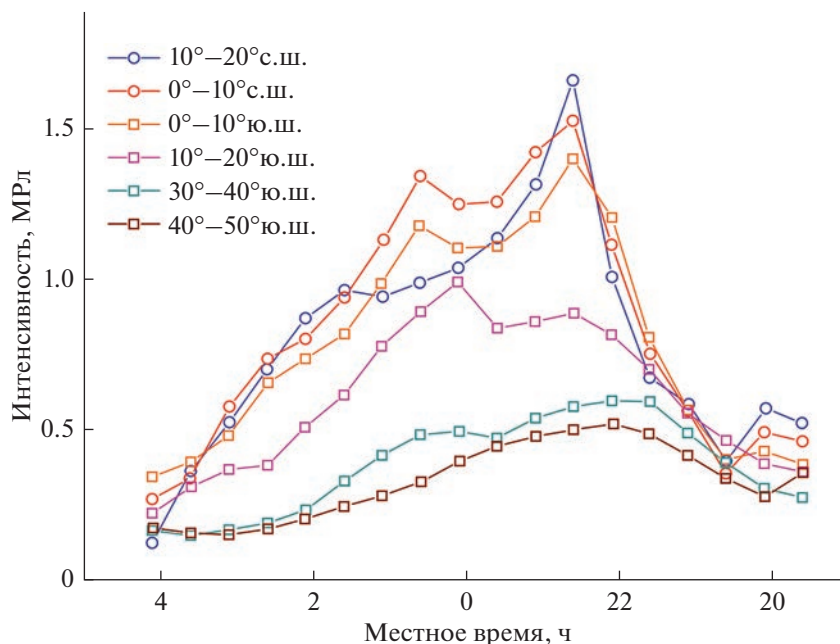


Рис. 10. Интенсивность свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) на ночной стороне Венеры в зависимости от местного времени в шести широтных ячейках шириной 10° от 50° ю.ш. (квадраты) до 20° с.ш. (кружки).

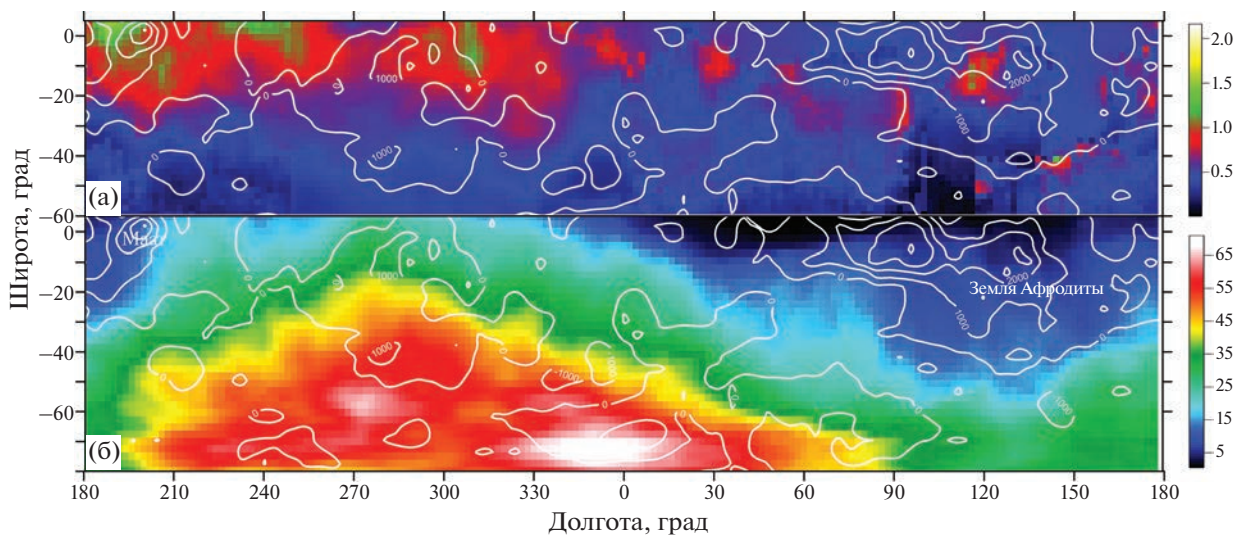


Рис. 11. Карта свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) и статистика данных в координатах долгота–широта: а) распределение свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) для данных в диапазоне местного времени 22.5–1.5 ч; б) покрытие данными без ограничения по местному времени. Белые контуры соответствуют топографической карте поверхности Венеры (Saunders, Pettengill, 1991).

Важно отметить неравномерность распределения интенсивности свечения в экваториальной области. Если бы режим циркуляции SS-AS доминировал в переходной области, свечение было бы распределено равномерно по всем долготам, поэтому можно сделать вывод о присутствии других динамических механизмов.

Благодаря сложной морфологии свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) и наличию в базе данных VIRTIS-M последовательных изображений возможно отслеживать перемещение “облачных” деталей и рассчитывать по нему горизонтальные скорости ветра. Результаты расчета указывают на асимметричную картину относительно полуночи как для зональ-

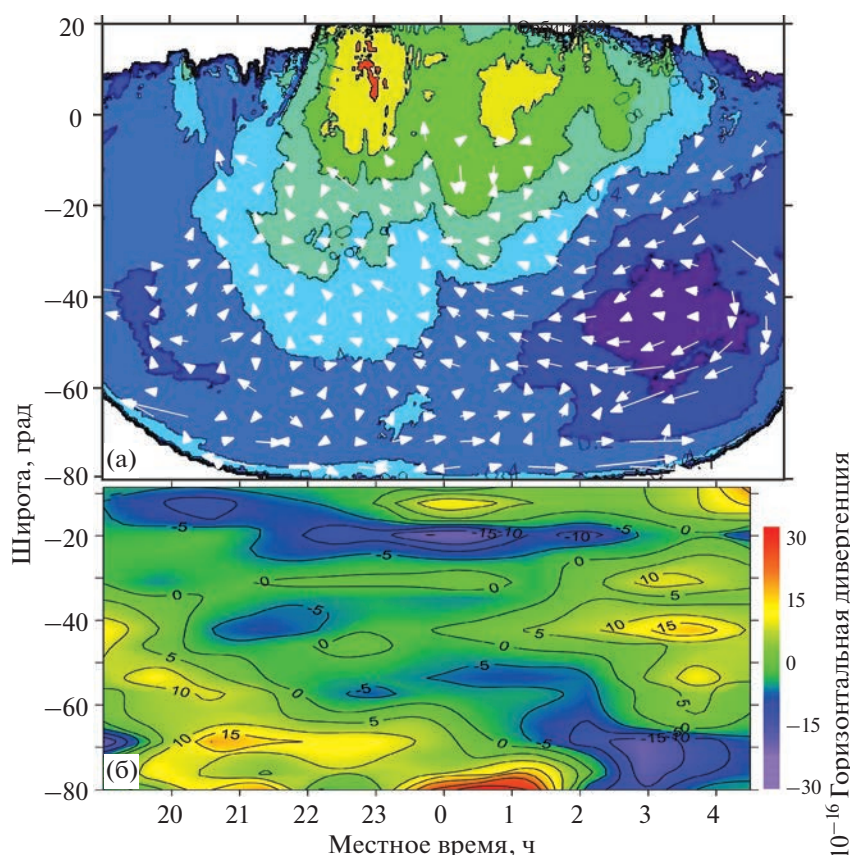


Рис. 12. Векторы горизонтальной скорости ветра, наложенные поверх среднего распределения свечения $O_2(a^1\Delta_g)$ (а) и дивергенция горизонтального атмосферного потока на высоте 90–110 км (б). Отрицательный знак дивергенции указывает на сходящийся, нисходящий поток, положительный — на расходящийся, восходящий поток.

ной, так и для меридиональной компоненты скорости ветра (Hueso и др., 2008; Gorinov и др., 2018). Эта асимметрия во многом похожа на асимметрию интенсивности свечения кислорода (рис. 12а). В общей картине наблюдается перенос через терминаторы в сторону противосолнечной точки. Однако этот перенос асимметричен, и после полуночи зональный поток более интенсивен, чем до полуночи. А область, где зональная скорость меняет направление, т.е. область нисходящего потока, находится в районе 22–23 ч местного времени, совпадая с областью абсолютного максимума среднего распределения интенсивности свечения $O_2(a^1\Delta_g)$.

Горизонтальная дивергенция (рис. 12б), рассчитанная по среднему полю скорости ветра (формула (9) в Khatuntsev и др., 2013), позволяет сделать выводы о наличии восходящих или нисходящих потоков в координатах широта — местное время на высотах 90–110 км. Восходящие потоки наблюдаются в высоких и средних широтах до полуночи и в экваториальных и средних широтах в предутренние часы (3–5 ч). Эти две области

разделены “бороздой” нисходящих потоков, простирающейся от низких широт, наблюдаемых вечером, до высоких широт вблизи утреннего терминатора. При этом наблюдается перемещение атмосферных масс вдоль этой “борозды” из высоких широт в низкие. Максимальная скорость горизонтального потока наблюдается в предутренние часы. Причем векторы скорости направлены против направления суперротации атмосферы Венеры, которое направлено на ночной стороне от вечернего терминатора к утреннему.

Обнаруженные особенности в скорости и направлении горизонтального потока позволяют однозначно утверждать о смене режима циркуляции атмосферы Венеры на ночной стороне на высотах 90–110 км с зональной суперротации на солнечно-противосолнечную приливную циркуляцию (SS-AS).

В данных VIRTIS-M сравнительно мало последовательностей орбит (каждая орбита Venus Express занимала 24 ч), в течение которых прибор наблюдал одну и ту же область планетарного диска. Такие наблюдения позволяют отслеживать

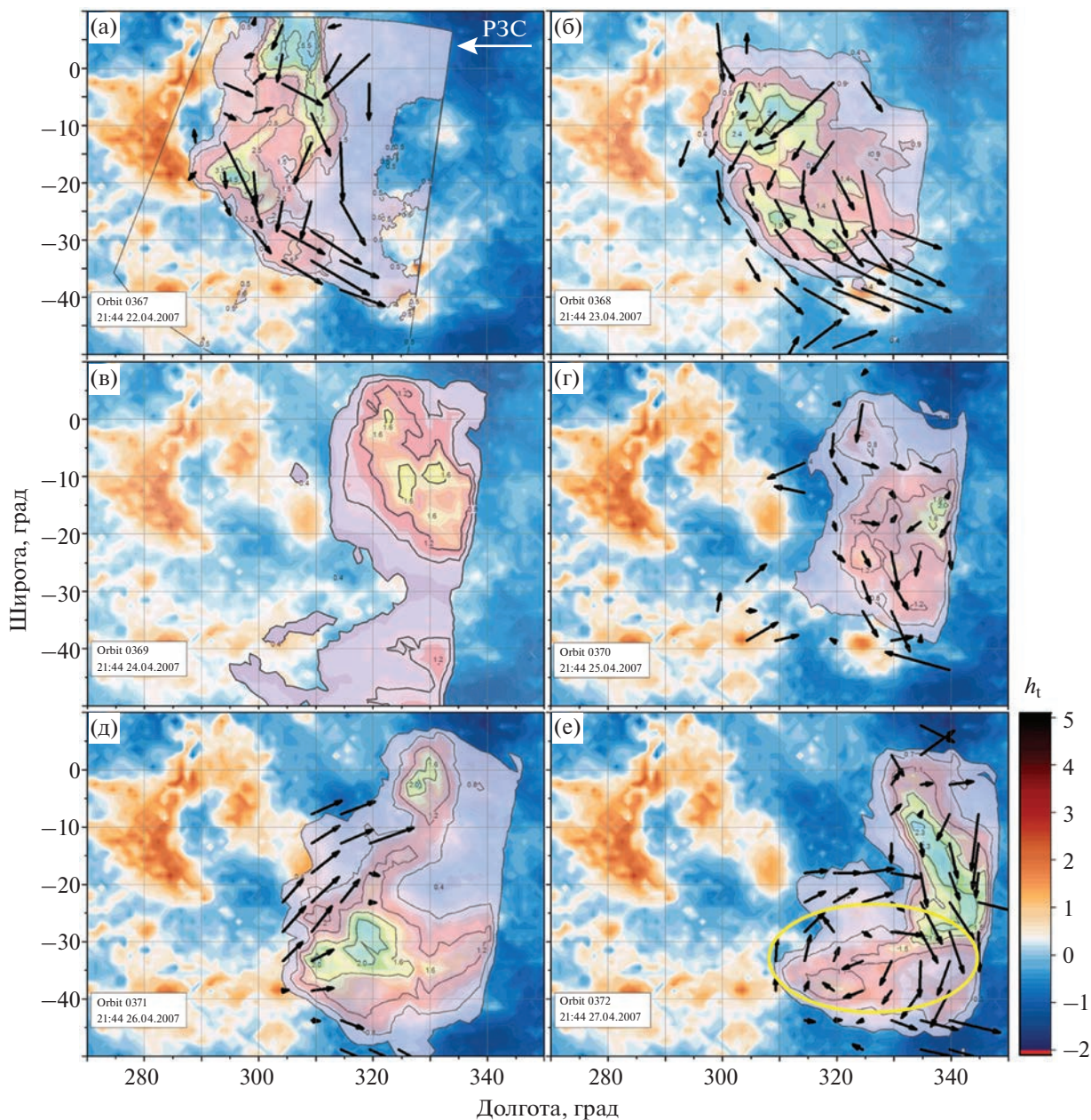


Рис. 13. Вариации интенсивности свечения локализованной структуры и векторов скоростей от орбиты к орбите с 367 до 372. Дата и время съемки указаны на каждой панели: а) орбита 367: интенсивность свечения (МРл, контуры) и векторы скоростей (стрелки) поверх топографии поверхности; б) орбита 368: смещение яркой структуры на юго-восток, падение максимальной интенсивности с 4.5 до 2.5 МРл; в) орбита 369: смещение на северо-восток, падение максимальной интенсивности до 1.5 МРл. Векторы скоростей недоступны из-за отсутствия пар изображений; г) орбита 370: смещение на юг и уменьшение значений скоростей ветра по сравнению с орбитами 367–368 до 0–15 м/с, что может косвенно указывать на область вертикального переноса; д) орбита 371: смещение на запад, при этом скорость ветра направлена на восток, а максимальная интенсивность увеличивается до 2 МРл; е) — орбита 372: смещение на восток и появление области замкнутого кругового движения с диаметром около 1500 км и центром на 30° ю.ш.; 330° в.д. (1 ч местного времени).

короткопериодические вариации интенсивности свечения и динамических особенностей. В этой статье мы рассмотрим наиболее долгий мониторинг такого типа, с орбиты № 367 до орбиты № 372 включительно. На протяжении 6 дней VIR-

TIS-M наблюдал область между 60° ю.ш. и 15° с.ш., 270° и 350° в.д. (0 и 4 ч местного времени) (рис. 13).

На протяжении этих орбит наблюдалась локализованная яркая область свечения O_2 ($a^1\Delta_g$).

В начале наблюдений, во время орбиты № 367, максимальная интенсивность была равна ~ 4.5 МРл — одно из наиболее ярких свечений, зарегистрированных VIRTIS-M за все время работы. Ранее было отмечено, что морфология этой области свечения повторяет контуры находящейся под ней Области Фебы (Gorinov и др., 2018), несмотря на удаление вклада излучения поверхности при обработке, а максимум функции корреляции топографии рельефа и интенсивности свечения оказался равен 0.61 при смещении свечения на 20° на запад, 7° на север и поворота по часовой стрелке на 14° . Для пяти последующих орбит интенсивность свечения была в 2–3 раза ниже, чем для орбиты № 367. В течение орбит № 368–372 яркая область потеряла свою первоначальную форму, постепенно смещаясь на 30° – 40° на восток (зональная суперротация на Венере имеет направление на запад). Векторы скорости претерпели значительные изменения, нередко меняя направление. Во время орбиты № 372 установилось замкнутое круговое движение по часовой стрелке с диаметром около 1500 км (желтый овал на рис. 13е).

ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием описанного выше алгоритма обработки было получено распределение интенсивности свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) в канале 1.27 мкм, как для индивидуальных орбит, так и для усредненного поля свечения. Исключение влияния излучения поверхности позволило уточнить значения и распределение свечения по сравнению с предыдущими работами (Gérard и др., 2008a; Pisciotti и др., 2009; Soret и др., 2010; Шакун и др., 2010). Характер распределения свечения описывает циркуляцию в верхней мезосфере и нижней термосфере, в переходной области в районе мезопаузы. В мезосфере (ниже 90 км) основным режимом циркуляции является ретроградная зональная суперротация, тогда как в термосфере (выше 120 км) доминирует перенос из подсолнечной в противосолнечную точку (SS-AS). Ранее наблюдения свечения NO на ночной стороне Венеры по данным Pioneer Venus (Stewart и др., 1980; Bougher и др., 1990), прибора SPICAV на Venus Express (Gérard и др., 2008b) показали, что максимум свечения NO в термосфере выше 110 км, смещен к 2 ч после полуночи, что может означать, что, помимо режима SS-AS, здесь существует значительное влияние зональной суперротации.

Глобальная карта распределения свечения кислорода, полученная в настоящей работе, указывает на более сложный характер циркуляции в переходной области. Нахождение абсолютного максимума до полуночи, смещенного в направлении, обратном суперротации, не может быть свя-

зано с суперротацией. Кроме того, наблюдается асимметрия средней интенсивности свечения, которая до полуночи составляет 0.43 МРл, значительно превышая среднюю интенсивность после полуночи, 0.26 МРл. Распределение свечения может быть подвержено влиянию волновой активности. Это термические приливы и гравитационные волны. Известно, что большие значения (до 8 К) суточных и полусуточных амплитуд тепловых приливов обнаруживаются на высотах от 80 до 100 км (Засова и др., 2006; Zasova и др., 2007). Температура на изобарических уровнях была аппроксимирована суперпозицией гармонических функций, в зависимости от солнечной долготы (местного времени). На рис. 14 в работе (Засова и др., 2006) приведена зависимость температуры от местного времени вместе с аппроксимирующими кривыми на нескольких уровнях в атмосфере на широте 35° . На уровне 0.1 мбар (95 км) наблюдается максимум температуры приблизительно за 2 ч до полуночи, что приблизительно соответствует максимуму свечения O_2 и практически нулевой горизонтальной скорости, говорящей о существовании здесь нисходящего потока. Максимум температуры может быть также связан с нагревом в нисходящем потоке. Интересно заметить, что, несмотря на то, что ниже в атмосфере фаза прилива изменяется, на уровне 100 мбар, максимум температуры возвращается к 22 ч и совпадает с максимумом скорости термического ветра. В переходной области распространяются гравитационные волны, вероятно, генерируемые облачным слоем. Вертикальные профили свечения кислорода с двойными пиками, обнаруженные при исследовании вертикальных профилей кислородной эмиссии по лимбовым наблюдениям (Altieri и др., 2014), с помощью моделирования были воспроизведены с вертикальной длиной волны, соответствующей ширине профиля пиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Рассмотренный метод позволяет при надирной геометрии наблюдений разделить тепловое излучение нижней атмосферы и эмиссию кислорода O_2 ($a^1\Delta_g$) в спектрах ночной стороны Венеры, полученных с прибором VIRTIS-M.

Карты распределения свечения O_2 ($a^1\Delta_g$) позволяют получить важную информацию о динамике атмосферы на высотах около 100 км. В экваториальной области значительный вклад в наблюдаемую картину вносит перенос атмосферных масс от подсолнечной к противосолнечной точке (SS-AS). Свечения разной интенсивности могут наблюдаться практически на любых широтах, достигая 6 МРл в низких широтах. Возможны силь-

ные нисходящие потоки на высоте эмиссии O_2 практически на ночной стороне Венеры. Существует асимметрия средней интенсивности свечения относительно полуночи — до полуночи она составляет 0.43 МРл, что значительно превышает среднюю интенсивность 0.26 МРл после полуночи, при средней интенсивности 0.36 ± 0.3 .

Важным механизмом, определяющим отличие циркуляции верхней мезосферы от SS-AS и асимметрию относительно полуночи, являются термические приливы. Смещение максимума свечения к 22–23 ч связано с термическим приливом, который также приводит к максимуму температуры (0.1 мбар, 95 км).

Авторы с глубоким прискорбием сообщают о безвременной кончине нашего коллеги, А.В. Шакуна, чей профессионализм и лидерские качества легли в основу данной статьи.

Авторы выражают благодарность программе Минобрнауки № 122042500018-9 за финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Краснопольский В.А., Крысько А.Л., Рогачев В.Н., Паршев В.Л. Спектроскопия ночного свечения Венеры с орбитеров Венера 9, 10 // Космич. исслед. 1976. Т. 14. С. 789–795.
- Засова Л.В., Мороз В.И., Линкин В.М., Хатунцев И.В., Майоров Б.С. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км // Космич. исслед. 2006. Т. 44. № 4. С. 1–20.
- Шакун А.В., Засова Л.В., Пиччиони Дж., Дроссар П., Миглиорини А. Исследование свечения кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ на ночной стороне Венеры по надирным данным эксперимента VIRTIS-M миссии Венера-Экспресс // Космич. исслед. 2010. Т. 48. № 3. С. 239–245.
- Altieri F., Migliorini A., Zasova L., Shakun A., Piccioni G., Bellucci G. Modeling VIRTIS/VEX $O_2(a^1\Delta_g)$ nightglow profiles affected by the propagation of gravity waves in the Venus upper mesosphere // J. Geophys. Res.: Planets. 2014. V. 119. № 1. P. 2300–2316. <https://doi.org/10.1002/2013JE004585>
- Arnold G., Haus R., Kappel D., Drossart P., Piccioni G. Venus surface data extraction from VIRTIS/Venus Express measurements: Estimation of a quantitative approach // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № 3. id. E00B10. <https://doi.org/10.1029/2008JE003087>
- Bailey J., Meadows V.S., Chamberlain S., Crisp D. The temperature of the Venus mesosphere from $O_2(a^1\Delta_g)$ airglow observations // Icarus. 2008. V. 197. P. 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2008.04.007>
- Bailey J. A comparison of water vapor line parameters for modeling the Venus deep atmosphere // Icarus. 2009. V. 201. № 2. P. 444–453. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.01.013>
- Bertaux J.-L., Khatuntsev I.V., Hauchecorne A., Markiewicz W.J., Marcq E., Lebonnois S. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // J. Geophys. Res.: Planets. 2016. V. 121. P. 1087–1101. <https://doi.org/10.1002/2015JE004958>
- Bézard B., Tsang C.C.C., Carlson R.W., Piccioni G., Marcq E., Drossart P. Water vapor abundance near the surface of Venus from Venus Express/VIRTIS observations // J. Geophys. Res.: Planets. 2009. V. 114. id. E00B39. <https://doi.org/10.1029/2008JE003251>
- Bougher S.W., Gérard J.C., Stewart A.I.F., Fesen C.G. The Venus nitric oxide night airglow: Model calculations based on the Venus Thermospheric General Circulation Model // J. Geophys. Res.: Space Physics. 1990. V. 95. № A5. P. 6271–6284. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p06271>
- Bougher S.W., Borucki W.J. Venus O_2 visible and IR nightglow: Implications for lower thermosphere dynamics and chemistry // J. Geophys. Res.: Planets. 1994. V. 99. № E2. P. 3759–3776. <https://doi.org/10.1029/93JE03431>
- Brecht A.S., Bougher S.W., Gérard J.-C., Parkinson C.D., Rafkin S., Foster B. Understanding the variability of nightside temperatures, NO UV and O_2 IR nightglow emissions in the Venus upper atmosphere // J. Geophys. Res.: Atmosphere. 2011. V. 116. № E8. id. E08004. <https://doi.org/10.1029/2010JE003770>
- Connes P., Noxon J.F., Traub W.A., Carleton P. $O_2(^1D)$ emission in the day and night airglow of Venus // Astrophys. J. 1979. V. 233. P. L29–L32. <https://doi.org/10.1086/183070>
- Crisp D., Meadows V.S., Bézard B., de Bergh C., Maillard J., Mills F.P. Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: 1.27- μm $O_2(a^1\Delta_g)$ airglow from the upper atmosphere // J. Geophys. Res.: Physics. 1996. V. 101. P. 4577–4593. <https://doi.org/10.1029/95JE03136>
- D’Incecco P., Filiberto J., López I., Gorinov D., Komatsu G. Iduun Mons: Evidence for ongoing volcano-tectonic activity and atmospheric implications on Venus // Planet. Sci. J. 2021. V. 2. № 5. id. 215. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac2258>
- Drossart P., Piccioni G., Gérard J.C., Lopez-Valverde M.A., Sanchez-Lavega A., Zasova L., Hueso R., Taylor F.W., Bézard B., Adriani A., Angrilli F., Arnold G., Baines K.H., Bellucci G., Benkhoff J. and 89 co-authors. A dynamic upper atmosphere of Venus as revealed by VIRTIS on Venus Express // Nature. 2007. V. 450. P. 641–645. <https://doi.org/10.1038/nature06140>
- Fukuhara T., Futaguchi M., Hashimoto G.L., Horinouchi T., Imamura T., Iwagami N., Kouyama T., Murakami S.-Y., Nakamura M., Ogohara K., Sato M., Sato T.M., Suzuki M., Taguchi M., Takagi S. and 4 co-authors. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus // Nat. Geosci. 2017. V. 10. № 2. P. 85–88. <https://doi.org/10.1038/ngeo2873>
- Gérard J.-C., Saglam A., Piccioni G., Drossart P., Cox C., Erard S., Hueso R., Sánchez-Lavega A. Distribution of the O_2 infrared nightglow observed with VIRTIS on

- board Venus Express // *Geophys. Res. Lett.* 2008a. V. 35. id. L02207.
<https://doi.org/10.1029/2007GL032021>
- Gérard J.-C., Cox C., Saglam A., Bertaux J.-L., Villard E., Nehmé C. Limb observations of the ultraviolet nitric oxide nightglow with SPICAV on board Venus Express // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2008b. V. 113. № 9. id. E00B03.
<https://doi.org/10.1029/2008JE003078>
- Gérard J.-C., Soret L., Saglam A., Piccioni G., Drossart P. The distributions of the OH Meinel and O₂ (a¹Δ–X³R) nightglow emissions in the Venus mesosphere based on VIRTIS observations // *J. Adv. Space Res.* 2010. V. 45. P. 1268–1275.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.022>
- Gérard J.-C., Soret L., Piccioni G., Drossart P. Latitudinal structure of the Venus O₂ infrared airglow: A signature of small-scale dynamical processes in the upper atmosphere // *Icarus*. 2014. V. 236. P. 92–103.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.028>
- 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 // *Geophys. Res. Letters*. 2018. V. 45. № 5. P. 2554–2562.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076380>
- Haus R., Kappel G., Arnold G. Atmospheric thermal structure and cloud features in the southern hemisphere of Venus as retrieved from VIRTIS/VEX radiation measurements // *Icarus*. 2014. V. 232. P. 232–248.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.01.020>
- Hueso R., Sánchez-Lavega A., Piccioni G., Drossart P., Gérard J.-C., Khatuntsev I., Zasova L., Migliorini A. Morphology and dynamics of Venus oxygen airglow from Venus Express/Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer observations // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2008. V. 113. id. E00B02.
<https://doi.org/10.1029/2008JE003081>
- Ignatiev N.I., Moroz V.I., Moshkin B.E., Ekonomov A.P., Gnedykh V.I., Grigoriev A.V., Khatuntsev I.V. Water vapour in the lower atmosphere of Venus: A new analysis of optical spectra measured by entry probes // *Adv. Space. Res.* 1997. V. 19. № 8. P. 1159–1168.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00267-6](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00267-6)
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Turin A.V., Limaye S.S., Markiewicz W.J., Almeida M., Roatsch Th., Moissl R. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 140–158.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>
- Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., 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. Geophys. Res.: Planets*. 2017. V. 122. P. 2312–2327.
<https://doi.org/10.1002/2017JE005355>
- Krasnopolsky V.A. Venus night airglow: Ground-based detection of OH, observations of O₂ emissions, and photochemical model // *Icarus*. 2010. V. 207. P. 17–27.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.10.019>
- Marcq E., Bézard B., Drossart P., Piccioni G., Reess J.M., Henry F.A. Latitudinal survey of CO, OCS, H₂O, and SO₂ in the lower atmosphere of Venus: Spectroscopic studies using VIRTIS-H // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2008. V. 113. id. E00B07.
<https://doi.org/10.1029/2008JE003074>
- Meadows V.S., Crisp D. Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: The thermal structure and water abundance near the surface // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. P. 4595–4622.
- Migliorini A., Piccioni G., Gérard J.-C., Soret L., Slangier T., Politi R., Snels M., Drossart P., Nuccilli F. The characteristics of the O₂ Herzberg II bands observed with VIRTIS/Venus Express // *Icarus*. 2013. V. 223. № 1. P. 609–614.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.11.017>
- Navarro T., Gilli G., Schubert G., Soret L., Lebonnois S., Lefèvre F., Quirino D. Venus' upper atmosphere revealed by a GCM: I. Structure and variability of the circulation // *Icarus*. 2021. V. 366. id. 114400.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114400>
- Ohtsuki S., Iwagami N., Sagawa H., Ueno M., Kasaba Y., Imamura T., Yanagisawa K., Nishihara E. Distributions of the Venus 1.27-μm O₂ airglow and rotational temperature // *Planet. and Space Sci.* 2008. V. 56. P. 1391–1398.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.05.013>
- Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., Hauchecorne A., Titov D.V., Bertaux J.-L. Solar related variations of the cloud top circulation above Aphrodite Terra from VMC/Venus Express wind fields // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2019. V. 124. P. 1864–1879.
<https://doi.org/10.1029/2018JE005620>
- Piccioni G., Zasova L., Migliorini A., Drossart P., Shakun A., García Muñoz A., Mills F.P., Cardesin-Moinelo A. Near-IR oxygen nightglow observed by VIRTIS in the Venus upper atmosphere // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2009. V. 114. id. E00B38.
<https://doi.org/10.1029/2008JE003133>
- Rothman L.S., Jacquemart D., Barbe A., Chris Benner B., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian Jr C., Chance K., Couderc L.H., Dana V., Devi V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A. and 15 co-authors. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // *J.Q.S.R.T.* 2005. V. 96. № 2. P. 139–204.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2004.10.008>
- Saunders R.S., Pettengill G.H. Magellan: Mission summary // *Science*. 1991. V. 252. P. 247–249.
<https://doi.org/10.1126/science.252.5003.247>
- Soret L., Gérard J.-C., Piccioni G., Drossart P. Venus OH nightglow distribution based on VIRTIS limb observations from Venus Express // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. № 6. id. L06805.
<https://doi.org/10.1029/2010GL042377>
- Soret L., Gérard J.-C., Piccioni G., Drossart P. Time variations of O₂(a¹Δ) nightglow spots on the Venus nightside and dynamics of the upper mesosphere // *Icarus*. 2014. V. 237. P. 306–314.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.034>
- Soret L., Gérard J.-C. Is the O₂(a¹Δg) Venus nightglow emission controlled by solar activity? // *Icarus*. 2015.

- V. 262. P. 170–172.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.08.030>
- Stamnes K., Tsay S.-C., Wiscombe W., Jayaweera K.* Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media // *Appl. Optics*. 1988. V. 27. P. 2502–2509.
<https://doi.org/10.1364/AO.27.002502>
- Stewart A.I.F., Gérard J.-C., Rusch D.W., Bougher S.W.* Morphology of the Venus ultraviolet night airglow // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 1980. V. 85. P. 7861–7870.
<https://doi.org/10.1029/JA085iA13p07861>
- Svedhem H., Titov D.V., Taylor F.W., Witasse O.* The Venus Express mission // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2009. V. 114. id. E00B33.
<https://doi.org/10.1029/2008JE003290>
- Tashkun S.A., Perevalov V.I., Teffo J.-L., Bykov A.D., Lavrentieva N.N.* CDSD-1000, the high-temperature carbon dioxide spectroscopic databank // *J. Quant. Spec. Rad. Transfer*. 2003. V. 82. № 1–4. P. 165–196.
[https://doi.org/10.1016/S0022-4073\(03\)00152-3](https://doi.org/10.1016/S0022-4073(03)00152-3)
- Titov D.V., Svedhem H., Koschny D., Hoofs R., Barabash S., Bertaux J.-L., Drossar P., Formisano V., Häusler B., Korablev O., Markiewicz W.J., Nevejans D., Pätzold M., Piccioni G., Zhang T.L., 5 co-authors.* Venus Express science planning // *Planet. and Space Sci.* 2006. V. 54. P. 1279–1297.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.04.017>
- Zasova L.V., Ignatiev N., Khatuntsev I., Linkin V.* Structure of the Venus atmosphere // *Planet. and Space Sci.* 2007. V. 55. P. 1712–1728.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.01.011>