

На правах рукописи

Горинов Дмитрий Алексеевич

## **Циркуляция ночной атмосферы Венеры**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2026

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы  
Института космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель:

Засова Людмила Вениаминовна, д.ф.-м.н., в.н.с. ИКИ РАН

Официальные оппоненты:

Чхетиани Отто Гурамович, д.ф.-м.н., ..... ИФА РАН

Мингалёв Олег Викторович, д.ф.-м.н., ..... ПГИ РАН

Ведущая организация:

Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга  
Московского Государственного Университета

Защита состоится ... 2026 года в .....

на заседании Диссертационного совета Д 24.1.481.01 ИКИ РАН

по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан .....2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 24.1.481.01  
к.ф.-м.н.

Ткаченко А.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Венера – ближайшая к Земле планета, имеющая схожие с земными параметры, такие, как размер, масса и количество энергии, которую поверхность планеты получает от Солнца. Две планеты образовались в близкой области протопланетного диска, получив одинаковый набор элементов и воды – об общем образовании говорит и сходное содержание стабильных элементов, таких как азот (N) и аргон (Ar). Венера исследуется космическими аппаратами с 1960-х гг., и научные данные, полученные к настоящему времени, описывают условия на самой планете как существенно отличные от земных. Так, атмосфера Венеры на два порядка массивнее земной и состоит на 96,5% из углекислого газа (CO<sub>2</sub>), с давлением у поверхности до 93 атм. Углекислый газ вместе с другими газами, поглощающими тепловое излучение (парниковыми газами, имеющими фундаментальные полосы поглощения в тепловой области спектра), такими как H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, CO, и облачным слоем планеты, обеспечивают нагрев поверхности примерно на 500°, до средней температуры 473 °C (737±10°K) (Basilevsky, Head, 2003). Причины различия Земли и Венеры, равно как и временной этап, на котором их пути разошлись, на данный момент не ясны. Их изучение необходимо для понимания возможной эволюции климата Земли и условий возникновения жизни.

Атмосфера Венеры вращается вокруг планеты в западном направлении с максимальной скоростью, в 60 раз превышающей скорость вращения самой планеты: примерно 100 м/с на высотах 68–70 км (Schubert, 1983; Gierasch et al., 1997) в области верхней границы облаков – это явление известно как ретроградная зональная суперротация. Это основная мода глобальной циркуляции в тропосфере и мезосфере до 90 км высоты. Скорость уменьшается с ростом высоты над облаками и на высоких широтах (Zasova et al., 2000). В термосфере (>110 км) циркуляция с подсолнечной стороны к противосолнечной (SS-AS) управляется солнечным нагревом (Sánchez-Lavega et al., 2017). Глобальная динамика в переходной области (мезопауза, предмет настоящего исследования) может быть подвержена влиянию обоих этих режимов (Bougher et al., 2006; Lellouch et al., 1997), а также термических приливов – солнечно-связанных волн, зависящих от солнечной долготы (Zasova et al., 2007), и гравитационных волн (Alexander, 1992; Altieri et al., 2014; Zhang et al., 1996).

Исследование динамики атмосферы на разных высотных уровнях важно для понимания физических процессов, происходящих на Венере, а также для создания моделей общей циркуляции атмосферы.

Актуальность темы диссертации подтверждается возрастающим интересом к исследованию Венеры со стороны мировых космических агентств: планируемый запуск в 2030-х гг. космических аппаратов (КА) DAVINCI и VERITAS (США), EnVision (ЕС) и Venus Orbiter Mission (Индия), а также российский проект «Венера-Д» (Zasova et al., 2019; Widemann et al., 2023).

Объектом исследования диссертации является атмосфера Венеры и ее динамические свойства в области верхней мезосферы (90-110 км) – «переходной области» между основной модой циркуляции – зональной суперротацией (ниже 90 км) и солнечно-антисолнечной ячейкой (в термосфере) на ночной стороне Венеры, а также нижнего облачного слоя (44–48 км).

Целью работы является исследование параметров циркуляции верхней мезосферы и нижнего облачного слоя Венеры на ночной стороне по данным изображающего спектрометра VIRTIS-M (КА «Венера-Экспресс») и инфракрасной (ИК) камеры IR2 (КА «Акацуки»). Особое внимание уделяется вариациям характеристик и изучению влияния рельефа поверхности Венеры на динамику атмосферы.

Научная новизна работы. В работе впервые были рассчитаны скорости ветра по всем имеющимся изображениям на ночной стороне Венеры: 1) на длине волны 1,27 мкм по перемещению областей («облаков») свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  – маркера циркуляции верхней мезосферы (90–110 км) – по измерениям, полученным прибором VIRTIS-M на борту КА «Венера-Экспресс», 2) по перемещению облачных деталей в окне прозрачности 1,74 мкм в нижнем облачном слое (44–48 км) по данным прибора VIRTIS-M, а также камеры IR2 (КА «Акацуки») на длине волны 1,74 мкм. Получена база векторов скоростей, насчитывающая более 8000 векторов для верхней мезосферы и более 80000 – для нижнего облачного слоя. Измерения скоростей и их вариаций проводились по анализу перемещения «облаков» кислорода (1,27 мкм) и деталей облачного слоя (1,74 мкм) на основе данных, полученных на отдельных орбитах.

Анализ глобального поля скоростей зонального ветра на ночной стороне Венеры, построенного по перемещению областей свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$ , показал асимметрию относительно полуночного меридиана: область конвергенции потоков от терминаторов сдвинута на 1–2 часа до полуночи ( $22,5 \pm 0,5$  ч), в отличие от симметричной моды SS-AS, которая предполагает область

конвергенции в полночь. Впервые предложено объяснение этого смещения как имеющего солнечно-связанный характер, а именно, связанный с термическим приливом: кривая изменения температуры в зависимости от широты, давления и солнечной долготы (или местного времени)  $T(\varphi, p, L_s)$  на высоте 95 км имеет максимум, связанный с суточной и полусуточной гармоникой термического прилива, приходящийся на тот же самый интервал местного времени (Zasova et al., 2002).

На высоте 95–100 км в поле свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  1,27 мкм обнаружены «рельефные отпечатки» Области Фебы – гористой области высотой до 2 км. При этом коэффициент корреляции яркости свечения и высоты рельефа составил 0,61. Наблюдение перемещения «отпечатка» позволило определить направление и скорость движения атмосферных масс на данной высоте. Несмотря на единственный случай возможности наблюдения перемещения «отпечатка» в течение нескольких орбит при сохранении узнаваемых очертаний яркой области, можно утверждать, что перемещение «облаков» свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  является маркером циркуляции. Это явление можно рассматривать как аналог влияния волн плавучести на циркуляцию в верхней атмосфере Земли (Jones, Bedard, 2018). В земной атмосфере волны плавучести возникают при обтекании приповерхностным потоком горной области, вызывают подъём более тёплых атмосферных масс, приводя к возникновению волн, вихревых и круговых течений. Впервые в верхней мезосфере Венеры по перемещению областей свечения кислорода были обнаружены течения, подобные циклонам и антициклонам. Таким образом, проведённые исследования демонстрируют возможность изучения как глобальной, так и локальной циркуляции верхней мезосферы по наблюдению перемещения «отпечатков» рельефных деталей поверхности в поле свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  1,27 мкм.

Впервые была обнаружена (фрагментарно) прямая ячейка Хэдли в нижнем облачном слое (которая предполагалась в моделях атмосферы (Sugimoto et al., 2019), но до сих пор не была найдена), подтверждающая, что и в нижнем облачном слое Венеры, аналогично верхнему, меридиональная циркуляция организована в виде ячеек Хэдли.

Впервые в нижнем облачном слое была обнаружена асимметрия циркуляции северного и южного полушарий, относящаяся к экваториальной области, вероятно, связанная с асимметрией рельефа поверхности, известная ранее в верхнем облачном слое по наблюдениям в УФ.

Апробация работы. Результаты, изложенные в данной работе, были неоднократно представлены в докладах на семинарах Отдела физики планет и малых тел Солнечной системы ИКИ РАН, а также на международных конференциях: на Московском симпозиуме по исследованиям Солнечной системы (MS<sup>3</sup>) (2016–2023), конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2018–2023), Европейских конгрессах по планетным исследованиям (EPSC) (2016, 2018, 2019) Генеральных Ассамблеях COSPAR (2022, 2024), Международных конференциях по Венере (IVC) (2016, 2019).

По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых изданиях.

1. 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 O<sub>2</sub> 1.27 μm nightglow from VIRTIS-M (Venus Express) data // *Geophysical Research Letters* – 2018 – vol. 45. <https://doi.org/10.1002/2017GL076380>
2. Gorinov, D.A., N.A., Zasova, L.V., Khatuntsev, I.V., Patsaeva, M.V., Turin, A.V. Winds in the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 μm Images. // *Atmosphere* – 2021 - vol. 12 - no 186. <https://doi.org/10.3390/atmos12020186>
3. D’Incecco, P., Filiberto, J., López, I., Gorinov, D.A., Komatsu, G. Idunn Mons: Evidence for Ongoing Volcano-tectonic Activity and Atmospheric Implications on Venus // *The Planetary Science Journal* – 2021 - vol. 2 - no 5 – id. 215. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac2258>
4. Shakun, A.V., Zasova, L.V., Gorinov, D.A., Khatuntsev, I.V., Ignatiev, N.I., Patsaeva, M.V., Turin, A. V. O<sub>2</sub> (a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) Airglow at 1.27 μm and upper Mesosphere Dynamics on the Night Side of Venus // *Solar System Research* – 2023 – Volume 57, Issue 3, p. 200-213. <https://doi.org/10.1134/S0038094623030085>
5. Filiberto, J., Zolotov, M.Y., Kohler, E., D’Incecco, P., Gorinov, D.A., Bhiravarasu, S.S. et al. Assessing the evidence for active volcanism on Venus: current limitations and future prospects // *Geochemistry* – 2025 – id. 126316. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2025.126316>

Теоретическая и практическая значимость работы. Исследование атмосферной динамики важно для понимания физических процессов, происходящих на Венере, а также для создания модели общей циркуляции атмосферы Венеры. Выявленные закономерности помогут определить научную

программу для будущих космических миссий к Венере и наземных астрономических наблюдений.

Основные положения, выносимые на защиту. На основе обработки и анализа инфракрасных изображений свечения кислорода  $O_2(a^1\Delta_g)$  в верхней мезосфере (1,27 мкм, 90–110 км), а также нижнего облачного слоя (1,74 мкм, 44–48 км) на ночной стороне Венеры, полученных КА «Венера-Экспресс» и «Акацуки», были получены следующие результаты:

1. В глобальном поле скоростей, вычисленном по измерениям перемещения областей свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  на ночной стороне Венеры на высотах 90–110 км, обнаружена асимметрия солнечно-антисолнечной (SS-AS) циркуляции. Зона конвергенции потоков от терминаторов в направлении полуночного меридиана сдвинута на 1–2 часа от полуночи в сторону вечернего терминатора. Это смещение имеет солнечно-связанный характер и вызвано термическим приливом, совпадая с температурным максимумом суточной и полусуточной гармоника термического прилива.

2. По анализу скоростей на локальных масштабах в поле свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  1,27 мкм на высоте 90–110 км впервые обнаружены «рельефные отпечатки» гористой Области Фебы (высотой до 2 км). Наблюдение перемещения «отпечатка» позволило определить направление и скорость движения атмосферных масс на данной высоте. Аргументирован вывод о том, что, как и в случае верхней атмосферы Земли, эти «отпечатки» рельефа являются результатом влияния волн плавучести, которые возникают при столкновении приповерхностного потока с рельефом.

3. В верхней мезосфере обнаружены спорадически возникающие замкнутые вихри, подобные циклонам и антициклонам, диаметром от 1500 до 4000 км. Таким образом, наблюдение перемещения «облаков» свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  является маркером циркуляции на высоте 90–110 км.

4. Впервые обнаружены «фрагменты» прямой ячейки Хэдли в нижнем облачном слое, аналогичной наблюдаемой в верхнем облачном слое. Вместе с ранее отождествленной верхней ветвью возвратной ячейки Хэдли (по наблюдениям камеры VMC КА «Венера Экспресс») в области верхней границы среднего облачного слоя это подтверждает, что циркуляция Хэдли является важным механизмом меридионального переноса в атмосфере Венеры.

5. Впервые обнаружена асимметрия широтного профиля ветра относительно экватора на низких широтах в нижнем облачном слое (известная ранее по профилям скорости ветра, измеренным в УФ-диапазоне), вследствие

которой меридиональная скорость ветра меняет свой знак не на экваторе, а на широте 5–7° ю.ш. – как и в верхнем облачном слое. Вероятной причиной такой асимметрии полушарий является асимметрия рельефа, а именно – существование в южном полушарии высокогорной области Земля Афродиты.

6. Обнаружено влияние рельефа на циркуляцию нижнего облачного слоя Венеры: торможение зонального потока на 3–4 м/с ( $57,4 \pm 0,4$  м/с) относительно среднего значения ( $60,9 \pm 0,2$  м/с) наблюдалось над вулканической Областью Имд. Вкупе с оценками возраста Области Имд как геологически молодой (менее  $10^3$  лет относительно среднего возраста поверхности  $\sim 5 \times 10^8$  лет) это может косвенно свидетельствовать о современной вулканической активности Венеры.

Личный вклад автора. Все работы по теме диссертации выполнены в соавторстве. Автором вручную отбирались изображения из архивов данных миссий «Венера-Экспресс» и «Акацуки» для анализа и измерения скорости ветра ручным и автоматическим методами, применявшимися ранее для анализа данных камеры VMC КА «Венера-Экспресс» (Khatuntsev et al., 2013; Patsaeva et al., 2015). В анализе, интерпретации, оформлении и представлении результатов автор сыграл ключевую роль. Основные результаты диссертации основаны на работах (Gorinov et al., 2018; 2021) и (Шакун и др., 2023), где автором выполнен анализ короткопериодических вариаций и их сравнение с поведением среднего распределения свечения кислорода. В работах (D’Incecco et al., 2021; Filiberto et al., 2025) автору принадлежит идея о влиянии вулканической активности Венеры на циркуляцию нижнего облачного слоя.

Работа Gorinov et al., 2018 из списка публикаций автора получила премию «Лучшая научная работа института» в составе цикла «Исследование циркуляции атмосферы Венеры по данным Venus Express» на конкурсе научных работ Института космических исследований РАН.

## **Структура и объём диссертации**

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения. В конце представлен список литературы, список сокращений и приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** посвящено описанию текущего состояния знаний о планете Венера, актуальности темы, целям и задачам исследования, а также формулировке и

обоснованию научной новизны и практической значимости полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, описываются степень достоверности и апробация полученных результатов, личный вклад автора и объём работы.

**Глава 1 – «Циркуляция верхней мезосферы Венеры по результатам миссии «Венера-Экспресс»»** – посвящена исследованию динамики ночного свечения кислорода  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) на длине волны 1,27 мкм по данным прибора VIRTIS-M КА «Венера-Экспресс».

В разделе 1.1 приводится описание спектральных окон прозрачности в атмосфере Венеры, механизма свечения и переноса атомов кислорода глобальной ячейкой циркуляции SS-AS, перечисляются основные работы по обнаружению и измерению свечения кислорода  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) на ночной стороне. Указывается на противоречие в результатах независимых работ о нахождении максимума свечения (Gérard et al., 2008; Шакун и др., 2023). Раздел содержит постановку задачи исследования.

Раздел 1.2 посвящен описанию картирующего спектрометра VIRTIS на борту орбитального КА «Венера Экспресс» (VIRTIS/VEx) (Svedhem et al., 2007; Drossart et al., 2007) Европейского космического агентства, работавшего с 2006 по 2008 год. Обсуждается специфика наблюдений ИК канала VIRTIS-M: пространственное покрытие данными, которое охватывает в основном южное полушарие, и особенности инфракрасного спектра атмосферы Венеры.

В разделе 1.3 описан метод ручного измерения горизонтальной скорости ветра по перемещению деталей свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ). Рассмотрены особенности ИК изображений на длине волны 1,27 мкм и процесс отбора данных для исследования.

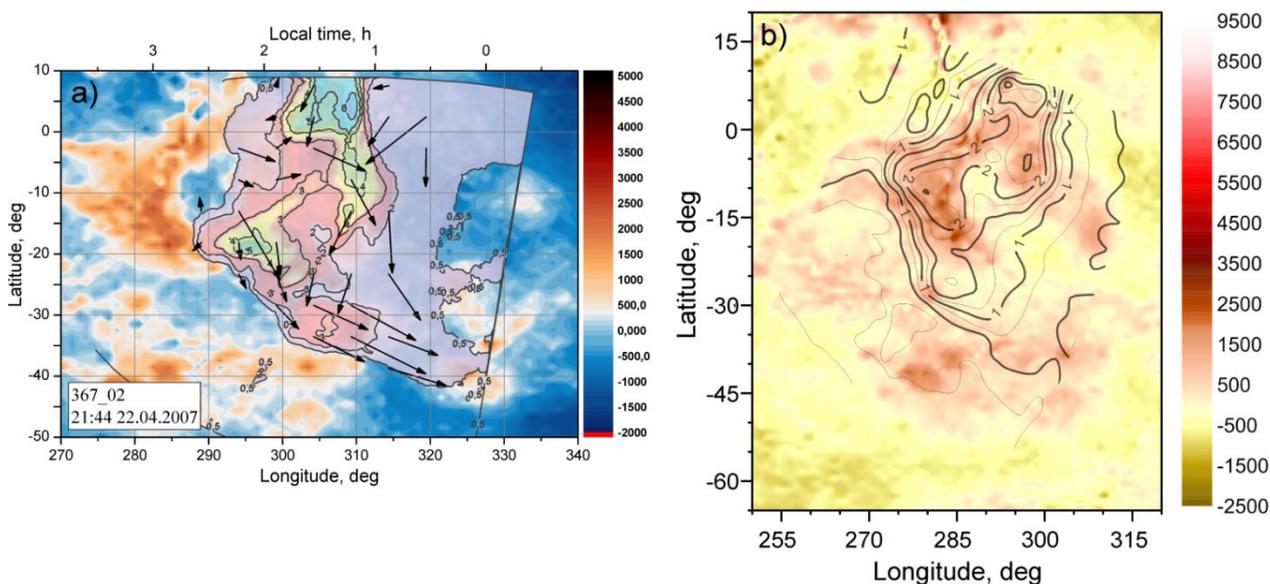
В разделе 1.4 приводится описание поведения свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) из работы (Шакун и др., 2023). Показано, что несмотря на то, что отдельные максимумы пространственного распределения свечения могут обнаруживаться как в противосолнечной точке (AS), так и со смещением в сторону утреннего или вечернего терминатора, в усреднённой картине абсолютный максимум смещён к  $22,5 \pm 0,5$  ч местного времени.

В разделе 1.5 рассматриваются результаты измерения горизонтальной скорости ветра в верхней мезосфере на ночной стороне Венеры. Показано, что обе компоненты скорости – зональная и меридиональная – асимметричны относительно полуночи, что отличает наблюдаемую картину от симметричного режима циркуляции SS-AS. Для зональной компоненты скорость потока с утреннего терминатора (в восточном направлении, знак «+») превышает скорость с вечернего

терминатора (в западном, знак «-») на 20–30 м/с. Меридиональная скорость направлена к экватору до полуночи (знак «+») и к южному полюсу после полуночи (знак «-»), при этом значения варьируются в пределах от -40 до +40 м/с.

В разделе 1.6 обсуждается корреляция свечения и скорости ветра с рельефом подстилающей поверхности. При усреднении всех данных корреляция не наблюдается, однако вариации горизонтальных скоростей на отдельных орбитах указывают на роль высокогорий как «препятствий» для горизонтального потока. Кроме того, обнаруживаются замкнутые вихреобразные течения диаметром до 4000 км (местное время наблюдения всегда находится между 0 и 6 ч), возникновение которых также может быть связано с влиянием поверхности. Следует отметить, что обнаруженное ранее замедление скорости ветра над высокогорьями Земли Афродиты в верхнем облачном слое (Vertaux et al., 2016) связывалось с распространением орографических (горных) волн.

В разделе 1.7 рассматривается последовательность из 6 орбит (№367–372, 6 земных суток) и описывается эволюция наблюдаемой яркой области кислородного свечения. На орбите №367 обнаружен самый выразительный пример влияния поверхности на циркуляцию: контуры распределения свечения кислорода при смещении изображения в направлении, противоположном направлению движения потока, совпадают с рельефом Области Фебы с коэффициентом корреляции 0,61 (Рисунок 1). Также на орбите №372 обнаружен замкнутый вихрь, подобный антициклону, с характерным размером около 1500 км.



**Рисунок 1.** Иллюстрация влияния поверхности на циркуляцию верхней мезосферы. Данные прибора VIRTIS-M, КА «Венера-Экспресс», орбита № 367, изображение 02

в канале 1,27 мкм. (а): Стрелки обозначают горизонтальную скорость ветра; изолинии обозначают интенсивность свечения кислорода в МРл; фоновые цвета обозначают рельеф поверхности Венеры. (б) Контуры свечения из (а), наложенные на рельеф Венеры (здесь – Область Фебы с характерной формой «полумесяца») после смещения на 20° на запад, 7° на север и поворота на 14° по часовой стрелке (в направлении, противоположном ветру).

В разделе 1.8 обсуждаются полученные в главе 1 результаты. Показано, что как асимметрия среднего распределения ночного свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ), так и положение области конвергенции потоков, имеет солнечно-связанный характер и совпадает с положением максимума температуры, связанного с суточной и полусуточной гармоникой термического прилива на высоте 95 км на ночной стороне Венеры. Сделан вывод, что термические приливы влияют на распределение свечения и динамику верхней мезосферы (90–110 км). Таким образом, кроме глобальных процессов: циркуляции SS-AS, солнечно-связанных волн (термических приливов), зональной суперротации, на циркуляцию могут влиять вертикально распространяющиеся орографические волны (волны плавучести), проявление которых в мезосфере Венеры также было обнаружено в настоящей работе.

В разделе 1.9 суммируются основные результаты, полученные в главе 1.

Впервые полностью были полностью обработаны все данные спектрометра VIRTIS-M в канале 1,27 мкм и получена база данных векторов горизонтальных скоростей на высоте 90–110 км.

В «переходной области» в верхней мезосфере (мезопаузе) мода циркуляции SS-AS является основной, но она не симметрична относительно противосолнечной точки, асимметрия имеет солнечно-связанный характер (т.е. наблюдаемая асимметрия вызвана термическим приливом).

Впервые измерена асимметрия циркуляции SS-AS в верхней мезосфере Венеры (90–110 км высоты) относительно полуночного меридиана, вызванная термическими приливами: скорость зонального потока от утреннего терминатора (в среднем +35 м/с) превышает скорость потока от вечернего (в среднем -5 м/с) на 30–50 м/с. В результате конвергенция встречающихся потоков от терминаторов и, как следствие, рекомбинация атомов кислорода и максимальной интенсивности в полосе  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) 1,27 мкм, наблюдается в среднем в  $22,5 \pm 0,5$  ч.

Обнаружено влияние орографических волн – волн плавучести – на циркуляцию в верхней мезосфере, проявляющихся в «обтекании» потоком на

высоте 90–110 км областей над высокогорьями, а также в повторении контуров рельефа в морфологии свечения кислорода.

Впервые в атмосфере Венеры обнаружены движения, подобные циклонам и антициклонам, наблюдающиеся в 0–4 ч местного времени, характерный размер которых оценивается до 4000 км.

**В Главе 2 – «Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Венера-Экспресс»** – приведены результаты исследования динамики атмосферы на уровне нижнего облачного слоя (44–48 км) на ночной стороне Венеры по данным прибора VIRTIS-M КА «Венера-Экспресс» на длине волны 1,74 мкм.

В разделе 2.1 приводится исторический обзор работ по измерению скорости ветра на высоте нижнего облачного слоя, в том числе и по данным прибора VIRTIS-M, но с использованием неполного набора данных.

В разделе 2.2 описываются используемые данные прибора VIRTIS-M – изображения на длине волны 1,74 мкм – и особенности, связанные с покрытием данными ночной стороны: из-за наклона и вытянутости орбиты КА «Венера-Экспресс» изображения в основном покрывают средние широты южного полушария.

В разделе 2.3 описываются методы измерения скоростей ветра и обосновывается необходимость применения вейвлет-фильтра для увеличения контрастности.

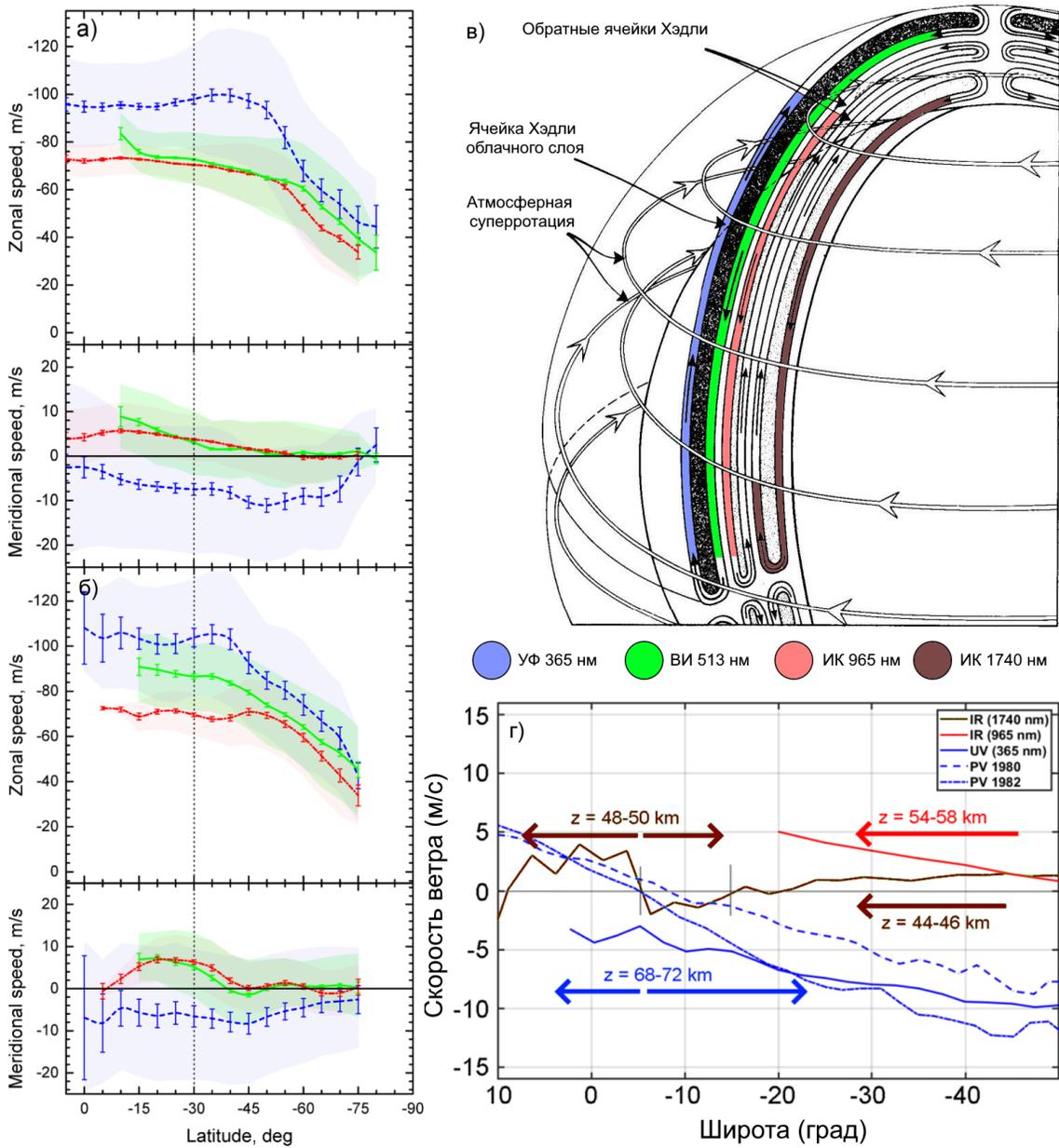
В разделе 2.4 рассматриваются результаты измерения скорости ветра в нижнем облачном слое Венеры, зависимость скорости ветра от местного времени. Скорость ветра направлена на запад, в направлении суперротации. Её зональная компонента в низких и средних широтах равна  $60,9 \pm 0,2$  м/с, в высоких широтах она снижается до нуля к полюсу. Модуль зональной компоненты скорости ветра уменьшается от вечернего к утреннему терминатору на величину 3–5 м/с. Между 40 и 60° ю.ш. обнаружено струйное течение (джет), в котором скорость увеличивается на 2–4 м/с относительно среднего. Меридиональная компонента в основном направлена к экватору и варьируется в пределах 0–3 м/с, но меняет знак вблизи вечернего терминатора.

В разделе 2.5 строится средний широтный профиль скорости ветра в нижнем облачном слое. Было обнаружено, что изменение знака скорости меридионального ветра (с положительного на отрицательный) на 20° ю.ш. совпадает с увеличением зональной скорости (2–5 м/с). В результате обнаружения двух потоков, движущихся

навстречу друг другу, делается заключение, что к северу и к югу от 20° ю.ш. наблюдаются атмосферные слои, расположенные на разных высотах.

В разделе 2.6 делаются предположения, аналогичные таковым в разделе 1.7, о влиянии поверхности на динамику атмосферы на рассматриваемом высотном уровне. В средней картине не обнаружилось корреляции с топографией и долготных вариаций, превышающих возможные вариации от местного времени (3–5 м/с), за исключением одной области, расположенной над областью Имд (210–260° в.д., 40–50° ю.ш.). Здесь зональная скорость замедляется на 3–4 м/с ( $57,4 \pm 0,4$  м/с) по сравнению со средним значением ( $60,9 \pm 0,2$  м/с). Известно, что поверхность вулканической области Имд имеет очень молодой геологический возраст (1–1000 лет) (D’Incesso et al., 2020; 2021) относительно среднего возраста поверхности  $\sim 5 \times 10^8$  лет, а модели показывают, что вулканический плюм на Венере может достигать высоты 30–40 км (Dias et al., 2025), и возникающая при этом тепловая аномалия может возбуждать распространяющиеся выше гравитационные волны, влияющие на горизонтальную циркуляцию. Делается предположение об обнаружении косвенного признака вулканической активности.

В разделе 2.7 обсуждаются полученные в главе 2 результаты. В средней картине наблюдается согласование с предыдущими работами и моделями общей циркуляции. Однако наличие большей статистики измерений позволяет исследовать динамику более детально. По наблюдению двух разнонаправленных потоков, отличающихся зональной скоростью, в канале 1,74 мкм вдоль меридиана на разных высотах, делается предположение об обнаружении двух фрагментов прямой ячейки циркуляции Хэдли нижнего облачного слоя, дополняющей обнаруженные ранее ячейки в среднем и верхнем облачном слое (Рисунок 2). В ИК канале наблюдаются уровни вблизи верхней границы среднего облачного слоя – здесь расположена верхняя ветвь возвратной ячейки Хэдли, направленная к экватору. Дополнительным аргументом в пользу присутствия ячейки Хэдли является наблюдение среднеширотного джета между 40° и 60° ю.ш. – связь между джетами и ячейками Хэдли была показана ранее моделями (Yamamoto et al., 2016).



**Рисунок 2.** Положение трёх ячеек Хэдли в облачном слое Венеры. Прямая ячейка в верхнем облачном слое: верхняя ветвь направлена к полюсу (УФ, 365 нм, синий цвет), обратная ветвь направлена к экватору (ВИ – видимое излучение, 513 нм, зелёный цвет); верхняя ветвь возвратной ячейки Хэдли (ИК, 965 нм, красный цвет) в диапазонах камеры VMC. Фрагменты прямой ячейки Хэдли (1,74 мкм, коричневый цвет) спектрометра VIRTIS-M. а) и б) широтные профили средней зональной и меридиональной скорости ветра, рассчитанные по наблюдениям VMC в трёх спектральных каналах для «медленной» (а) и «быстрой» (б) части данных из (Khatuntsev et al., 2022); в) адаптация иллюстрации из (Schubert et al., 1983) – цветами показано соответствие наблюдений и обнаруженных ячеек; г) широтные

профили зональной скорости ветра по УФ, ВИ и ИК по наблюдениям КА «Пионер-Венера» и камеры VMC «Венера-Экспресс».

В разделе 2.8 суммируются основные результаты, полученные в главе 2.

Впервые были полностью обработаны все данные, полученные прибором VIRTIS-M в канале 1,74 мкм, и получена база данных векторов горизонтальных скоростей на высоте нижнего облачного слоя Венеры.

Впервые обнаружена, фрагментарно, прямая ячейка Хэдли в нижнем облачном слое по измерениям скорости ветра в 1,74 мкм, предсказываемая моделями. В экваториальной области измеренная скорость при вертикальном сдвиге скорости  $2 \text{ м с}^{-1} \text{ км}^{-1}$  соответствует более высокому (на 2 км выше) наблюдаемому уровню. Ключевым является тот факт, что при изменении величины зональной скорости, меридиональная скорость меняет знак, что свидетельствует о том, что с изменением широты наблюдаются разные высотные уровни, отличающиеся как величиной зональной скорости, так и направлением движения. Подтверждением существования ячейки Хэдли является также связанный с ней среднеширотный джет в нижнем облачном слое.

При широте  $< 5^\circ$  ю.ш. горизонтальный поток направлен к северному полюсу, от  $5^\circ$  ю.ш. до  $20^\circ$  ю.ш. – к южному полюсу. В средних широтах ( $\varphi > |-20^\circ|$ ) более медленная зональная скорость может быть интерпретирована как более низкое положение уровня в атмосфере, а вместе с изменением направления меридионального потока к экватору может представлять собой фрагмент ячейки Хэдли в нижнем облачном слое, где движение преимущественно направлено к экватору.

Прямая ячейка Хэдли наблюдалась ранее в верхнем облачном слое: ветвь, направленная к полюсу на верхней границе облаков и к экватору – вблизи нижней границы верхнего облачного слоя по измерениям скорости и направления ветра КА «Пионер-Венера», по поведению широтного градиента температуры КА «Пионер-Венера» и «Венера-15», по измерению скорости и направления ветра камерой VMC КА «Венера-Экспресс». В области верхней границы среднего облачного слоя была обнаружена направленная к экватору ветвь возвратной ячейки Хэдли. Вместе с фрагментарно обнаруженной прямой ячейкой в нижнем облачном слое, можно говорить об экспериментальном подтверждении, что циркуляция Хэдли является важным механизмом меридионального переноса в атмосфере Венеры.

Впервые обнаружена асимметрия широтного профиля ветра в низких широтах относительно экватора в нижнем облачном слое: знак меридиональной

скорости изменяется не на экваторе, а на широте 5-7° ю.ш. Аналогично происходит и на верхней границе облаков по данным УФ измерений (КА «Маринер-10» и «Пионер-Венера») (Limaue et al., 2007). Эта асимметрия, наблюдаемая как в верхнем, так и нижнем облачном слое, вероятно, связана с влиянием Земли Афродиты, которая находится на широтах между 0 и 20° ю.ш.

Впервые обнаружено влияние рельефа поверхности на циркуляцию нижнего облачного слоя Венеры. Над вулканической областью Имд, возможно активной в настоящее время, наблюдается торможение зонального потока на 3–4 м/с ( $57,4 \pm 0,4$  м/с) относительно среднего значения ( $60,9 \pm 0,2$  м/с). Влияние поверхности может отождествляться с распространением гравитационных волн при обтекании потоком в подоблачном слое тепловой аномалии от вулканического плюма.

**В Главе 3 – «Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Акацуки»** – приведены результаты исследования динамики атмосферы на уровне нижнего облачного слоя на ночной стороне Венеры по данным прибора IR2 КА «Акацуки» на длине волны 1,74 мкм. Проводится сравнение с результатами главы 2.

В разделе 3.1 приводится описание космической миссии «Акацуки» и установленной на аппарате ИК камеры IR2, работавшей чуть более 200 дней с марта по октябрь 2016 года. Описываются особенности циркуляции нижнего облачного слоя, обнаруженные ранее при первичном анализе данных IR2 – появление сильного экваториального струйного течения («джета»), ускоряющего зональную компоненту горизонтального ветра на 15–20 м/с по сравнению с данными VIRTIS-M (Peralta et al., 2018).

В разделе 3.2 описывается структура данных IR2, свойства изображений, особенности покрытий данными, методы обработки изображений и расчёта скоростей ветра. В отличие от изображений VIRTIS-M, к расчёту скоростей ветра по изображениям IR2 можно применять как ручной (Khatuntsev et al., 2013), так и автоматический метод (Patsaeva et al., 2015).

В разделе 3.3 рассматриваются результаты расчёта скоростей ветра по всей базе данных IR2 в канале 1,74 мкм. Подтверждена обнаруженная в главе 2 зависимость от местного времени, а также присутствие обнаруженного предыдущими исследователями (Peralta et al., 2018) ускорения зональной скорости на экваторе ( $78 \pm 2$  м/с), при этом изменяется и форма широтного профиля зональной скорости (Рисунок 3).

В пределах широт  $|20-60|^\circ$  зональная скорость как в северном, так и южном полушарии, изменяется в пределах от -60 до -70 м/с, тогда как меридиональная

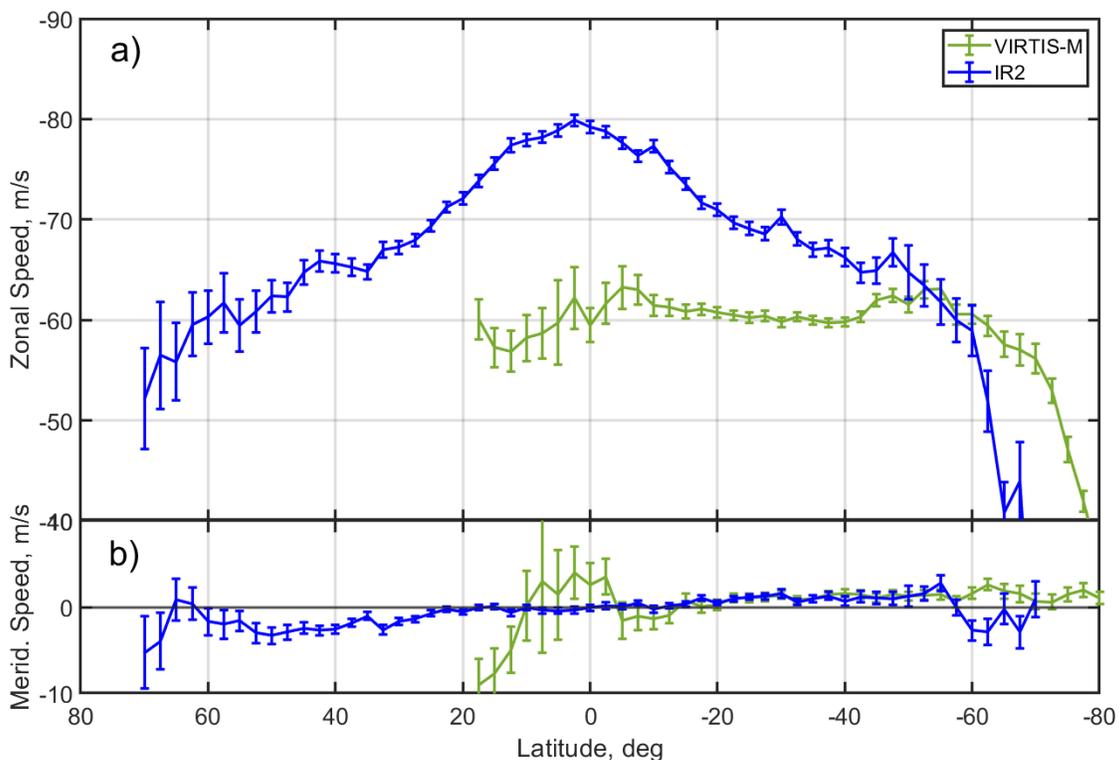
скорость составляет 1–2 м/с в южном полушарии и 1–4 м/с в северном: меридиональный поток в обоих случаях направлен к экватору, что согласуется с результатами VIRTIS-M в канале 1,74 мкм.

Таким образом, наблюдаемые зональные скорости по величине находятся в пределах значений, измеренных камерой VMC в ближнем ИК канале, т.е. в области верхней границы среднего облачного слоя (Khatuntsev et al., 2022). Этот результат говорит о том, что камера IR2 может видеть верхнюю ветвь «возвратной» ячейки Хэдли в среднем облачном слое.

Так как и в том и в другом случае меридиональная скорость направлена к экватору, то невозможно отличить, относятся ли наблюдаемые ветви в 1,74 мкм IR2 к нижней ветви ячейки Хэдли верхнего облачного слоя либо верхней ветви возвратной ячейки Хэдли среднего облачного слоя. Наблюдения IR2 находятся вблизи максимума солнечного цикла – области «высоких» зональных скоростей VMC. Сравнение областей «высоких» и «низких» скоростей показывает отличие в видимом и ИК диапазоне: в области «низких» скоростей зональные скорости в этих фильтрах совпадают, в области «высоких» скоростей в видимом канале превышают на 10–20 м/с.

В экваториальной области ( $0\pm 20^\circ$ ), где наблюдаются максимальные зональные скорости (т.н. «экваториальный джет»), меридиональные скорости в 1,74 мкм близки к нулю, указывая на движение потока вдоль экватора.

Меридиональные скорости, измеренные по данным VIRTIS-M, отличаются от наблюдаемых IR2 в том же интервале широт ( $0\pm 20^\circ$ ), где были отождествлены фрагменты прямой ячейки Хэдли в Южном полушарии благодаря изменению направления потока одновременно с изменением величины зональной скорости (Глава 2). Наблюдения IR2 относятся к среднему облачному слою – находящейся в нём направленной к полюсу верхней ветви «возвратной» ячейки циркуляции. Таким образом, в верхнем облачном слое находится прямая ячейка Хэдли, в среднем облачном слое – «возвратная» ячейка (наблюдается её верхняя ветвь) и фрагментарно – прямая ветвь в среднем облачном слое.



**Рисунок 3.** Средние профили зонального (а) и меридионального (б) ветра (синие кривые) в нижнем облачном слое Венеры на ночной стороне по результатам анализа всех данных прибора IR2 (март-октябрь 2016). Средние значения рассчитаны для широтных ячеек  $2,5^\circ$ . Для сравнения приведены широтные профили по данным VIRTIS-M (глава 2), обозначенные зелёным цветом. Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%.

Экваториальная орбита КА «Акацуки» позволяет сравнивать динамические характеристики северного и южного полушарий – так была обнаружена глобальная асимметрия: в низких и высоких широтах ( $0-25^\circ$  и  $60-90^\circ$ ) зональная скорость ветра выше в южном полушарии, а в средних ( $30-45^\circ$ ) – в северном. В долготной зависимости не было выявлено каких-либо особенностей, что в целом может объясняться малым количеством данных камеры IR2.

В разделе 3.4 рассмотрены вариации поведения горизонтального потока на коротких временных масштабах (1–10 суток). Обнаружено, что на этих масштабах существенные изменения могут происходить как с величиной скорости (до 10 м/с), так и положением максимума и формой широтного профиля (появление двойных максимумов).

В разделе 3.5 обсуждаются результаты главы 3. Основной обнаруженной особенностью является наличие экваториального «ускорения» зонального потока в

нижнем облачном слое в результате анализа данных IR2 (2016 г.) на 15–20 м/с по сравнению с аналогичными величинами по данным VIRTIS-M (2006–2008 гг.).

Одна из причин может носить инструментальный характер – различие в ширине спектрального интервала двух приборов: VIRTIS-M (с шириной канала 2 нм и разрешением 14 нм) в области максимума пропускания позволяет видеть более глубокие слои облаков, чем IR2 (с шириной канала 42 нм). Однако расчёты показали, что разница высот может составлять не более 2 км (разница скоростей ~4 м/с), т.е. «приборная» разница не может полностью объяснить разницу результатов.

Вторая причина может быть вызвана наблюдением слоёв на разной высоте из-за изменения оптической толщины облачного слоя. Если исходить из разности скоростей по данным IR2 и VIRTIS-M и вертикального сдвига скорости  $2 \text{ м с}^{-1} \text{ км}^{-1}$  (Khatuntsev et al., 2017), наблюдения IR2 в экваториальной области должны относиться к среднему облачному слою (до 10 км выше).

Ещё одним возможным объяснением различия величины зональных скоростей может быть периодическое изменение скорости нижнего облачного слоя в результате резонансного взаимодействия экваториальной волны Кельвина и полярных волн Россби (т.н. «неустойчивость Россби-Кельвина»), имеющих периоды 5,8 и 7 дней, соответственно. Модели показывают, что скорость ветра в нижнем облачном слое на экваторе может изменяться от 62 до 80 м/с в течение венерианского года (Takagi et al., 2023).

Возможность появления второй и третьей причин может быть связана с корреляцией с циклом солнечной активности, изменением притока солнечной энергии. Измерения IR2 в 2016 г., которые производились вблизи максимума 24-го солнечного цикла (апрель 2014 г.), т.е. через 1,5–2 года после максимума, показывают на 15–20 м/с более высокие значения зональных скоростей по сравнению с измерениями VIRTIS-M (2006–2008 гг.) в минимуме 24-го солнечного цикла, т.е. за 6–8 лет до максимума. Подобное же ускорение зонального потока на 15–20 м/с наблюдается и в верхнем слое облаков между УФ измерениями камер VMC (2006–2008 гг.) КА «Венера-Экспресс» и UVI КА «Акацуки» (2016 г.) (Khatuntsev et al., 2022) в те же периоды цикла солнечной активности. Таким образом, увеличение зональной скорости, коррелирующее с циклом солнечной активности, наблюдается как в верхнем, так и в нижнем облачном слое в экваториальной области. С ростом солнечной активности возрастает поглощение в УФ диапазоне (Lee et al., 2020), в результате чего генерируются термические приливы, поставляющие энергию на поддержание суперротации – ускорение зонального потока во всём облачном слое.

В разделе 3.6 суммируются основные результаты, полученные в Главе 3.

Впервые полностью были полностью обработаны все данные, полученные камерой IR2 в канале 1,74 мкм (2016 г.) и получена база данных векторов горизонтальных скоростей на высоте нижнего облачного слоя Венеры в дополнение к базе данных прибора VIRTIS-M, описанной в Главе 2.

Обнаружено значительное, до 30% (на 15–20 м/с) увеличение зональной скорости, измеренной камерой IR2 в 2016 г. (вблизи максимума 24-го солнечного цикла) по сравнению с наблюдениями VIRTIS-M в 2006–2008 гг. (вблизи солнечного минимума). Подобная разница в зональной скорости ветра наблюдалась и для верхнего облачного слоя при сравнении измерений в соответствующих фазах солнечного цикла (Khatuntsev et al., 2022).

В горизонтальных скоростях ветра обнаружена глобальная асимметрия между северным и южным полушарием: на низких и высоких широтах скорость ветра выше в южном полушарии, в средних широтах – в северном.

В **Заключении** подводятся основные итоги диссертационной работы и делаются завершающие выводы. Результаты, полученные в настоящей работе, могут усовершенствовать имеющиеся на сегодняшний момент модели общей циркуляции атмосферы Венеры, помочь продвинуться в понимании механизмов суперротации и подготовить планирование экспериментов на готовящихся к запуску в ближайшее десятилетие космических аппаратах к Венере.

## Цитируемая литература

1. Alexander M.J. A mechanism for the Venus thermospheric superrotation // *Geophysical Research Letters*. 1992. Vol. 19, № 22. P. 2207–2210 Basilevsky A.T., Head J.W. The surface of Venus // *Reports on Progress in Physics*. 2003. Vol. 66, № 10. P. 1699–1734.
2. Altieri F. et al. Modeling VIRTIS/VEX O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) nightglow profiles affected by the propagation of gravity waves in the Venus upper mesosphere // *Journal of Geophysical Research Planets*. 2014. Vol. 119, № 11. P. 2300–2316.
3. Basilevsky A.T., Head J.W. The surface of Venus // *Reports on Progress in Physics*. 2003. Vol. 66, № 10. P. 1699–1734.
4. Bertaux J. et al. Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // *Journal of Geophysical Research Planets*. 2016. Vol. 121, № 6. P. 1087–1101.
5. Bougher S.W., Rafkin S., Drossart P. Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2006. Vol. 54, № 13–14. P. 1371–1380.
6. Dias J.A. et al. Volcanic gas plumes' effect on the spectrum of Venus // *Icarus*. 2025. Vol. 438. ID. 116589.
7. D’Incecco P. et al. Local stratigraphic relations at Sandel crater, Venus: Possible evidence for recent volcano-tectonic activity in Imdr Regio // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 546. ID. 116410.
8. D’Incecco P. et al. Idunn Mons: Evidence for Ongoing Volcano-tectonic Activity and Atmospheric Implications on Venus // *The Planetary Science Journal*. 2021. Vol. 2, № 5. ID. 215.
9. Drossart P. et al. A dynamic upper atmosphere of Venus as revealed by VIRTIS on Venus Express // *Nature*. 2007. Vol. 450, № 7170. P. 641–645.
10. Gérard J.-C. et al. Atomic oxygen distribution in the Venus mesosphere from observations of O<sub>2</sub> infrared airglow by VIRTIS-Venus Express // *Icarus*. 2008. Vol. 199, № 2. P. 264–272.
11. Gierasch, P.J., Goody, R.M. et al. The general circulation of the Venus atmosphere: an assesment // кн. *Venus II: Geology, Geophysics, Atmospheres, and Solar Wind Environment* / Под ред. S. W. Bougher, D. M. Hunten и R. J. Philips. Univ. of Arizona Press, Tucson. 1997. P.459-500.
12. Jones R.M., Bedard A.J. Atmospheric gravity wave ray tracing: Ordinary and extraordinary waves // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2018. Vol. 179. P. 342–357.

13. Lee Y.J. et al. Spatial and temporal variability of the 365-nm albedo of Venus observed by the camera on board Venus Express // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2020. Vol. 125, № 6.
14. Lellouch, E. et al. Monitoring of mesospheric structure and dynamics // кн. Venus II: Geology, Geophysics, Atmospheres, and Solar Wind Environment / Под ред. S. W. Bougher, D. M. Hunten и R. J. Philips. Univ. of Arizona Press, Tucson. 1997. P. 295–324.
15. Khatuntsev I.V. et al. Winds in the middle cloud deck from the Near-IR imaging by the Venus Monitoring Camera onboard Venus Express // *Journal of Geophysical Research Planets*. 2017. Vol. 122, № 11. P. 2312–2327.
16. Khatuntsev I.V. et al. Winds From the Visible (513 nm) Images Obtained by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // *Journal of Geophysical Research Planets*. 2022. Vol. 127, № e2021JE007032.
17. Limaye S.S. Venus atmospheric circulation: Known and unknown // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007. Vol. 112, № E4.
18. Patsaeva M.V. et al. The relationship between mesoscale circulation and cloud morphology at the upper cloud level of Venus from VMC/Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2015. Vol. 113–114. P. 100–108.
19. Peralta J. et al. Nightside Winds at the Lower Clouds of Venus with Akatsuki /IR2: Longitudinal, Local Time, and Decadal Variations from Comparison with Previous Measurements // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2018. Vol. 239, № 2. P. 29.
20. Sánchez-Lavega A. et al. The atmospheric dynamics of Venus // *Space Science Reviews*. 2017. Vol. 212, № 3–4. P. 1541–1616.
21. Schubert, G. General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere // кн. Venus / Под ред. Hunter D.M., Colin L., Donahue T.M., Moroz V.I.. Univ. of Arizona Press, Tucson. 1983. P.681-765.
22. Sugimoto N., Takagi M., Matsuda Y. Fully developed superrotation driven by the mean meridional circulation in a Venus GCM // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46, № 3. P. 1776–1784.
23. Svedhem H. et al. Venus Express—The first European mission to Venus // *Planetary and Space Science*. 2007. Vol. 55, № 12. P. 1636–1652.
24. Takagi M. et al. Formation and Quasi-Periodic variation of equatorial jet caused by Planetary-Scale waves in the Venusian lower cloud layer // *Journal of Geophysical Research Planets*. 2023. Vol. 128, № 11.
25. Widemann T. et al. Venus: Evolution Through Time: key science questions, selected mission concepts and future investigations // *Space Science Reviews*. 2023. Vol. 219, № 7.

26. Yamamoto M., Takahashi M. General circulation driven by baroclinic forcing due to cloud layer heating: Significance of planetary rotation and polar eddy heat transport // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2016. Vol. 121, № 4. P. 558–573.
27. Zasova L.V., Linkin V.M., Khatuntsev I.V. Zonal wind in the middle atmosphere of Venus. // *Cosmic Research*. 2000. Vol. 38, № 1. P. 49.
28. Zasova L. et al. Local time variations of the middle atmosphere of Venus: Solar-related structures // *Advances in Space Research*. 2002. Vol. 29, № 2. P. 243–248.
29. Zasova L.V. et al. Structure of the Venus atmosphere // *Planetary and Space Science*. 2007. Vol. 55, № 12. P. 1712–1728.
30. Zasova L.V. et al. Venera-D: A Design of an Automatic Space Station for Venus Exploration // *Solar System Research*. 2019. Vol. 53, № 7, P. 506–510.
31. Zhang S., Bougher S.W., Alexander M.J. The impact of gravity waves on the Venus thermosphere and O<sub>2</sub> IR nightglow // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1996. Vol. 101, № E10. P. 23195–23205.
32. Засова Л.В. и др. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км // *Космические исследования*. 2006. Т. 44. № 4. С. 381 – 400.
33. Шакун А.В. и др. Исследование свечения кислорода O<sub>2</sub> ( $a^1\Delta_g$ ) на ночной стороне Венеры по надирным данным эксперимента VIRTIS-M миссии Венера-Экспресс // *Космические Исследования*. 2010. Т. 48. № 3. С. 232-239.