

На правах рукописи

Горинов Дмитрий Алексеевич

## **Циркуляция атмосферы Венеры на ночной стороне**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2025

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:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
астрономии Российской академии наук

Защита состоится ... 2025 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 .....2025 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), 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 до конца. Их изучение необходимо для понимания возможной эволюции климата Земли и условий возникновения жизни.

Облачный слой Венеры вращается вокруг планеты в западном направлении с максимальной скоростью, в 60 раз превышающей скорость вращения самой планеты: примерно 100 м/с на высотах 65–70 км (верхний уровень облаков) (Schubert, 1983; Gierasch et al., 1997) – это явление известно как ретроградная зональная суперротация. Скорость уменьшается с ростом высоты над облаками и на широтах, близких к полюсам (Zasova et al., 2000). В термосфере (>110 км) циркуляция с подсолнечной стороны к противосолнечной (SS-AS) управляется солнечным нагревом (Sánchez-Lavega et al., 2017). Динамика в переходной области может быть подвержена влиянию обоих этих режимов (Bougher et al., 2006; Lellouch et al., 1997), а также других механизмов, таких как гравитационные волны (Alexander, 1992; Altieri et al., 2014; Bertaux et al., 2016; Peralta et al., 2017; Zhang et al., 1996) и термические приливы (Zasova et al., 2007).

Исследование динамики атмосферы на разных высотных уровнях важно для понимания физических процессов, происходящих на Венере, а также для создания модели 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» (Widemann et al., 2024).

Объектом исследования диссертации является атмосфера Венеры и ее динамические свойства в области нижнего облачного слоя (44–48 км) и 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.

Целью работы является исследование параметров циркуляции облачного слоя и верхней мезосферы 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 длинах волн 1,27 по перемещению областей («облаков») свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) – маркера циркуляции верхней мезосферы (90–110 км), по перемещению облачных деталей в окне прозрачности 1,74 мкм в нижнем облачном слое (45–50 км), полученных прибором VIRTIS-M на борту КА «Венера-Экспресс», а также по изображениям 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 суточных вариаций проводились по анализу перемещения «облаков» кислорода на основе данных, полученных на отдельных орбитах.

Анализ глобального поля скоростей зонального ветра на ночной стороне Венеры по перемещению областей свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) показал асимметрию относительно полуночного меридиана: область конвергенции потоков от терминаторов сдвинута на 1,5–2 часа от полуночи. Впервые предложено объяснение связи этого смещения с термическим приливом: кривая изменения температуры на высоте 95 км имеет максимум, приходящийся на тот же самый интервал местного времени.

В диссертации впервые был проведён детальный анализ долготной зависимости скорости ветра на ночной стороне с использованием данных,

полученных на отдельных орбитах. Было обнаружено замедление потока и рельефные «отпечатки» горных областей, например, Области Фебы (высотой до 2 км), на высоте 95–100 км, возникающие при обтекании приповерхностным потоком горной области, что можно рассматривать как аналог влияния волн плавучести на циркуляцию в верхней атмосфере Земли. Впервые в верхней мезосфере Венеры по перемещению областей свечения кислорода были обнаружены течения, подобные циклонам и антициклонам. Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможность изучать характер движения горизонтальных потоков, т.е. циркуляцию верхней мезосферы по наблюдению перемещения «отпечатков» в поле свечения рельефных деталей поверхности.

Впервые была обнаружена (фрагментарно) прямая ячейка Хэдли в нижнем облачном слое (которая предполагалась в моделях атмосферы, но до сих пор не была обнаружена), 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, вероятно, связанная с асимметрией рельефа поверхности, известная ранее в верхнем облачном слое по наблюдениям в УФ и связанная с высокогорной областью Земля Афродиты.

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  $\mu\text{m}$  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> $\Delta_g$ ) Airglow at 1.27  $\mu\text{m}$  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 (принята к печати 30.06.2025)

Теоретическая и практическая значимость работы. Исследование атмосферной динамики важна 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<sub>2</sub> (a<sup>1</sup> $\Delta_g$ ) (90–110 км) и нижнего облачного слоя (44–48 км) на ночной стороне Венеры, полученных КА «Венера-Экспресс» и «Акацуки», были получены следующие результаты:

1. По измерениям горизонтальных скоростей областей свечения O<sub>2</sub> на ночной стороне Венеры на высотах 90–110 км обнаружена асимметрия солнечно-антисолнечной (SS-AS) циркуляции. Показано, что зона конвергенции потоков от терминаторов в направлении полуночного меридиана сдвинута на 1,5–2 часа от полуночи в сторону вечернего терминатора и близка к максимуму температуры в кривой зависимости термического прилива от местного времени на высоте 95 км.

2. Впервые по анализу отдельных орбит обнаружен рельефный «след» горной Области Фебы в верхней мезосфере на высоте 90–110 км на ночной

стороне планеты в поле свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) (1,27 мкм), при этом коэффициент корреляции яркости свечения и высоты рельефа составляет 0,61. Аргументирован вывод о том, что, как и в случае верхней атмосферы Земли, это является результатом влияния волн плавучести, которые возникают при столкновении потока с препятствием. В верхней мезосфере обнаружены течения, подобные циклонам и антициклонам диаметром от 1500 до 4000 км, сохраняющие стабильность не более суток.

3. Впервые обнаружены «фрагменты» прямой ячейки Хэдли в нижнем облачном слое, аналогичной наблюдаемой в верхнем облачном слое. Вместе с ранее обнаруженной верхней ветвью возвратной ячейки Хэдли это подтверждает, что циркуляция Хэдли является важным механизмом меридионального переноса в атмосфере Венеры.

4. Впервые обнаружена асимметрия широтного профиля ветра относительно экватора на низких широтах в нижнем облачном слое (известная ранее по профилям скорости ветра 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. Вероятная причина этого – влияние высокогорной области Земля Афродиты (0–30° ю.ш.).

5. Обнаружено влияние рельефа на циркуляцию нижнего облачного слоя Венеры: обнаружено торможение зонального потока (на 4–5 м/с) над вулканической областью Имд. Вкупе с геологическими оценками возраста области Имд как очень молодой (1–1000 лет) это может косвенно свидетельствовать о современной вулканической активности Венеры.

Личный вклад автора. Все работы по теме диссертации выполнены в соавторстве. Автор самостоятельно вручную отбирал подходящие для анализа изображения из архива данных миссий «Венера-Экспресс» и «Акацуки» и рассчитывал скорости ветра ручным и автоматическим методами. 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) автором высказаны предположения 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** повествует о текущей картине знаний о планете Венера, сообщает актуальность темы исследования, формулирует цели и задачи исследования, обосновывает научную новизну и практическую значимость 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 КА «Венера-Экспресс».

В разделе 1.1 приводится описание спектральных окон прозрачности в атмосфере Венеры, описывается механизм свечения и переноса атомов кислорода глобальной 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 повествует о картирующем спектрометре VIRTIS на борту орбитального КА «Венера Экспресс» (VIRTIS/VEx) (Svedhem et al., 2007; Drossart et al., 2007) Европейского космического агентства, работавшем с 2006 по 2008 год. Описывается специфика наблюдений и особенности инфракрасного спектра Венеры.

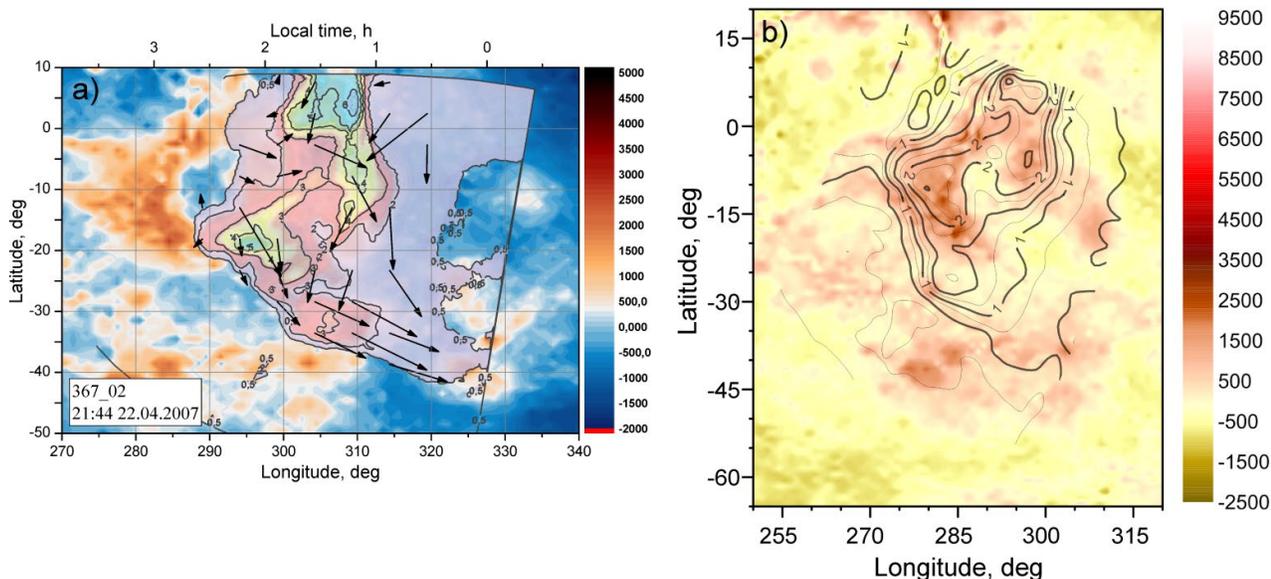
В разделе 1.3 описан метод ручного измерения горизонтальной скорости ветра по перемещению деталей свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ). Рассмотрены особенности ИК изображений на длине волны 1,27 мкм и процесс отбора данных для исследования.

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

В разделе 1.5 рассматриваются результаты измерения горизонтальной скорости ветра в верхней мезосфере на ночной стороне Венеры. Показана сильная асимметрия обеих компонент – зональной и меридиональной – относительно полуночи, накладывающаяся на циркуляцию SS-AS. Для зональной компоненты скорость потока с утреннего терминатора превышает таковую с вечернего почти на 20 м/с.

В разделе 1.6 обсуждается обнаруженный ранее механизм влияния поверхности Венеры на циркуляцию в верхнем облачном слое (Vertaux et al., 2016) посредством орографических (горных) волн. Делается предположение о подобном влиянии и в верхней мезосфере. Корреляция свечения или динамики с рельефом в усредненной картине не наблюдается, однако при анализе атмосферной динамики на отдельных орбитах обнаруживается роль «следов» высокогорий как «препятствий» для горизонтального потока. Кроме того, обнаруживаются завихрения, или циклоны, диаметром до 4000 км, возникновение которых также может быть связано с влиянием поверхности.

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 против направления потока совпадают с рельефом расположенной под ним Области Фебы с коэффициентом корреляции 0,61 (Рисунок 1). Также обнаружен «антициклон» на орбите 372 с характерным размером около 1500 км.



**Рисунок 1.** Иллюстрация влияния поверхности на циркуляцию верхней мезосферы. Данные прибора VIRTIS, 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  $20^\circ$  на запад,  $7^\circ$  на север и поворота на  $14^\circ$  по часовой стрелке (в направлении, противоположном ветру).

В разделе 1.8 обсуждаются полученные в главе 1 результаты. Проводится связь между асимметрией усредненной картины распределения ночного свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) с асимметрией измеренной скорости ветра и асимметрией распределения температуры (термического прилива на высоте 95 км). Сделан вывод о влиянии термических приливов на распределение свечения и динамику верхней мезосферы (90–110 км). Кроме термических приливов, на циркуляцию могут влиять планетарные волны и вертикальные орографические волны, проявление которых также было обнаружено в настоящей работе.

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

Впервые полностью были полностью обработаны все данные, полученные прибором VIRTIS 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: в средней картине на нее накладываются другие процессы, такие как термические приливы.

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 превышает скорость потока от вечернего на 30–50 м/с. В результате конвергенция встречающихся потоков от терминаторов и, как следствие, рекомбинация атомов кислорода и высвечивание в полосе  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) 1,27 мкм, наблюдается в среднем в  $22,5 \pm 0,5$  ч, что было показано ранее.

Обнаружено влияние вертикально распространяющихся волн от поверхности (волн плавучести) на циркуляцию в верхней мезосфере, проявляющихся в «обтекании» потоком областей над высокогорьями и в повторении контуров рельефа в морфологии свечения кислорода.

Впервые обнаружены движения, подобные циклонам и антициклонам в атмосфере Венеры, 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 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 по данным прибора VIRTIS, с использованием, однако, неполного набора данных.

В разделе 2.2 описываются используемые данные прибора VIRTIS – 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.

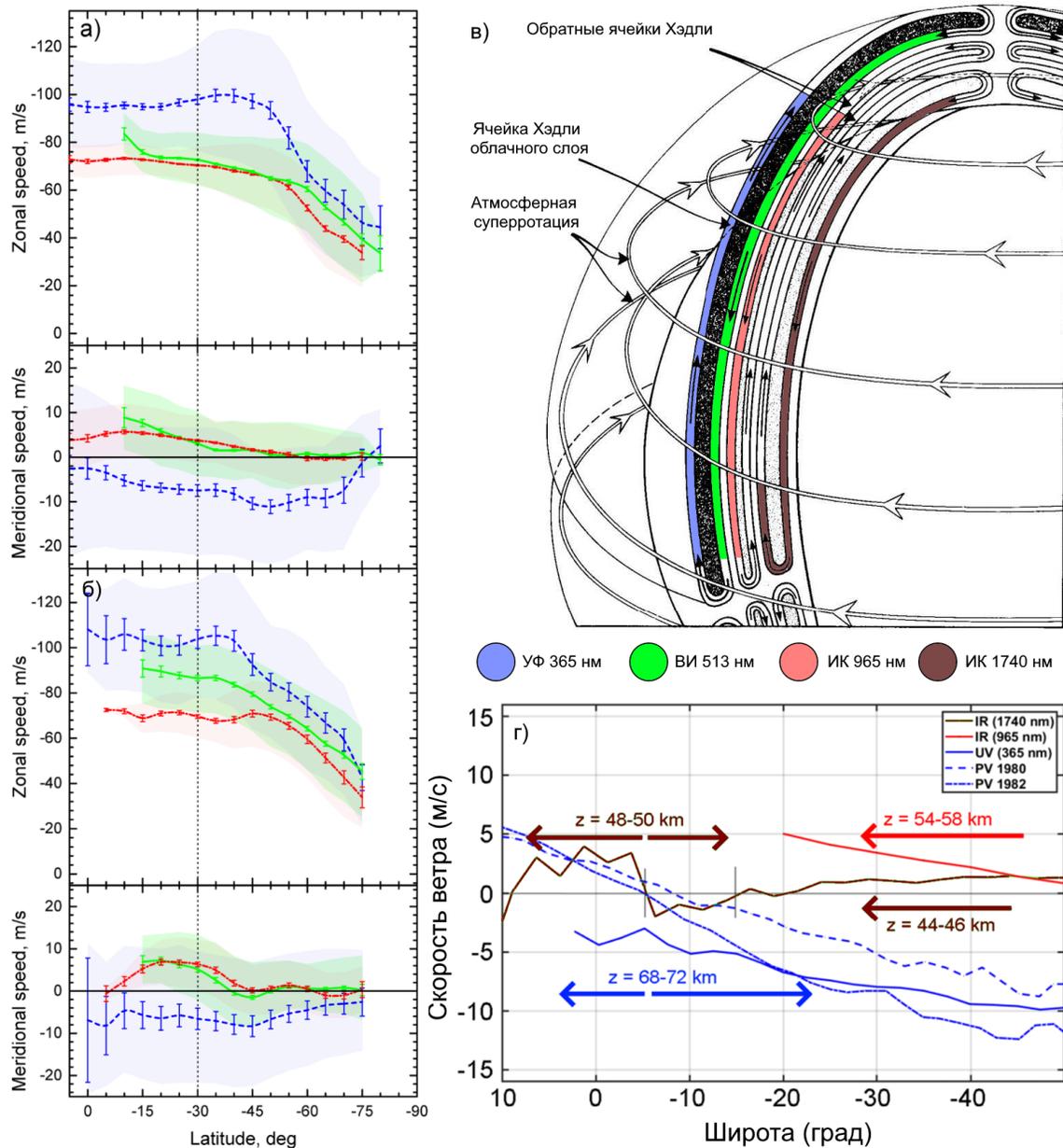
В разделе 2.3 описываются методы измерения скоростей ветра и обосновывается необходимость применения вейвлет-фильтра.

В разделе 2.4 рассматриваются результаты измерения скорости ветра, зависимость скорости ветра от местного времени. Модуль зональной компоненты скорости ветра уменьшается от вечернего к утреннему терминатору на величину 3–5 м/с, меридиональная компонента в основном направлена к экватору, 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  $20^\circ$  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  $20^\circ$  ю.ш. наблюдаются уровни 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, за исключением одной области, расположенной над областью Имд ( $210\text{--}260^\circ$  в.д.,  $40\text{--}50^\circ$  ю.ш.). Здесь зональная скорость замедляется на 3–5 м/с по сравнению со средним значением. Известно, что поверхность вулканической области Имд имеет очень молодой геологический возраст (1–1000 лет) (D’Innesco et al., 2020; 2021), 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 вертикальные 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 большой 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 очевидное 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  $40^\circ$  и  $60^\circ$  ю.ш. – связь между джетами и ячейками Хэдли была показана ранее моделями (Yamamoto et al., 2016).



**Рисунок 2.** Возможное положение трёх ячеек Хэдли в облачном слое Венеры по наблюдениям в УФ (синий цвет), ВИ (видимом излучении, зелёный цвет) и ИК (красный цвет) диапазоне камерой VMC (365, 513 и 965 нм), и спектрометром VIRTIS (1,74 мкм, коричневый цвет) КА «Венера-Экспресс». 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 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 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 1–2 м/с/км 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  $5-7^\circ$  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 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 4-5 м/с. Влияние поверхности может отождествляться с распространением гравитационных волн при обтекании потоком в подоблачном слое тепловой аномалии от вулканического плюма.

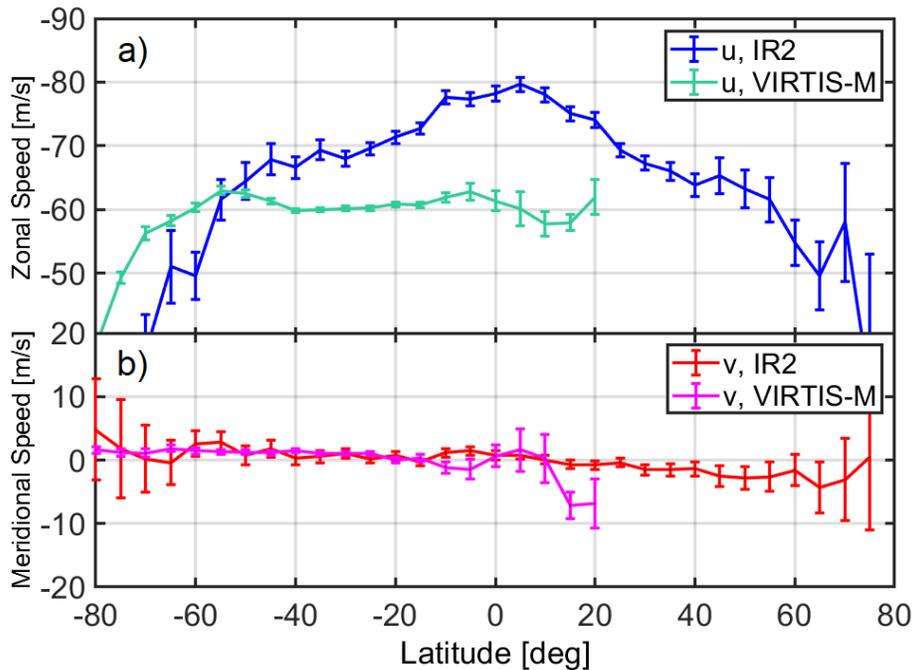
**В Главе 3 – «Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Акацуки»** – приведены результаты исследования динамики атмосферы на уровне нижнего облачного слоя на ночной стороне Венеры по данным прибора IR2 КА «Акацуки» на длине волны 1,74 мкм для прямого сравнения с результатами главы 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 анализе данных IR2 – появление сильного экваториального «джета», ускоряющего зональную компоненту горизонтального ветра на 15–20 м/с.

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, к расчёту скоростей ветра по изображениям IR2 можно применять как ручной, 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 сильного увеличения зональной скорости на экваторе ускорения, при этом изменяется и вся форма широтного профиля зональной скорости (Рисунок 3). При этом меридиональная скорость согласуется с результатами VIRTIS в пределах ошибки среднего. Экваториальная орбита КА «Акацуки» позволяет сравнивать динамические характеристики северного и южного полушарий – была обнаружена глобальная асимметрия. Так, в низких и высоких широтах (0–25 и 60–90°) зональная скорость ветра выше в южном полушарии, а в средних (30–45°) – в северном. В долготной зависимости на было

выявлено каких-либо особенностей, что в целом объясняется малым количеством данных камеры IR2.



**Рисунок 3.** Средние профили зональных (а, синяя кривая) и меридиональных (б, красная кривая) ветров в нижнем облачном слое Венеры на ночной стороне по всем данным прибора IR2. Средние значения рассчитаны для широтных ячеек  $5^\circ$ . Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%. Для сравнения приведены широтные профили по данным VIRTIS (глава 2), обозначенные зелёным (а) и розовым (б) цветами.

В разделе 3.4 рассмотрены вариации поведения горизонтального потока на коротких временных масштабах. Обнаружено, что существенные изменения могут происходить с величиной скорости, положением максимума и формой широтного профиля.

В разделе 3.5 обсуждаются результаты главы 3. Главной 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 величинами в данных VIRTIS (2006–2008 гг.). Вероятная причина может носить инструментальный характер – различие в ширине спектрального интервала двух приборов: VIRTIS (с шириной канала 2 нм и разрешением 14 нм) в области максимума пропускания позволяет видеть глубже, чем IR2 (с шириной канала 42 нм). Таким образом в IR2 может наблюдает слой облаков, расположенный

значительно выше наблюдаемого (до 20 км разницы при вертикальном сдвиге скорости 1–2 м/с/км (Khatuntsev et al., 2017)). Другие возможные объяснения различия величины зональных скоростей включают в себя: ускорение нижнего облачного слоя в результате резонансного взаимодействия экваториальной волны Кельвина и полярных волн Россби (т.н. «неустойчивость Россби-Кельвина»); вариации поглощаемого атмосферой солнечного излучения из-за цикла солнечной активности; вариации оптической толщины облаков, из-за чего в двух экспериментах наблюдаются разные высоты. Неустойчивость Россби-Кельвина может также отвечать за короткопериодические вариации скорости ветра, а солнечный цикл и/или наблюдение слоёв на разной высоте – объяснить отсутствие наблюдения ячейки Хэдли в данных IR2.

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, описанной в Главе 2.

Обнаружено значительное, до 30% (на 15–20 м/с) увеличение зональной скорости, измеренной камерой IR2 в 2016 г. по сравнению с наблюдениями VIRTIS в 2006–2008 гг. Подобная разница в зональной скорости ветра наблюдалась и в случае верхнего облачного слоя, наиболее интенсивно проявляющееся на экваторе. Ускорение может объясняться динамическими процессами, но вероятнее – наблюдением разных высотных слоёв.

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. 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.
4. 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.
5. Dias J.A. et al. Volcanic gas plumes' effect on the spectrum of Venus // *Icarus*. 2025. Vol. 438. ID. 116589.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.

13. 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.
14. Limaye S.S. Venus atmospheric circulation: Known and unknown // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007. Vol. 112, № E4.
15. 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.
16. 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.
17. Sánchez-Lavega A. et al. The atmospheric dynamics of Venus // *Space Science Reviews*. 2017. Vol. 212, № 3–4. P. 1541–1616.
18. 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.
19. Svedhem H. et al. Venus Express—The first European mission to Venus // *Planetary and Space Science*. 2007. Vol. 55, № 12. P. 1636–1652.
20. Widemann T. et al. Venus: Evolution Through Time – editorial // *Space Science Reviews*. 2024. Vol. 220, № 4.
21. 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.
22. 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.
23. Zasova L.V. et al. Structure of the Venus atmosphere // *Planetary and Space Science*. 2007. Vol. 55, № 12. P. 1712–1728.
24. 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.
25. Засова Л.В. и др. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км // *Космические исследования*. 2006. Т. 44. № 4. С. 381 – 400.
26. 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.