

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

*На правах рукописи*

Горинов Дмитрий Алексеевич

## **Циркуляция ночной атмосферы Венеры**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель

Доктор физико-математических наук

Засова Людмила Вениаминовна

Москва 2026

## Содержание

Введение .....	3
Глава 1. Циркуляция верхней мезосферы Венеры .....	10
1.1 Обзор исследований свечений в атмосфере Венеры .....	10
1.2 Источники данных .....	16
1.3 Методы .....	18
1.4 Распределение свечения кислорода на ночной стороне .....	23
1.5 Зависимость скорости ветра в верхней мезосфере от широты и местного времени .....	24
1.6 Влияние поверхности, орографические (горные) волны .....	29
1.7 Короткопериодические вариации свечения кислорода и связанных с ним динамических характеристик .....	33
1.8 Обсуждение .....	36
1.9 Выводы по Главе 1 .....	43
Глава 2. Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Венера-Экспресс» .....	45
2.1 Обзор исследований динамики нижнего облачного слоя Венеры .....	45
2.2 Источники данных .....	46
2.3 Методы .....	48
2.4 Зависимость средней скорости ветра от местного времени .....	50
2.5 Зависимость средней скорости ветра от широты .....	53
2.6 Зависимость средней скорости ветра от долготы .....	55
2.7 Обсуждение .....	56
2.8 Выводы по Главе 2 .....	63
Глава 3. Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Акацуки» .....	66
3.1 Обзор исследований динамики нижнего облачного слоя Венеры КА «Акацуки» .....	66
3.2 Источники данных и методы .....	67
3.3 Зависимость средней скорости ветра от широты, местного времени и долготы .....	71
3.4 Короткопериодические вариации скорости ветра в нижнем облачном слое .....	75
3.5 Обсуждение .....	77
3.6 Выводы по Главе 3 .....	83
Заключение .....	85
Благодарности .....	87
Список литературы .....	88

## Введение

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).

Облака Венеры, находящиеся примерно между 44 и 70 км высоты, подразделяются на три слоя, соответствующие трём модам распределения облачного аэрозоля по размерам (Засова и др., 2006) – верхний, средний и нижний.

Исследование динамики атмосферы на разных высотных уровнях имеет актуальность 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 была предсказана моделями 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 имеет актуальность 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 в верхней мезосфере O<sub>2</sub> (a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) (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  $5-7^\circ$  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.

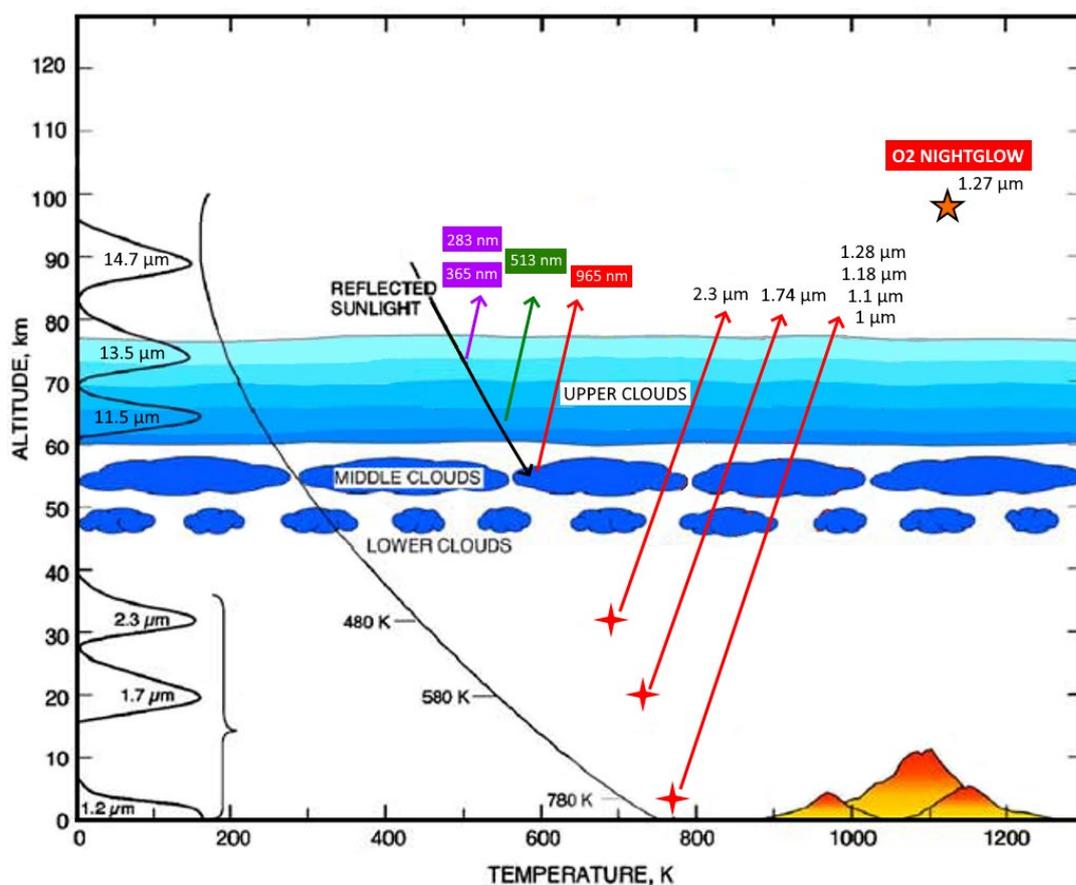
Работа Gorinov et al., 2018 из списка публикаций автора получила премию «Лучшая научная работа института» в составе цикла «Исследование циркуляции атмосферы Венеры по данным Venus Express» на конкурсе научных работ Института космических исследований РАН.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения, содержит 98 страниц текста, включая 38 рисунков, 4 таблицы и список литературы из 111 наименований.

## Глава 1. Циркуляция верхней мезосферы Венеры по результатам миссии «Венера-Экспресс»

### *1.1 Обзор исследований свечений в атмосфере Венеры*

Спектр ночной стороны Венеры в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне представляет собой совокупность теплового излучения, приходящего с поверхности и нижних слоёв атмосферы, и полос излучения малых составляющих (Allen, Crawford, 1984). Главным компонентом атмосферы является углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ) – 96,5%, который поглощает значительную часть уходящего теплового излучения планеты в фундаментальной спектральной полосе 15 мкм (Taylor et al., 1980). В условиях медленного вращения Венеры (звёздные сутки равны ~243 земным суткам, солнечные сутки составляют ~117 земных суток, а год равен ~225 земных суток), обратного по отношению к вращению планеты вокруг Солнца, цикл день-ночь занимает продолжительное время, и циркуляцию дневной и ночной стороны можно рассматривать по отдельности. В узких областях инфракрасного спектра (т.н. «окнах прозрачности» от 1 до 2,5 мкм) поглощение отсутствует или незначительно, что позволяет излучению горячей поверхности, многократно рассеянному, выходить из атмосферы и регистрироваться на ночной стороне в отсутствие солнечного излучения, которое имеет на много порядков превышающую интенсивность (Засова и др., 2006; Vaines et al., 2006) (Рис. 1.1).



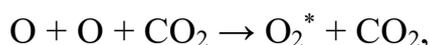
**Рисунок 1.1.** Вертикальная структура атмосферы Венеры (адаптировано из Vaines et al., 2006) от поверхности до экзосферы. Показаны высотные уровни, с которых приходит излучение в окна прозрачности между полосами поглощения CO<sub>2</sub> на ночной стороне (1–2,3 мкм, красный цвет), отражённое солнечное излучение (0,3–4 мкм, зелёный цвет) и тепловое излучение на дневной стороне (4,3–25 мкм, жёлтый цвет). Чёрная линия обозначает температурный профиль.

В настоящей работе рассматривается циркуляция атмосферы Венеры на ночной стороне, обсуждается связь с результатами наблюдений дневной стороны. По изображениям кислородного свечения на длине волны 1,27 мкм (неравновесное излучение) анализируется динамика верхней мезосферы. По изображениям облачного покрова Венеры на длине волны 1,74 мкм (тепловое излучение) анализируется динамика нижнего облачного слоя.

Ночное свечение кислорода на Венере (линии Герцберга II / H $\alpha$ II) 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 H $\alpha$  с наземными телескопами (Connes et al., 1979). Исследование свечения с Земли продолжалось в последующие годы (Crisp et al., 1996; Ohtsuki et al., 2008; Bailey et al., 2008); результаты показали существенные вариации абсолютных величин и пространственного распределения свечения на масштабе дней.

Считается, что атомарный кислород производится на дневной стороне Венеры выше облаков и до 130 км посредством фотолиза  $CO_2$  солнечным УФ излучением (Bougher, Borucki, 1994). Рекомбинация двух атомов кислорода в молекулу  $O_2$  является спин-запрещенной, однако возможна тройная рекомбинация, например, с участием  $CO_2$  (Rothman, 1982; Krasnopolsky, 2011):



где  $O_2^*$  – одно из возбуждённых состояний кислорода. Вероятность образования состояния  $a^1\Delta_g$  оценивается в 0,94–0,99 (Huestis et al., 2002). Рекомбинация происходит на ночной стороне после того, как атомы кислорода переносятся туда глобальной ячейкой циркуляции SS-AS (“*subsolar-to-antisolar*”, «от подсолнечной к противосолнечной точке») через терминаторы и опускаются в нисходящем потоке в противосолнечной области. В состоянии  $a^1\Delta_g$  кислород способен находиться около 72 мин (Miller et al., 2001), затем происходит переход в основное состояние  $X^3\Sigma_g^-$ :



где  $h\nu$  – излучаемый при переходе гамма-квант с длиной волны 1,27 мкм (энергией 0,98 эВ).

Прорыв в исследовании кислородных эмиссий возник благодаря миссии ЕКА «Венера-Экспресс» (2004–2015) (Titov et al., 2006; Svedhem et al., 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 октябрь 2008 гг. Первые работы были

посвящены обнаружению свечения кислорода (Drossart et al., 2007), определению характерных значений интенсивности и построению карт распределения свечения по надирным изображениям (Gérard et al., 2008), а также по лимбовым изображениям (Piccioni et al., 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 выбирались участки поверхности, где излучение  $O_2$  не наблюдалось, и спектр был полностью тепловым.

Скорости ветра по перемещению деталей свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) в полосе 1,27 мкм были получены в результате анализа 23 орбит (малой части базы данных прибора VIRTIS) (Hueso и др., 2008). Было обнаружено сходство средней циркуляции с режимом SS-AS.

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 работ (Gérard и др., 2008; 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., 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 часов. 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, максимум эмиссии был обнаружен в диапазоне высот от 90 до 110 км, что соответствует области верхней мезосферы, мезопаузы Венеры. Средняя высота пика свечения оказалась равной  $97,4 \pm 2,5$  км при полуширине  $7,6 \pm 2,2$  км. В некоторых случаях пики имели более сложную форму, в т.ч. 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).

Наблюдения эмиссии атомного кислорода на дневной стороне на длине волны 130 нм с помощью ультрафиолетового спектрометра Pioneer Venus Orbiter (PVOUVS) предоставили данные о структуре и циркуляции термосферы на высотах около 95 км (Alexander et al., 1993). Кроме того, результаты показали свидетельства влияния циркуляции SS-AS на средних и высоких широтах ( $>30^\circ$ ), а также асимметрию концентрации атомарного кислорода между утренним и вечерним терминатором. Количество атомов кислорода на вечернем терминаторе оказалось примерно в два раза больше, чем на утреннем. Это явление было интерпретировано как влияние циркуляции SS-AS и гравитационных волн, распространяющихся вверх из средней атмосферы (Alexander, 1992; Alexander et al., 1993). Асимметрия между терминаторами была также выявлена на основе данных фурье-спектрометра КА «Венера-15» (Oertel et al., 1985; Zasova et al., 2007) таким образом, что на высоте 95 км температура на вечернем терминаторе была примерно на 20 К ниже, чем на утреннем; это объяснялось активностью термических приливов. Суточные и полусуточные амплитуды были найдены равными 6 и 5 К соответственно на широтах  $20\text{--}30^\circ$  с.ш.

Таким образом, существует противоречие между работами, использующими одни и те же измерения, так что, с одной стороны, в части работ (Gérard et al., 2008; Soret et al., 2010) показывается, что распределение свечения на ночной стороне Венеры соответствует гипотезе симметричной SS-AS циркуляции (т.е. проходящие с дневной стороны потоки атомарного кислорода рекомбинируют в нисходящем потоке и излучают в полночь. С другой стороны, корректный учет вклада теплового излучения в интенсивность излучения в полосе 1,27 мкм позволил обнаружить при анализе неполного набора данных асимметрию в поле свечения кислорода (Шакун и др., 2010) – максимальная интенсивность свечения смещена к 23 часам. Это смещение не соответствует направлению суперротации и до сих пор не было объяснено. Хотя следует отметить, что на высоте 120-140 км, в термосфере, циркуляция представляет собой наложение зональной суперротации и SS-AS: положение максимума эмиссии оксида азота (NO) смещено в направлении после полуночи (Gérard и др., 2008b).

Анализ данных ИК спектрометра SPICAV КА «Венера-Экспресс» при усреднении за всё время наблюдений (2006-2014) также показал, что в основном область свечения расположена вблизи экватора, но имеет несколько максимумов, смещённых по местному времени до и после полуночи (Evdokimova et al., 2024).

С помощью трехмерной модели циркуляции верхней атмосферы Венеры VTGCM (Venus Thermospheric General Circulation Model) (Brecht et al., 2011) было показано доминирование режима SS-AS в переходной области высот. Модель общей циркуляции IPSL (Navarro et al., 2021) смогла воспроизвести короткопериодические изменения свечения кислорода на 1,27 мкм, включая смещение максимума к 23 или 1 ч местного времени от полуночи.

Долговременные вариации и влияние рельефа на атмосферные процессы на Венеры были изложены ранее в различных исследованиях. Замедление ветра (Bertaux et al., 2016), наблюдаемое над Землёй Афродиты с помощью камеры VMC в УФ фильтре на верхней границе облаков (~70 км), было объяснено стационарными гравитационными (орографическими) волнами, которые возникают, когда горизонтальный поток взаимодействует с высокими

возвышениями местности. Доказательства существования стационарной волны над Землёй Афродиты были получены с помощью длинноволновой инфракрасной камеры (LIR) на длине волны  $10\pm 2$  мкм (в верхнем облачном слое, 65–70 км) на борту КА «Акацуки», который наблюдал структуру в форме дуги (в оригинале: “*bow-shaped feature*”) (Fukuhara et al., 2017). Влияние рельефа поверхности на динамические процессы в среднем облачном слое было выявлено на основе изображений в ближнем ИК-диапазоне (1 мкм), полученных с помощью мониторинговой камеры VMC на борту КА «Венера-Экспресс» (Khatuntsev et al., 2017). Замедление скорости ветра над высокогорьями было обнаружено в наблюдениях в каналах 3,8 и 5 мкм (соответствующих высоте 65–70 км) спектрометра VIRTIS-M и объяснено влиянием стационарных гравитационных волн (Peralta et al., 2017). После 1,5 лет наблюдений с помощью камеры LIR было установлено, что большие стационарные гравитационные волны зависят не только от долготы, но и от местного времени (Kouyama et al., 2017).

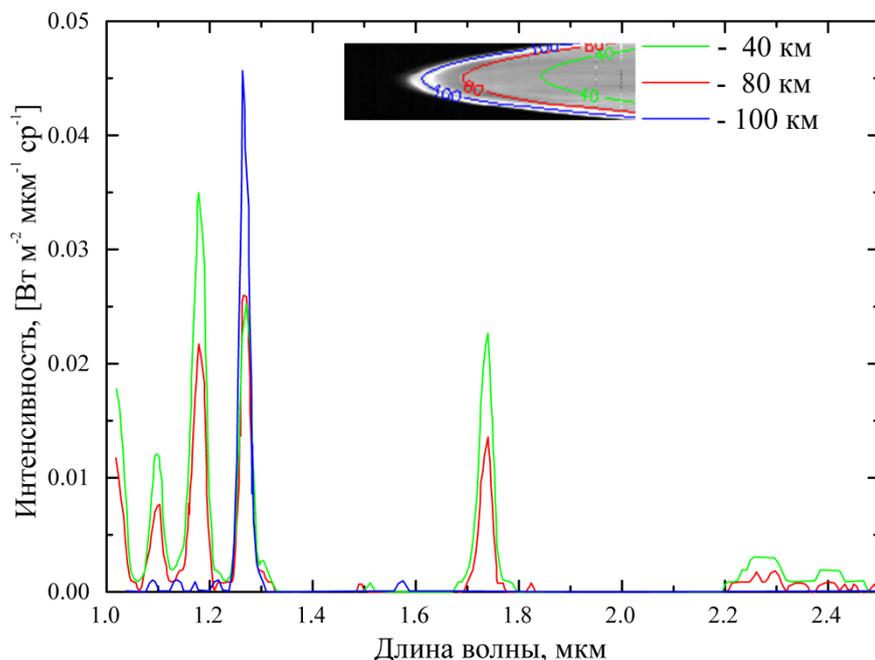
## **1.2 Источники данных**

9 ноября 2005 года был запущен европейский орбитальный аппарат «Венера-Экспресс». 11 апреля 2006 года аппарат был выведен на суточную (24 часа) полярную высокоэллиптическую орбиту с высотой перицентра 250-400 км и апоцентра – около 66000 км (Svedhem et al., 2007). При этом перицентр находился в северном полушарии Венеры. «Венера Экспресс» проработала на орбите до 18 января 2015 года.

На борту «Венеры-Экспресс» в составе научной аппаратуры был установлен прибор VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer) – изображающий спектрометр видимого и инфракрасного диапазона (Drossart et al., 2007). VIRTIS предназначен для исследования атмосферных свойств и процессов, а также картирования теплового излучения поверхности с помощью трех своих каналов: VIRTIS-M-vis (изображающий канал в диапазоне 0,27–1,1 мкм), VIRTIS-M-IR (изображающий канал с визуализацией в диапазоне 1,05–5,19 мкм) и VIRTIS-N (апертурный спектрометр с высоким разрешением в диапазоне 1,84–4,99 мкм). В

настоящей работе используются данные канала VIRTIS-M-IR, спектральное разрешение которого составляет 14–16 нм. Размер детектора –  $270 \times 438$  пикселей. Каждый «снимок» VIRTIS-M представляет собой 3-мерный массив (далее – «куб данных»), имеющий двумя измерениями пространственные координаты и третьим – длину волны излучения.

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  $\text{CO}_2$ , 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  $\text{O}_2$  с центром пика на 1,27 мкм, которое и исследуется в настоящей работе (рис. 1.2).



**Рисунок 1.2.** Пример инфракрасного спектра ночной стороны Венеры, полученного прибором VIRTIS-M для лимбового изображения Венеры №320\_05 (расположен в верхней части графика) на разных высотах (Шакун и др., 2023). 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.

Пик свечения  $O_2$  на 1,27 мкм и тепловое излучение не разрешаются друг относительно друга при среднем спектральном разрешении VIRTIS-M, составляющим 14–16 нм (1,269 мкм – пик  $O_2$ , 1,277 мкм – максимум теплового излучения). Истинная интенсивность излучения  $O_2$  рассчитывается вычитанием из измеренного значения теплового излучения нижней атмосферы (Шакун и др., 2010; Шакун и др., 2023).

Всего за время работы прибора VIRTIS (июль 2006 – сентябрь 2008) в ИК-канале VIRTIS-M было получено 718 изображений, на которых наблюдалось свечение кислорода в полосе 1,27 мкм. Из-за особенностей орбиты КА «Венера-Экспресс» надирные измерения ночной стороны Венеры покрывают в основном южное полушарие и лишь небольшую часть северного в низких широтах. Покрывание по широте составляет от  $80^\circ$  ю.ш. до  $25^\circ$  с.ш., причем 90% данных лежат в широтном интервале  $30^\circ$ – $70^\circ$  ю.ш.

### ***1.3 Методы***

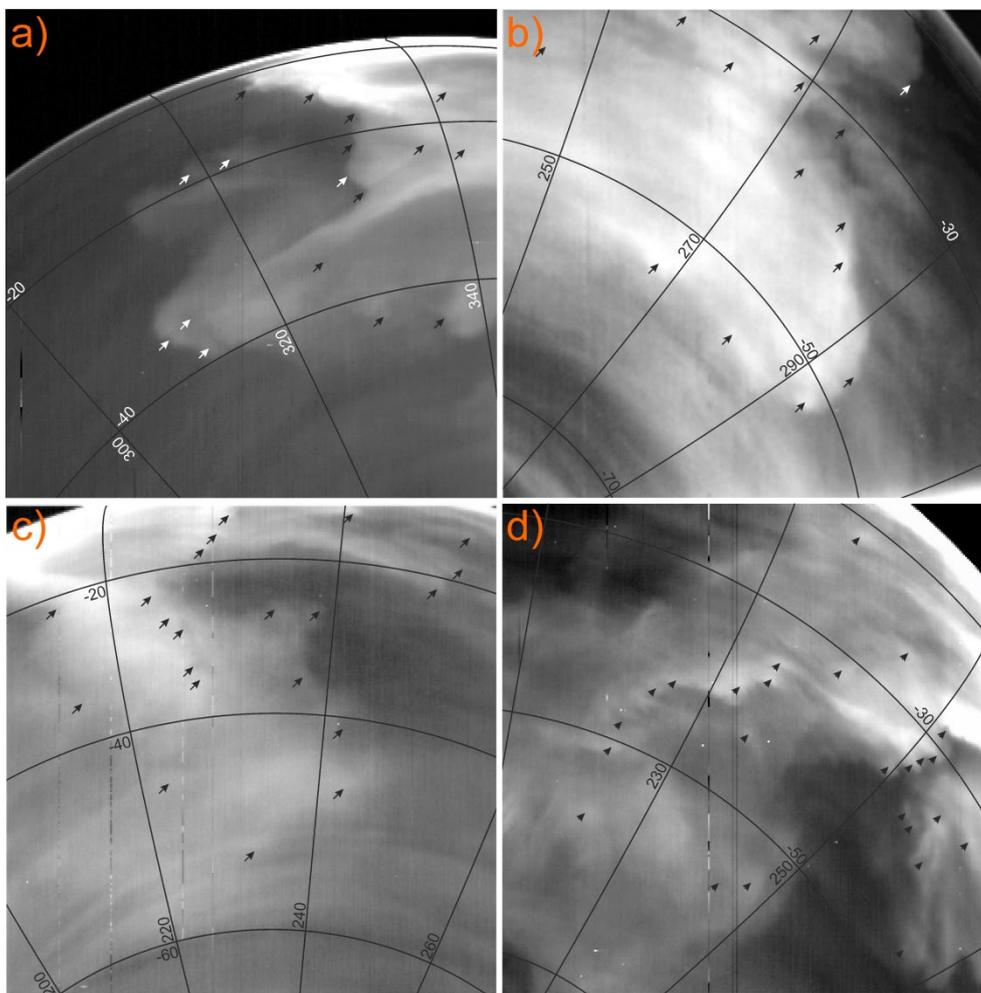
Метод ручного измерения скорости ветра, использованный в этой работе, был впервые применен к данным камеры VMC КА «Венера-Экспресс» (Khatuntsev et al., 2013; Moissl et al., 2009). Зональные ( $u$ ) и меридиональные ( $v$ ) компоненты скорости ветра определяются по следующим уравнениям:

$$u = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(R + h) \cos(\varphi_1)}{\Delta t}$$

$$v = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)(R + h)}{\Delta t}$$

где  $\lambda_{1,2}$  и  $\varphi_{1,2}$  — это, соответственно, долготы и широты отслеживаемых деталей свечения в первом и втором изображениях;  $R = 6051,8$  км — радиус

Венеры;  $h = 97,5$  км — средняя высота наблюдаемого свечения;  $\Delta t$  — временной интервал между двумя изображениями.



**Рисунок 1.3.** Примеры изображений ночного свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) 1,27 мкм, полученных VIRTIS-M: а) орбита № 0372, куб данных № 01, наклонная дальность 66304 км, 26 апреля 2007 г.; б) орбита № 0569, куб данных № 05, наклонная дальность 65481 км, 10 ноября 2007 г.; в) орбита № 0571, куб данных № 04, наклонная дальность 66509 км, 12 ноября 2007 г.; д) орбита № 0793, куб данных № 01, наклонная дальность 64591 км, 21 июня 2008 г. Стрелки указывают на отслеживаемые детали облаков, по которым рассчитываются скорости ветра.

На рисунке 1.3 представлены примеры изображений ночного свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) на длине волны 1,27 мкм. Стрелки указывают на детали свечения, по которым рассчитывается горизонтальная скорость ветра. Были использованы изображения, сделанные на расстоянии 40000–67000 км от планеты с размером пикселя 10–40 км. Каждое измерение вектора скорости требовало наличия пары

последовательных изображений одной и той же области планеты. Временной интервал между изображениями в парах варьируется от 0,5 до 2 часов. Известно, что крупномасштабные области эмиссии  $O_2$  существуют в течение многих часов (Soret et al., 2014), однако мелкомасштабные детали более переменчивы. Хотя они и сохраняют стабильность в течение 1-часового периода при пределах времени жизни состояния ( $a^1\Delta$ ) около 72 минут (Miller et al., 2001), некоторые из них (5–15%) могут полностью исчезнуть или деформироваться так, что их отслеживание становится невозможным, снижая общее количество полученных векторов.

Изображения с экспозицией менее 3 с не использовались в расчётах, так как низкое соотношение сигнал-шум для них не позволяло достоверно идентифицировать детали свечения.

Каждый вектор скорости сопровождается точностью позиционирования, что приводит к ошибкам одиночных измерений при использовании метода ручного расчёта скоростей. Для всего рассматриваемого набора данных учитывались те детали, которые могли смещаться не более чем на 2 пикселя. Ошибки варьируются в зависимости от геометрической конфигурации, увеличиваясь от центра планетного диска к краю, из-за увеличения размера пикселя в том же направлении. Поскольку из-за особенностей орбиты КА «Венера-Экспресс» это увеличение обычно соответствует направлению от Южного полюса к экватору (и Северному полюсу), ошибки оказываются выше для экваториальных широт и ниже в средних и высоких широтах. Оценка ошибки для одиночного вектора, рассчитанного для пары изображений, сделанных с интервалом в 1 час, составляет от 5 до 10 м/с в высоких широтах и от 30 до 40 м/с в экваториальной области. Из-за таких больших ошибок, а также потенциальных искажений видимых деталей, область в  $5\text{--}10^\circ$  рядом с краем наблюдаемого диска была исключена из алгоритма расчёта скорости ветра.

В настоящей работе был проанализирован весь массив данных прибора VIRTIS-M, полученный с июля 2006 года по август 2008 года (орбиты № 73–861), из которого были отобраны 99 орбит с изображениями в канале 1,27 мкм,

соответствующие вышеуказанным критериям. Общее количество полученных векторов скорости горизонтального ветра составило 8914 (Таблица 1.1).

**Таблица 1.1.** Данные прибора VIRTIS-M, используемые для расчёта скоростей ветра в канале 1,27 мкм.

Период наблюдений («сезон»)	Дата начала / конца	Номера орбит	Кол-во орбит	Кол-во векторов
I	2006-07-02/2006-07-27	0073–0098	12	635
II	2006-12-04/2007-05-19	0228–0394	57	4255
III	2007-09-07/2007-12-31	0505–0620	19	3097
IV	2008-04-29/2008-08-29	0740–0861	11	927
Всего	2006-07-02/2008-08-29	0073–0861	99	<b>8914</b>

В Главе 1 результаты измерения горизонтальных скоростей ветра сравниваются с распределением интенсивности свечения кислорода. Ниже кратко описан подход к получению величины свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ). Результаты обработки данных этим методом отличаются от симметричной картины SS-AS циркуляции, что будет детально обсуждаться в разделе 1.8.

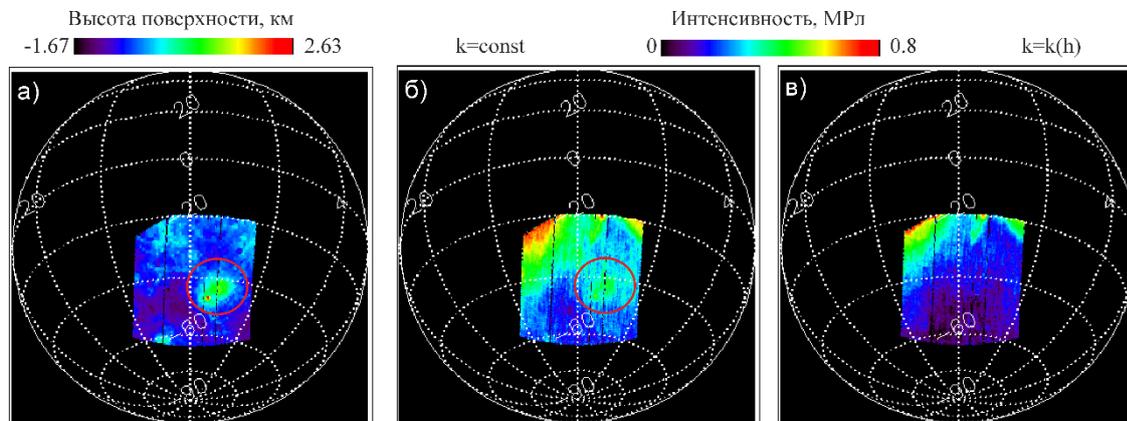
Для получения истинной величины свечения из наблюдаемого излучения на длине волны 1,27 мкм было исключено: тепловое излучение нижней атмосферы, отражение от облаков, рельеф поверхности, поглощение парами воды (Шакун и др., 2023). Интенсивность свечения  $B$  рассчитывалась по формуле:

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

где  $\kappa_{MR}$  – коэффициент перевода размерности в МРл (1 Рл равен излучению  $10^{10}$  фотонов в столбе сечением  $1 \text{ м}^2$  за 1 с в телесном угле  $4\pi$  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 et. al, 1996);  $I(\lambda)$  – измеряемая VIRTIS-M интенсивность в полосе 1,27 мкм;  $k(h, \tau_{cl}, n_{H_2O})$  – отношение интенсивности 1,27 мкм к 1,18 мкм;  $h$  – высота подстилающей поверхности,  $\tau_{cl}$  – оптическая толщина облаков;  $n_{H_2O}$  – концентрация водяного пара;  $a = 0,875$  – альбедо облаков (Crisp et al., 1996);  $l$  – длина оптического

пути излучающего слоя при угле падения  $\theta \neq 0^\circ$ ,  $\Delta R$  – длина пути при  $\theta = 0^\circ$  (наблюдение в надир).

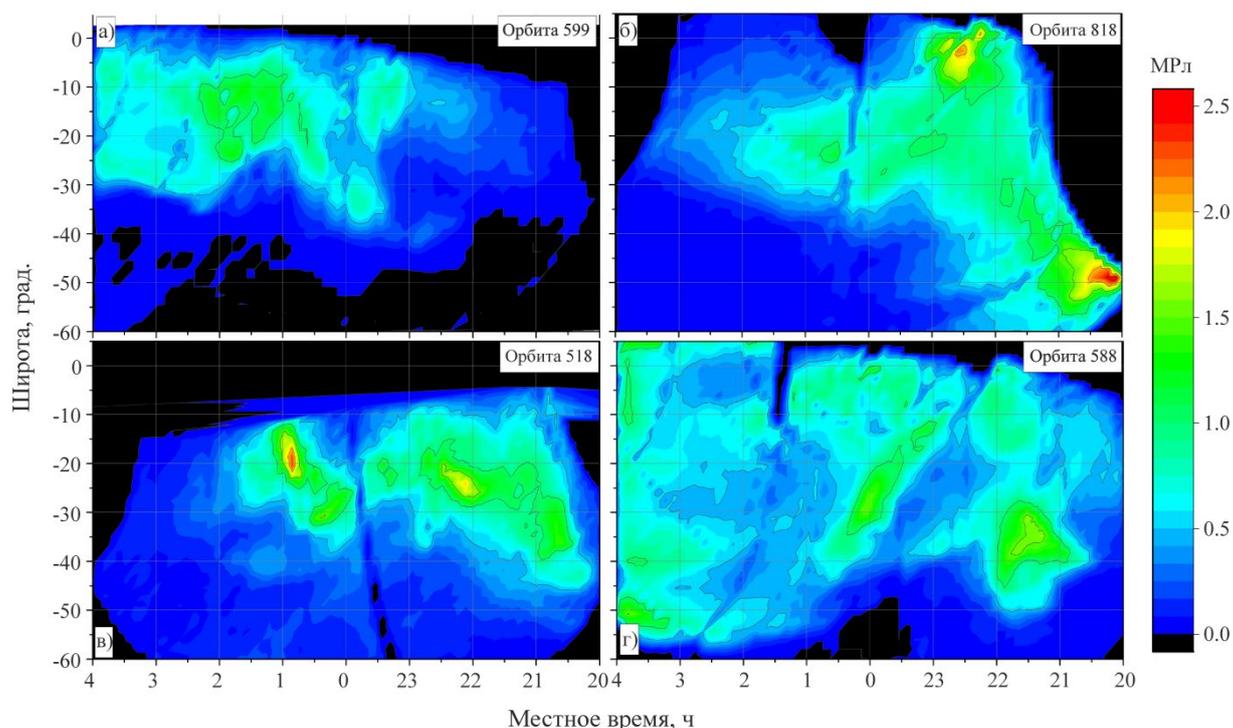
Важность использования такого подхода наглядно иллюстрирует пример на Рис. 1.4. Показана коррекция изображения ночной стороны Венеры, полученного прибором VIRTIS-M в полосе 1,27 мкм 8 ноября 2007 г. (орбита 567, изображение 04), с учетом влияния теплового излучения нижней атмосферы. Оригинальное изображение полностью покрывает вулканическую Область Имд (Imdr Regio) с вулканом Идунн (Idunn Mons) (рис. 1.4а, обведено красным овалом), известную своей высокой яркостью в тепловом ИК-диапазоне (D’Incecco et al., 2021). Коррекция, использующая постоянный коэффициент  $k$ , не зависящий от высоты рельефа  $h$ , не удаляет артефакт от поверхности (рис. 1.4б, красный овал), тогда как использование коэффициента  $k(h)$  при построении карт распределения свечения кислорода для ночной стороны Венеры позволяет исключить подобные артефакты (рис. 1.4в). В разделе 1.6 и в Главе 2 будет обсуждаться также значение Области Имд для динамики атмосферы Венеры.



**Рисунок 1.4.** Пример коррекции распределения свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) по изображению VIRTIS-M в полосе 1,27 мкм с учетом теплового излучения нижней атмосферы (орбита 567, куб данных 04): а) фрагмент топографической карты Венеры с альтиметрией КА «Магеллан» (Saunders, Pettengill, 1991), красным овалом отмечена Область Имд; б) распределение свечения  $O_2$  при использовании  $k = \text{const}$ , красным овалом обозначен артефакт; в) распределение эмиссии  $O_2$  при использовании  $k = k(h)$ .

### 1.4 Распределение свечения кислорода на ночной стороне

Примеры горизонтального распределения свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) по единичным орбитам после обработки показаны на рис. 1.5. Рисунок иллюстрирует значительную изменчивость структуры свечения и положения максимумов. Так, максимум 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. Переменчивость свечения кислорода также иллюстрируется Таблицей 1.2, сравнивающей исторические наблюдения. Несмотря на средние значения в пределах 1 МРл, максимальные значения интенсивности могут превышать средние на порядок величины.



**Рисунок 1.5.** 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 3,5 ч местного времени.

**Таблица 1.2.** Средние значения интенсивности свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$ , полученные с помощью наземных наблюдений и при обработке данных прибора VIRTIS-M

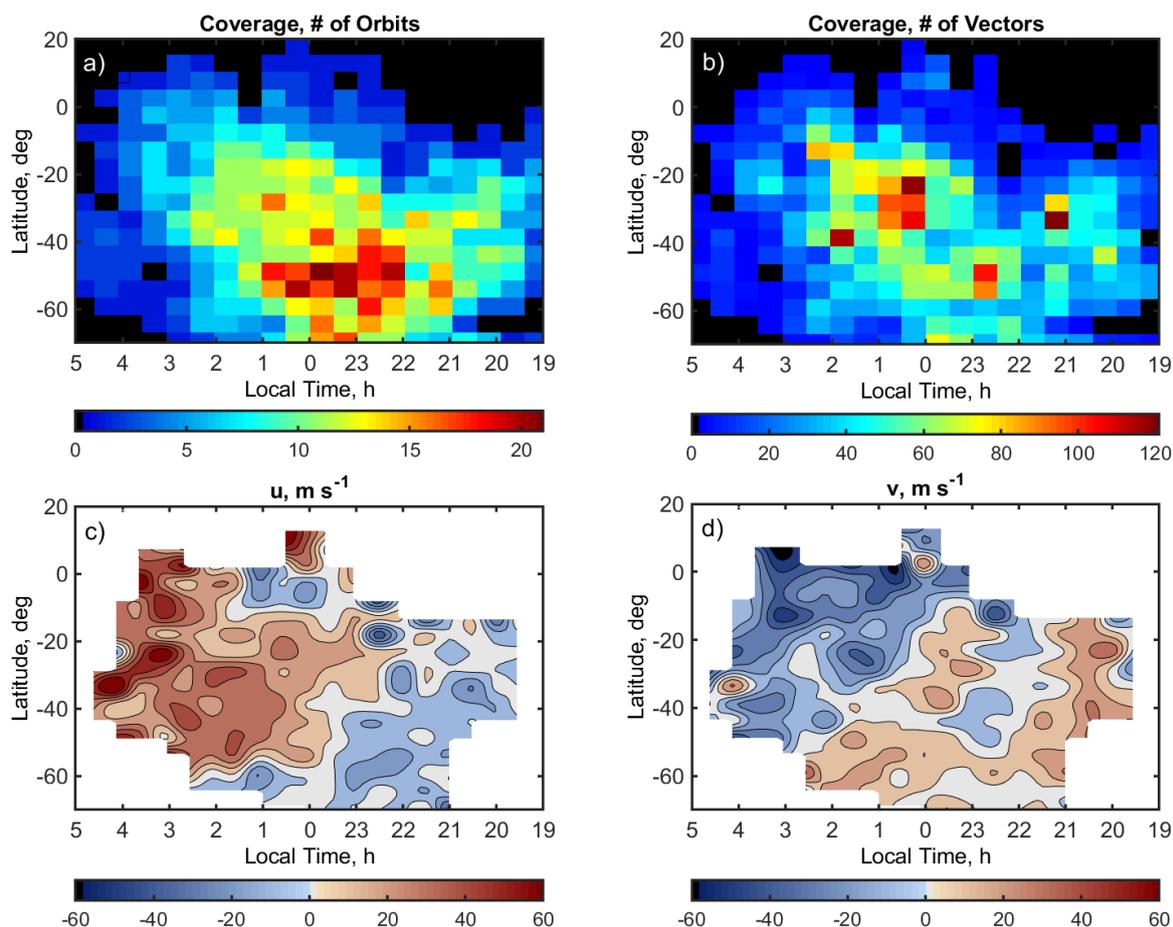
Автор(ы)	Годы наблюдений	Прибор	Среднее значение интенсивности свечения $O_2$ , МРл	Максимальное значение интенсивности свечения $O_2$ , МРл
Crisp и др. (1996)	1991 – 1994	Canada-France Hawaii Telescope	1	6
Ohtsuki и др. (2008)	2002 – 2007	CSHELL	0,28	5
Krasnopolsky (2009)	2009	CSHELL	0,52	1,2
Piccioni и др. (2009)	2006 – 2008	VIRTIS-M	0,52±0,4	1,2
Шакун и др. (2023)	2006 – 2008	VIRTIS-M	0,35±0,3*	6

Примечание: \* среднее значение (0,46 до полуночи, 0,23 после полуночи).

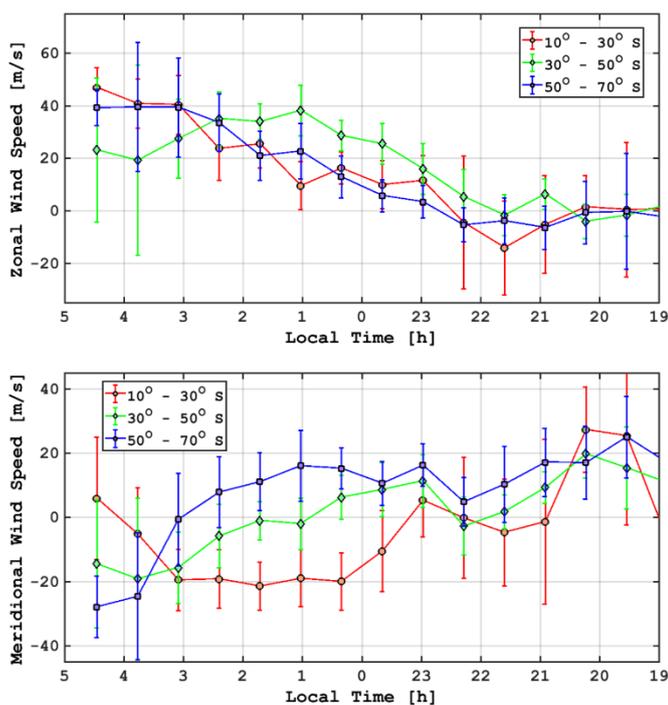
### ***1.5 Зависимость скорости ветра в верхней мезосфере от широты и местного времени***

Чтобы получить средние карты как зональной, так и меридиональной компоненты скорости ветра в координатах местное время-широта, общее

количество (8914 векторов) было усреднено в декартовых ячейках  $7,5^\circ \times 0,5$  ч. Результаты представлены на рисунках 1.6 и 1.7. Данные охватывают ночную сторону Венеры и включают в себя всё южное полушарие и часть северного полушария до  $20^\circ$  с.ш. на утренней стороне. Около 80% всех данных расположено между 21–2,5 ч и  $70^\circ$ – $15^\circ$  ю.ш.



**Рисунок 1.6.** Распределение средней зональной и меридиональной скорости ветра компонент горизонтального потока на высоте 90–110 км на ночной стороне Венеры в координатах местное время – широта, усредненное в ячейках  $7,5^\circ \times 0,5$  ч. (a) – покрытие данными (количество орбит на ячейку), (b) – покрытие данными (количество векторов на ячейку), (c) – сглаженное распределение средней зональной компоненты, (d) – меридиональной. Знаки «+» зональной и меридиональной компоненты (красный цвет) означают направления на восток и север соответственно, знаки «-» – на запад и юг.



**Рисунок 1.7.** Профили средней зональной (а) и меридиональной (б) компонент горизонтального потока на высоте 90–110 км на ночной стороне Венеры в широтных интервалах  $20^\circ$ . Ошибки указывают пределы погрешности в доверительном интервале 99%. Знаки «+» зональной и меридиональной компоненты означают направления на восток и север соответственно.

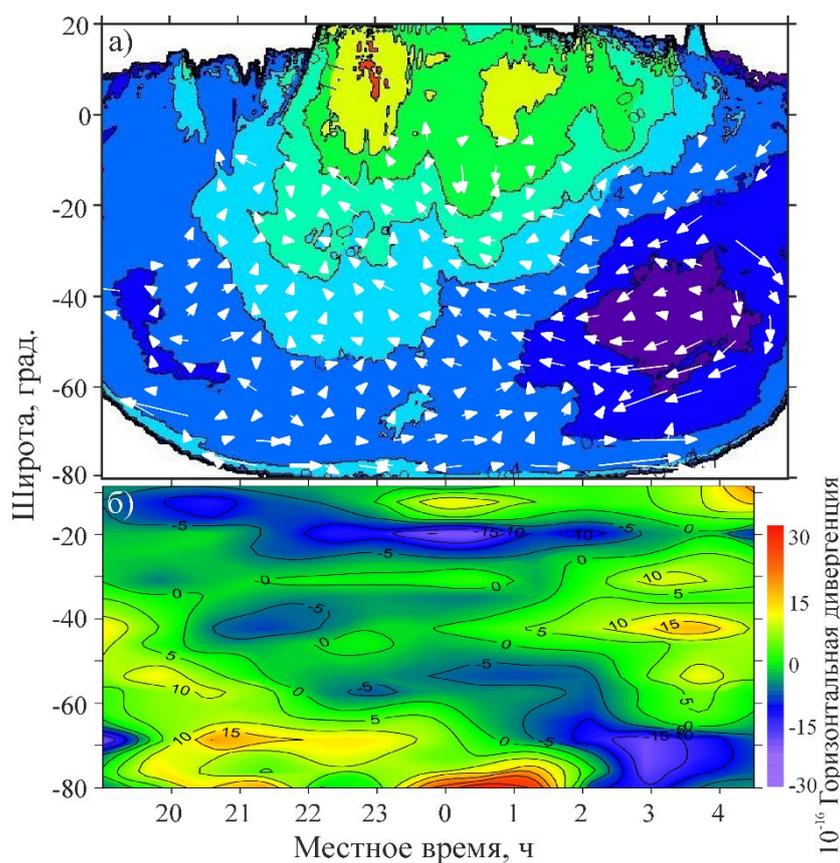
Обе компоненты скорости ветра — зональная и меридиональная — демонстрируют сильную асимметрию относительно полуночи. Более сильная зональная компонента (Рисунок 1.7а) на утренней стороне направлена на восток, в сторону, противоположную западному направлению, которое наблюдалось бы в случае влияния суперротации, и достигает значений до +60 м/с. Западное направление сохраняется между 5 и 22–23 часами, при этом скорость постепенно уменьшается до 0 м/с и меняет свое направление на вечерней стороне. Зональный поток в восточном направлении на вечерней стороне значительно слабее утреннего и не превышает 30 м/с. К вечеру (восточнее) от полуночи зональное движение переменное и сложное, часто меняет направление (знак) от орбиты к орбите. Два противоположных средних зональных потока «встречаются» (нужно иметь в виду, что на самом деле они могут находиться на разных высотах) в 21–23 часа местного времени, где зональная компонента достигает почти нулевых значений.

Меридиональная компонента (Рисунок 1.7b) преимущественно направлена к южному полюсу на утренней стороне, варьируясь от 0 до 50 м/с, и меняет направление к экватору на средних широтах ( $>40-50^\circ$  ю.ш., местное время  $< 2$  ч). На вечерней стороне меридиональная компонента ветра в основном направлена к экватору и достигает +40 м/с. На экваториальных широтах ( $15^\circ$  ю.ш. –  $15^\circ$  с.ш.) меридиональная компонента направлена к Южному полюсу со средними скоростями от 0 до 40 м/с. Поскольку обе компоненты — зональная и меридиональная — сопоставимы по величине, средняя горизонтальная скорость в диапазоне  $60^\circ-10^\circ$  ю.ш. на большей части утренней стороны направлена на восток и к полюсу, а на большей части вечерней стороны — на запад и к экватору.

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 зональной, 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. 1.6). 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. 1.10), рассчитанная по среднему полю скорости ветра (Khatuntsev и др., 2013; Шакун и др., 2023), 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. В этой области векторы скорости направлены против суперротации атмосферы Венеры, которая на ночной стороне движется от вечернего терминатора к утреннему.



**Рисунок 1.10.** 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.

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), на которую,

однако, накладываются и другие атмосферные механизмы, которые будут обсуждены далее.

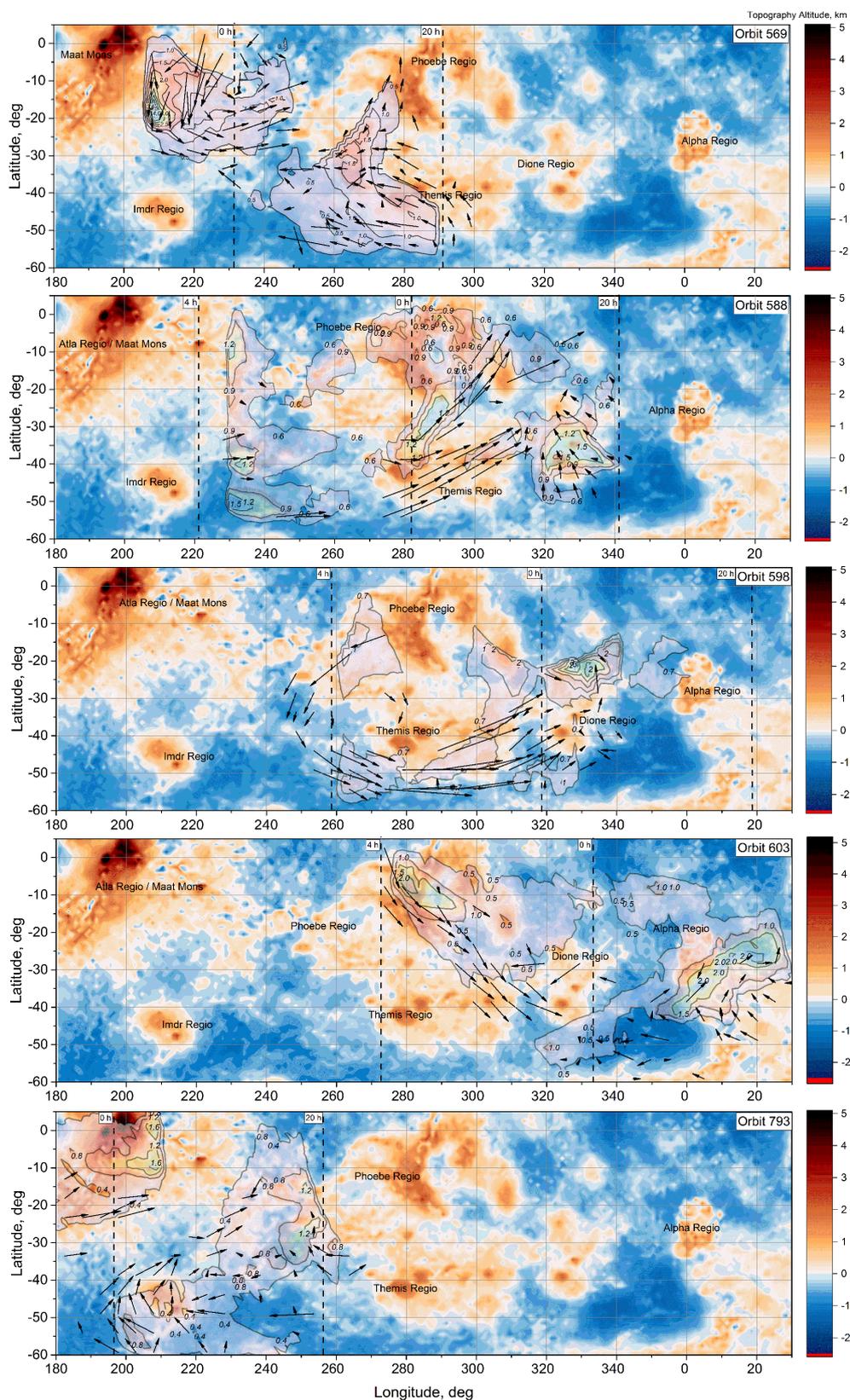
### ***1.6 Влияние поверхности, орографические (горные) волны***

В разделе 1.1 были приведены обнаруженные ранее примеры влияния топографии поверхности на динамику атмосферы Венеры, как правило, на высоте верхнего облачного слоя (65–70 км). В настоящей работе был предпринят анализ возможного влияния поверхности на динамику верхней мезосферы.

В качестве механизма, объясняющего влияние высокогорных массивов и атмосферной циркуляции, были предложены орографические (горные) волны (или волны плавучести) (Vertaux et al., 2016). Они являются разновидностью внутренних гравитационных волн и известны по земным метеонаблюдениям. На Земле приповерхностные потоки воздуха (ураганы), сталкиваясь с горами, обтекают их, направляют потоки вверх и оставляют след в верхней атмосфере. Волны плавучести также являются маркером циркуляции, как и свечение  $O_2(a^1\Delta_g)$  на Венере.

Для изучения вариаций динамики верхней мезосферы Венеры были проанализированы векторные поля, измеренные на отдельных орбитах. Для этого анализа были использованы только те орбиты, где скорость ветра была измерена более чем 200 векторами, и измерения охватывали область, большую чем  $50^\circ \times 50^\circ$ . Результаты обычно соответствуют усреднённой картине, описанной выше, то есть наличию двух противоположно направленных потоков от терминаторов и асимметрии циркуляции относительно полуночного меридиана. Однако нередко можно увидеть (примеры на Рисунке 1.8) отклонения направления ветра, которые совпадают с большими топографическими структурами ниже, в основном, высокогорными регионами (Атла, Феба и др.). Потоки ведут себя так, как будто «сталкиваются с препятствием» — они меняют направление, обтекая эти области. В некоторых случаях это приводит к образованию циклонов и антициклонов — областей замкнутого завихрённого движения, которые могут иметь диаметр от 1000 до 4000 км (Рисунок 1.8с). Нельзя, тем не менее, утверждать, что влияние

поверхности является единственной причиной возникновения завихрённостей — влияние могут оказывать встречающиеся на одной высоте противоположные потоки SS-AS циркуляции и экваториальная волна Кельвина, как было показано ранее математическим моделированием (Navarro et al., 2021).

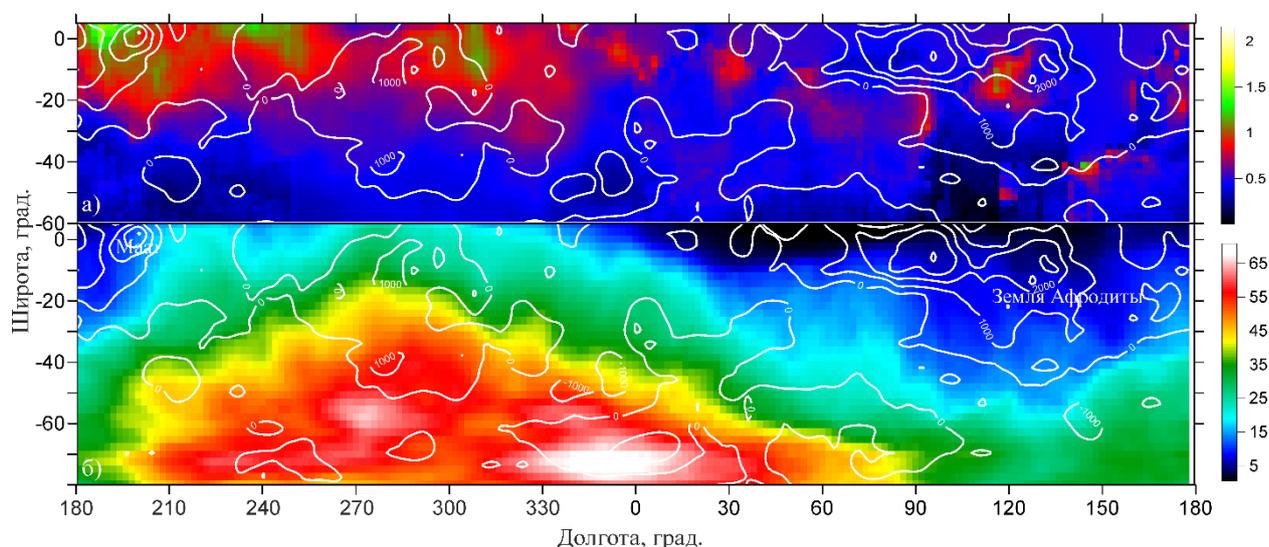


**Рисунок 1.8.** Примеры поведения горизонтальной скорости ветра на высоте 90–110 км для отдельных орбит вместе с топографией подстилающей поверхности (глобальные данные топографии КА «Магеллан» (Saunders, Pettengill, 1991) показаны фоновыми цветами). Числа около изолиний указывают интенсивность ночного свечения  $O_2$  1,27 мкм в МРл. Изолинии начинаются с уровней интенсивности 0,5 МРл (а, d), 0,6 МРл (b), 0,7 МРл (c), 0,4 МРл (e). Стрелки представляют среднее видимое атмосферное движение в ячейках  $5^\circ \times 5^\circ$ , где конец вектора показывает, куда начало того же вектора переместилось бы за период 3 часа. Местное время для каждого изображения определяется меридианами 20 ч, 0 ч и 4 ч (пунктирная линия).

Примеры горизонтальных векторных полей ветра на высоте 90–110 км над подлежащей топографией для отдельных орбит представлены на Рисунке 1.8. Диапазон осей долготы ( $180^\circ$ – $20^\circ$  в.д.) и широты ( $60^\circ$  ю.ш. –  $5^\circ$  с.ш.) на рисунке больше, чем область, охваченная каждым изображением. Рисунок 1.8a: орбита №569 является примером двух потоков, «встречающихся» примерно в 22 часа местного времени и меняющих направление над низким рельефом (равнинами), а также квазикругового движения внутри каждого из них, которое «обтекает» высокогорья, такие как Область Фемиды. Морфология излучения  $O_2$  напоминает форму соответствующих высокогорий, но смещена в основном направлении среднего потока — к полуночи, вместе с местоположением возмущения в потоке. На Рисунке 1.8b (орбита №588) можно увидеть типичную «встречу» двух противоположных потоков, что можно наблюдать на Рисунке 1.7a в усреднённой картине распределения зональной скорости. Более сильное утреннее восточное течение простирается через полночь и встречается со слабым вечерним западным потоком примерно в 22 ч местного солнечного времени. Направление ветра меняется над низменностями. Рисунок 1.8c (орбита №598) показывает большую область кругового движения против часовой стрелки (антициклон) между 0–4 ч с диаметром около 4000 км. Векторы обтекают большую топографическую структуру, которая включает области Феба, Фемиды и Диона. На Рисунке 1.8d

(орбита №603) наблюдается сильный поток на утренней стороне к полуночи и Южному полюсу, расположенный между областями Фемида и Диона, а также более слабое движение к экватору на вечерней стороне, где Область Альфа действует как «препятствие». Рисунок 1.8e (орбита №793): область с почти нулевой скоростью около 22 ч, созданная противоположными потоками; вечерний поток «обтекает» Область Имд.

Трудности наблюдения влияния топографии связаны с переменностью свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) и коротким временем жизни «следа» (менее суток). Не все случаи можно отождествить с конкретными деталями рельефа. Тем не менее, некоторые примеры можно использовать для анализа характера циркуляции. Чтобы статистически подтвердить влияние топографии, потребуется большое количество данных по долготе и широте в узких интервалах местного времени (0,5–1 ч), так как зависимость от местного времени оказывается значительной (см. раздел 1.5). Данные VIRTIS-M не соответствуют этому требованию, так как они относительно разреженные, а стандартное отклонение в каждом интервале слишком велико для того, чтобы делать обоснованные выводы. Рисунок 1.9б показывает неравномерность покрытия данными южного полушария. Подавляющее большинство данных находится в средних широтах от  $180^\circ$  в.д. до  $90^\circ$  в.д. 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. Максимум интенсивности оказался расположенным на  $0^\circ$  с.ш.;  $200^\circ$  в.д. – строго над вулканом Маат, имеющим высоту около 8000 м. Помимо Маат, в экваториальных широтах доминирующей возвышенностью является Земля Афродиты ( $60^\circ$ – $180^\circ$  в.д.), 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.

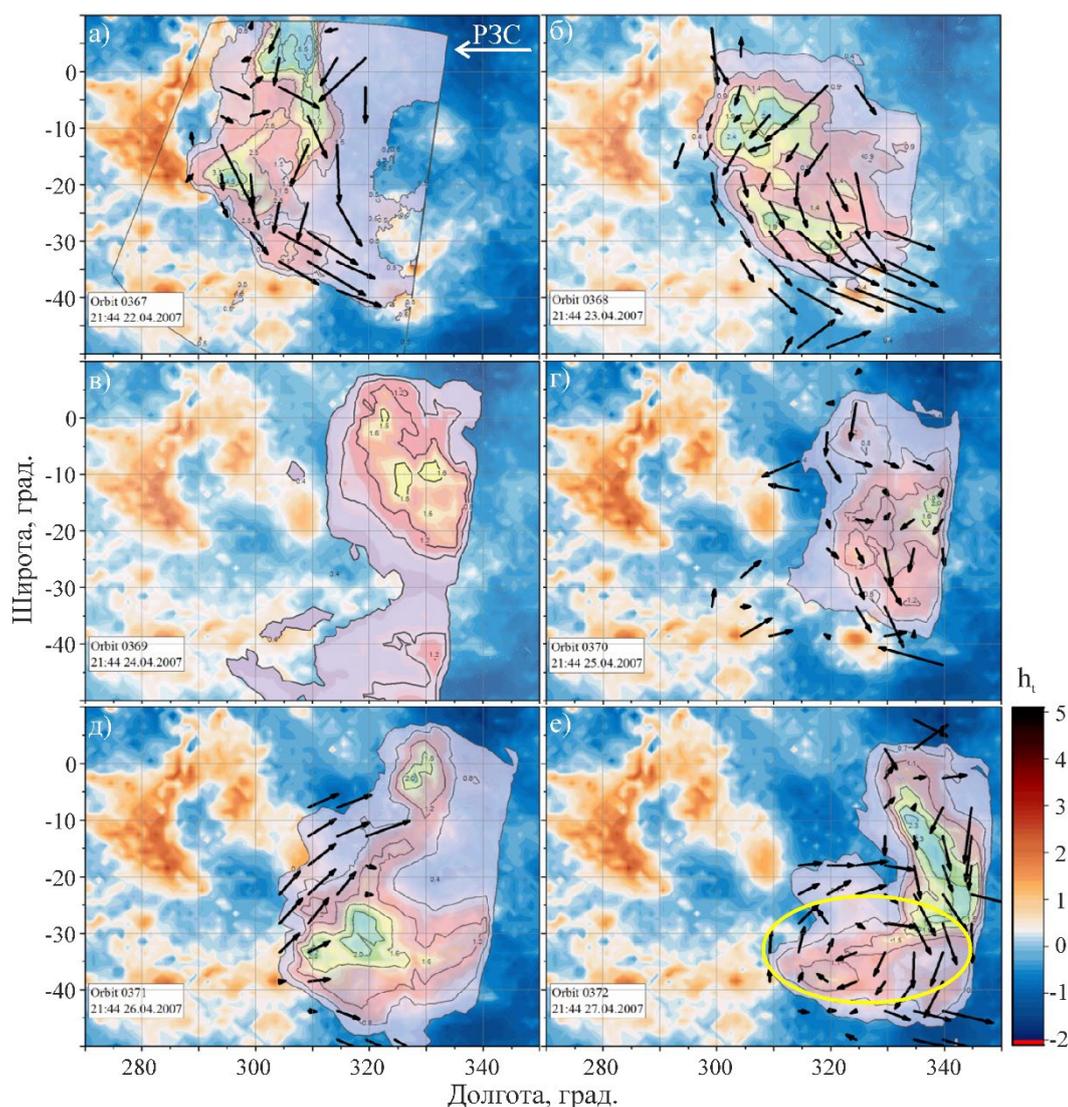


**Рисунок 1.9.** Карта свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) и статистика данных в координатах долгота – широта: а) – распределение свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) для данных в диапазоне местного времени 22.5–1.5 ч; б) – покрытие данными без ограничения по местному времени. Белые контуры соответствуют топографической карте поверхности Венеры (Saunders, Pettengill, 1991).

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

### ***1.7 Короткопериодические вариации свечения кислорода и динамических характеристик в верхней мезосфере***

В данных VIRTIS-M сравнительно мало сплошных последовательностей орбит (каждая орбита «Венеры-Экспресс» занимала 24 ч), в течение которых прибор наблюдал одну и ту же область планетарного диска. Такие наблюдения позволяют отслеживать короткопериодические вариации интенсивности свечения и динамических особенностей. В диссертации рассматривается наиболее продолжительный мониторинг в этом режиме, с орбиты № 367 до орбиты № 372 включительно. На протяжении 6 дней VIRTIS-M наблюдал область между  $60^\circ$  ю.ш. и  $15^\circ$  с.ш.,  $270^\circ$  в.д. и  $350^\circ$  в.д. (0 и 4 ч местного времени) (рис. 1.11).

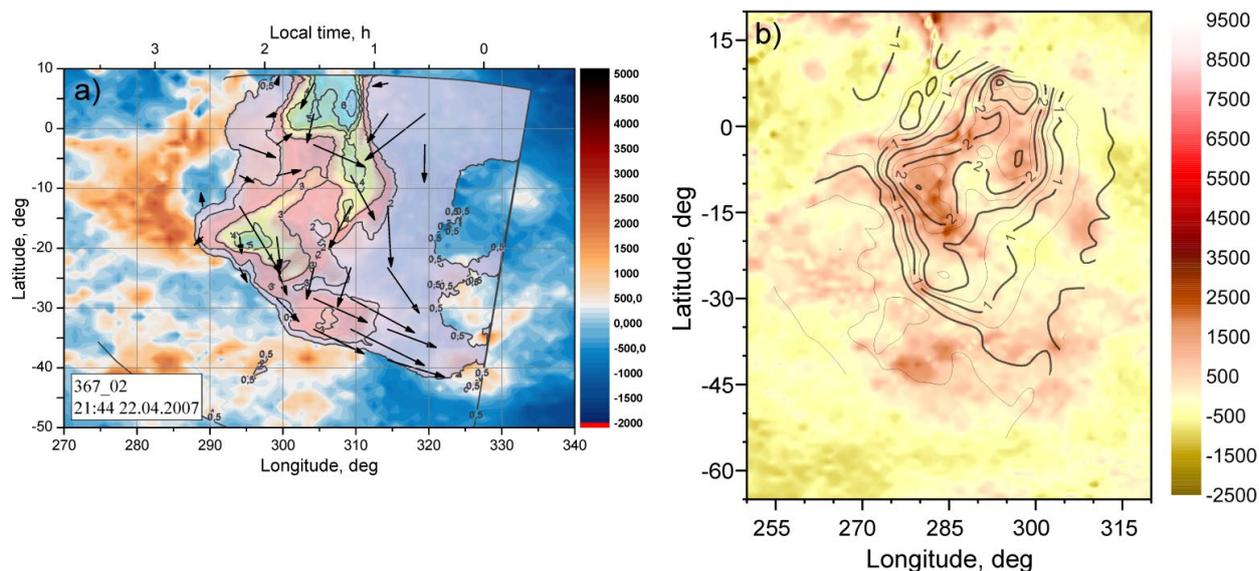


**Рисунок 1.11.** Вариации интенсивности свечения локализованной структуры и векторов скоростей от орбиты к орбите с 367 до 372. Дата и время съемки указаны на каждой панели: а) орбита 367: интенсивность свечения (МРл, контуры) и векторы скоростей (стрелки) поверх топографии поверхности; б) орбита 368: 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  $30^\circ$  ю.ш.;  $330^\circ$  в.д. (1 ч местного времени)

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  $\sim 4.5$  МРл – одно из наиболее ярких свечений, зарегистрированных VIRTIS-M за все время работы. 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  $30^\circ$ – $40^\circ$  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. 1.11e).

Как было указано ранее, области яркого ночного свечения в некоторых случаях напоминают форму подлежащих высокогорий, находясь прямо над ними или смещаясь в направлении основного потока. Известно, что яркие структуры ночного свечения возникают в различных местах на ночной стороне, хотя в среднем они распределены вокруг точки AS (Gérard и др., 2008). Стоит подробнее рассмотреть орбиту 367 (Рисунок 1.11a). Здесь поля скоростей показывают разнообразие движений; однако основной поток направлен на восток и к полюсу (Рисунок 1.12a), что типично для утренней стороны (Рисунок 1.6). В южной части изображения наблюдалось движение против часовой стрелки.



**Рисунок 1.12.** 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 мезосферного 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).

Предполагая смещение яркой структуры в направлении основного потока и ее сходство с формой Области Фебы, можно вычислить коэффициент корреляции между высотами топографии и значениями ночного свечения. Для этого карту ночного свечения необходимо сместить и повернуть противоположно основному потоку. Максимум функции корреляции в сетке  $5^\circ \times 5^\circ$  составил 0,61 после смещения на  $20^\circ$  на запад,  $7^\circ$  к экватору и поворота на  $14^\circ$  по часовой стрелке. Уменьшение коэффициента корреляции можно объяснить наблюдаемыми мелкомасштабными движениями, которые могут деформировать яркую структуру.

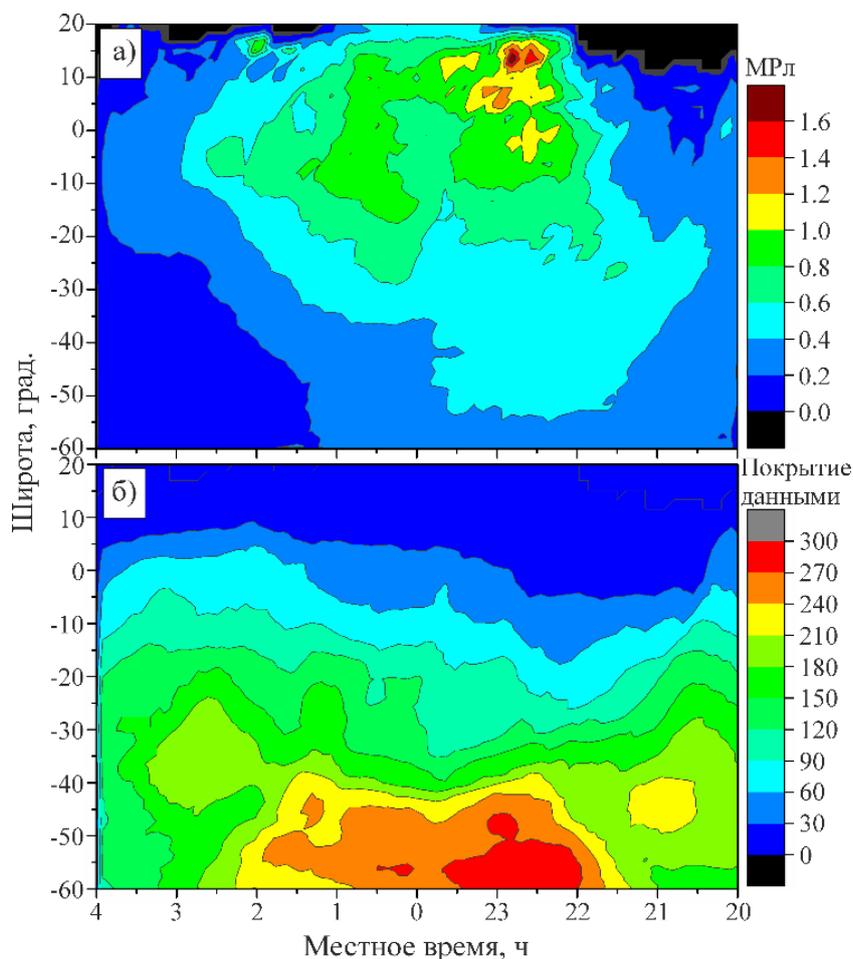
### ***1.8 Обсуждение***

Результаты показывают, что циркуляция в переходной области на ночной стороне Венеры оказывается более сложной, чем ожидалось. Два противоположных зональных потока, исходящие от обоих терминаторов,

напоминают режим циркуляции SS-AS; однако они асимметричны таким образом, что скорость ветра на утренней стороне выше, чем на вечерней, и оба потока «встречаются» примерно в 22 часа, за 2 часа до полуночи, что минимизирует влияние суперротации на этих высотах. Меридиональная компонента также асимметрична, будучи в среднем направленной: к полюсу – к западу от полуночного меридиана (к утру) на экваториальных широтах, и к экватору – на вечерней стороне и на более высоких широтах, что указывает на отклонение от режима циркуляции SS-AS, так как он не направлен к экватору на всех наблюдаемых местных временах.

Асимметричная картина скорости ветра на ночной стороне Венеры хорошо согласуется со средним распределением свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  (Шакун и др., 2023). Оно также имеет асимметрию относительно полуночи (Рисунок 1.13).

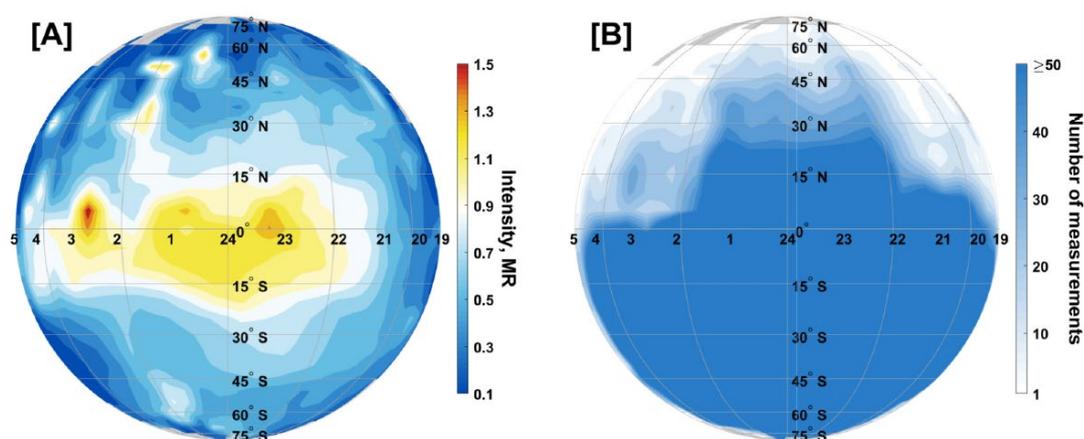
Абсолютный максимум  $\sim 1,7$  МРл находится на 22–23 ч местного времени и  $10^\circ$  с.ш., тогда как абсолютный минимум обнаруживается на 2–4 ч на широтах южнее  $20^\circ$  ю.ш. Таким образом, максимум свечения смещен на 1 час на восток, т.е. против направления зональной суперротации. В разделе 1.5 было показано, что зональный поток с утреннего терминатора сильнее потока с вечернего, что объясняет наблюдаемую асимметрию свечения и также говорит о влиянии термического прилива на циркуляцию в этой области.



**Рисунок 1.13.** 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 изображений, полученных прибором VIRTIS-M в канале 1,27 мкм; б) – соответствующее (а) покрытие данными.

Анализ полей ветра отдельных орбит показывает, что глобальная асимметрия относительно полуночного меридиана обычно проявляется на многих орбитах: два потока «встречаются» в  $22,5 \pm 0,5$  часа. Это сопровождается асимметрией интенсивности ночного свечения между терминаторами: более высокая интенсивность наблюдается на вечернем терминаторе; до полуночи она составляет 0,43 МРл, что значительно превышает среднюю интенсивность 0,26 МРл после полуночи при средней интенсивности  $0,36 \pm 0,3$  МРл. Более высокая скорость горизонтального потока указывает на меньшую конвергенцию и, следовательно, на более низкую интенсивность ночного свечения.

Для сравнения, результаты обработки данных другого прибора КА «Венера-Экспресс», SPICAV (Evdokimova et al., 2024), показывают, что в среднем свечение кислорода расположено в противосолнечной области, однако локальные максимумы наблюдаются на широте экватора в 23 и 2,5 часа местного времени (как вдоль, так и против направления суперротации) (Рисунок 1.14). Такое нерегулярное распределение максимумов свечения во многом согласуется со смещениями в данных VIRTIS (Рисунок 1.5). Очевидно, что циркуляция SS-AS, гравитационные волны и тепловые приливы вместе ответственны за сложную картину, которая наблюдается из видимого движения ночного свечения  $O_2$ .

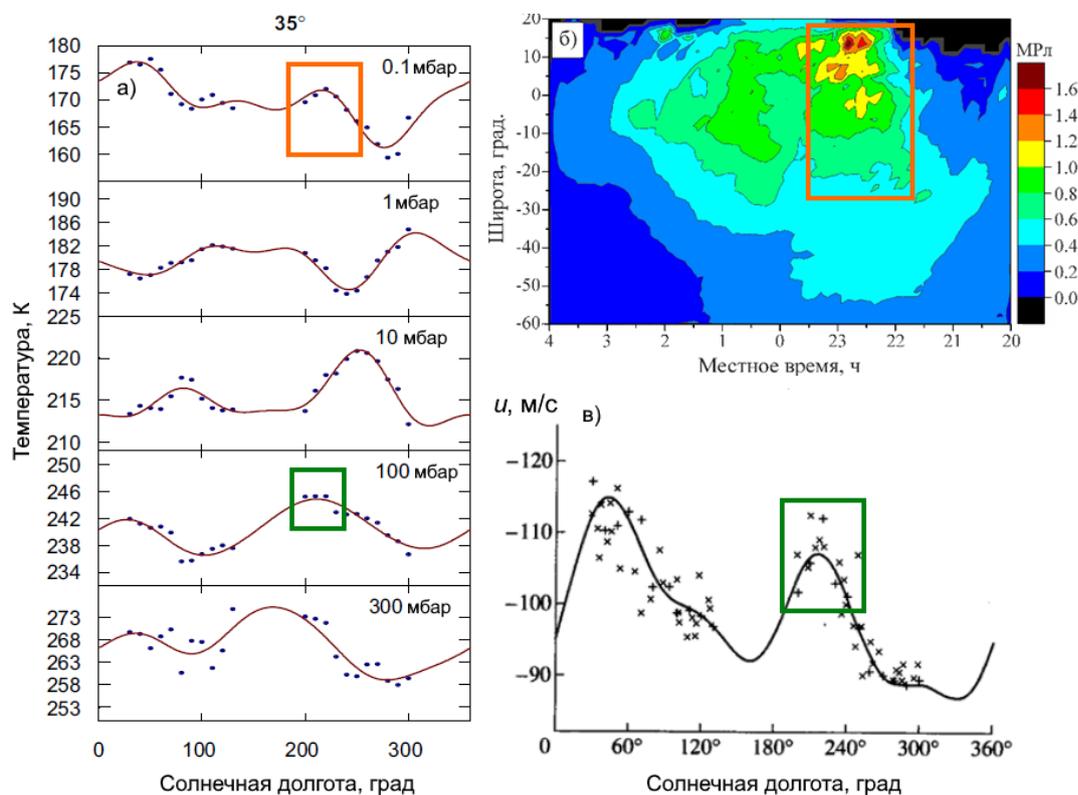


**Рисунок 1.14.** Карта свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) на ночной стороне Венеры и статистика данных в координатах местное время – широта по данным SPICAV (Evdokimova et al., 2024), приведённые для сравнения с данными VIRTIS: А) – распределение свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ), построенное по результатам обработки и усреднения изображений, полученных прибором SPICAV в канале 1,27 мкм; В) – соответствующее (А) покрытие данными.

Ранее было обнаружено несколько других асимметрий в переходном регионе. Асимметрия распределения NO в термосфере была зафиксирована с помощью КА Pioneer Venus (Stewart et al., 1980) и прибора SPICAV КА «Венера-Экспресс» (Stieren et al., 2013). Яркое пятно NO было обнаружено в 2 часа утра вместо ожидаемых 0 часов, и смещение от полуночи авторы объясняют влиянием зональной суперротации. Однако стоит заметить, что высота свечения NO находится на высоте около 115 км, в термосфере. Такое различие между

смещениями максимумов свечений  $O_2$  и  $NO$  может объясняться влиянием разных видов волн.

Асимметрии между терминаторами наблюдались на высоте 95 км в распределении атомного кислорода (Alexander и др., 1993) — на вечернем терминаторе кислородных атомов было в два раза больше. Это было объяснено влиянием гравитационных волн, распространяющихся из мезосферы. На высоте 95 км была обнаружена асимметрия в температуре: температура была на 15–20 К выше на утреннем терминаторе, что можно объяснить как результат термических приливов (Zasova et al., 2007). Смещение максимума свечения к 22–23 ч связано с термическим приливом, который также приводит к максимуму температуры (0,1 мбар, 95 км, Рисунок 1.15).



**Рисунок 1.15.** а) Примеры поведения температуры на изобарических уровнях (0,1, 1, 10, 100, 300 мбар), усредненные по  $10^\circ$  широты и  $10^\circ$  солнечной долготы для низких ( $35^\circ$ ) широт (Zasova et al., 2007); б) среднее распределение свечения  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) на ночной стороне Венеры (из Рисунка 1.13); в) зональная скорость ветра в среднеширотном джете по каждому сеансу измерений КА «Венера-15» в зависимости от солнечной долготы (местное время) вместе с аппроксимирующей

кривой (Zasova et al., 2000). Оранжевым отмечена область, где скорость ветра меняет направление, и происходит конвергенция потоков, идущих от терминаторов (циркуляция SS-AS). Зелёным отмечено совпадение максимума зональной скорости ветра при 100 мбар и местном времени 22 ч с температурным максимумом.

Модели показывают, что появление максимумов свечения после полуночи (сдвиг в западном направлении, например, Рис. 1.5а,в, 1.14) может быть вызвано влиянием экваториальной волны Кельвина (Brecht et al., 2021; Navarro et al., 2021), распространяющейся до 110 км. Модель IPSL (Navarro et al., 2021) подтвердила возможность существования циклических вихрей в переходной области в местное время 0-3 ч. Их появление в модели также связано с влиянием волны Кельвина от лежащих ниже атмосферных слоёв. Обнаруженные в настоящей работе циклоны и антициклоны наблюдаются после полуночи, так что их генерация может быть вызвана именно этим механизмом.

Волна Кельвина — разновидность атмосферной гравитационной волны, которая распространяется строго вдоль экватора в направлении вращения планеты. Уравнение экваториальной волны Кельвина записывается как

$$u = u_0 e^{\frac{\beta y^2}{2c}} e^{i(kx - \omega t)}$$

где  $u$  — зональная скорость ветра,  $u_0$  — амплитуда волны,  $\beta$  — параметр Россби (для Венеры  $\beta \approx 6 \times 10^{-12} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ),  $y$  — расстояние вдоль широтной оси,  $c$  — фазовая скорость ( $c = \sqrt{gH}$ , где  $g$  — ускорение свободного падения,  $H$  — вертикальный масштаб; для Венеры  $c \approx 16 \text{ м/с}$ ) (James, 1994; Taylor, 2010). Влияние волны Кельвина на циркуляцию атмосферы Венеры будет также рассмотрено в Главе 3.

Таким образом, несмотря на то что на рассматриваемых высотах SS-AS является основной модой глобальной циркуляции, горизонтальная циркуляция асимметрична относительно полуночи. Причиной может служить действие термического прилива на данной высоте и влияние волны Кельвина. Сдвиг области конвергенции к 22-23 часам совпадает с локальным максимумом температуры, связанного с термическим приливом на высоте 90-95 км. Существует только три

эксперимента: OIR КА «Пионер-Венера» (1978), фурье-спектрометр КА «Венера-15» (1983) и радиозатменный эксперимент на КА «Акацуки» (2016-2022), которые получили достаточное покрытие измерениями температуры по высоте, широте и местному времени для получения картины термического прилива в мезосфере Венеры, показав, что максимум температуры на высоте 90-95 км находится на вечерней стороне.

Анализ отдельных орбит предполагает влияние подстилающей поверхности. Области ночного свечения, как правило, находятся над гористыми районами, наблюдаемыми непосредственно над ними или смещенными на несколько градусов вдоль текущего направления ветра, часто повторяя форму возвышенности на поверхности. Топографические районы, похоже, вызывают нарушения в потоке, действуя как «препятствия» (пример — «обтекание» Области Имд на Рисунке 1.9е). Влияние поверхности топографии на верхнюю границу облаков было установлено на основе данных камеры VMC КА «Венера-Экспресс» (365 нм) (Bertaux et al., 2016) и изображений, полученных с камеры LIR (10 мкм) на КА «Акацуки», которые показали дугообразную формацию в поле температур (Fukuhara et al., 2017). Все эти особенности были объяснены через влияние стационарных гравитационных волн над Землей Афродиты. Позже было показано, что дугообразные формы могут появляться и исчезать над возвышенностями, которые их генерируют. Большие стационарные гравитационные волны зависят как от топографии, так и от местного времени (Kouyama et al., 2017).

В данных VIRTIS обнаружено лишь небольшое количество случаев, когда можно предположить влияние поверхности на мезосферную циркуляцию или морфологию свечения кислорода – таким образом, предполагается непостоянство этого механизма. Известно, что атмосфера Венеры стабильна на высотах выше 60 км (Tellmann et al., 2012), поэтому гравитационные волны могут мигрировать в переходный регион и проявлять контуры топографии в горизонтальном атмосферном течении. Влияние поверхности может проявляться нерегулярно из-за непостоянной стабильности конвективного слоя между 52 и 57 км (Hauchecorne, 2017). Области яркого свечения кислорода ( $> 1$  МРл) проявляют переменное

пространственное поведение, часто возникая не в противосолнечной точке (AS). Стационарные гравитационные волны над возвышенностями могут объяснить непостоянное появление ярких пятен ночного свечения и динамику вокруг них. Для небольших возвышенностей (1–5 км) малый топографический масштаб гористой местности снижает потенциал генерации гравитационных волн (Коцуама и др., 2017), что может служить причиной непостоянного обнаружения влияния Области Фебы и аналогичных по размеру и высоте областей.

В целом, модели циркуляции указывают на способность вертикальных волн достигать высот 90–95 км (Мингалев и др., 2015). Исследование ионосферы Венеры показало, что гравитационные волны могут достигать даже высот 110 км и влиять на характеристики ионосферного слоя  $V_0$  (Tripathi et al., 2023).

Обнаруженные атмосферные волны схожи по поведению с волнами плавучести (гравитационными волнами) в земной атмосфере (Jones, Bedard, 2018). В вертикальных профилях свечения кислорода  $O(^1S \rightarrow ^3D)$  (557,7 нм) и гидроксила  $OH(6-0)$  (527 нм) в термосфере (80–120 км) такие волны проявляются в наблюдаемых двойных пиках свечения (Mende et al., 1993; Melo et al., 2000), как и на Венере (Altieri et al., 2014). В лимбовых данных VIRTIS двойные пики наблюдаются в 9% измерений, что может говорить о непостоянстве условий для их распространения. Моделирование показало, что гравитационные волны на Венере имеют длины волн 7–16 км, причём длина волны может расти с высотой (Altieri et al., 2014). В настоящей работе впервые предполагается обнаружение волн плавучести по проявлению изображения Области Фебы в свечении кислорода и «обтекании» горизонтальным потоком областей над некоторыми высокогорьями.

### ***1.9 Выводы по 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.

## Глава 2. Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Венера-Экспресс»

### *2.1 Обзор исследований динамики нижнего облачного слоя Венеры*

Тепловое излучение от горячей нижней атмосферы и поверхности наблюдается на ночной стороне Венеры в ближнем инфракрасном диапазоне в спектральных «окнах» между полосами поглощения CO<sub>2</sub>. Нижний облачный слой имеет неоднородное распределение оптической толщины, что приводит к сложной морфологии мелкомасштабных структур с различными наблюдаемыми контрастами (McGouldrick et al., 2012). Отслеживая перемещение этих облачных структур с течением времени, можно определить горизонтальную скорость ветра на высоте дистанционного зондирования (Sánchez-Lavega et al., 2008).

В спектральном окне 1,74 мкм на ночной стороне тепловое излучение исходит от нижних облаков и из-под основного облачного уровня. Оценка высоты эффективного уровня излучения составляет 44–48 км (Sánchez-Lavega et al., 2008). Таким образом, движение наблюдаемых облачных структур связано с динамикой атмосферы на этих высотах.

Первые точечные измерения скорости ветра в нижнем облачном слое были сделаны спускаемыми аппаратами «Венера»-4, 7, 8, 9, 10, 12 (Kerzhanovich, Marov, 1983); «Пионер-Венера» (Counselman et al., 1980), «Венера-13» (Avduevskiy et al., 1983), «ВЕГА»-1 и 2 (Moroz, Zasova, 1997). По данным вертикальных профилей скорости ветра, измеренной доплеровским методом, на высоте ~46 км она может варьироваться от 45 до 70 м/с.

До миссии «Венера-Экспресс» дистанционно нижний облачный слой Венеры изучался инфракрасным спектрометром NIMS (Near-Infrared Mapping Spectrometer) на борту космического аппарата «Галилео» (Carlson et al., 1991) и с помощью наземных телескопов (Crisp et al., 1991; Tavenner et al., 2008; Young et al., 2008, 2010).

Результаты двух анализов отслеживания облаков частичного набора данных изображений VIRTIS-M («Венера-Экспресс»), полученных в 2006–2008 годах

(Sánchez-Lavega et al., 2008; Hueso et al., 2012) за 18 и 45 орбит соответственно, показали постоянную зональную скорость ветра около 60 м/с между 0 и 70° южной широты. Эти работы также анализировали значения меридиональной скорости ветра, местное время, широту и временную зависимость скорости ветра в нижних облаках.

Последующие результаты отслеживания нижних облаков были получены с помощью камеры IR2 на борту космического аппарата JAXA Akatsuki в 2016 году (Horinouchi et al., 2017; Peralta et al., 2018). Хотя средние значения меридиональной скорости согласуются с результатами VIRTIS-M, зональная скорость показывает другую форму широтного профиля, представляя собой «экваториальный джет», со значениями зональной скорости ветра, достигающими около 75 м/с вблизи экватора.

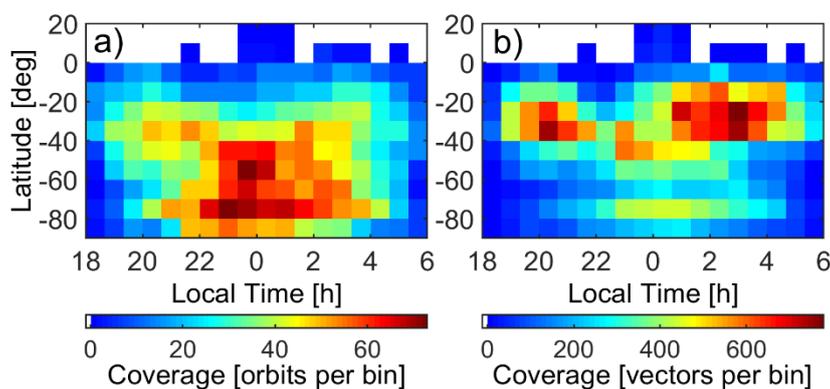
## 2.2 Источники данных

В работе, описываемой Главой 2, был проанализирован весь набор данных прибора VIRTIS-M, из которого 195 орбит были признаны подходящими (подробности о критериях отбора приведены в следующем разделе), и из которых в свою очередь было рассчитано 44480 векторов горизонтальной скорости ветра (Таблица 2.1). Количество использованных орбит составляет примерно в 4 раза больше, чем в предыдущих исследованиях (Hueso et al., 2012). Это позволило снизить ошибки средних значений скорости, обеспечить лучшее покрытие экваториальных широт и более обширное долготное покрытие.

**Таблица 2.1.** Данные прибора VIRTIS-M, используемые для расчёта скоростей ветра в канале 1,74 мкм.

Период наблюдений («сезон»)	Дата начала / конца	Номера орбит	Кол-во орбит	Кол-во векторов
I	2006-05-28/2006-10-05	0038–0167	29	2605
II	2006-12-04/2007-06-06	0228–0411	97	23904
III	2007-07-18/2008-01-24	0454–0644	44	12774
IV	2008-04-09/2008-10-27	0720–0921	25	6007
Всего	2006-05-28/2008-10-27	0038–0921	195	<b>44480</b>

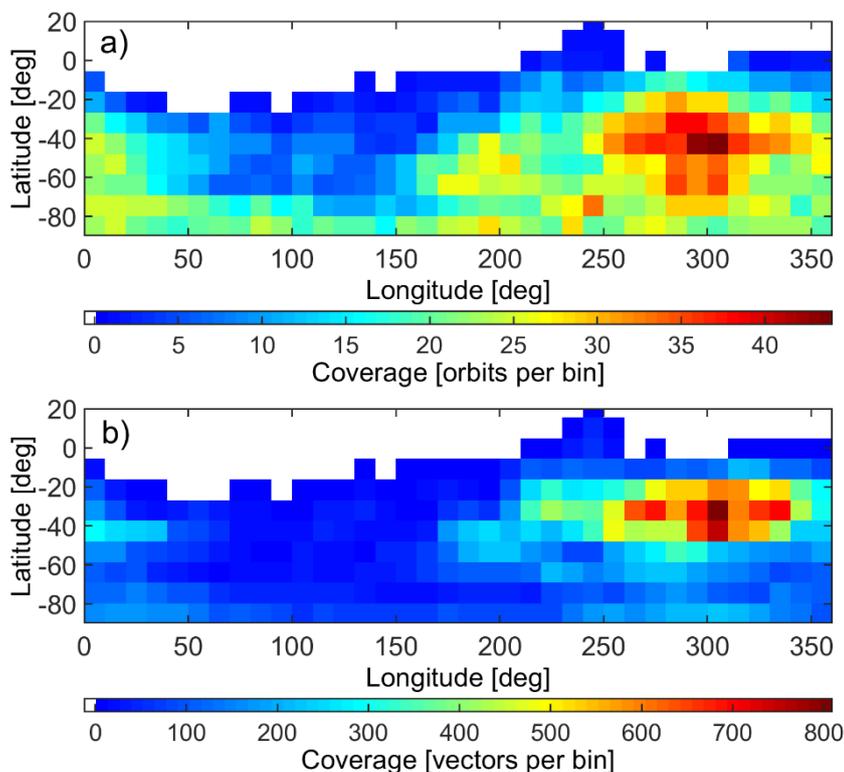
Данные VIRTIS-M на длине волны 1,74 мкм в основном (99,8%) охватывают Южное полушарие. На рисунке 2.1 показано, как распределена статистика рассчитанных векторов скорости ветра по ночной стороне. Облачные структуры наиболее контрастны и детализированы между 10 и 40° ю.ш., и в результате этот диапазон широт содержит более половины — 51,2% всех векторов. Векторы распределены почти симметрично относительно полуночного меридиана: 45,9% расположены до 0 часов местного времени, 54,1% — после. Количество полученных векторов уменьшается к обоим терминаторам.



**Рисунок 2.1.** Покрытие ночной стороны Венеры векторами скорости, полученными в результате анализа 1,74 мкм изображений VIRTIS, в координатах местное время – широта. Данные разбиты на ячейки 40 мин × 10°. (а): количество орбит (на ячейку), в течение которых были сняты пригодные для анализа изображения. (б): количество векторов (на ячейку), полученных в общей сложности.

На рисунке 2.2 показано распределение полученных векторов скорости в координатах долгота-широта. Долготы между 50° и 150° содержат только 5,8% всех данных. В Южном полушарии этот диапазон долгот включает в себя Землю Афродиты, самую значительную возвышенность планеты, которая, как было показано в предыдущих исследованиях, влияет на атмосферу на уровне верхнего облачного слоя на дневной стороне (Bertaux et al., 2016; Fukuhara et al., 2017; Khatuntsev et al., 2017). В настоящем исследовании сделан шаг к изучению возможного влияния топографии Венеры на динамику нижнего облачного слоя. К сожалению, количество данных в вышеупомянутом диапазоне слишком мало, и

влияние Земли Афродиты исследовать невозможно, однако некоторые другие работы указывали на то, что другие топографические особенности также могут влиять на атмосферу — в верхней мезосфере (Глава 1) и на уровне верхних облаков (Fukuya et al., 2022).

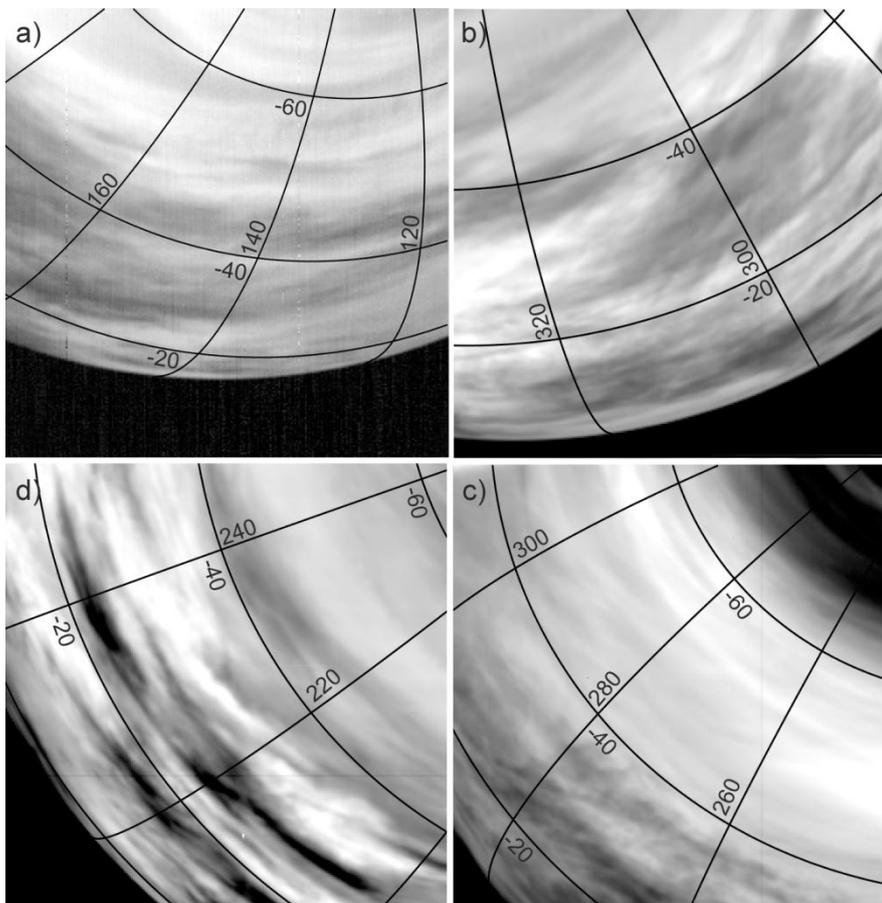


**Рисунок 2.2.** Покрытие ночной стороны Венеры в координатах долгота-широта векторами скорости, полученными в результате анализа 1,74 мкм изображений VIRTIS. Распределение разбито на ячейки  $10^\circ \times 10^\circ$ . (a): количество орбит (на ячейку), в которых были пригодные для анализа изображения. (b): количество векторов (на ячейку), полученных в общей сложности.

### 2.3 Методы

Изображения VIRTIS-M в канале 1,74 мкм характеризуются сложной морфологией облаков (Рисунок 2.3), вызванной изменяющейся оптической толщиной и обилием облачных структур, которые вытянуты в зональном направлении из-за суперротации. Последующие изображения одной и той же области облачного покрова содержат стабильные облачные структуры, и отслеживание их перемещения позволяет рассчитывать векторы скорости так же, как и в Главе 1. Величина  $h$  для канала 1,74 мкм бралась равной 46 км. В этой работе

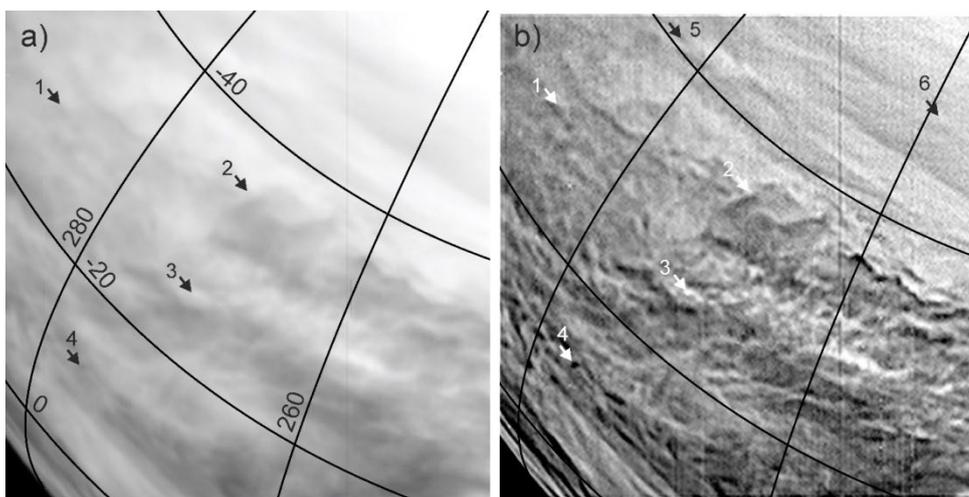
были использованы изображения, разделенные интервалами от 3600 до 7200 секунд.



**Рисунок 2.3.** Примеры изображений VIRTIS-M в канале 1,74 мкм, снятые с расстояния 60000–65000 км: а) орбита 71, куб данных 01, 30/06/2006 15:06; б) орбита 367, куб данных 02, 22/04/2007 21:44; в) орбита 569, куб данных 05, 10/11/2007 16:11; д) орбита 812, куб данных 04, 10/07/2008 20:15.

Изображения ночной стороны Венеры, полученные с помощью VIRTIS-M в канале 1,74 мкм, имеют низкое значение контраста. Чтобы увеличить контраст облачных структур, к изображениям был применён двумерный вейвлет-фильтр с помощью программы *Registax* (Khatuntsev et al., 2017; Verrevoets et al., 2012). Пример применения этого фильтра показан на рисунке 2.4, где значение контраста Майкельсона увеличивается с 0,75 до 0,99. Эта техника особенно эффективна для облачных деталей в средних широтах. Она позволяет увеличить количество идентифицированных облачных структур на пару последовательных изображений и обеспечить более равномерное пространственное покрытие рассчитанными

векторами скорости. В экваториальной области на широтах от 0 до 40° ю.ш. облачные детали небольшие и имеют высокий контраст, поэтому их легко идентифицировать (маркеры 1–4 на рисунке 2.4а). В средних широтах облачные детали становятся низкоконтрастными и вытянутыми вдоль широт. Их идентификация улучшается после вейвлет-фильтрации (маркеры 5,6 на рисунке 2.4б).



**Рисунок 2.4.** Пример применения вейвлет-фильтра к изображению VIRTIS-M (куб данных 569\_13). Стрелки указывают на примеры идентифицированных деталей облаков, используемых при расчёте скорости ветра.

Как и в случае с изображениями в канале 1,27 мкм, каждому рассчитанному вектору скорости сопутствует ошибка единичного измерения, варьирующаяся от 5–10 м/с ближе к центру планетного диска (обычно в околополярных широтах) до 30–40 м/с вблизи лимба (обычно вблизи экваториальных широт). Из-за высоких ошибок и потенциальных искажений облачных деталей область 5–10° вблизи лимба, таким образом, также была исключена из расчётов.

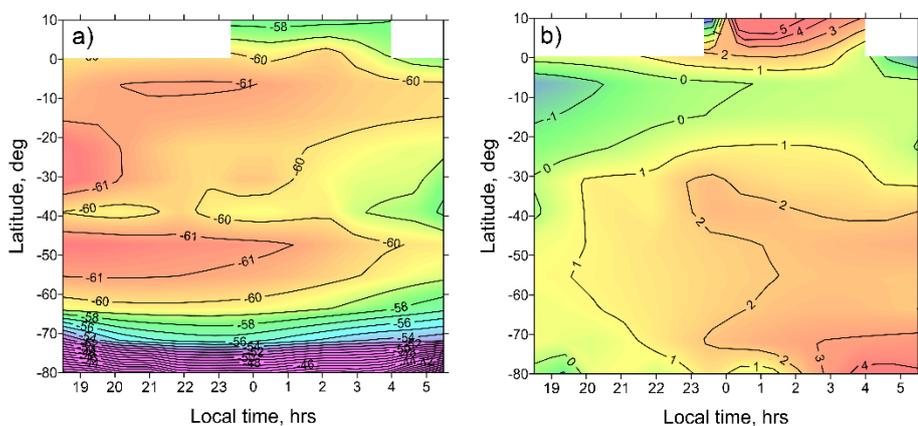
#### ***2.4 Зависимость средней скорости ветра от местного времени***

Основная часть данных, полученных VIRTIS-M, охватывает средние и высокие широты Южного полушария на ночной стороне, причём большинство кубов данных находятся около полуночи. Однако на низких и средних широтах было получено непропорционально много векторов из-за более богатой деталями

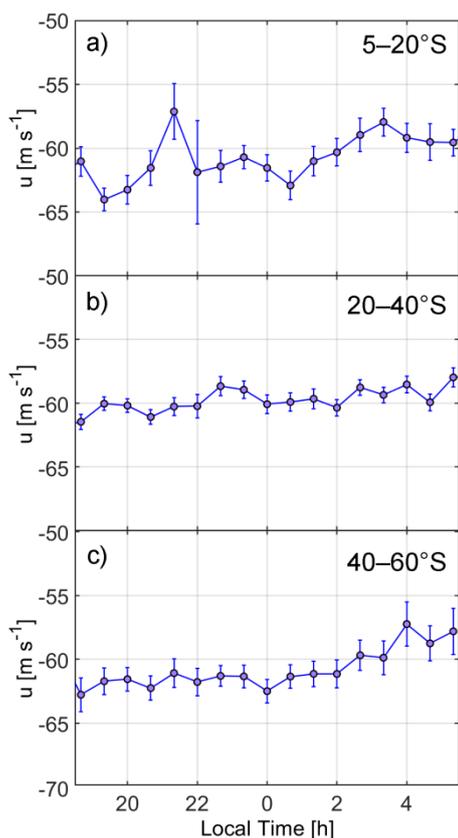
морфологии облаков, что привело к отслеживанию большего количества облачных особенностей (рисунки 2.1 и 2.2).

При получении средних значений каждый раз применялся двухэтапный подход. Вначале векторы скорости усреднялись по сетке долгота-широта или местное время-широта в пределах каждой орбиты. Затем средние значения по орбитам усреднялись между собой по той же сетке. Характеристики анализируемого среднего атмосферного течения рассматриваются ниже.

Распределения средней зональной и меридиональной скорости ветра в координатах местное время-широта приведены на рисунке 2.5. Средняя зональная скорость в средних широтах достигает  $-60$  м/с, и этот результат согласуется с общим режимом суперротации. Наблюдается небольшое замедление зональной скорости с востока на запад ( $1-5$  м/с, в зависимости от широты), т. е. по направлению к утреннему терминатору. Самая низкая скорость на ночной стороне (в абсолютных значениях),  $-58$  м/с, обнаружена в  $4-5$  часов, тогда как абсолютные максимумы зональной скорости,  $-64$  м/с, расположены в  $19,5-21$  и  $23-24$  часа местного времени. На рисунке 2.6 показаны профили зональной скорости от местного времени в трех диапазонах широт. Для доверительного интервала в  $99\%$  стандартной ошибки среднего значения замедление от вечера к утру в средних широтах является статистически значимым. В экваториальной области наблюдаются два минимума зональной скорости в  $21$  и  $4$  часа.

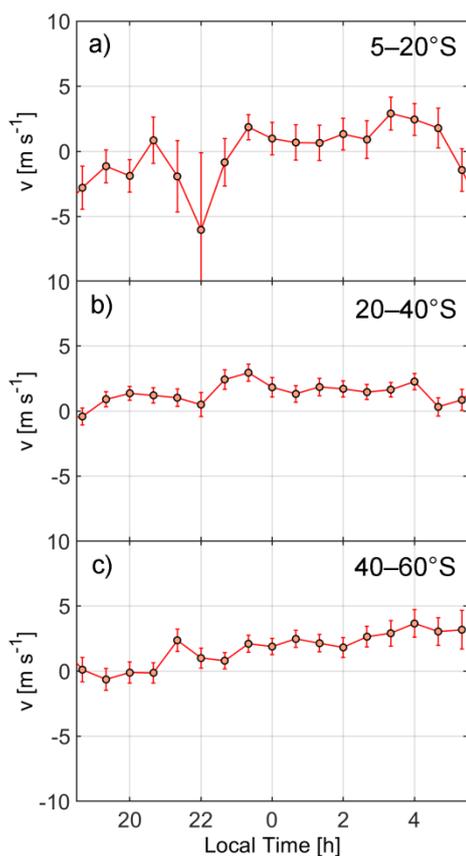


**Рисунок 2.5.** Средняя зональная (а) и меридиональная (б) скорость ветра в нижнем облачном слое в зависимости от местного времени и широты по данным VIRTIS.



**Рисунок 2.6.** Профили зональной скорости ветра от местного времени, усреднённые по широтным интервалам 5–20° ю.ш. (а), 20–40° ю.ш. (б) и 40–60° ю.ш. (в). Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%.

Меридиональная скорость преимущественно направлена на север (к экватору) со значениями в диапазоне 0–3 м/с. Существует её статистически значимое ускорение на запад (к утреннему терминатору) по всей ночной стороне, более выраженное в средних и высоких широтах, чем в низких (рисунок 2.7). Позже вечернего терминатора, в 19–20 ч, в высоких широтах, средняя меридиональная скорость меняет направление и становится южнонаправленной (к полюсу). Кроме того, меридиональная скорость имеет отрицательные значения (направление на юг) в низких широтах между 19 и 1 ч. Эта область совпадает с одним из максимумов зональной скорости.



**Рисунок 2.7.** Профиль меридиональной скорости ветра от местного времени, ограниченный широтными интервалами  $5\text{--}20^\circ$  ю.ш. (а),  $20\text{--}40^\circ$  ю.ш. (б) и  $40\text{--}60^\circ$  ю.ш. (в). Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%.

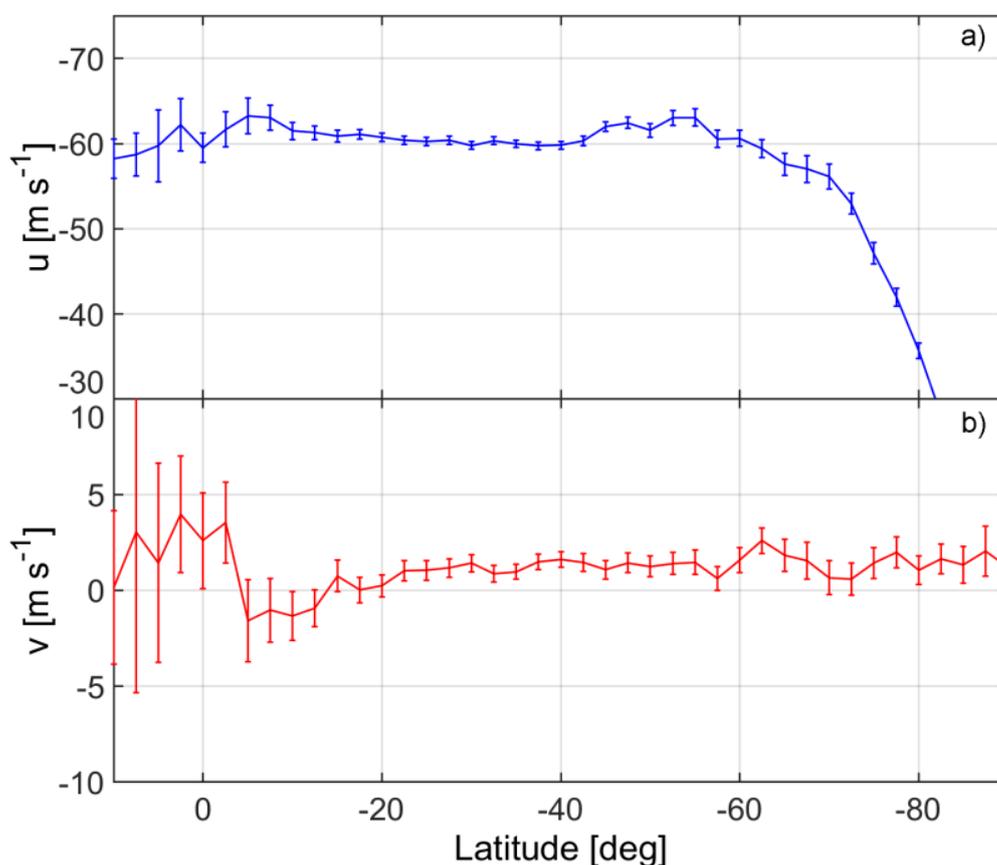
### ***2.5 Зависимость средней скорости ветра от широты***

Широтные профили средней зональной и меридиональной скорости ветра показаны на рисунке 2.8. Зональная скорость остается неизменной на уровне  $-60$  м/с между  $20^\circ$  ю.ш. и  $40^\circ$  ю.ш. Она постепенно увеличивается как к северу, так и к югу от этого диапазона широт. К югу, между  $40^\circ$  ю.ш. и  $60^\circ$  ю.ш., было обнаружено струйное течение (джет) с ускорением на  $2\text{--}4$  м/с. К югу от  $60^\circ$  ю.ш. средняя зональная скорость уменьшается до нуля к южному полюсу.

На большей части южного полушария средняя меридиональная скорость имеет положительный знак, что означает направление на север, к экватору. Однако это не относится к широтам севернее  $15\text{--}20^\circ$  ю.ш., поскольку меридиональный ветер, вероятно, меняет свой знак на отрицательный, а горизонтальный поток

меняется на южный полюс (примерно до  $5^\circ$  ю.ш.). В экваториальной области знак меридионального ветра резко меняется на положительный, и до  $10^\circ$  с.ш. горизонтальный поток возвращается к направлению на север.

Было обнаружено, что изменение знака 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. Несмотря на скудность данных в экваториальной области, эти изменения достаточно статистически значимы, чтобы уложиться в доверительный интервал 99%.



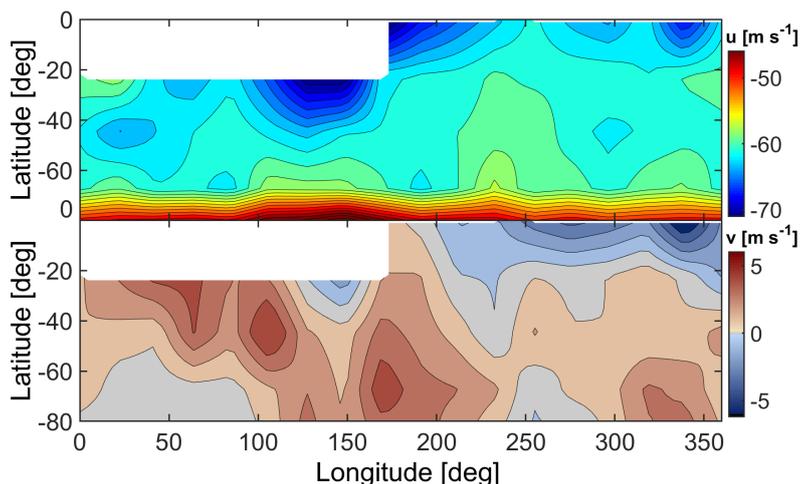
**Рисунок 2.8.** Средние профили зональной (a) и меридиональной (b) компоненты горизонтальной скорости ветра в нижнем облачном слое Венеры на ночной стороне по всем данным прибора VIRTIS-M. Средние значения были рассчитаны для широтных ячеек  $2,5^\circ$ . Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%.

## ***2.6 Зависимость средней скорости ветра от долготы***

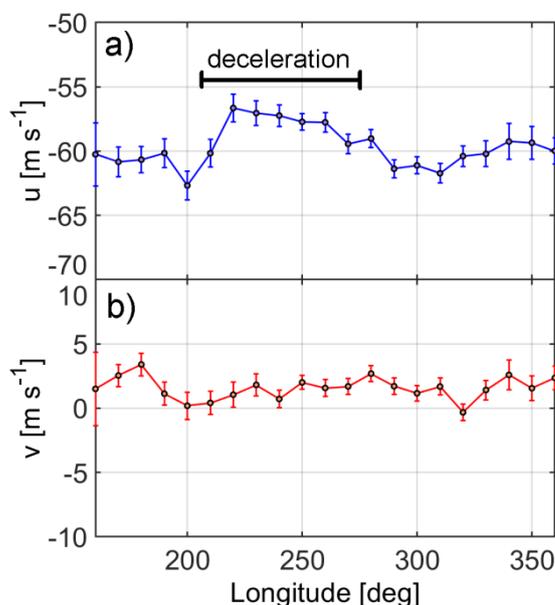
В отличие от упомянутого ранее влияния топографии на циркуляцию на верхней границе облачного слоя, это же влияние в нижнем облачном слое долгое время не исследовалось. Результаты анализа изображений камеры IR2 на борту КА «Акацуки» не показали никакого влияния топографии, поскольку их вариации скорости ветра с долготой не могут быть отделены от эффектов влияния местного времени (Peralta et al., 2018). Для данных VIRTIS-M отделение влияния долготы от влияния местного времени представляет ту же проблему. Распределение средней скорости ветра (рисунок 2.9) показывает, что вариации присутствуют по всему южному полушарию.

Сильное ускорение до  $-70$  м/с зонального ветра над равнинами к югу от Земли Афродиты является наиболее заметной особенностью распределения зонального ветра, однако данные в этой области состоят всего из 10–50 векторов на ячейку  $10^\circ \times 10^\circ$ . Область самого медленного среднего зонального ветра (до  $-58$  м/с) находится в средних широтах между  $210^\circ$  и  $260^\circ$  долготы (здесь и далее – в.д.), что соответствует координатам вулканической Области Имд (Imdr Regio) на поверхности. Меридиональная скорость в средних широтах близка к нулю на долготах  $220^\circ$ – $350^\circ$ , тогда как на  $40^\circ$ – $200^\circ$  она может достигать 5–6 м/с в направлении к экватору.

На Рисунке 2.10 более подробно рассматривается поведение зонального ветра в средних широтах. Здесь особый интерес представляют изменения скорости ветра в интервале долгот  $40^\circ$ – $50^\circ$  ю.ш. От  $180^\circ$  на восток зональная скорость замедляется с  $60,9 \pm 0,2$  м/с (среднее значение для широтной полосы  $40^\circ$ – $50^\circ$  ю.ш.) до  $57,4 \pm 0,4$  м/с при  $220^\circ$ – $240^\circ$ , затем далее на восток ускоряется обратно до среднего значения при долготе около  $300^\circ$ . Важно отметить, что среднее местное время векторов в вышеупомянутом диапазоне широты и долготы почти не изменяется (не более 0,5 ч между любыми интервалами  $10^\circ \times 10^\circ$ ), поэтому влияние местного времени, связанное с вариациями, описанными в разделе «Зависимость от местного времени», исключается. Меридиональная скорость ветра не проявляет никаких существенных вариаций в этом интервале широт.



**Рисунок 2.9.** Долготно-широтное распределение зональной (а) и меридиональной (б) скорости ветра по данным VIRTIS-M, обозначенное изолиниями.



**Рисунок 2.10.** Долготные профили (160–360°) зональной (а) и меридиональной (б) скорости ветра в диапазоне широт 40°–50° ю.ш. Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%. Выделена область, где зональная скорость имеет аномально низкие (по модулю) значения.

## 2.7 Обсуждение

Результаты этого исследования в средних значениях скоростей соответствуют предыдущим исследованиям (Sánchez-Lavega et al., 2008; Hueso et al., 2012) в пределах стандартной ошибки. Подтверждается увеличение меридиональной скорости с востока на запад, а также ускорение зональной

скорости в средних широтах. Однако увеличение количества анализируемых данных благодаря накопленной статистике и методам обработки позволило более подробно рассмотреть циркуляцию нижнего облачного слоя, выделив зависимости от местного времени, широты и долготы, которые ранее не были обнаружены.

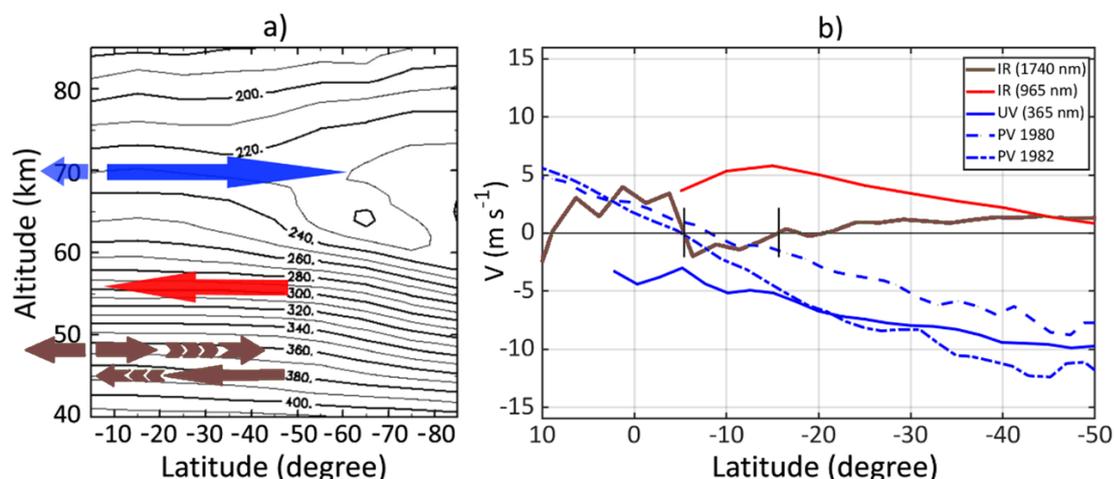
Обнаруженное замедление зонального потока в нижнем облачном слое от вечернего к утреннему терминатору согласуется с результатами измерения скорости ветра на верхней границе облачного слоя на дневной стороне, где скорость возрастает от утра к вечеру (Khatuntsev et al., 2013). На дневной стороне ускорение происходит благодаря поглощению 50% солнечной энергии неизвестным УФ-поглостителем, что приводит к генерации термических приливов, за счет чего момент передается как вверх, так и вниз от области генерации. Аналогичное замедление было предложено для среднего облачного слоя по наблюдениям в ближнем ИК-диапазоне на дневной стороне (Khatuntsev et al, 2017), хотя оно было и менее выраженным, чем на ночной стороне – до 2 м/с, что близко к пределам погрешности.

Меридиональная циркуляция организована в виде ячеек Хэдли. Теория предполагает существование нескольких прямых и обратных ячеек (Gierasch et al., 1997), однако экспериментально до сих пор была подтверждена только одна прямая ячейка, которая находится в верхнем облачном слое (Khatuntsev et al, 2013). Модели общей циркуляции (GCM) допускают существование в нижнем облачном слое даже нескольких ячеек меридиональной циркуляции (Sugimoto et al, 2019). Детальные УФ-наблюдения камеры VMC «Венеры-Экспресс», PVOUVS «Пионер-Венеры», УФ камеры КА «Маринер-10» и наземные наблюдения показали ветвь, направленную к южному полюсу на верхней границе облаков (68–72 км, Limaue et al., 2007), а по наблюдениям VMC в видимом диапазоне (513 нм) вблизи нижней границы верхнего облачного слоя – нижней ветви направленной к экватору прямой ячейки (Khatuntsev et al., 2022). По ИК наблюдениям VMC вблизи верхней границы среднего облачного слоя найдена направленная к экватору верхняя ветвь возвратной ячейки (Khatuntsev et al, 2017; Machado et al., 2017; Gonçalves et al., 2020).

Следует отметить, что наблюдения разных атмосферных слоев в одном спектральном диапазоне в многократно рассеивающей среде Венеры очень сложны и удаются только в некоторых исключительных случаях. Например, когда два зональных потока движутся навстречу друг другу: один к полюсу, другой к экватору, отличающиеся значением зональной скорости. В реальности – это один и тот же поток, измеряемый в одном фильтре, одновременно в двух широтных интервалах. В таком случае на определенной широте одновременно с изменением знака меридиональной скорости изменяется и величина зональной скорости.

Как обсуждалось ранее, наблюдение двух меридиональных потоков, движущихся навстречу друг другу на север и юг от  $20^\circ$  ю. ш., означает, что наблюдаются уровни на разных высотах в облаках. Некоторую ясность добавляет анализ изменения зональной скорости ветра в широтных интервалах, где меридиональная скорость меняет направление. Согласно широтному профилю (Рисунок 2.8а) были выбраны два соседних диапазона широт, где средняя меридиональная скорость направлена к экватору:  $20^\circ - 40^\circ$  ю. ш. и к полюсу:  $3^\circ - 20^\circ$  ю. ш. Затем была рассчитана средняя зональная скорость для обоих диапазонов, которая оказалась равной  $-60,3$  и  $-61,8$  м/с соответственно, со стандартной ошибкой каждого значения, не превышающей  $0,9$  м/с. Принимая во внимание, что расчетный вертикальный сдвиг в нижних облаках составляет  $2 \text{ м с}^{-1} \text{ км}^{-1}$  (Khatuntsev et al., 2017), делается предположение, что слой в экваториальной области расположен примерно на  $2-4$  км выше ( $48-50$  км), чем слой с положительной меридиональной скоростью ( $44-46$  км). Более высокий уровень имеет отрицательную меридиональную скорость, и горизонтальный поток движется к Южному полюсу, тогда как на широтах  $20^\circ-40^\circ$  ю.ш., на нижнем уровне, меридиональная скорость положительна, и горизонтальный поток движется к экватору. Предполагается, что здесь наблюдались два фрагмента прямой ячейки Хэдли нижнего облачного слоя: ветвь, направленная к южному полюсу, расположенная на высоте  $48-50$  км, и обратная ветвь к экватору — на высоте  $44-46$  км. Таким образом, эти два фрагмента можно рассматривать как фрагменты второй прямой ячейки Хэдли теперь уже в нижнем облачном слое, наблюдаемой на длине волны  $1,74$  мкм. Это

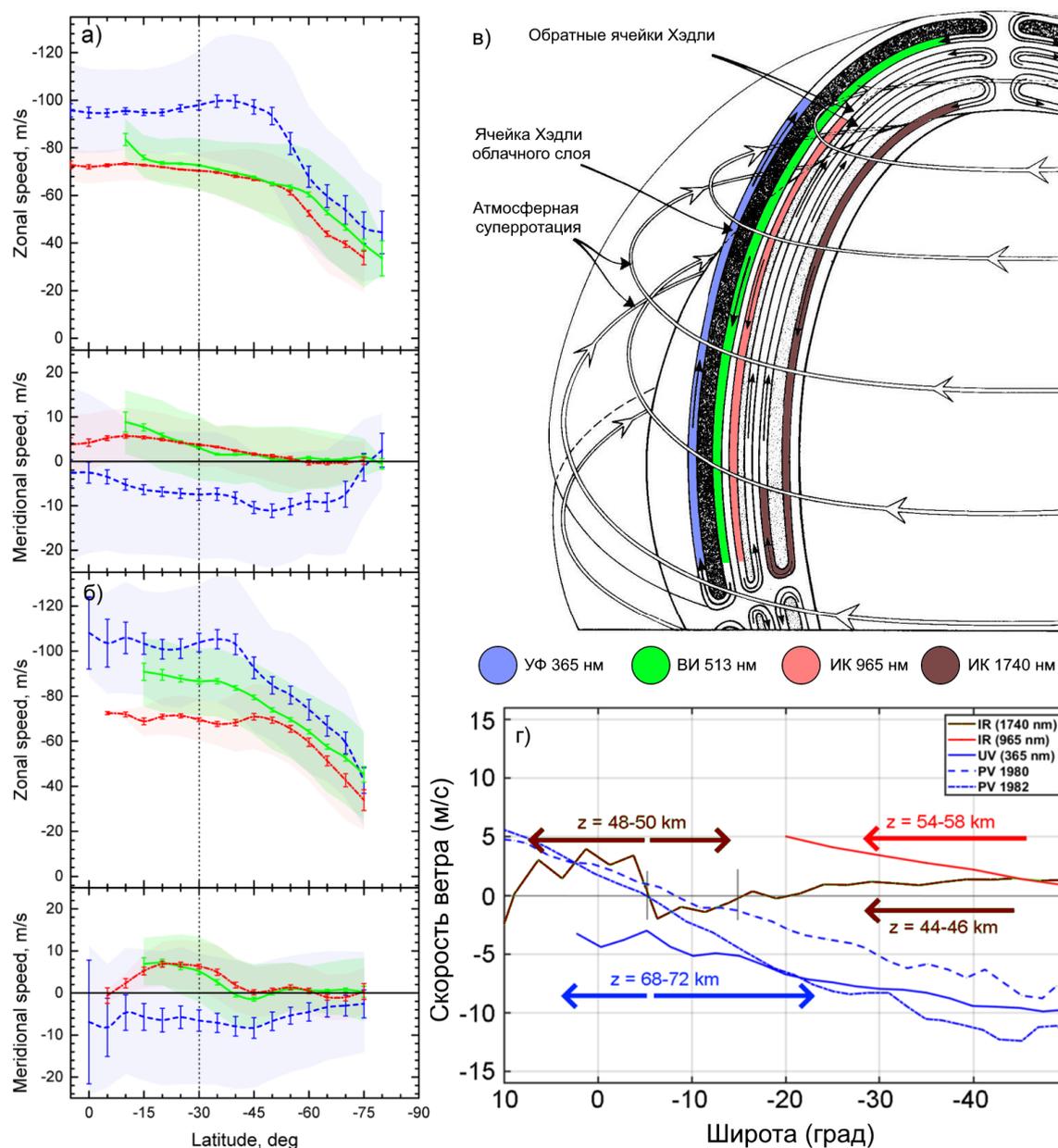
предположение также подтверждается существованием среднеширотного струйного течения (джета) на  $40\text{--}60^\circ$  ю.ш. (рисунок 2.8а), связанного с прямой ячейкой Хэдли нижнего облачного слоя.



**Рисунок 2.11.** (а) Направление среднего меридионального ветра на разных высотах (стрелки), наложенное на термическую структуру атмосферы в координатах широта-высота из объединенных результатов радиозатменных экспериментов «Венеры-Экспресс» и «Акацуки», усредненных по обоим полушариям (Ando et al., 2020). Знак широты здесь изменён на отрицательный, чтобы адаптировать рисунок к Южному полушарию. Числа на изолиниях указывают температуру в К. Широты представляют одновременно оба полушария, предполагая симметрию север-юг. Термическая структура используется для иллюстрации, чтобы обозначить различные уровни в Южном полушарии. Синие стрелки представляют результаты измерения скорости ветра в УФ-диапазоне по PVOUVS и VMC, красная стрелка: в ИК-диапазоне по VMC, коричневые стрелки: в ИК-диапазоне 1,74 мкм по VIRTIS. Пунктирные зеленые стрелки указывают ветви ячеек Хэдли, которые не наблюдаются экспериментально. (б) Широтные профили среднего меридионального ветра  $v$ ; цвета линий соответствуют таковым в (а), типы линий соответствуют легенде. Две вертикальные линии, расположенные на оси нулевой скорости, ограничивают интервал широт измерения скоростей ветра на 1,74 мкм (коричневая линия), где меридиональный ветер становится направленным к южному полюсу.

Результаты Главы 2 были сравнены с измерениями скорости ветра на других длинах волн на дневной стороне по УФ (VMC/«Венера-Экспресс» (Khatuntsev et al, 2013) и двум профилям «Пионер-Венеры» за два разных года наблюдений (Limaye et al., 2007)) и ИК (VMC/«Венера-Экспресс» (Khatuntsev et al, 2017)) (рисунок 2.11). Синие стрелки на рисунке 2.11a показывают направление меридионального потока в Южном (направление на Южный полюс) и Северном (направление на Северный полюс) полушариях на верхней границе облаков в полярной ветви ячейки Хэдли верхних облаков (на высоте 70 км). Обратный поток к экватору находится на высоте около 54–58 км в средних облаках и показан красной стрелкой. Результат, полученный в 1,74 мкм, показан зеленым цветом и состоит из 3 стрелок: 1) поток в направлении экватора к югу от 20° ю.ш., где направление совпадает с красной стрелкой; 2) поток, направленный на Южный полюс от 20° ю.ш. к экватору, где направление совпадает с синей стрелкой в Южном полушарии; 3) поток, направленный на Северный полюс от экватора до 10° с.ш., где направление совпадает с синей стрелкой в Северном полушарии, например, с направлением зонального ветра на верхней границе облаков в Северном полушарии.

Таким образом, зеленые стрелки указывают на фрагменты прямой ячейки Хэдли нижнего облака и симметричную ячейку Хэдли нижнего облака в Северном полушарии. От экватора и до 10° с.ш. (данные VIRTIS по динамике для более высоких северных широт отсутствуют) меридиональный ветер меняет знак на положительный; горизонтальный поток меняет направление в сторону Северного полюса. На этих широтах горизонтальный поток в сторону Северного полюса, вероятно, соответствует ветви прямой ячейки Хэдли северного полушария. Визуализация возможного расположения наблюдаемых ячеек Хэдли показана на Рисунке 2.12.



**Рисунок 2.12.** 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» из Рисунка 2.11b.

Появление среднеширотного струйного течения («джета»), наблюдаемого на верхней границе облаков, может быть связано с ячейкой циркуляции Хэдли, что предсказывается моделями (Yamamoto et al., 2016). В нижнем облачном слое джет, обнаруженный между  $40^\circ$  и  $60^\circ$  ю.ш., также может быть вызван циркуляцией Хэдли. Это также может косвенно указывать на наблюдение фрагментов прямой ячейки Хэдли. Поэтому описанные выше особенности повторяют особенности, обнаруженные в поведении верхнего облачного слоя.

Результаты Главы 2 можно сравнить с существующими моделями общей циркуляции. Модель AFES-Venus (Takagi et al., 2018) показала замедление зонального ветра от вечернего до утреннего терминатора на высоте 50 км, аналогичное наблюдениям VIRTIS-M (Рисунок 2.5). Зависимость от местного времени для меридиональной скорости также имеет сходство, поскольку движение к полюсу обнаруживается до полуночи, а к экватору – после полуночи. Увеличение зональной скорости в нижнем облачном слое в виде струйного течения («джета») вблизи экватора и в средних широтах было показано моделью T63 (Yamamoto et al., 2021). Долготные вариации также были продемонстрированы этой моделью на высоте  $\sim 54$  км (Yamamoto et al., 2019). Несмотря на то, что общее поведение скорости ветра в модели не совпадает с результатами Главы 2 (рисунок 2.9), было обнаружено, что модельная меридиональная скорость показывает большую переменчивость по сравнению с зональной скоростью.

Обнаруженные долготные изменения во многих случаях сопоставимы по величине с суточными изменениями (до  $\pm 5$  м/с). Более того, поиск влияния топографии на циркуляцию является сложной задачей, поскольку надирные данные VIRTIS-M не покрывают выдающиеся возвышенности, такие как Земля Афродиты, а скорее несколько более мелких, самая высокая из которых — Земля Лады (Lada Terra) (имеет высоту до  $\sim 3$  км и расположена на  $65\text{--}75^\circ$  ю.ш./ $320\text{--}30^\circ$  в.д.). Замедление зональной скорости, обнаруженное в координатах Области Имд,

превышает любые возможные вариации от местного времени, однако другие возвышенности, такие как Земля Лады (центр на  $60^\circ$  ю.ш./ $20^\circ$  в.д.), Область Фемиды ( $40^\circ$  ю.ш./ $280^\circ$  в.д.) и Область Альфа ( $22^\circ$  ю.ш./ $5^\circ$  в.д.), не проявляют никаких признаков влияния на циркуляцию.

Область Имд – вулканическая, с разнообразными потоками базальтовой лавы и избыточным тепловым излучением по сравнению с окружающим рельефом (D’Incecco et al., 2020). Характер тектонических разломов вокруг вулкана Идунн (Idunn Mons) Области Имд указывает на чрезвычайно молодой геологический возраст (до 1000 лет при среднем возрасте поверхности  $\sim 5 \times 10^8$  лет), что также подкрепляется измерениями изменений спектральных свойств оливина и других породообразующих материалов по данным VIRTIS-M на длине волны 1 мкм (D’Incecco et al., 2021; Filiberto et al., 2025). Моделирование показывает, 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. Таким образом, наблюдаемое замедление потока может быть ещё одним косвенным признаком современной вулканической активности Венеры.

## **2.8 Выводы по 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  $2 \text{ м с}^{-1} \text{ км}^{-1}$  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 в настоящей работе 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») (Limaye 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  $20^\circ$  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 (волн плавучести) при обтекании потоком в подоблачном слое тепловой аномалии от вулканического пюма.

### Глава 3. Циркуляция нижнего облачного слоя Венеры по результатам миссии «Акацуки»

#### 3.1 Обзор исследований динамики нижнего облачного слоя Венеры КА «Акацуки»

После окончания проекта «Венера-Экспресс» следующим и последним на сегодняшний день космическим аппаратом у Венеры был орбитальный аппарат Японского космического агентства (JAXA) «Акацуки» (Akatsuki). Запущенный в мае 2010 года, аппарат не сумел выйти на запланированную орбиту в декабре из-за нештатной работы маневровых двигателей. После 5 лет нахождения на орбите Солнца аппарат удалось вернуть на экваториальную орбиту Венеры в декабре 2015 года (Nakamura et al., 2016). Период «новой» орбиты «Акацуки» – около 10 суток, с высотой перицентра 1000-8000 км и апоцентра – 360000 км. Научная аппаратура КА состоит из комплекса камер для мониторинга облачного покрова Венеры в различных спектральных диапазонах.

Инфракрасная камера IR2 предназначена для изучения свойств атмосферы в глубине облачного покрова на ночной стороне. Она оснащена тремя узкими фильтрами с центрами на 1,74, 2,26 и 2,32 мкм, а также одним на 2,02 мкм для дневной стороны (Sato et al., 2016). Размер матрицы – 1024×1024 пикселя, что означает в 16 раз большее количество точек на изображение, чем у спектрометра VIRTIS.

В настоящей работе анализируется полный набор данных (изображений облачного покрова Венеры в окне прозрачности) канала 1,74 мкм IR2 для прямого сравнения с результатами работы канала 1,74 мкм VIRTIS-M (Глава 2).

Преыдушие, частичные, анализы данных IR2 показали существование экваториального «джета» в нижнем облачном слое, с широтным профилем зональной скорости ветра, близким к профилю вращения твёрдого тела (сферы). При этом максимальная скорость на экваторе достигала 80 м/с, что на 20 м/с быстрее, чем по данным VIRTIS (Horinouchi et al., 2017; Peralta et al., 2018). Это резко контрастировало с наблюдениями VIRTIS, которые не обнаруживали

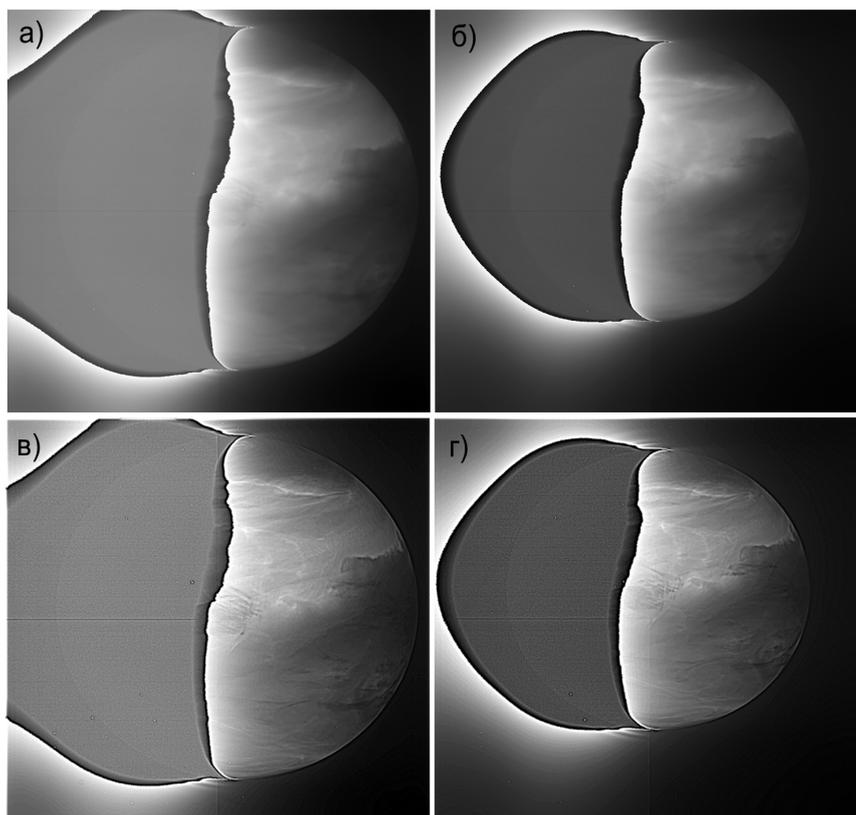
экваториального джета. Предложенное объяснение состояло в том, что концентрация  $\text{SO}_2$  (газа вулканического происхождения) меняется со временем на масштабах лет и влияет на непрозрачность облаков, таким образом, в разное время на одной и той же длине волны прибор зондирует разные высоты.

### ***3.2 Источники данных и методы***

Изображения были получены за период с 22 марта 2016 (орбита №11) по 27 октября 2016 года (орбита №30). Камера IR2 прекратила работу в конце 2016 года из-за неполадок в работе блока электроники, регулирующего её функционирование.

С помощью ручного метода обработки изображений (того же, которым обрабатывались изображения VIRTIS) было получено 19558 векторов горизонтальной скорости за всё время наблюдений. Но благодаря большому размеру детектора и размеру наблюдаемой на снимках области стала возможной и обработка автоматическим корреляционным методом, ранее успешно применённого к обработке изображений камеры VMC КА «Венера-Экспресс» на дневной стороне Венеры (Patsaeva et al., 2015). С его помощью за всё время наблюдений было получено 52338 векторов скорости. Ручной метод не только верифицирует автоматический, но и дополняет его, поскольку 1) на части изображений видимый диск Венеры относительно мал, и корреляционный метод не подходит для их анализа – в этих случаях использовался только ручной метод; 2) автоматический метод не работает для краёв видимого диска планеты – для этих областей данные брались из результатов ручных измерений.

Для усиления контраста, так же, как и изображения VIRTIS, изображения IR2 обрабатывались вейвлет-фильтрами (Рисунок 3.1).



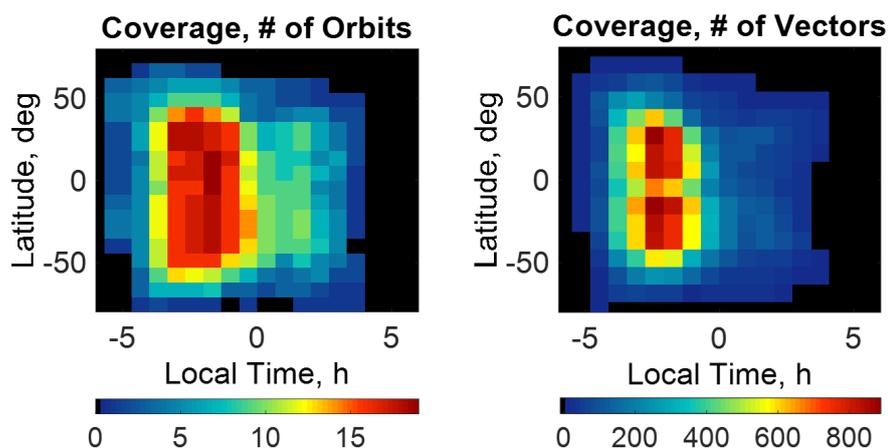
**Рисунок 3.1.** а, б) Пример двух последовательных изображений камеры IR2 в канале 1,74 мкм, снятых 5 сентября 2016 года. Временной интервал между изображениями а) и б) составляет 2 часа. в, г) Те же изображения после применения к ним вейвлет-фильтра для усиления контраста.

Временное распределение данных IR2 в канале 1,74 мкм приведено в Таблице 3.1. Изображения снимались неравномерно: 48% подходящих пар изображений были получены за август 2016 г., в то время как маем не датировано ни одного изображения. Общее количество векторов скоростей, полученных автоматическим методом, превышает таковое для ручного метода в 2,6 раза. Автоматический метод позволяет получить больше векторов, поскольку работает с «окнами корреляции» на декартовой сетке, количество которых может быть ограничено только вычислительными возможностями, в то время как ручной метод перцептивно и эвристически ограничен количеством видимых глазом градиентных облачных особенностей.

**Таблица 3.1.** Данные прибора IR2, используемые для расчёта скоростей ветра в канале 1,74 мкм.

Месяц (2016 года)	Пары изображений	Кол-во векторов (ручной метод)	Кол-во векторов (автоматический метод)
Март	15	592	650
Апрель	5	2623	2936
Май	0	0	0
Июнь	1	77	0
Июль	17	3695	6703
Август	69	8033	30439
Сентябрь	32	3750	9137
Октябрь	11	1275	2473
<b>ИТОГО</b>	<b>143</b>	<b>20045</b>	<b>52338</b>

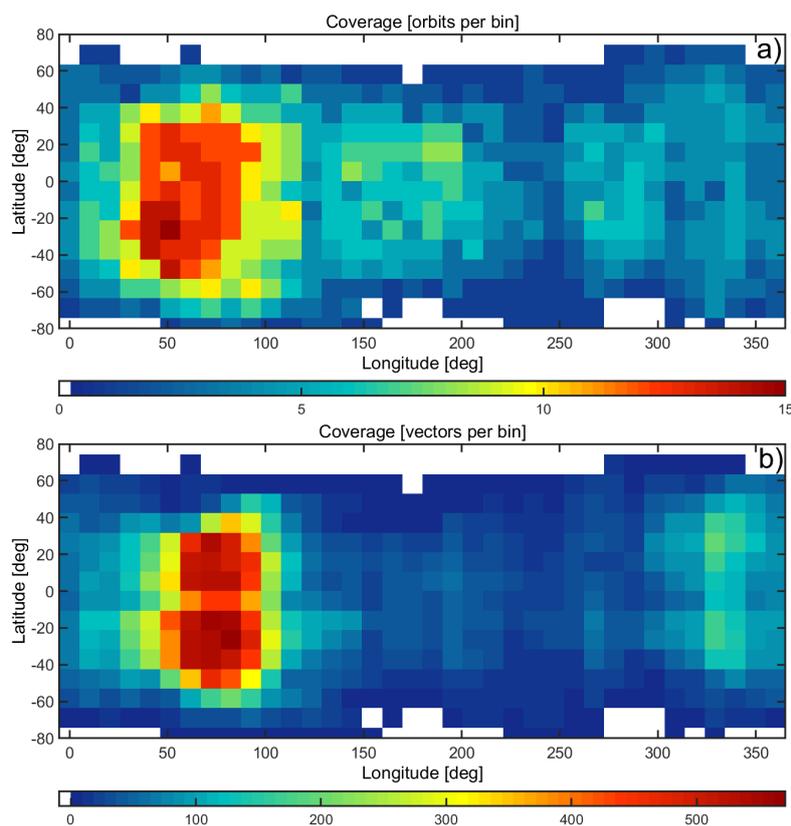
Благодаря наклонению орбиты КА «Акацуки», близкому к экваториальному, полученные изображения ночной стороны охватывают северное и южное полушария в равной степени. По покрытию местного времени, однако, существует сильная асимметрия: 86% всех векторов расположены до полуночи, и 14% - после (Рисунок 3.2).



**Рисунок 3.2.** Покрытие ночной стороны Венеры векторами скорости, полученными в результате анализа 1,74 мкм изображений IR2, в координатах местное время – широта. Данные разбиты на ячейки 40 мин × 10°. (а): количество

орбит (на ячейку), в которых были пригодные для анализа изображения. (b): количество векторов (на ячейку), полученных в общей сложности.

Временной интервал между первым и последним изображениями IR2, по которым можно рассчитать скорости ветра, составляет 214 дней, что немного короче одного венерианского года (225 дней). Полученная база данных векторов скорости ветра охватывает все долготы, однако распределение очень неравномерное: почти половина (49%) всех векторов расположена между 50 и 100° долготы. Для сравнения, только 6% расположены между 150 и 250° (Рисунок 3.3). Короткий срок работы IR2 не позволил измерить скорость ветра на одних и тех же долготах в течение нескольких венерианских лет, что естественным образом привело к увеличению погрешности усреднения.



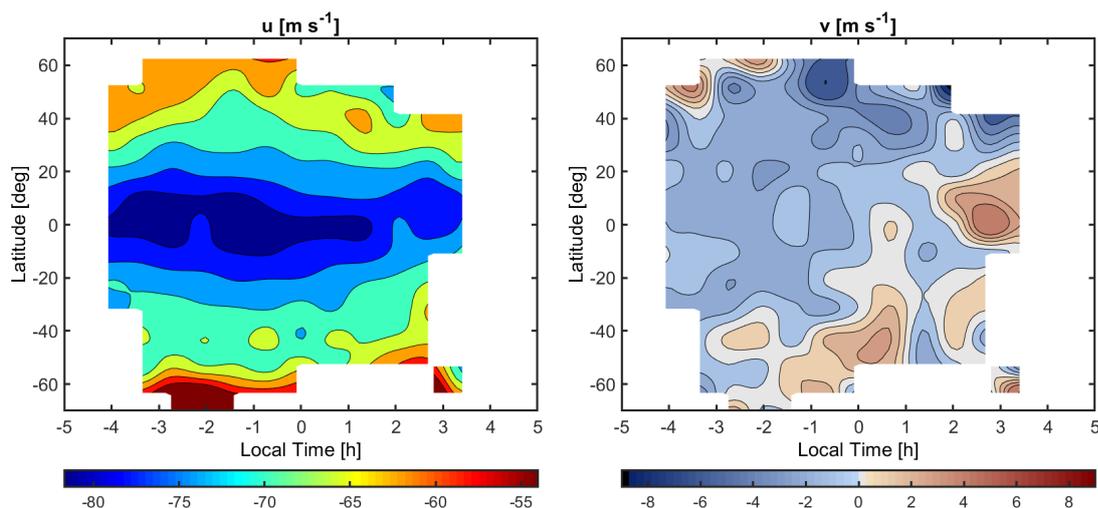
**Рисунок 3.3.** Покрытие ночной стороны Венеры векторами скорости, полученными в результате анализа 1,74 мкм изображений IR2, в координатах долгота – широта. Данные разбиты на ячейки  $10^\circ \times 10^\circ$ . (a): количество орбит (на ячейку), в которых были пригодные для анализа изображения. (b): количество векторов (на ячейку), полученных в общей сложности.

### 3.3 Зависимость средней скорости ветра от широты, местного времени и долготы

Распределения средней зональной и меридиональной скорости ветра в координатах местное время-широта приведены на рисунке 3.4. Средние значения зональной скорости ветра показывают существенное отличие от наблюдавшихся в 2006–2008 по данным VIRTIS. Средняя зональная компонента скорости ветра достигает максимальных значений в районе экватора, на  $0-10^\circ$  – до  $-78$  м/с, что на  $18$  м/с превышает аналогичное значение для VIRTIS (30%-е ускорение). Форма широтного профиля также существенно отличается от результатов VIRTIS (Рисунок 3.5). Значения зональной скорости согласуются между двумя экспериментами только на широтах  $50-55^\circ$ .

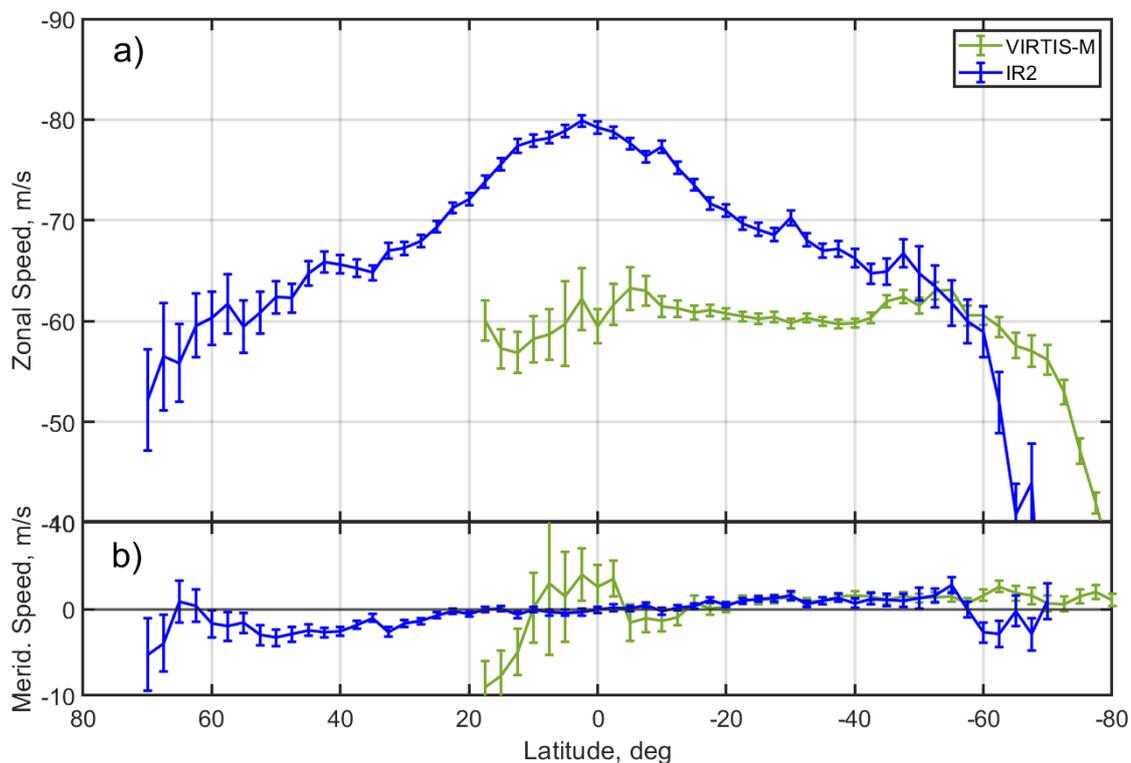
Также, как и для результатов VIRTIS, наблюдаются вариации зональной скорости в зависимости от местного времени. На всех широтах, в том числе и в северном полушарии, происходит замедление зонального потока от вечернего к утреннему терминатору. Величина такой вариации может достигать  $10$  м/с.

В пределах широт  $20-60^\circ$  в северном полушарии меридиональная скорость отрицательна (направление к экватору) и составляет от  $-1$  до  $-4$  м/с, а зональная – от  $-60$  до  $-70$  м/с.



**Рисунок 3.4.** Средняя зональная (а) и меридиональная (б) скорость ветра в нижнем облачном слое в зависимости от местного времени и широты по данным IR2. На рисунке 3.4b области с отрицательным знаком меридиональной скорости (синий

цвет) означают направление на юг, с положительным знаком (красный цвет) – на север.



**Рисунок 3.5.** 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 (Рис. 2.8), обозначенные зелёным цветом. Зоны погрешности указывают стандартную ошибку для доверительного интервала 99%.

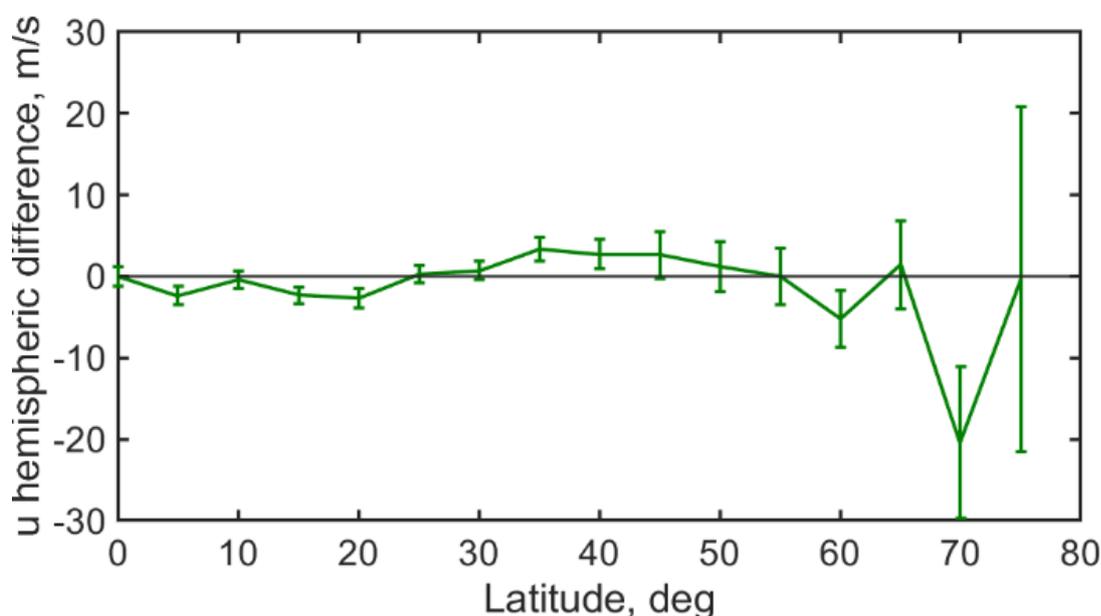
В экваториальной области ( $0 \pm 20^\circ$ ), где наблюдаются максимальные зональные скорости (т.н. «экваториальный джет»), меридиональные скорости в  $1,74$  мкм близки к нулю, указывая на движение потока вдоль экватора.

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).

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.

Экваториальная орбита КА «Акацуки» позволяет сравнивать динамику атмосферы северного и южного полушария по одновременным наблюдениям. По среднему широтному профилю зональной скорости наблюдается асимметрия север-юг, однако она проявляется по-разному в зависимости от широты. 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.



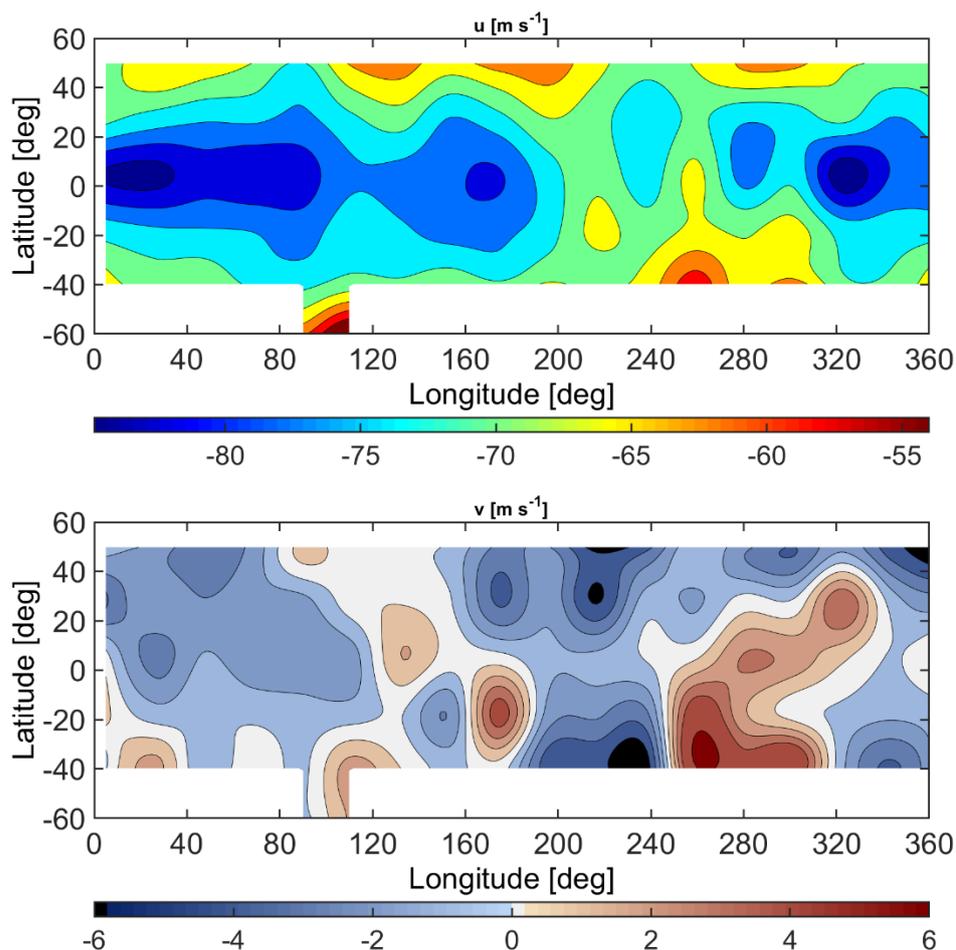
**Рисунок 3.6.** Разность средних значений скоростей в нижнем облачном слое на ночной стороне между двумя полушариями Венеры для одних и тех же значений широты (вычет значений южного полушария из значений северного). Знак «+» означает, что скорость ветра на данной широте по модулю выше в северном полушарии, чем в южном.

Разница скоростей в пользу южного полушария в высоких широтах может быть объяснена замедлением потока над Землёй Иштар (Ishtar Terra), расположенной в северном полушарии. Однако аналогичная разница наблюдается и в низких широтах, но главное экваториальное высокогорье – Земля Афродиты – находится южнее экватора.

Разница в скоростях ветра между северным и южным полушарием в нижнем облачном слое была предсказана ранее моделями общей циркуляции (Lebonnois et al., 2018) и объяснена неодинаковостью рельефа поверхности на севере и юге. Глобальная асимметрия север-юг характерна для Земли и Марса, что также объясняется разностью рельефа (Taylor, 2010). Тем не менее, газовые гиганты, не имеющие твёрдой поверхности, также имеют асимметрию север-юг, проявляющуюся в широтных профилях скорости ветра (Kaspi et al., 2020). Наиболее вероятным объяснением этого эффекта является асимметрия гравитационного поля газовых гигантов, обнаруженная в случае Юпитера измерениями с борта КА «Юнона» (Juno).

В данных IR2 не обнаружено смены знака меридиональной скорости на  $10^\circ$  с.ш., как это наблюдалось в данных VIRTIS, что подтверждает непостоянство условий наблюдения фрагментов ячейки Хэдли, либо говорит о том, что в двух экспериментах наблюдаются разные высотные слои.

По данным IR2 была также проанализирована долготная зависимость скорости ветра. Данные покрывают только один венерианский год (Рисунок 3.3), поэтому несмотря на покрытие векторами всех долгот величина ошибки усреднения существенна. При усреднении всех данных наблюдаются значительные вариации зональной и меридиональной компоненты скорости ветра, иногда превышающие таковые от местного времени (Рисунок 3.7). Модуль зональной скорости ветра на экваторе может меняться от 80–85 м/с на «долготах Области Афродиты» и западнее ( $320-100^\circ$ ) до 70 м/с на  $200-270^\circ$ . Меридиональная скорость в основном направлена к экватору (синие области в северном полушарии и красные – в южном), однако в северном полушарии направление течения меняется на противоположное на долготах  $250-330^\circ$ , а в южном – на  $320-120$  и  $190-250^\circ$ .



**Рисунок 3.7.** Долготно-широтное распределение зональной (а) и меридиональной (б) скорости ветра по данным IR2, обозначенное изолиниями. На рисунке 3.7б области с отрицательным знаком меридиональной скорости (синий цвет) означают направление на юг, с положительным знаком (красный цвет) – на север.

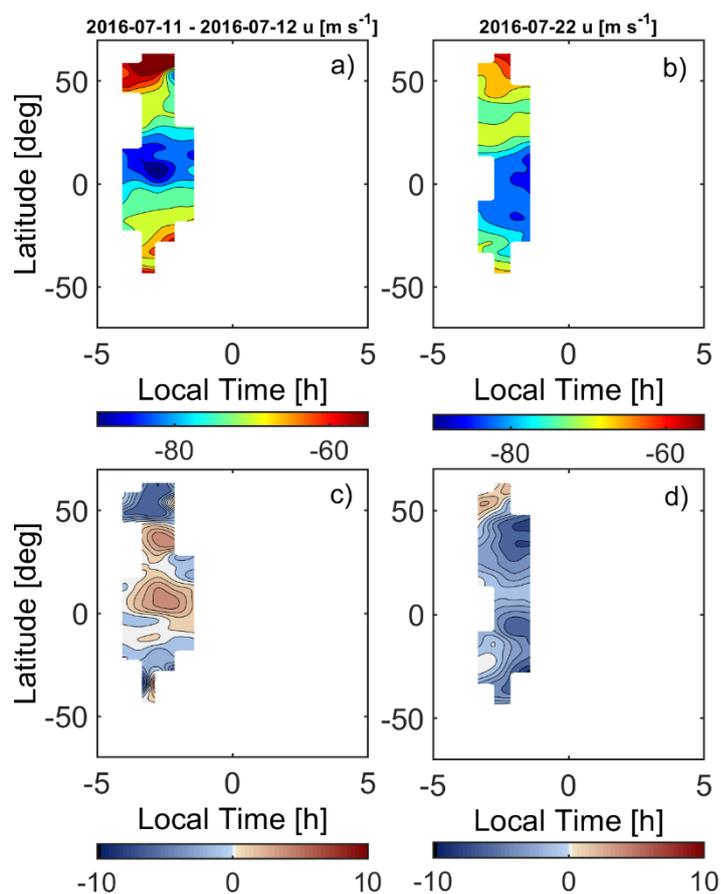
### ***3.4 Короткопериодические вариации скорости ветра в нижнем облачном слое***

Из-за особенностей орбиты аппарата «Акацуки» последовательности изображений в рамках одной орбиты отделены друг от друга «пустыми» интервалами в 8–10 суток. Анализ вариаций между соседними орбитами показывает, что динамические свойства нижнего облачного слоя могут существенно изменяться за этот период.

На Рисунке 3.8 показан пример изменения векторного поля скоростей за интервал 10–11 суток между соседними наблюдениями. На обеих орбитах камера IR2 наблюдала одну и ту же область диска планеты по широте, долготе и местному

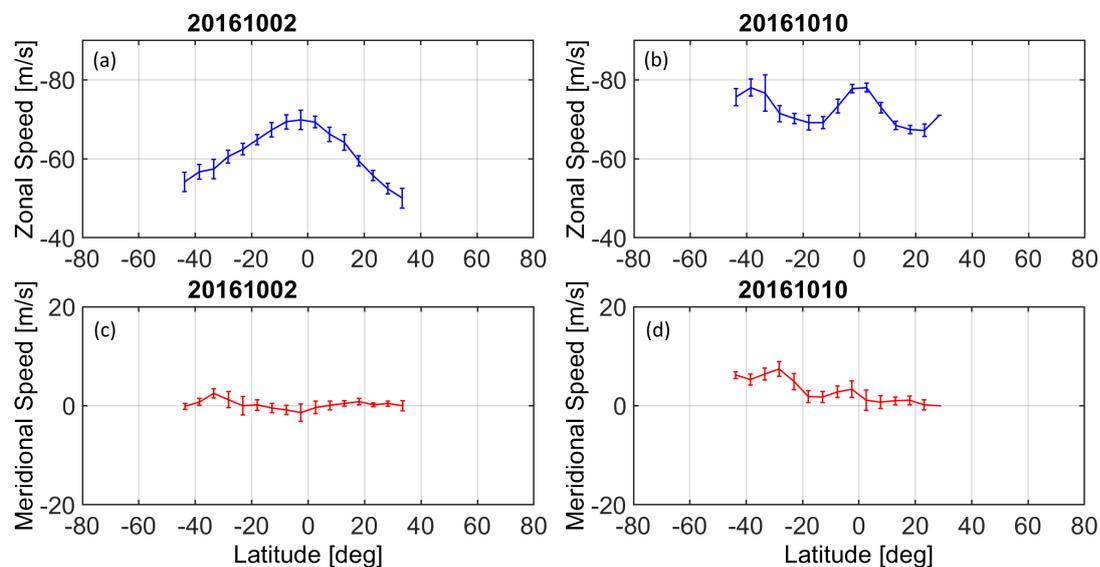
времени. Область наибольших (по модулю) зональных скоростей (синий цвет на рисунке) переместилась из широт северного полушария примерно на  $10^\circ$  южнее, одновременно расширившись в южные широты. Меридиональная скорость испытала ещё более значительные изменения. Будучи разнонаправленной, с преобладанием направления на север на первой орбите, на второй орбите она стала полностью направленной на юг.

На масштабе нескольких суток может изменяться не только положение максимума зональной скорости, но и форма широтного профиля. На Рисунке 3.9 показано сравнение широтных профилей скорости, разделённых интервалом 8 суток. На первой из двух орбит наблюдался широтный профиль, подобный усредненному по всем данным IR2: экваториальное ускорение потока до  $-70$  м/с и почти линейный спад к средним широтам. Спустя 8 суток форма профиля приобретает двойной максимум (каждый – около  $-78$  м/с).



**Рисунок 3.8.** Сравнение векторного поля скоростей в нижнем облачном слое Венеры 11–12 июля 2016 года (а – зональная компонента, с – меридиональная

компонента) и 22 июля 2016 года (b – зональная компонента, d – меридиональная компонента).



**Рисунок 3.9.** Сравнение широтных профилей зональной (a, b) и меридиональной (c, d) компонент скорости ветра в нижнем облачном слое Венеры 2 и 10 октября 2016 года.

### 3.5 Обсуждение

В Главе 3 было показано, что наблюдаемые зональные скорости ветра по изображениям в канале 1,74 мкм увеличились на ~30% в экваториальной области за 8–10 лет, на протяжении которых не было промежуточных измерений. Форма широтного профиля зональной скорости также претерпела существенные изменения, став более близкой к профилю вращения твёрдой сферы.

Вариации зональной скорости ветра на масштабах лет были обнаружены ранее на верхней границе облачного слоя Венеры. Из анализа изображений камеры ВМС КА «Венера-Экспресс» было обнаружено ускорение суперротации в период с 2006 по 2014 год (Khatuntsev et al., 2013). Позже была установлена корреляция ускорения зонального потока и фазы 12-летнего солнечного цикла (Khatuntsev et al., 2022) по объединённым данным УФ-экспериментов в проектах «Венера-Экспресс» и «Акацуки»: данные VIRTIS-M были получены в районе минимума солнечной активности, а IR2 (показывающие более высокие скорости на верхней границе облаков) – максимума. Одновременно с этим наблюдался рост поглощения

солнечной энергии в УФ диапазоне, что привело к усилению термических приливов и ускорению суперротации (Lee et al., 2020).

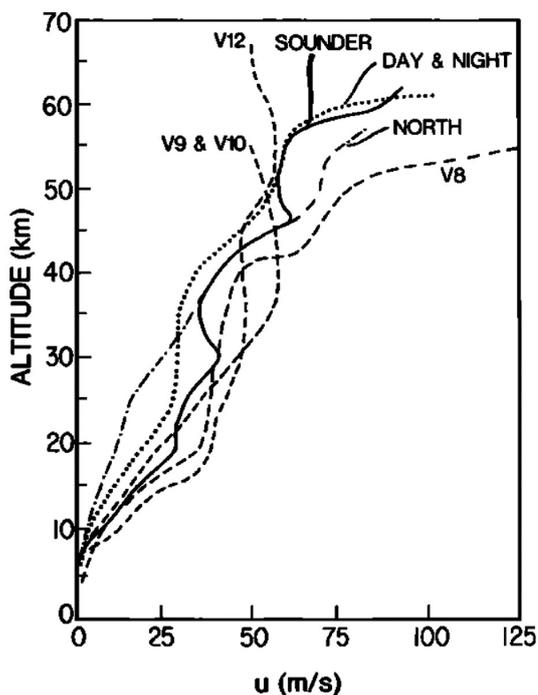
Для таких значительных вариаций скорости могут быть предложены несколько объяснений (или их комбинация). Их можно разделить на «инструментальные» и «природные».

Приборы VIRTIS-M и IR2 имеют разный принцип работы, и, как следствие, записывают научную информацию, соответствующую неодинаковым физическим характеристикам исследуемого объекта. VIRTIS-M представляет собой картирующий спектрометр, на матрицу которого записывается изображение в узких спектральных каналах шириной 2 нм. Расстояние между центрами каналов составляет 6–7 нм. IR2 же является камерой, матрица которой принимает интегрированное излучение в диапазоне (полосе пропускания) шириной 48 нм.

Таким образом, в спектральном диапазоне IR2 помещается около 7 узких каналов VIRTIS-M. В то время как VIRTIS-M способен измерять излучение вблизи центра «окна прозрачности» 1,74 мкм, IR2 сворачивает спектральную полосу с широкой функцией пропускания (Sato et al., 2016). Для анализа этого различия можно сравнить яркостные температуры, соответствующие измерениям в двух экспериментах. Для центра полосы 1,74 мкм среднее значение излучения составляет  $0,21 \text{ Вт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$  (Magurno et al., 2017). Соответствующая яркостная температура, рассчитываемая по обратной функции Планка, равна 475 К. Интегральное излучение в полосе пропускания IR2 приблизительно равно  $0,11 \text{ Вт м}^{-2} \text{ мкм}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ , что соответствует яркостной температуре 457 К. Разница между измерениями составляет 18 К, что при градиенте температуры 8–10 К/км (Засова и др., 2006) говорит о разнице высот наблюдаемых слоёв в 2 км и может объяснить разницу скоростей в 2–4 м/с, т.е. только часть от разницы в 15–20 м/с, наблюдаемой в экспериментах.

Известно, что для атмосферы Венеры характерны естественные вариации параметров атмосферы со временем. Так, например, на высоте 50 км данные спускаемых аппаратов от «Венеры-8» до «Пионер-Венеры» измеряли вариации

скорости ветра от -50 до -75 м/с, что очень близко по величине к наблюдаемому различию между результатами VIRTIS-M и IR2 (Рисунок 3.10).



**Рисунок 3.10.** Высотные профили горизонтальной скорости ветра по данным спускаемых зондов «Венера»-8, 9, 10, 12, «Пионер-Венера»-«День», «Ночь» и «Север», а также орбитального аппарата «Пионер-Венера» (Schubert et al., 1980).

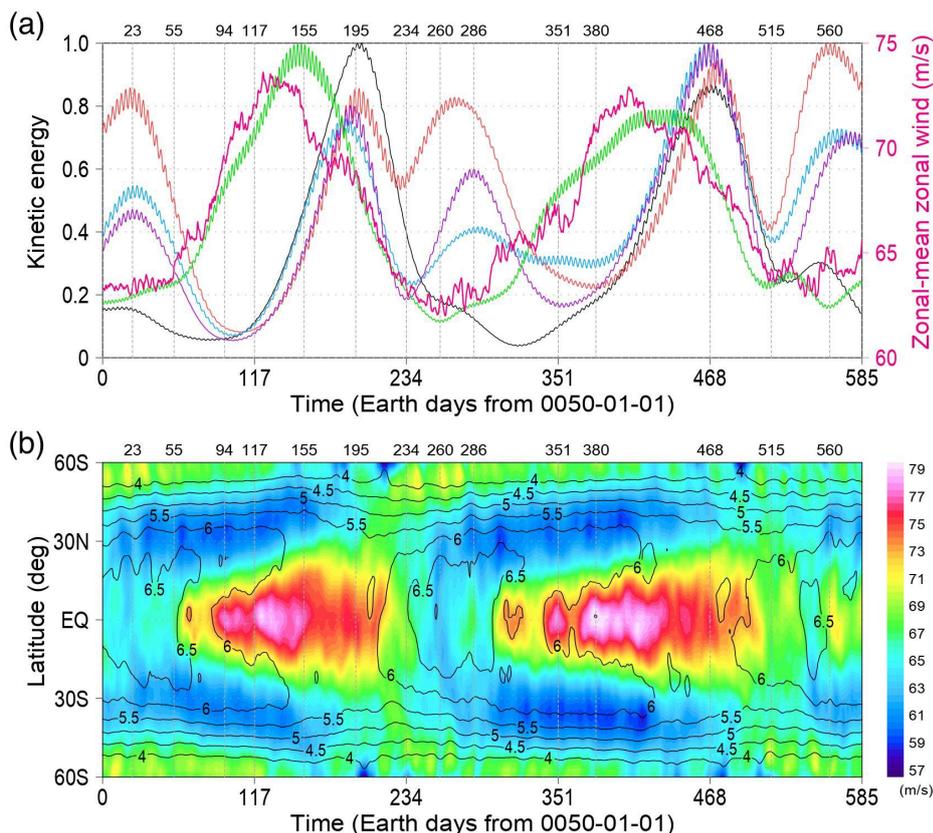
Следующие причины естественного характера могут объяснить разницу зональных скоростей между экспериментами:

1) Ускорение циркуляции зонального потока под воздействием волновых процессов. Фурье-анализ УФ изображений, полученных КА «Пионер-Венера», показал существование атмосферных волн с периодами 4 и 5 дней (Del Genio et al., 1990). 4-дневная волна (быстрее, чем период суперротации 4,7 дней) наблюдается на экваториальных широтах и идентифицируется как волна Кельвина. 5-дневная волна (медленнее, чем период суперротации) наблюдается на широтах выше  $20^\circ$  и идентифицируется как волна Россби. На границе влияния этих двух волн возникает т.н. неустойчивость Россби-Кельвина (НРК).

Неустойчивость Россби-Кельвина можно интерпретировать как резонанс между волной Кельвина и волнами Россби (Iga & Matsuda, 2005). В верхней атмосфере Венеры средний зональный ветер вращается медленнее в низких

широтах и быстрее в высоких широтах. Следовательно, хотя волна Кельвина движется на восток, а волны Россби движутся на запад относительно суперротации, волна Кельвина и волны Россби могут иметь одинаковую угловую зональную скорость. В результате возникает резонанс, в котором волна Кельвина и волны Россби взаимодействуют на определённой «критической» широте. В то же время угловой момент переносится к экватору, ускоряя суперротацию в низких широтах и замедляя в средних и высоких широтах.

В модели общей циркуляции AFES-Venus удалось воспроизвести несколько атмосферных волн (Takagi et al., 2022; 2023): 1) волна с периодом 3,3 дня на верхней границе облаков, возбуждаемая НПК, соответствующая 4-дневной волне; 2) волна с периодом 5,8 дня, также возбуждаемая НПК и соответствующая 5-дневной волне на верхней границе облаков, но проявляющаяся на разных широтах в зависимости от высоты; 3) 7-дневная волна в нижнем облачном слое, возбуждаемая волнами Россби. Наблюдаемый по данным IR2 в нижнем облачном слое экваториальный «джет» в модели возникает за счёт 5,8-дневной волны, и разрушается под действием 7-дневной волны (Рисунок 3.11). Суперпозиция этих двух волн может объяснить короткопериодические вариации, описываемые в разделе 3.4, включая форму широтного профиля. При этом зональная скорость на экваторе может изменяться на величину до 20 м/с за интервал около 100 дней.



**Рисунок 3.11.** Численное моделирование вариации зональной скорости ветра на Венере на высоте 54 км с помощью модели AFES-Venus (Takagi et al., 2023). (a) Временные вариации зонально и вертикально усредненной плотности кинетической энергии, усредненной по верхней экваториальной области (красная линия), по нижней экваториальной области (черная линия), по северной средне- и высокоширотной области (синяя линия) и по южной средне- и высокоширотной области (фиолетовая линия). Пурпурная и зеленая линии показывают временные вариации средней зональной скорости ветра на экваторе, усредненной по высотам 48–54 км (правая ось, м/с) и плотности кинетической энергии 5,8-дневной волны. Плотности кинетической энергии нормализованы по их максимальным значениям. (b) Зависимость среднего зонального ветра на высоте 54 км от времени и широты. Изолинии показывают период вращения среднего зонального ветра в сутках.

2) Наблюдение разных высот слоёв в разных экспериментах из-за изменения оптических параметров атмосферы. Поскольку не представляется возможным получить точную высотную привязку изображений облачного слоя, настоящая высота наблюдаемого слоя только лишь предполагается в определённом диапазоне.

В реальности оптическая толщина облачного слоя может претерпевать существенные изменения. Ранее было высказано предположение о том, что наблюдаемая высота может зависеть от обнаруженных ранее колебаний концентрации диоксида серы  $\text{SO}_2$ , имеющего в том числе и вулканическое происхождение (Marcq et al., 2012; Peralta et al., 2018). При увеличении оптической толщины на той же длине волны будут наблюдаться более высокие слои, что вследствие градиента скорости должно привести к наблюдению более высоких скоростей ветра, и наоборот. Учитывая упомянутый в Главе 2 вертикальный сдвиг скорости до  $1\text{--}2 \text{ м с}^{-1} \text{ км}^{-1}$  (Sánchez-Lavega et al., 2008) или  $2 \text{ м с}^{-1} \text{ км}^{-1}$  (Khatuntsev et al., 2017), можно предположить разницу наблюдаемых высот до 20 км между экспериментами VIRTIS и IR2.

3) Непостоянное поглощение атмосферой Венеры солнечного излучения из-за цикла солнечной активности. Долговременный тренд изменения зональной скорости ветра на верхней границе облаков, зависящий от солнечного цикла, был обнаружен в результате объединения данных VMC и УФ камеры UVI КА «Акацуки» (Patsaeva et al., 2019): на пике солнечной активности средняя зональная скорость ветра превышала таковую в минимуме на почти 20 м/с. При этом вариации значения УФ альbedo облаков антикоррелируют с трендом зональной скорости (Lee et al., 2020).

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.

Важно заметить, что наблюдаемые IR2 зональные скорости по величине находятся в пределах значений скоростей в области нижней границы верхнего облачного слоя (видимый канал VMC) и верхней границы среднего облачного слоя (ИК канал VMC) (Khatuntsev et al., 2022).

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. Зональные скорости IR2 при этом ближе к ИК VMC, поэтому наблюдаемые меридиональные скорости в области 20–60° говорят о принадлежности к среднему облачному слою. Таким образом, несмотря на близкие меридиональные скорости, в соответствии с величиной зональной скорости на 20–60° ю.ш., IR2 может видеть верхнюю ветвь возвратной ячейки Хэдли в среднем облачном слое.

### ***3.6 Выводы по Главе 3***

Впервые полностью были полностью обработаны все данные, полученные камерой IR2 в канале 1,74 мкм в 2016 году, 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. (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). Сравнение указывает на то, что камера IR2 может видеть верхнюю ветвь «возвратной» ячейки Хэдли в среднем облачном слое. Таким образом, в зависимости от фазы солнечного цикла на длине волны 1,74 мкм может наблюдаться как нижний, так и средний облачный слой.

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.

## Заключение

В рамках диссертационной работы был проведён анализ полных массивов данных инфракрасных приборов космических аппаратов «Венера-Экспресс» и «Акацуки», полученных ими за 2006–2008 и 2016 гг. соответственно. По перемещениям деталей облачного покрова в 1,74 мкм (44–50 км высоты над поверхностью) и свечения кислорода в 1,27 мкм (90–110 км) на ночной стороне Венеры были получены поля векторов горизонтальных скоростей ветра. Скорости ветра в верхней мезосфере, полученные по изображениям 1,27 мкм, охватывают только южное полушарие, тогда как данные по динамике нижнего облачного слоя (1,74 мкм) позволяют сравнивать оба полушария.

Расчёты перемещения деталей свечения кислорода показали, что в верхней мезосфере (90–110 км) горизонтальная циркуляция на ночной стороне несимметрична относительно полуночного меридиана, и зональный поток от утреннего терминатора превышает поток от вечернего на 30–50 м/с, что отражается и в смещении максимума свечения кислорода  $O_2(a^1\Delta_g)$  на соответствующих высотах от полуночи к 22,5 ч местного времени. Такой сдвиг до полуночи объясняется влиянием термического прилива. В мезосфере возникают локальные замкнутые вихри, сохраняющие стабильность не более суток, от 1500 до 4000 км в диаметре.

Обнаружено, что циркуляция атмосферы как в глубине облачного слоя (44–48 км), так и в верхней мезосфере (90–110 км) подвержена влиянию рельефа поверхности. Вследствие распространения вертикальных орографических волн зональный поток в нижнем облачном слое испытывает торможение (на 3–4 м/с) над областью Имд, а контуры горизонтального распределения свечения кислорода совпадают с рельефом расположенной под ним Области Фебы с коэффициентом корреляции 0,61.

В нижнем облачном слое был обнаружен фрагмент ветви одной из ячеек Хэдли, составляющих меридиональную циркуляцию венерианской атмосферы. В экваториальной области облачный слой расположен на 2 км выше, и в северных широтах (от 10 до 5°) наблюдался меридиональный поток, направленный к

северному полюсу, а в южных широтах от 5 до 20° к южному полюсу фрагменты прямой ветви ячейки Хэдли (как в южном, так и северном полушарии).

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.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю Людмиле Вениаминовне Засовой, вдохновившей автора на изучение Венеры и планетологии в целом и оказавшей неоценимую помощь при работе над диссертацией, а также за вовлечение в проект межпланетной станции «Венера-Д». Особая благодарность выражается: соавторам основных статей по теме диссертации – И.В. Хатунцеву и М.В. Пацаевой – за помощь в подготовке материалов и ценные наставления, П. Д’Инчекко за исследовательские идеи и плодотворное сотрудничество, научным руководителям приборов VIRTIS (П. Дроссар, Дж. Пиччони) и IR2 (Т. Сато) за предоставленный доступ к научным данным. Автор благодарит Л.М. Зелёного и О.И. Кораблёва за возможность участия в проекте «Венера-Д», параллельно шедшего с научной работой по теме диссертации.

Автор благодарен коллегам и друзьям, благотворно повлиявшим на создание этой работы: Николаю Игнатьеву, Борису Мошкину, Александру Родину, Алексею Шакуну, Дарье Евдокимовой, Денису Беляеву, Жану-Лу Берто, Анне Фёдоровой, Алексею Григорьеву, Хавьеру Перальта, Педро Машадо, Масахиро Такаги, Михаилу Иванову, Себастьяну Лебоннуа, Санджею Лимею, Натану Эйсмонту, Михаилу Лугинину, Александру Таврову, Екатерине Стариченко, Александру Ломакину, Денису Стрельникову, Илье Кузнецову.

### Список литературы

1. Alexander M.J. A mechanism for the Venus thermospheric superrotation // *Geophysical Research Letters*. 1992. Vol. 19, № 22. P. 2207–2210.
2. Alexander M.J. et al. Local time asymmetries in the Venus thermosphere // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1993. Vol. 98, № E6. P. 10849–10871.
3. Allen D.A., Crawford J.W. Cloud structure on the dark side of Venus // *Nature*. 1984. Vol. 307, № 5948. P. 222–224.
4. 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.
5. Ando H. et al. Thermal structure of the Venusian atmosphere from the sub-cloud region to the mesosphere as observed by radio occultation // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, № 1.
6. Avduevskiy, V.S. et al. Structure and parameters of the Venus atmosphere according to Venera probe data // кн. *Venus / Под ред. Hunter D.M., Colin L., Donahue T.M., Moroz V.I.* Univ. of Arizona Press, Tucson. 1983. P. 280-298.
7. Bailey J. et al. The temperature of the Venus mesosphere from O<sub>2</sub> (a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) airglow observations // *Icarus*. 2008. Vol. 197, № 1. P. 247–259.
8. Baines K.H. et al. To the depths of Venus: Exploring the deep atmosphere and surface of our sister world with Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2006. Vol. 54, № 13–14. P. 1263–1278.
9. Basilevsky A.T., Head J.W. The surface of Venus // *Reports on Progress in Physics*. 2003. Vol. 66, № 10. P. 1699–1734.
10. Berrevoets C. et al. RegiStax: Alignment, stacking and processing of images // *Ascl*. 2012.
11. 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.

12. Bougher S.W., Borucki W.J. Venus O<sub>2</sub> visible and IR nightglow: Implications for lower thermosphere dynamics and chemistry // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1994. Vol. 99, № E2. P. 3759–3776.
13. 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.
14. Brecht A.S. et al. Understanding the variability of nightside temperatures, NO UV and O<sub>2</sub> IR nightglow emissions in the Venus upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. Vol. 116, № E8.
15. Brecht A.S. et al. Understanding the variability of nightside temperatures, NO UV and O<sub>2</sub>IR nightglow emissions in the Venus upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2011. Vol. 116, № E8.
16. Carlson R.W. et al. Galileo Infrared Imaging Spectroscopy measurements at Venus // *Science*. 1991. Vol. 253, № 5027. P. 1541–1548.
17. Connes P. et al. O<sub>2</sub><sup>1</sup>Δ emission in the day and night airglow of Venus // *The Astrophysical Journal*. 1979. Vol. 233. P. L29.
18. Counselman C.C. et al. Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry // *Journal of Geophysical Research*. 1980. Vol. 85, P. 8026–8030.
19. Crisp D. et al. Ground-Based Near-Infrared imaging observations of Venus during the Galileo encounter // *Science*. 1991. Vol. 253, № 5027. P. 1538–1541.
20. Crisp D. et al. Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: 1.27-μm O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>) airglow from the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1996. Vol. 101, № E2. P. 4577–4593.
21. Dias J.A. et al. Volcanic gas plumes' effect on the spectrum of Venus // *Icarus*. 2025. Vol. 438. ID. 116589.

22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Evdokimova D. et al. Night O<sub>2</sub> ( $a^1\Delta_g$ ) airglow spatial distribution and temporal behavior on Venus based on SPICAV IR/VEx nadir dataset // *Icarus*. 2024. Vol. 429. P. 116417.
26. Fukuhara T. et al. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10, № 2. P. 85–88.
27. Fukuya K. et al. Horizontal structures of bow-shaped mountain wave trains seen in thermal infrared images of venusian clouds taken by Akatsuki LIR // *Icarus*. 2022. Vol. 378. P. 114936.
28. 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.
29. Gérard J.-C. et al. Latitudinal structure of the Venus O<sub>2</sub> infrared airglow: A signature of small-scale dynamical processes in the upper atmosphere // *Icarus*. 2014. Vol. 236. P. 92–103.
30. 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.*
31. Gonçalves R. et al. Venus' cloud top wind study: Coordinated Akatsuki/UVI with cloud tracking and TNG/HARPS-N with Doppler velocimetry observations // *Icarus*. 2019. Vol. 335. P. 113418.

32. Gorinov D.A. et al. 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, № 5. P. 2554–2562.
33. Gorinov D.A. et al. Winds in the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 μm Images // *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, № 2. P. 186.
34. Hauchecorne A. Jet-setting atmosphere // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10, № 9. P. 622–623.
35. Horinouchi T. et al. Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki // *Nature Geoscience*. 2017. Vol. 10, № 9. P. 646–651.
36. Hueso R. et al. Morphology and dynamics of Venus oxygen airglow from Venus Express/Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. Vol. 113, № E5.
37. Hueso R., Peralta J., Sánchez-Lavega A. Assessing the long-term variability of Venus winds at cloud level from VIRTIS–Venus Express // *Icarus*. 2011. Vol. 217, № 2. P. 585–598.
38. Huestis D.L. Current laboratory experiments for planetary aeronomy // КН. Atmospheres in Solar System: Comparative Aeronomy / Geophysical Monograph Series. 2002. Vol. 130. P. 245–258.
39. Iga S.-I., Matsuda Y. Shear Instability in a Shallow Water Model with Implications for the Venus Atmosphere // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2005. Vol. 62, № 7. P. 2514–2527.
40. James I.N., Introduction to circulating atmospheres, Cambridge University Press. 1994. P. 211.
41. 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.

42. Kaspi Y. et al. Comparison of the deep atmospheric dynamics of Jupiter and Saturn in light of the Juno and Cassini gravity measurements // *Space Science Reviews*. 2020. Vol. 216, № 5.
43. Kerzhanovich, V.V., Marov M.Y. The atmosphere dynamics of Venus according to Doppler measurements by the Venera entry probes // кн. *Venus* / Под ред. Hunter D.M., Colin L., Donahue T.M., Moroz V.I. Univ. of Arizona Press, Tucson. 1983. P. 766-778.
44. Khatuntsev I.V. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // *Icarus*. 2013. Vol. 226, № 1. P. 140–158.
45. 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.
46. 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.
47. Khatuntsev I.V. et al. Twelve-Year Cycle in the Cloud Top Winds Derived from VMC/Venus Express and UVI/Akatsuki Imaging // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, № 12. P. 2023.
48. Kouyama T. et al. Topographical and local time dependence of large stationary gravity waves observed at the cloud top of Venus // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44, № 24.
49. Krasnopolsky V.A. Venus night airglow: Ground-based detection of OH, observations of O<sub>2</sub> emissions, and photochemical model // *Icarus*. 2009. Vol. 207, № 1. P. 17–27.
50. Krasnopolsky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // *Planetary and Space Science*. 2011. Vol. 59. P. 754–766.
51. Lebonnois S. et al. Planetary boundary layer and slope winds on Venus // *Icarus*. 2018. Vol. 314. P. 149–158.

52. 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.
53. 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.
54. Limaye S.S. Venus atmospheric circulation: Known and unknown // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2007. Vol. 112, № E4.
55. Machado P. et al. Venus cloud-tracked and doppler velocimetry winds from CFHT/ESPaDOnS and Venus Express/VIRTIS in April 2014 // *Icarus*. 2016. Vol. 285. P. 8–26.
56. Marcq E. et al. Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus's dynamic atmosphere // *Nature Geoscience*. 2012. Vol. 6, № 1. P. 25–28.
57. McGouldrick K. et al. Quantification of middle and lower cloud variability and mesoscale dynamics from Venus Express/VIRTIS observations at 1.74  $\mu\text{m}$  // *Icarus*. 2011. Vol. 217, № 2. P. 615–628.
58. Melo S.M.L., Lowe R.P., Russell J.P. Double-peaked hydroxyl airglow profiles observed from WINDII/UARS // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2000. Vol. 105, № D10. P. 12397–12403.
59. Mende S.B. et al. Limb view spectrum of the Earth's airglow // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993. Vol. 98, № A11. P. 19117–19125.
60. Migliorini A. et al. Comparative analysis of airglow emissions in terrestrial planets, observed with VIRTIS-M instruments on board Rosetta and Venus Express // *Icarus*. 2013. Vol. 226, № 1. P. 1115–1127.
61. Miller H.C. et al. Measurement of the radiative lifetime of  $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$  using cavity ring down spectroscopy // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2001. Vol. 69, № 3. P. 305–325.

62. Moissl R. et al. Venus cloud top winds from tracking UV features in Venus Monitoring Camera images // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2009. Vol. 114, № E5.
63. Moroz V.I., Zasova L.V. VIRAC-2: a review of inputs for updating the Venus international reference atmosphere // *Advances in Space Research*. 1997. Vol. 19. P. 1191–1201.
64. Nakamura M. et al. AKATSUKI returns to Venus // *Earth Planets and Space*. 2016. Vol. 68, № 1.
65. Navarro T. et al. Venus' upper atmosphere revealed by a GCM: I. Structure and variability of the circulation // *Icarus*. 2021. Vol. 366. P. 114400.
66. Oertel D. et al. Infrared spectrometry of Venus from “Venera-15” and “Venera-16” // *Advances in Space Research*. 1985. Vol. 5, № 9. P. 25–36.
67. Ohtsuki S. et al. Distributions of the Venus 1.27- $\mu\text{m}$  O<sub>2</sub> airglow and rotational temperature // *Planetary and Space Science*. 2008. Vol. 56, № 10. P. 1391–1398.
68. 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.
69. Patsaeva M.V. et al. Solar-Related variations of the cloud top circulation above Aphrodite Terra from VMC/Venus Express wind fields // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2019. Vol. 124, № 7. P. 1864–1879.
70. Peralta J. et al. Overview of useful spectral regions for Venus: An update to encourage observations complementary to the Akatsuki mission // *Icarus*. 2017. Vol. 288. P. 235–239.
71. 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.

72. Piccioni G. et al. Near-IR oxygen nightglow observed by VIRTIS in the Venus upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. Vol. 114, № E5.
73. Rossow W.B., Del Genio A.D., Eichler T. Cloud-Tracked winds from Pioneer Venus OCPP images // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1990. Vol. 47, № 17. P. 2053–2084.
74. Rothman, L.S. Magnetic dipole infrared atmospheric oxygen bands // *Applied Optics*. 1982. Vol. 21, № 13. P. 2428–2431.
75. Sánchez-Lavega A. et al. Variable winds on Venus mapped in three dimensions // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35, № 13.
76. Sánchez-Lavega A. et al. The atmospheric dynamics of Venus // *Space Science Reviews*. 2017. Vol. 212, № 3–4. P. 1541–1616.
77. Satoh T. et al. Development and in-flight calibration of IR2: 2- $\mu$ m camera onboard Japan's Venus orbiter, Akatsuki // *Earth Planets and Space*. 2016. Vol. 68, № 1.
78. Saunders R.S., Pettengill G.H. Magellan: Mission Summary // *Science*. 1991. Vol. 252, № 5003. P. 247–249.
79. Schubert G. et al. Structure and circulation of the Venus atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1980. Vol. 85, № A13. P. 8007–8025.
80. 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.
81. Soret L. et al. Time variations of O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup> $\Delta$ ) nightglow spots on the Venus nightside and dynamics of the upper mesosphere // *Icarus*. 2014. Vol. 237. P. 306–314.
82. Soret L. et al. Venus OH nightglow distribution based on VIRTIS limb observations from Venus Express // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37, № 6.
83. Soret L., Gérard J.-C. Is the O<sub>2</sub>(a<sup>1</sup> $\Delta$ <sub>g</sub>) Venus nightglow emission controlled by solar activity? // *Icarus*. 2015. Vol. 262. P. 170–172.

84. Stewart A.I.F. et al. Morphology of the Venus ultraviolet night airglow // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1980. Vol. 85, № A13. P. 7861–7870.
85. Stiepen A. et al. Venus nitric oxide nightglow mapping from SPICAV nadir observations // *Icarus*. 2013. Vol. 226, № 1. P. 428–436.
86. 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.
87. Svedhem H. et al. Venus Express mission // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. Vol. 114, № E5.
88. Svedhem H. et al. Venus Express—The first European mission to Venus // *Planetary and Space Science*. 2007. Vol. 55, № 12. P. 1636–1652.
89. Takagi M. et al. A GCM study on the 4-Day and 5-Day waves in the Venus atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2022. Vol. 127, № 4.
90. 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.
91. Takagi M. et al. Three-Dimensional structures of thermal tides simulated by a Venus GCM // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2018. Vol. 123, № 2. P. 335–352.
92. Tavenner T. et al. Global mean cloud coverage on Venus in the near-infrared // *Planetary and Space Science*. 2008. Vol. 56, № 10. P. 1435–1443.
93. Taylor F.W., Venus: Atmosphere, Kluwer Academic Publishers eBooks. 2006. P. 890–895.
94. Taylor F.W., Planetary atmospheres, Oxford University Press. 2010. P. 174.
95. Tellmann S. et al. Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa Radio Science Experiment on Venus Express // *Icarus*. 2012. Vol. 221, № 2. P. 471–480.
96. Titov D.V. et al. Venus Express science planning // *Planetary and Space Science*. 2006. Vol. 54, № 13–14. P. 1279–1297.

97. Tripathi K.R. et al. Gravity wave modulations at the lower altitudes of Venus ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 2023. Vol. 50, № 4.
98. Widemann T. et al. Venus Evolution Through Time: key science questions, selected mission concepts and future investigations // *Space Science Reviews*. 2023. Vol. 219, № 7.
99. 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.
100. Yamamoto M. et al. Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer // *Icarus*. 2018. Vol. 321. P. 232–250.
101. Yamamoto M., Ikeda K., Takahashi M. Atmospheric response to high-resolution topographical and radiative forcings in a general circulation model of Venus: Time-mean structures of waves and variances // *Icarus*. 2020. Vol. 355. P. 114154.
102. Young, E.F. et al. Temporal variability and latitudinal jets in Venus's zonal wind profiles // *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2008, Vol. 40, P. 513.
103. Young E.F. et al. Evidence for and against 8-day planetary waves in ground-based cloud-tracking observations of Venus' nightside // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*. 2010. Vol. 42.
104. 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.
105. 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.
106. Zasova L.V. et al. Structure of the Venus atmosphere // *Planetary and Space Science*. 2007. Vol. 55, № 12. P. 1712–1728.
107. 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.

108. 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.
109. Засова Л.В. и др. Строение атмосферы Венеры от поверхности до 100 км // *Космические исследования*. 2006. Т. 44. № 4. С. 381 – 400.
110. Краснопольский В.А. и др. Спектроскопия ночного свечения Венеры с орбитеров «Венера 9, 10» // *Космические исследования*. 1976. Т. 14. С. 789 – 795.
111. 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.