

ОТЗЫВ

официального оппонента Репиной Ирины Анатольевны о диссертационной работе Горинова Дмитрия Алексеевича «**Циркуляция ночной атмосферы Венеры**», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Диссертационная работа Горинова Дмитрия Алексеевича посвящена исследованию динамики атмосферы Венеры на ночной стороне в двух высотных диапазонах: в верхней мезосфере (90–110 км) по свечению молекулярного кислорода на 1,27 мкм и в нижнем облачном слое (44–48 км) по изображениям в окне прозрачности 1,74 мкм. Для достижения цели автором решены следующие задачи: выполнена обработка полных массивов данных приборов VIRTIS-M (КА «Венера-Экспресс», 2006–2008 гг.) и IR2 (КА «Акацуки», 2016 г.); получены базы векторов горизонтальных скоростей ветра (более 8000 для верхней мезосферы и более 80 000 для нижнего облачного слоя); проведён анализ зональных и меридиональных компонент, их зависимостей от широты, местного времени и долготы; выявлены асимметрии циркуляции, влияние рельефа поверхности и проявления волновых процессов.

Актуальность темы диссертации

Венера является ближайшей к Земле планетой, имеющей сравнимые размеры, массу и количество получаемой солнечной энергии, но её климат и динамика атмосферы кардинально отличаются от земных. Понимание причин этого расхождения – ключевая задача сравнительной планетологии, позволяющая уточнить возможные сценарии эволюции земного климата и пределы обитаемости. Атмосфера Венеры вращается вокруг планеты в режиме суперротации (период 4–5 земных суток при вращении самой планеты ~243 суток), при этом механизмы поддержания суперротации до конца не выяснены. Исследование вертикальных сдвигов ветра, волновых процессов и перехода от суперротации к другим модам циркуляции непосредственно влияет на построение адекватных моделей общей циркуляции.

Обнаруженное в работе влияние рельефа поверхности Венеры на циркуляцию верхней мезосферы и нижнего облачного слоя открывает новое направление в исследовании связи твердой оболочки планеты с атмосферной динамикой. Выявленное торможение зонального потока над вулканической областью Имд (на 3–4 м/с) и её молодой геологический возраст (менее 10^3 лет при среднем возрасте поверхности $\sim 5 \times 10^8$ лет) позволяют выдвинуть предположение о современной вулканической активности Венеры, что является одним из наиболее горячих вопросов в современной планетологии.

Исследование нижнего облачного слоя (44–48 км) имеет самостоятельную ценность, поскольку именно на этих высотах расположены плотные облачные массы, формирующие наблюдаемый контраст в окнах прозрачности 1,74 мкм. До настоящей работы меридиональная циркуляция в этом слое оставалась практически не изученной: существовали лишь теоретические предсказания о наличии ячеек Хэдли, но экспериментальных подтверждений не было.

Сравнение данных «Венеры-Экспресс» (2006–2008 гг.) и «Акацуки» (2016 г.) позволило выявить долговременные изменения зональной скорости в нижнем облачном слое – её увеличение до 30% (на 15–20 м/с) вблизи максимума 24-го солнечного цикла по сравнению с

минимумом. Этот результат находится в русле активно развиваемой тематики влияния солнечной активности на динамику атмосферы Венеры и имеет прямое отношение к интерпретации данных будущих миссий, запланированных на разные фазы солнечного цикла.

Наконец, практическая значимость работы определяется тем, что полученные закономерности и базы векторов скоростей могут быть использованы для верификации и улучшения существующих моделей общей циркуляции (AFES-Venus, IPSL и др.), а также для планирования научной программы готовящихся космических миссий – DAVINCI и VERITAS (США, 2030-е гг.), EnVision (ЕКА), Venus Orbiter Mission (Индия) и российского проекта «Венера-Д». В частности, результаты об асимметрии циркуляции, влиянии рельефа и вариациях, связанных с солнечной активностью, должны быть учтены при выборе высот зондирования и режимов съёмки.

Таким образом, тема диссертации является, безусловно, актуальной как с фундаментальной научной точки зрения (понимание динамики атмосферы Венеры и её отличий от Земли), так и с прикладной – для обеспечения успеха будущих межпланетных миссий и совершенствования моделей планетарной циркуляции.

Научная новизна

Научная новизна работы убедительно продемонстрирована в тексте и заключается в следующем:

Впервые полностью обработаны все изображения ночной стороны Венеры, полученные спектрометром VIRTIS-M в каналах 1,27 мкм и 1,74 мкм, а также камерой IR2 в канале 1,74 мкм; созданы наиболее полные на сегодняшний день базы векторов горизонтальных скоростей ветра для высот 90–110 км и 44–48 км.

Впервые обнаружена асимметрия солнечно-антисолнечной циркуляции в верхней мезосфере относительно полуночного меридиана: зона конвергенции потоков от терминаторов смещена к 22–23 часам местного времени, что объяснено влиянием термических приливов; показано, что зональный поток от утреннего терминатора на 30–50 м/с превышает поток от вечернего.

Впервые в поле свечения $O_2(a^1\Delta_g)$ выявлены «рельефные отпечатки» горной области Фебы, а также замкнутые вихри (циклоны и антициклоны) диаметром до 4000 км; аргументирована связь этих явлений с орографическими волнами (волнами плавучести), что является аналогом известных земных процессов.

Впервые фрагментарно обнаружена прямая ячейка Хэдли в нижнем облачном слое Венеры (на высотах 44–48 км), что подтверждает модельные прогнозы и расширяет представления о меридиональной циркуляции.

Впервые обнаружена асимметрия широтного профиля ветра относительно экватора в нижнем облачном слое (знак меридиональной скорости меняется на широте 5–7° ю.ш.), а также выявлено влияние рельефа (Область Имд) на зональный поток – торможение на 3–4 м/с, что может косвенно свидетельствовать о современной вулканической активности.

Достоверность результатов подтверждается публикациями в авторитетных профессиональных изданиях, выступлениями автора на ведущих российских и международных научных конференциях.

Также достоверность подтверждается использованием большого объёма первичных данных (99 орбит для 1,27 мкм, 195 орбит для 1,74 мкм по VIRTIS-M и 143 пары изображений по IR2); применением ручного и автоматического методов трекинга облачных деталей, ранее успешно использовавшихся для анализа данных камеры VMC; тщательной калибровкой и коррекцией измерений (учёт теплового излучения нижней атмосферы, вейвлет-фильтрация для повышения контраста); статистической обработкой с расчётом доверительных интервалов (99%); согласием полученных зависимостей (например, замедления зонального ветра от вечернего к утреннему терминатору) с результатами других авторов и численных моделей (AFES-Venus, IPSL, VTGCM).

Личный вклад автора адекватно представлен в тексте диссертации и реферата, где отражено участие соавторов и даны корректные ссылки на предыдущие исследования. Все вынесенные на защиту положения и научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором. Автору принадлежит ведущая роль в постановке задач, подготовке научных публикаций и докладов на конференциях, семинарах и т.д. Автор самостоятельно отбирал изображения из архивов миссий, проводил ручные и автоматические измерения скоростей ветра (последние с использованием ранее разработанных алгоритмов, адаптированных под задачи работы), участвовал в интерпретации результатов и подготовке публикаций.

Во **Введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, перечислены научная новизна, практическая значимость и защищаемые положения.

Первая глава посвящена циркуляции верхней мезосферы (90–110 км) по данным свечения O_2 1,27 мкм. Подробно описаны методы обработки, коррекции теплового фона, получены карты зональной и меридиональной скоростей. Показана асимметрия SS-AS циркуляции (смещение максимума свечения к 22–23 ч), обнаружены вихревые структуры и влияние орографических волн (на примере области Фебы). Приведены результаты корреляционного анализа (коэффициент 0,61 между свечением и топографией после смещения).

Вторая глава посвящена динамике нижнего облачного слоя (44–48 км) по данным VIRTIS-M (1,74 мкм). Проанализированы зависимости скорости от местного времени (замедление к утру), широты (обнаружен джет на 40–60° ю.ш.) и долготы. Впервые выявлены фрагменты прямой ячейки Хэдли: на широтах 5–20° ю.ш. поток направлен к южному полюсу, на широтах 20–40° ю.ш. – к экватору, что интерпретируется как наблюдение разных высотных уровней. Обнаружено торможение ветра над областью Имд.

Третья глава представляет результаты анализа данных камеры IR2 КА «Акацуки» за 2016 г. Выявлено значительное (до 30%) увеличение зональной скорости в экваториальной области по сравнению с 2006–2008 гг., что связывается с солнечным циклом. Обнаружена асимметрия между полушариями. Показана изменчивость широтного профиля на масштабах 8–10 суток.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты диссертации изложены в 5 работах автора: все статьи опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Основные замечания к работе:

Ряд замечаний носят скорее редакционный характер.

В диссертации отсутствуют сведения, в каких публикациях автора отражены основные выводы диссертации и материалы её глав.

Формулировка положений, выносимых на защиту, предполагает четкую формулировку собственно результата. Слова «обнаружена», «позволило определить» применяться не должны. Положения сформулированы слишком пространно.

Замечания по существу:

1. В диссертации практически отсутствует обзор предыдущих исследований динамики атмосферы Венеры. Прежде всего, отсутствует упоминание фундаментальных работ Г.С. Голицына по динамике планетных атмосфер и разработанной им теории подобия для планетных атмосфер (в частности прогноз динамики атмосферы Венеры). Было бы полезно дать краткий обзор деятельности советских миссий «Венера 1-16».
2. В Главе 1 при анализе влияния топографии на свечение O_2 автор приводит коэффициент корреляции 0,61 после смещения и поворота карты. Но выбор величины смещения (20° по долготе, 7° по широте) и угла поворота (14°) выполнен, вероятно, эмпирически. Не обсуждается, насколько чувствителен коэффициент корреляции к точности этих параметров и нет ли риска «подгонки». Желательно было бы привести карту распределения коэффициента корреляции в пространстве сдвигов.
3. В разделе 1.7 (короткопериодические вариации) приведены данные по шести последовательным орбитам (367–372). Но временной интервал между орбитами составляет 24 часа, и наблюдение одной и той же области диска не было непрерывным. Возможно ли, что часть наблюдаемых изменений связана с разной геометрией съёмки, а не с реальной эволюцией атмосферы? Этот момент следовало бы обсудить подробнее.
4. В Главе 2 при идентификации фрагментов ячейки Хэдли автор использует вертикальный сдвиг ветра $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$, взятый из литературы для других высот. Нет ли собственной оценки сдвига для уровня 1,74 мкм по данным VIRTIS? Кроме того, остаётся открытым вопрос, почему прямая ячейка наблюдается не целиком, а фрагментарно, и какие условия способствуют её появлению.
5. Автор интерпретирует обнаруженное изменение знака меридиональной скорости на широтах около 20° ю.ш. как фрагмент прямой ячейки Хэдли в нижнем облачном слое. Но по литературным данным в нижних облаках (48–55 км) до сих пор не было зарегистрировано планетарных волн или стационарных структур, характерных для верхних облаков (65–70 км). Это ставит под вопрос возможность однозначной интерпретации наблюдаемого фрагмента ячейки Хэдли без привлечения дополнительных данных о вертикальном сдвиге ветра и оптической толщине облаков в промежуточных слоях. Было бы полезно обсудить, насколько надёжна эта

оценка и какие альтернативные интерпретации (например, наложение разных волновых мод) возможны.

6. В Главе 3, объясняя разницу скоростей между VIRTIS-M и IR2, автор рассматривает несколько факторов (солнечный цикл, разная спектральная полоса, изменение высоты зондирования). При этом количественный вклад каждого фактора не разделён. Было бы полезно привести оценку ожидаемого изменения скорости за счёт разницы яркостных температур (18 К, что даёт ~2 км высоты и ~2–4 м/с) – это лишь малая часть от наблюдаемого увеличения в 15–20 м/с. Значит, главным является всё же вариация, связанная с солнечной активностью, – стоило бы подчеркнуть это более отчётливо. Еще стоит отметить, что согласно отчёту о работе IR2, в первый год эксплуатации, камера столкнулась с рядом технических проблем, в частности, из-за многократных отражений в детекторе PSF имела протяжённый «хвост». Для устранения этих эффектов потребовалось построение эмпирической PSF, что вносит дополнительную неопределённость в получаемые значения яркости и, следовательно, в идентификацию облачных деталей. В диссертации этот фактор не обсуждается. Хотя утверждается, что после коррекции качество данных стало приемлемым, количественная оценка вклада инструментальных неопределённостей в разницу скоростей между VIRTIS-M и IR2 желательна, особенно при столь значительных (30%) наблюдаемых изменениях.

7. В работе обсуждается увеличение зональной скорости в нижнем облачном слое в 2016 г. по сравнению с 2006–2008 гг. и связывается с 24-м циклом солнечной активности. Но систематические измерения суперротации проводились лишь в УФ-диапазоне (высоты 65–69 км), в ИК-диапазоне (51–59 км) и в ходе эксперимента с зондами ВЕГА (53–55 км). В промежуточных высотах (например, 44–48 км, где работают VIRTIS-M и IR2) систематические измерения фактически отсутствуют, а используемая автором высотная привязка к 46 км является расчётной, а не измеренной. Это означает, что наблюдаемые долговременные изменения скорости могут быть вызваны не только изменением собственно динамики атмосферы, но и смещением эффективной высоты зондирования из-за изменения оптических свойств облаков (например, концентрации SO₂) или сезонных вариаций. Автор упоминает этот фактор в разделе 3.5, но не даёт количественной оценки его вклада. Было бы целесообразно обсудить, какая доля наблюдаемого ускорения (15–20 м/с) может быть объяснена изменением высоты наблюдения при типичном вертикальном градиенте скорости 1–2 м·с⁻¹·км⁻¹, а какая — действительно связана с солнечной активностью.

8. Отсутствие измерений меридиональной скорости для северного полушария (только до 20° с.ш.) является следствием орбиты «Венеры-Экспресс» (перицентр в северном полушарии, но наблюдения ночной стороны проводились в основном из южного полушария). Стоило бы явно указать это ограничение во введении к 1 главе.

Представленные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы и не ставят под сомнение ее основные научные и практические результаты. Работа написана

хорошим научным языком, содержит новые положения и вносит безусловный вклад в исследование динамики атмосферы Венеры.

Диссертационная работа Горинова Д.А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на хорошем методическом и техническом уровне. В работе содержится решение актуальной задачи – определения циркуляции атмосферы Венеры на ночной стороне в двух критически важных высотных интервалах: в верхней мезосфере (90–110 км) – переходной области между зональной суперротацией и солнечно-антисолнечной циркуляцией – и в нижнем облачном слое (44–48 км), где формируются наблюдаемые структуры облачного покрова.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования. Основные результаты опубликованы в достаточном количестве рецензируемых научных изданий (в том числе в журналах The Planetary Science J., Geochemistry, Geophysical Research Letters, Atmosphere, Solar System Research) и апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Диссертационная работа Горинова Дмитрия Алексеевича «Циркуляция ночной атмосферы Венеры» является самостоятельной работой. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.3.1. - Физика космоса, астрономия, а также пунктам 9-11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 года.

Официальный оппонент:
Репина Ирина Анатольевна

Доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы, профессор РАН, главный научный сотрудник, заместитель директора по научно-техническому развитию Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, 119017, г. Москва, Пыжевский пер. 3
e-mail. repina@ifaran.ru
Тел. +7(495)951-85-49

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Горинова Д.А.



«18» мая 2026 г.

Подпись И.А. Репиной заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)



Киселева Юлия Викторовна

