

УТВЕРЖДАЮ

чл. корр. РАН

Директор ИКИ РАН

А.А. Петрукович

20  
2019 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Диссертация «Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным камеры VMC орбитальной станции «Венера Экспресс» выполнена в отделе 53 «Физики планет и малых тел Солнечной системы» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Пацаева Марина Всеволодовна работала в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

Справки о сдаче кандидатских экзаменов выданы в 2016 г. в ФГБОУ ВО «МГТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ)», в 2017 и 2020 гг. в ИКИ РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, Засова Людмила Вениаминовна, работает заведующим лабораторией 531 (отдел 53) в ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным камеры VMC орбитальной станции «Венера Экспресс» принято следующее заключение:

### **Актуальность и направление исследования**

Данная диссертационная работа направлена на исследование особенностей динамики атмосферы Венеры на уровне верхней границы облачного слоя по результатам многолетних наблюдений в УФ канале (365 нм), выполненных камерой VMC на борту орбитальной станции Венера-Экспресс. Эта область высот представляет исключительный интерес, так как в верхнем облачном слое находится УФ-поглотитель, который поглощает до 50% всей солнечной энергии, поглощенной планетой, обеспечивая контрасты до 30%. Термические

приливы, возникающие при поглощении солнечной радиации в узком интервале высот (менее 10 км в верхнем облачном слое), могут поставлять энергию на поддержание суперротации.

При безусловной успешности предыдущих миссий, все имеющиеся наблюдения были существенно ограничены в пространстве и во времени. Для понимания механизма суперротации, понимания источника энергии для поддержания суперротации, а также для понимания механизма обмена моментом между атмосферой и поверхностью необходим долгосрочный мониторинг движения атмосферных масс (скорости ветра) с максимально полным долготно-широтным покрытием в зависимости от местного времени. Изображения, полученные камерой VMC миссии «Венера Экспресс» (VMC/VEX, 2006-2015 гг) в канале 365 нм в течение 9 лет предоставили возможность провести детальные измерения скорости горизонтального потока на верхней границе облачного слоя.

Автоматизированный корреляционный метод был разработан специально для анализа УФ изображений (365 нм) камеры VMC/VEX. Он предоставил возможность обработать большие объёмы данных и получить более 170 тысяч векторов смещения идентифицированных деталей облачного покрова на верхней границе облаков Венеры ( $70 \pm 2$  км). Полученный ряд векторов смещений является беспрецедентным по продолжительности наблюдений (7.5 лет) и долготно-широтному покрытию дневной стороны Венеры, покрывающему все долготы планеты в интервале широт от экватора до  $60^\circ$  ю.ш.

Полученный массив данных был использован для анализа зависимости зональной и меридиональной компонент скорости горизонтального потока от долготы, широты и местного времени.

В статье Bertaux et al. (2016) впервые было обнаружено влияние рельефа подстилающей поверхности на зональную компоненту скорости ветра. Исследования были выполнены на основе результатов, полученных визуальным методом при анализе УФ изображений камеры VMC/VEX в широтной полосе  $10 \pm 5^\circ$  ю.ш. Существенно большее количество данных, полученное корреляционным методом и более равномерное покрытие по местному времени позволили обнаружить, что минимум зональной скорости наблюдается в полдень над наиболее высокой областью Земли Афродиты (Область Овда). Исследование поведения горизонтального потока в экваториальной области планеты ( $0-30^\circ$  ю.ш.), представленные в диссертации, демонстрируют, что минимум зональной скорости, связанный с Землёй

Афродиты; смещается в направлении суперротации с увеличением широты при одновременном увеличении скорости в области минимума. Также впервые было обнаружено влияние рельефа подстилающей поверхности на меридиональную компоненту скорости ветра от 0° до 30° ю.ш.

Исследование поведения горизонтального потока в зависимости от местного времени показали, что солнечно-связанная зависимость (солнечный прилив) скорости горизонтального потока на широтах, близких к экватору, проявляется в уменьшении величины как зональной, так и меридиональной компонент скорости ветра после полудня (в 13-14 ч). Это уменьшение зональной скорости, связанное с солнечным приливом и уменьшение скорости, обусловленное влиянием рельефа поверхности в полдень, вместе приводят к широкому минимуму зональной скорости над Областью Овды между 11 и 14 часами.

При исследовании средних широт (от 30° до 60° ю.ш.) было обнаружено, что видимое изменение в поведении среднеширотного джета связано с присутствием на изображении крупномасштабной детали облачного покрова, являющейся ветвью Y-структуры. Впервые была обнаружена связь между поведением горизонтального потока и расположением Y-структуры, а именно, было показано, что скорость и направление горизонтального потока изменяются в зависимости от положения ветви Y-структуры на изображении. Была подтверждена солнечно-связанная зависимость скорости горизонтального потока на средних широтах и исследовано изменение его направления в зависимости от местного солнечного времени. При сравнении с результатами по положению верхней границы облаков, полученными по одновременным независимым измерениям VIRTIS-M/VEX (Ignatiev et al., 2009) было показано, что темные области Y-структуры расположены на 1.5 – 2 км выше окружающего облачного слоя.

#### **Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации**

Автор самостоятельно разработал автоматизированный корреляционный метод определения смещения деталей облачного покрова Венеры. Программное обеспечение для расчета и последующего анализа корреляционных функций применительно к серии последовательных УФ изображений облачного покрова Венеры разработано, отлажено и применено на практике автором самостоятельно. На основе полученной базы данных автор самостоятельно провёл исследования, решая самостоятельно поставленные задачи. Результаты, вошедшие в

диссертацию, были получены при определяющем вкладе автора при содействии соавторов публикаций.

### **Степень достоверности результатов проведенного исследования**

Результаты работы докладывались на семинарах отдела «Физики планет и малых тел Солнечной системы» в ИКИ РАН, а также на всероссийских и международных конференциях: Генеральных Ассамблеях COSPAR, сессиях Европейского Геофизического Союза (EGU), Европейских Планетных Конгрессах (EPSC), Международной конференции по Венере (The 74-th Fujihara Seminar/IVC), ежегодных Всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Московских международных симпозиумах по исследованиям Солнечной системы (M-S<sup>3</sup>), Школах-семинарах «Атмосферы планет: от земной группы к экзопланетам».

Всего по теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых изданиях и сделано 17 докладов на конференциях.

### **Научная новизна полученных результатов**

Для анализа УФ изображений камеры VMC/VEX разработан автоматизированный корреляционный метод измерения скорости ветра по перемещению деталей облачного покрова. Был проанализирован беспрецедентный по продолжительности ряд наблюдений (около 7.5 лет) и создана база данных векторов скорости ветра (более 170 тысяч). Построены векторные поля скорости ветра в координатах долготы-широты для индивидуальных орбит. На основе анализа полученного массива данных исследовано поведение горизонтального потока в зависимости от долготы, широты и местного времени. Впервые показано, что «область» минимальной скорости зонального ветра наблюдается в полдень над горными массивами Земли Афродиты. Очертания «области» торможения повторяют контуры рельефа подстилающей поверхности. Впервые показано, что минимум зональной скорости, связанный с Землей Афродиты, с ростом широты (от 0° до 30° ю.ш.) смещается в направлении суперротации при одновременном увеличении скорости в области минимума. Впервые обнаружено влияние рельефа подстилающей поверхности на меридиональную компоненту скорости ветра в экваториальных широтах (от 0° до 30° ю.ш.). Впервые показано, что ветвь Y-структуры, наблюдаемая с периодом суперротации 4-5 суток в средних широтах (30-60° ю.ш.) в горизонтальном потоке характеризуется изменением направления движения атмосферных

масс и большей скоростью ветра (до нескольких десятков м/с). Впервые показано, что темные области Y-структуры расположены на 1.5 – 2 км выше окружающего облачного слоя.

### **Научная и практическая значимость результатов исследования**

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание динамики атмосферы Венеры и будут учтены при подготовке будущих миссий при формировании комплекса научной аппаратуры. В связи с тем, что на данный момент не существует моделей атмосферы Венеры, которые бы полностью воспроизводили её динамику в соответствии с известными наблюдениями, полученные в данной работе результаты могут быть полезны при построении моделей общей циркуляции атмосферы Венеры (GCM).

Разработанный автоматизированный корреляционный метод показал свою эффективность и был использован при анализе инфракрасных изображений (965 нм) камеры VMC (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2017). В настоящий момент метод применяется для анализа изображений видимого канала (513 нм) камеры VMC и изображений, получаемых японским космическим аппаратом Akatsuki. Разработанный метод может быть применён при исследовании изображений в рамках будущего проекта «Венера-Д», а также, после адаптации, для исследования циркуляции атмосфер планет и спутников с плотными атмосферами, таких как Юпитер и Титан.

### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Turin A.V., Limaye S.S., Markiewicz W.J., Almeida M., Roatsch T., Moissl R. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // *Icarus*. 2013. V.226(1), P.140-158. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>.

Patsaeva, M.V., Khatuntsev, I.V., Patsaev, D.V., Titov, D.V., Ignatiev, N.I., Markiewicz, W.J., Rodin, A.V. The relationship between mesoscale circulation and cloud morphology at the upper cloud level of Venus from VMC/Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2015. V.113(08), P.100-108. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.01.013>.

Хатунцев И.В., Федорова А.А., Пацаева М.В., Тюрин А.В. Рельеф поверхности Венеры проступает сквозь толщу облаков // *Природа*. 2016. №10 (1214), С.87.

Bertaux, J.-L., Khatuntsev, I.V., Hauchecorne, A., Markiewicz W.J., Marcq E., Lebonnois, S., Patsaeva, M., Turin, A., Fedorova, A. 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*. 2016. V.121, P.1087–1101. <https://doi.org/10.1002/2015JE004958>.

Vázquez-Poletti, J. L., Velasco, M. P., Jiménez, S., Usero, D., Llorente, I. M., Vázquez, L., Korablev, O., Belyaev, D., Patsaeva, M. V., Khatuntsev, I. V. Public “Cloud” Provisioning for Venus Express VMC Image Processing // *Communications on Applied Mathematics and Computation*. 2019. V.1, P.253–261. ISSN 2096-6385. <https://doi.org/10.1007/s42967-019-00014-z>.

Patsaeva, M.V., Khatuntsev, I.V., Zasova, L.V., Hauchecorne, A., Titov, D.V., Bertaux, J.-L. Solar Related Variations of the Cloud Top Circulation Above Aphrodite Terra From VMC/Venus Express Wind Fields // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2019. V.124, P.1864–1879. <https://doi.org/10.1029/2018JE005620>.

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения диссертационной работы опубликованы в указанных статьях.

### **Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия»**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующему разделу паспорта специальности «01.03.02– астрофизика и звездная астрономия»: «Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд, галактик и их систем) межпланетной, околозвездной, межзвездной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях».

**ВЫВОД.** Кандидатская диссертация Пацаевой Марины Всеволодовны «Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным камеры VMC орбитальной станции “Венера Экспресс”» соответствует «Положению о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Физики планет» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 11 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 11 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от «27» февраля 2020 г.

Председатель НТС отдела 53 ИКИ РАН,

д.ф.-м.н., чл.корр. РАН

Секретарь НТС отдела 53 ИКИ РАН,

к.ф.-м.н.

О.И. Кorableв

А.А. Федорова