

## ОТЗЫВ

официального оппонента,  
доктора физ.-матем. наук Чхетиани Отто Гурамовича  
на диссертацию Пацаевой Марины Всеволодовны  
«Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным камеры VMC орбитальной  
станции «Венера Экспресс» »,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности  
01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация Пацаевой М.В. посвящена динамике атмосферы Венеры в области верхнего облачного слоя на дневной стороне. Исследование представляет собой анализ полей скоростей ветра, полученных автоматизированным корреляционным методом по данным многолетних наблюдений, выполненных камерой VMC на борту орбитальной станции «Венера Экспресс». Основным методом исследования – разработанный и реализованный программным образом диссертантом автоматизированный корреляционный метод для анализа изображений с целью получения информации о перемещении облачных особенностей. В рамках разработанного метода решались следующие задачи: проекция и приведение пары последовательных изображений на единую координатную сетку и, собственно, сам расчет корреляционных функций с последующим анализом, позволяющим получить компоненты скорости ветра, сформировать базу данных векторов скорости, используемую для исследования динамических характеристик ветров и их закономерностей на границе верхнего облачного слоя Венеры.

Венера, окутанная плотным слоем облаком и медленным периодом собственного вращения – ближайшая к Земле и вторая по удалённости от Солнца планета Солнечной системы, обладающая массивной атмосферой. Планета эта, тем не менее, несмотря на отсутствие океанов, и явной сезонности имеет сложную атмосферную динамику. Понимание этого факта пришло еще в 60-е годы и значительного прогресса, на деле нет. Модели общей циркуляции работают недостаточно хорошо в силу целого ряда объективных причин и тем важнее и актуальнее исследования и анализ движений венерианской атмосферы, основанные на добротном и глубоком анализе информации, полученной космическими миссиями к планете. Ярким примером является рассматриваемая здесь диссертационная работа, актуальность, новизна и ценность которой не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 118 страниц.

Сразу хотелось бы отметить качественное представление самой диссертационной работы. Общее развернутое введение о структуре и явлениях в атмосфере Венеры и исследовательских миссиях к планете. В заключении

подчеркивается, что, несмотря на успешность исследовательских миссий, динамика атмосферы и, в частности, характер суперротации, пространственные, долговременные вариации, вариации поля ветра в зависимости от местного времени и механизм обмена моментом между атмосферой и поверхностью все еще остаются одной из малоизученных областей в исследованиях Венеры.

Каждая глава также предваряется введением и кратким обзором по предмету исследования и завершается четко сформулированными выводами. В завершение диссертации сделаны заключительные и обобщающие выводы.

Диссертация содержит также 2 приложения с номерами орбит, изображения которых были использованы для получения векторов смещения разработанным диссертантом автоматизированным методом, а также количество векторов смещения в выборках по местному времени.

Особенности динамики атмосферы Венеры рассматриваются на уровне верхней границы облачного слоя по данным многолетних наблюдений в ультрафиолетовом канале (365 нм), выполненных камерой VMC на борту орбитальной станции «Венера-Экспресс» (VMC/VEX). Действительно, указанная область высот представляет исключительный интерес, так как в верхнем облачном слое находится УФ поглотитель (неизвестной природы), который поглощает до 50% всей солнечной энергии, поглощенной планетой. Возможно, термические приливы, возникающие при поглощении солнечной радиации в узком интервале высот в верхнем облачном слое, могут быть одним из источников не вполне ясной по сегодняшней день суперротации планеты.

В первой главе описывается миссия Венера Экспресс, проработавшая на орбите около 9 лет с 2006 по 2015 годы. Сформулирована сама постановка задачи об определении горизонтальных скоростей по последовательным снимкам. Описывается корреляционный метод. Корреляционная функция имеет анизотропию, возможно связанную с зональностью скоростей. Следует отметить, что для реализации всего алгоритма требуется решать множество локальных задач, с которыми диссертант успешно справилась. Сама процедура доведена до автоматического программного комплекса, реализованного на Паскале. Проверка выполняется сравнением с результатами, получаемыми визуальным методом – рис. 1.7, 1.9. Как видно, результаты оказываются достаточно близкими. В частности, величина стандартного отклонения  $\sigma$ , равна 13 и 18 м/с, что очень близко к величине ошибки, установленной для визуального метода. В целом в работе немало места уделено анализу ошибок и чувствительности метода, его точности, фактору ложных смещений. Проводится сравнение с измерениями, полученными предыдущими миссиями. На рис. 1.16 где широтные профили ветра, полученные по результатам работы корреляционного метода (более 170 тысяч векторов) по УФ изображениям VMC сопоставляются с более ранними результатами, полученными по данным Маринер-10, OCPP на борту «Пионер Венера», Галилео, VIRTIS на борту «Венера Экспресс» и также на основе данных, полученных спускаемыми аппаратами Венера – 8, 12, 13, 14, миссии «Пионер Венера» (спускаемые аппараты

DAY и NIGHT). В целом можно утверждать, что полученные значения не находятся в противоречии с остальными результатами. В заключении главы получены средние поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра в координатах местное время – широта по всем исследованным орбитам – рис. 1.17. Средняя зональная скорость имеет максимум около 100 м/с по абсолютной величине в 14-15 часов вблизи 40° ю.ш. В низких широтах наблюдается ускорение зонального потока в утренние часы (9-10 ч) и торможение в дневные (12-14 ч). Средняя меридиональная скорость имеет четко выраженный экстремум до -10 м/с в 14-15 ч на 50° ю.ш. Знак средней меридиональной скорости свидетельствует об общем направлении потока от экватора к Южному полюсу. В утренние часы в приполярных широтах (10 ч, 75° ю.ш.) значение меридиональной компоненты стремится к 0 м/с. Отмечается, что результаты хорошо согласуются с аналогичными полями, построенными за тот же период наблюдений с помощью визуального метода. Отметим, что используемые здесь методы восстановления скоростей близки к подходам, используемым при анализе гидродинамических экспериментов – т.н. PIV методы, где также анализируются последовательные снимки.

Во второй главе приведены результаты исследования поведения горизонтального потока на верхней границе облачного слоя в экваториальной области (от 0° до 30° ю.ш.) и детально над высокогорной областью Земли Афродиты – самой большой возвышенностью (материком) Венеры. Данные имеющихся наблюдений и их анализ, рассмотренные во Введении к главе, указывают на корреляцию скорости ветра в облачном слое и других параметров атмосферы с топографией, а также на существование солнечно-связанной зависимости для ряда атмосферных параметров. Задача получения информации о поведении горизонтального потока в зависимости от долготы, широты и местного времени могла быть решена только при наличии достаточного количества данных. Анализ скорости ветра, полученной автоматизированным методом из анализа УФ изображений, сделанных камерой VMC с 2006 по 2013 год, большое количество векторов смещения, (на экваториальную область, от 0° до 30° ю.ш. приходится более 44000 векторов) впервые предоставил такую возможность.

Так показано, что минимум зональной скорости достигается в районе максимальной высоты Земли Афродиты (Область Овда, 90±5° в.д.) в полдень по местному времени. Построены олюготные профили среднего зонального ветра для 10° широтных полос (Рисунок 2.5а). Исследованы долготно-широтные вариации среднего меридионального потока

Показано, что долготном интервале 60-270° в.д. меридиональная компонента меняет величину и направление в соответствии с изменением рельефа подстилающей поверхности. Обширные материковые возвышенности Земли Афродиты и Области Атлы, расположенные вблизи экватора, вносят возмущение в средний меридиональный поток. Амплитуда возмущения достигает 3,5 м/с.

Отдельно рассмотрена роль солнечно-связанных эффектов в вариациях горизонтального потока. Используемое здесь усреднение по всему периоду наблюдений (7.5 лет) даёт возможность исключить короткопериодические вариации (4-5 суток), вызванные суперротацией и планетарными волнами и рассматривать зональные и меридиональные вариации скорости в зависимости от долготы, широты и местного времени (рис. 2.7-2.8). Было обнаружено, что солнечно-связанная зависимость горизонтального потока (прилив) в экваториальной области наблюдается около 13-14 ч местного времени как над равниной, так и над высокогорьем. Этот эффект ярче выделяется над низиной, где отсутствует торможение потока, связанное с влиянием рельефа.

Долготно-широтные вариации среднего зонального и меридионального ветра и изменения скорости, связанные с местным временем, можно наблюдать на серии изображений для отдельных орбит. На отдельных орбитах наблюдаются одновременно сразу три явления: солнечный прилив, влияние топографии и “Y”-структура, являющаяся результатом распространения волны Кельвина. “Y”-структура характеризуется сильным отклонением зонального потока к полюсу во фронтальной части, что осложняет обнаружение солнечного прилива и стационарной волны над Землёй Афродиты. В целом можно отметить, что влияние Земли Афродиты на ряд атмосферных параметров наблюдается в значительном диапазоне широт и имеет планетарный масштаб.

В третьей главе рассматривается уже динамика атмосферы в средних широтах, в частности, взаимосвязь поведения горизонтального потока с крупномасштабными структурами облачного покрова (Y-структура). На верхней границе облачного слоя в низких широтах средняя зональная скорость близка к 90 м/с и, достигая своего максимума около 100 м/с на 40-50° ю.ш., быстро уменьшается с широтой. Увеличение зональной скорости в средних широтах обоих полушарий Венеры характеризует наличие струйного зонального течения в атмосфере Венеры, имеющего более высокую скорость по сравнению с основным потоком (среднеширотный джет). Наблюдается также область т.н. «холодного воротника» на 60 - 75° с.ш. на высоте 60-65 км в Северном полушарии Венеры. Можно отметить проблемы восстановления профилей, связанные с более сложным строением облачного слоя, наличием тонкой структуры по сравнению преимущественно зональным строением в экваториальной области. Присутствие или отсутствие Y ветви отражается на наблюдаемых полях скоростей. Так в отсутствие этого явления движения выглядят как зональное течение, слегка отклоняющееся к полюсу во второй половине дня. Наблюдается корреляция поведения горизонтального потока с характерными особенностями облачного покрова на средних широтах – горизонтальный поток следует за положением Y – ветви на изображении. Отмечается связь особенностей облачного покрова и поведения горизонтального потока с высотой верхней границы облачного слоя на широтах от 40° до 80° ю.ш.

Одним из основных итогов работы является создание автоматизированного метода, позволяющего получать анализом корреляций последовательных изображений, получаемых камерами и спектрометрами поля скорости и соответственно циркуляционные движения на разных уровнях в атмосфере Венеры.

Длительный период наблюдения и большое количество полученных векторов скорости предоставили возможность исследовать характерные особенности поведения горизонтального потока в зависимости от долготы, широты и местного времени. Долготно-широтное покрытие векторами скорости для каждой исследуемой орбиты, позволило исследовать кратковременные вариации динамических параметров атмосферы.

Подтверждено влияние рельефа венерианской поверхности на зональную компоненту скорости ветра. Исследовано влияние поверхности на поведение горизонтального потока в зависимости от местного солнечного времени.

Были обнаружены короткопериодические изменения динамических характеристик, связанные с присутствием на изображении характерной крупномасштабной структуры облачного покрова, являющейся частью Y-структуры. Впервые обнаружена связь высоты верхней границы облачного слоя с расположением облачных структур на изображении и с направлением ветра.

Полученные результаты, безусловно, полезны при построении моделей общей циркуляции атмосферы Венеры (GCM).

В качестве замечаний отметим следующее:

1. Можно было бы привести сравнение средних полей скорости с результатами моделей общей циркуляции. Конечно, в большей степени, это представило бы интерес для самих модельеров.
2. Стоило бы сказать несколько слов в обзоре о моделях и кратко сказать об их проблемах.
3. Почти ничего не сказано о теоретических моделях, хотя это и не обязательно для данной работы.
4. В диссертации, в основном, используются осредненные характеристики полей скорости. Вместе с тем, полученные диссертантом данные содержат информацию о волновых и макротурбулентных характеристиках движений. Здесь также возможно, помимо анализа, сравнение с модельными результатами.

Отмеченные недостатки не влияют на общую высокую положительную оценку работы.

Оценивая работу в целом, отметим следующее.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой, являющейся новым важным и существенным шагом в исследованиях динамики атмосферы Венеры. В диссертации решены важные научные задачи. Полученные результаты представляются достоверными и могут найти научно-практическое применение при последующих миссиях к

Венере, а также при исследованиях движений в плотных атмосферах систем планет-гигантов и их спутников. Содержание диссертации соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Работа хорошо оформлена. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Хотелось бы отметить добротное и качественное изложение и «читабельность» всего текста в целом. Опубликованные в ведущих научных журналах результаты М.В. Пацаевой и докладывавшиеся также на российских и международных конференциях, достаточно полно отражают материал, изложенный в диссертации.

Все сказанное позволяет заключить, что диссертационная работа «Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным камеры VMC орбитальной станции «Венера Экспресс»» представляет собой законченную научно-исследовательскую работу и отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, а ее автор, Пацаева Марина Всеволодовна, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Чхетиани Отго Гурамович

доктор физико-математических наук

шифр специальности оппонента – 01.04.02 «теоретическая физика»

Заместитель директора по науке\ Заведующий лабораторией геофизической гидродинамики

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение науки  
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3

Рабочий телефон 8 (495) 951 84 80

E-mail: lgg@ifaran.ru

23 апреля 2021 года

Подпись О.Г. Чхетиани заверяю

Ученый секретарь ИФА им. А.М. Обухова РАН

Канд. геогр. наук



/О.Г. Чхетиани/

/Л.Д. Краснокутская/