

На правах рукописи

Хатунцев Игорь Валерьевич

**ЦИРКУЛЯЦИЯ МЕЗОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ С  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 01.03.04 – планетные исследования

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва

2008 г.

Работа выполнена в отделе Физики планет и малых тел Солнечной системы Института космических исследований Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук Л.В.Засова (Институт космических исследований Российской академии наук)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук М.И.Веригин (Институт космических исследований Российской академии наук)

доктор физ.-мат. наук А.И.Чавро (Институт вычислительной математики Российской академии наук)

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Защита состоится 29 декабря 2008 года в 12:30 на заседании Диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997 Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 20 ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета  
к.ф.-м.н.

Ткаченко А.Ю.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Диссертационная работа посвящена исследованию параметров циркуляции средней атмосферы Венеры на основе данных, полученных космическими аппаратами.

### **Основные направления и актуальность исследований**

Среди планет земной группы Венера обладает самой массивной атмосферой. Отношение массы атмосферы к массе планеты для Венеры составляет  $8,6 \cdot 10^{-7}$ , что более чем на два порядка превышает аналогичное соотношение для Земли. Атмосфера в основном состоит из углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) – 96,5% с небольшой примесью азота ( $\text{N}_2$ ) – 3,5%. На долю остальных газов, таких как окись углерода ( $\text{CO}$ ), двуокись серы ( $\text{SO}_2$ ), водяной пар ( $\text{H}_2\text{O}$ ), аргон ( $\text{Ar}$ ), гелий ( $\text{He}$ ) и прочие малые составляющие, приходится менее 0,1%. Давление у поверхности составляет около 90 бар. Характерной особенностью атмосферы Венеры является наличие плотного облачного покрова – 20-километровой толщи сернистого аэрозоля. Верхняя кромка облаков расположена на высоте 65-70 км.

Венера – медленновращающаяся планета. Вращение – ретроградное, т.е. с востока на запад. Сидерический период обращения составляет 243 земных суток. На этом фоне циркуляция венерианской атмосферы представляет собой уникальное явление в физике планетных атмосфер. Начиная от поверхности планеты и до высот порядка 100 км, атмосферная масса перемещается быстрее вращения планеты, т.е. имеет место суперротация атмосферы Венеры (см., например, Gierasch et al., 1997). Скорость ветра растет от поверхности до верхней границы облачного слоя. Максимум скорости суперротации приходится на высоты порядка 65-70 км. Атмосфера над верхней границей облаков в области средних широт

движется со скоростями около 100 м/с (Newman et al., 1984; Limaye et al., 1988). Таким образом, атмосфера на этих высотах делает полный оборот вокруг планеты за 4-4,5 земных суток, в то время как синодический период обращения Венеры (солнечные сутки) составляет 117 земных суток. Более детальное исследование динамических характеристик перемещения воздушных масс в атмосфере Венеры позволит лучше понять механизм суперротации.

На обоих полюсах Венеры наблюдаются так называемые «полярные диполи». Впервые существование атмосферного вихря на северном полюсе Венеры было зафиксировано по снимкам, полученным АМС Mariner-10 (Murray et al., 1974). Было установлено, что диаметр полярного атмосферного вихря составляет несколько тысяч километров. ИК-радиометр АМС Pioneer-Venus впервые позволил исследовать термическую структуру полярной области. В результате вблизи северного полюса Венеры была обнаружена горячая атмосферная структура гантелеобразной формы, которую и принято называть «полярным диполем». По данным АМС Pioneer-Venus диполь имеет относительно высокую температуру – 260К, и располагается почти симметрично относительно северного полюса планеты, простираясь к югу до 80° с.ш. На юге, на широте около 70° с.ш., полярный диполь ограничивает так называемый холодный воротник (Taylor et al., 1979б). Данные относительно существования горячих областей в полярных широтах были подтверждены результатами инфракрасного фурье-спектрометра (ФС) АМС «Венера-15» (Zasova et al., 1995).

Изображающий спектрометр VIRTIS проекта Venus-Express позволил детально исследовать структуру полярного диполя вблизи южного полюса. Было обнаружено, что период вращения южного полярного диполя

составляет  $2,48 \pm 0,05$  сут (Piccioni et al., 2007). Для сравнения период, полученный по данным AMC Pioneer-Venus, составил от 2,79 до 3,21 сут (Schofield & Diner, 1983). Спектральные изображения полярной области, полученные VIRTIS, позволяют исследовать динамику полярного вихря на разных уровнях по высоте, что способствует лучшему пониманию процессов, протекающих в полярных областях атмосферы Венеры.

Динамика верхней атмосферы Венеры имеет иной тип глобальной циркуляции атмосферы – это так называемая солнечно-антисолнечная ячейка (Subsolar-Antisolar - SS-AS). Солнечно-антисолнечная ячейка в атмосфере возникает в результате разности температур на дневной и ночной стороне термосферы и сохраняет стабильность на высотах выше уровня мезосферы, т.е. выше 120 км (Bougher et al., 1997, 2006). Благодаря этому типу циркуляции воздушные массы поднимаются в подсолнечной точке около местного полудня, переносятся через терминатор на ночную сторону и опускаются в антисолнечной точке около полуночи.

На ночной стороне в верхней мезосфере Венеры наблюдается интенсивное свечение молекулярного кислорода на длине волны 1,27 мкм (Connes et al., 1979; Meadow & Crisp, 1996; Mills & Allen, 2007). Свечение возникает в результате рекомбинации атомов кислорода, которые образуются на дневной стороне при фотолизе  $\text{CO}_2$  и CO. Светящийся молекулярный кислород образует характерные атмосферные структуры, условно называемые «кислородными облаками». Исследование перемещения кислородных облаков позволяет получать информацию об атмосферной циркуляции на высоте около 100 км, характер которой пока слабо изучен (Bougher et al., 1994, 2006).

**Целью работы** является исследование параметров циркуляции средней атмосферы Венеры методами расчетов зонального термического ветра в циклострофическом приближении и непосредственные измерения перемещения деталей облачного покрова на разных высотах, а также поиск закономерностей в вариациях полученных динамических характеристик.

### **Новизна работы**

- Впервые получены поля скоростей зонального термического ветра в зависимости от местного времени, что позволило провести гармонический анализ и исследовать влияние солнечно-связанных тепловых приливов на динамические характеристики мезосферы Венеры. Продемонстрирована доминирующая роль полусуточной приливной волны.
- Разработана оригинальная методика измерения скорости ветра, его зональной и меридиональной составляющих, основанная на визуальной оценке смещения идентифицированных деталей облачного покрова.
- Получен средний широтный профиль зональной и меридиональной компонент скорости ветра с покрытием от  $0^{\circ}$  до  $85^{\circ}$  по широте.
- Продемонстрирован солнечно-антисолнечный характер циркуляции атмосферных слоев на верхней границе мезосферы. Исследованы основные закономерности динамики кислородных облаков.

### **Апробация работы и публикации**

Результаты работы докладывались на семинарах отдела «Физики планет и малых тел Солнечной системы» в ИКИ РАН, а также на международных конференциях и совещаниях: Генеральных Ассамблеях COSPAR, сессиях Европейского Геофизического Союза (EGU), Отделения

Планетных Наук Американского Астрономического общества (DPS AAS), Европейских Планетных Конгрессах (Europlanet), на рабочих совещаниях по приборам PFS, VMC и VIRTIS.

За последние 5 лет сделано 8 докладов на конференциях, включая доклады с соавторами.

Всего по теме диссертации опубликована 21 работа, перечень которых приведен в конце автореферата.

### **Положения, выносимые на защиту**

- Закономерности в поведении среднеширотного ветрового джета по данным ФС на АМС «Венера-15», представляющего собой устойчивое струйное течение в мезосфере Венеры на высотах 65-70 км. Впервые показано, что:
  - изменения скорости в джете имеют солнечно-связанный характер, доминирующую роль играет полусуточная волна;
  - изменения положения (по широте) максимума джета носят солнечно-связанный характер;
  - существует зависимость зональной скорости максимума джета от высоты и широты.
- Уточнены параметры и выявлены закономерности в циркуляции вблизи верхней границы облаков по визуальным измерениям смещения деталей облачного покрова на УФ-изображениях камеры VMC на АМС Venus-Express:
  - средний широтный профиль скорости ветра, его зональная и меридиональная составляющие;
  - солнечно-связанный характер изменения скорости в широтном профиле, зависимость от местного времени.

- Получены данные о циркуляции верхней мезосферы по наблюдениям «кислородных облаков» на высотах около 100 км:
  - основные характеристики отличной от суперротации солнечно-антисолнечной циркуляции, особенности перемещения «кислородных облаков» с дневной стороны на ночную через терминаторы с последующей концентрацией в среднеширотной и экваториальной областях около местной полуночи;
  - солнечно-связанные зависимости изменения скорости «кислородных облаков».

### **Научная и практическая ценность работы**

Разработанная методика позволила рассчитать поля скоростей зонального термического ветра на основе банка данных температурных профилей, полученных в процессе повторной обработки результатов ФС, установленного на борту АМС «Венера-15». Геометрия измерений «Венеры 15» (наблюдения проводились вдоль меридиана, а интервал широт в секторе экватор – полюс – экватор измерялся в течение часа, т.е. практически одновременно, для одного и того же местного времени) впервые позволила получить скорости термического ветра в зависимости от местного времени. На момент публикации результатов по этой части диссертации (2000 год) это был первый опыт исследования устойчивых суточных вариаций в поведении среднеширотного ветрового джета в мезосфере Венеры, в том числе для ночной стороны планеты. При этом был показан солнечно-связанный характер изменения скорости зонального термического ветра, полученного на основе данных, усредненных по 20-градусному интервалу солнечных долгот, с доминирующей ролью полусуточной волны и существенным вкладом 1-й и 4-й гармоник. Эти



результаты до сих пор остаются актуальными для исследования атмосферы Венеры.

Разработанная для данных ФС «Венеры-15» методика расчетов зонального термического ветра с последующим анализом приливных эффектов периодического характера в настоящий момент уже используется для обработки данных прибора VIRTIS. Методика может быть применена для аналогичных исследований в последующих проектах.

Основная трудность в определении скорости ветра по деталям облачного покрова в случае атмосферы Венеры заключается в широком разнообразии структурных форм. Предложенная автором методика визуальной оценки скорости перемещения воздушных масс показала свою эффективность для случая мезосферы Венеры на всех широтах. Определен широтный профиль зональной и меридиональной компонент.

Используя методики визуальной оценки скорости ветра в отношении «кислородных облаков», автор получил результаты, иллюстрирующие иной тип атмосферной циркуляции вблизи верхней границы мезосферы. Солнечно-антисолнечная циркуляция «кислородных облаков» – это перемещение атмосферных образований, подсвеченных кислородом, с дневной стороны на ночную через терминаторы с последующей концентрацией в среднеширотной и экваториальной областях около полуночи.

Показано, что циркуляция в верхней мезосфере (переходная область от суперротации к циркуляции SS-AS) имеет сложный и переменный характер: SS-AS в чистом виде, когда скорость ветра меняет знак около полуночи, SS-AS с влиянием зональной суперротации, скорость меняет знак вблизи полуночи, с большим влиянием гравитационных волн и суперротации нижележащих слоев.

Разработанные методики могут найти применение при обработке аналогичных данных в будущих проектах, например, в содержащемся в ФКП России проекте «Венера-Д».

### **Личный вклад автора**

Автору принадлежит равный с другими соавторами вклад в разработку методики расчетов зонального термического ветра. Методика анализа скрытой периодичности и гармонический анализ применительно к планетным исследованиям разработана автором самостоятельно. Также автором разработана методика определения скорости перемещения деталей облачного покрова по визуальным оценкам. Используя указанные методики, автор самостоятельно разработал программное обеспечение, провел расчеты и измерения, чтобы получить все перечисленные выше результаты.

### **Содержание работы**

Работа состоит из Введения, четырех глав, Заключения и Приложений.

**Введение.** В данном разделе обосновывается актуальность темы исследования и формулируются цели работы. Дается общий обзор работ, в которых были получены основные результаты исследования динамики мезосферы Венеры с помощью приборов на орбитальных аппаратах. Приводится характеристика основных методов определения параметров атмосферной циркуляции.

**Глава 1 – «Зональный термический ветер»** – посвящена обсуждению результатов расчетов зонального термического ветра по данным фурье-спектрометра, установленного на борту АМС «Венера-15».

В параграфе 1.1 приводится спецификация исходных данных и дается описание эксперимента «Фурье-спектрометр» (ФС) на борту АМС

«Венера-15». Благодаря полярной орбите ФС за один сеанс получал скан, близкий к меридиональному. В большинстве сеансов ось визирования ФС была почти параллельна оси вращения планеты (Moroz et al., 1986; Oertel et al., 1987). Вследствие такой геометрии наблюдений солнечная долгота  $L_S$  для каждой ветви орбиты (до полюса и после полюса) оставалась почти постоянной. Это позволило исследовать вариации по местному времени в полученных результатах.

В параграфе 1.2 дается постановка задачи расчетов зонального термического ветра, обосновывается методика расчета зонального термического ветра в циклострофическом приближении.

Венера – медленно вращающаяся планета, поэтому состояние динамики ее атмосферы определяется циклострофическим балансом (Leovy, 1973; Schubert, 1983; Gierasch, 1997), когда центробежная сила, действующая на единичную массу, уравновешивается меридиональной компонентой градиента давления. В этом случае уравнение зонального термического ветра имеет вид:

$$2u \frac{\partial u}{\partial \zeta} = - \frac{R}{\operatorname{tg}(\varphi)} \left( \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)_{p=\text{const}}, \quad (1.1)$$

где  $u$  – зональная скорость (м/с),  $R$  – газовая постоянная для атмосферы Венеры (191,4 Дж/(кг К)),  $T$  – температура (К),  $\varphi$  – широта (радианы),  $\zeta$  – вертикальная координата (относительные единицы), задаваемая как

$$\zeta = -\ln \frac{P}{P_{\text{ref}}}, \quad (1.2)$$

здесь  $P_{\text{ref}}$  - давление на уровне, принятом за начальный.

Уравнение (1.1) интегрировалось по высоте с использованием трапецеидальной разностной формулы:

$$\frac{u_{n+1}^2 - u_n^2}{\Delta\zeta} = -\frac{R}{2tg(\varphi)} \left( \frac{\partial T}{\partial \varphi_{n+1}} + \frac{\partial T}{\partial \varphi_n} \right)$$

или

$$u_{n+1}^2 = u_n^2 - \frac{R\Delta\zeta}{2tg(\varphi)} \left( \frac{\partial T}{\partial \varphi_{n+1}} + \frac{\partial T}{\partial \varphi_n} \right). \quad (1.3)$$

Для решения уравнения (1.3) необходимо задать граничные условия (широтный профиль зонального ветра  $u_0(\varphi)$  на начальном изобарическом уровне). Был выбран уровень, соответствующий  $P_{ref} = 280$  мбар (примерно 58 км):

$$u_0(\varphi) = \left[ 200sch\left(\frac{\varphi - 75}{10}\right) + 75 \right] \cos \varphi, \quad (1.4)$$

Вид аналитической функции для граничного условия был заимствован из работы Counselman (1980).

В параграфе 1.3 обсуждаются проблемы выбора вида граничных условий. Показано, что решение задачи (1.3) слабо зависит от вида граничных условий.

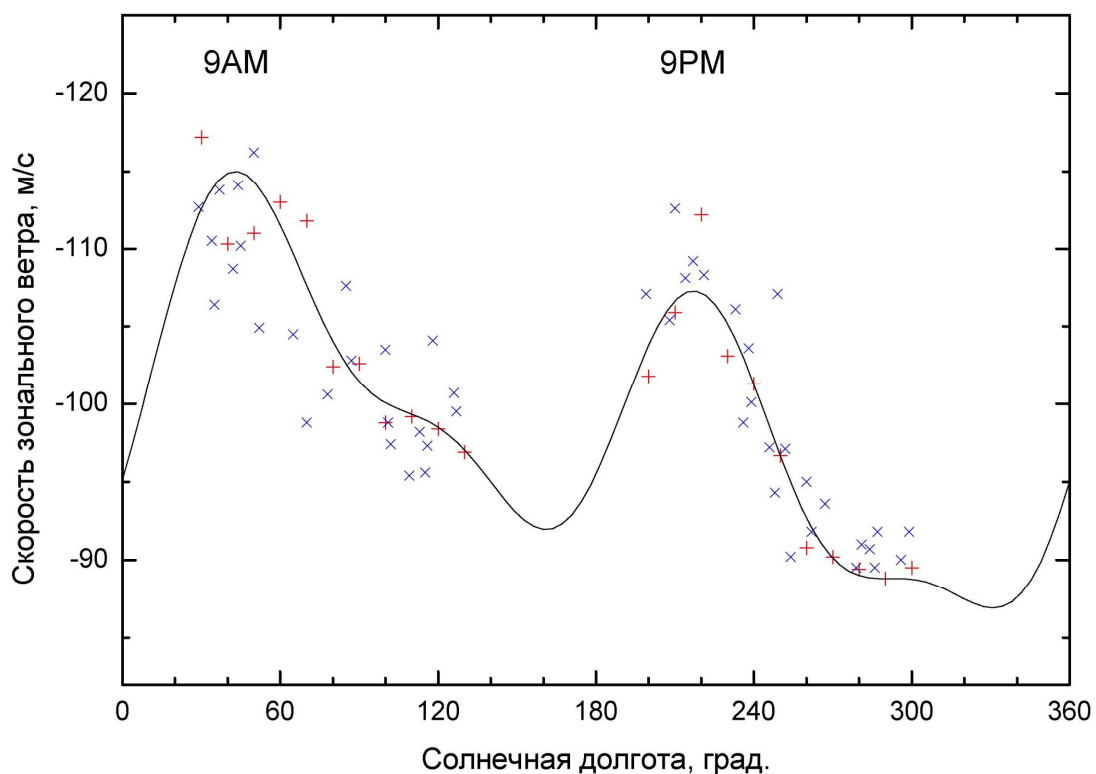
В параграфе 1.4 обсуждаются результаты расчетов полей зонального термического ветра. На полученных полях скоростей зонального термического ветра среднеширотный джет присутствует как основная деталь для каждого из диапазонов усреднения по солнечной долготе.

В параграфе 1.5 детально рассматривается проблема выявления скрытой периодичности в полученном ряде оценок скоростей, дается описание применяемой методики гармонического анализа. Методом наименьших квадратов получена следующая аппроксимация зависимости скорости зонального ветра от местного времени:

$$u(L) = -98,44 + 5,78 \cos(L + 89,64) + 9,36 \cos(2L + 88,65) + 0,19 \cos(3L + 32,99) + 3,52 \cos(4L + 34,69). \quad (1.5)$$

Получены следующие основные результаты:

- Изменение скорости зонального ветра в среднеширотном ветровом джете в течение местных солнечных суток носит периодический характер. Доминирующая роль в модуляции величины скорости принадлежит полусуточной приливной волне, существенный вклад дают также 1-я и 4-я гармоники тепловых приливов.



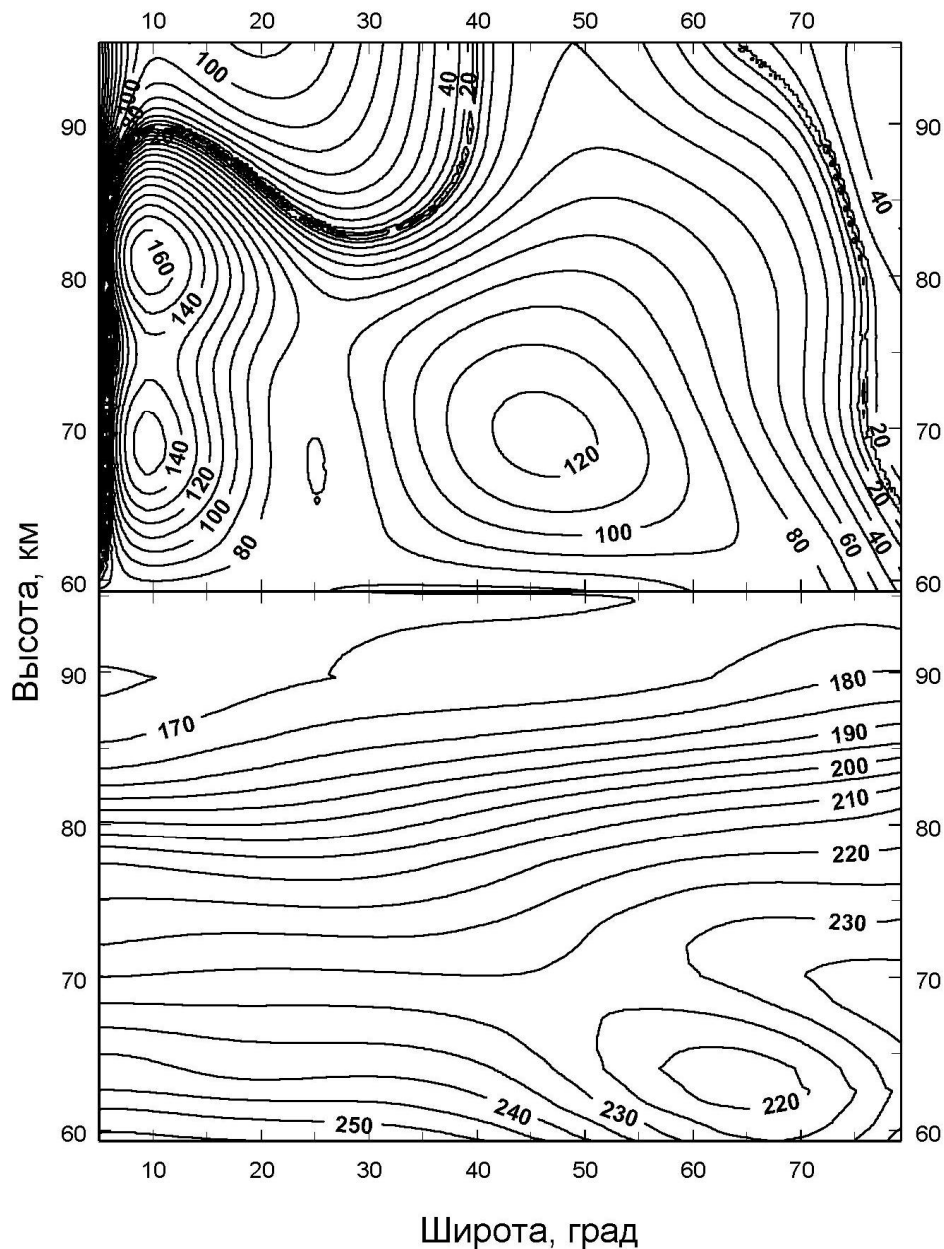
**Рис. 1.** Скорость зонального термического ветра как функция солнечной долготы: «х» - результаты, полученные из отдельных сеансов, «+» - при усреднении исходных данных на интервале солнечных долгот  $20^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Сплошной линией показан аппроксимирующий гармонический полином (1.5), построенный по усредненным данным с использованием метода наименьших квадратов.

- Скорости ветра, усредненные по 20-градусному интервалу солнечных долгот, показали периодические изменения величины скорости, которые в течение венерианских суток имеют два максимума: 9 AM и 9 PM (115 и 110 м/с соответственно). Скорость ветра на вечернем терминаторе систематически ниже, чем на утреннем, примерно на 5-10 м/с (рис. 1).
- Положение максимума ветрового джета изменяется в течение суток. После восхода он движется к низким широтам, достигает крайнего южного положения примерно в 7:30 AM, а затем возвращается обратно к более высоким широтам. Аналогичный эффект присутствует на «вечерней» стороне.
- Имеет место корреляция скорости ветра в среднеширотном джете с его положением (широтой и высотой). Аналитическая зависимость, аппроксимирующая скорость зонального ветра как функцию широты, указывает на вращение, близкое к «твердотельному» в рассматриваемом интервале широт. Аналитическая зависимость, аппроксимирующая скорость зонального ветра как функцию высоты, указывает на сохранение величины потока. Это позволяет сделать вывод о том, что во всех случаях наблюдается один и тот же ветровой джет, который меняет свое местоположение в течение суток.

В параграфе 1.6 обсуждаются результаты расчетов полей зонального термического ветра, построенные с использованием «южного сеанса» (Засова и др., 2000). На рис. 2 представлен пример поля зонального термического ветра, полученного из соответствующего поля температур. Максимум скоростей зонального ветра в средних широтах, так называемый среднеширотный ветровой джет, соответствует максимальным градиентам

поля температур. Среднеширотный ветровой джет присутствует на всех полученных полях скоростей: как на дневной, так и на ночной стороне.

В параграфе 1.7 суммируются основные результаты, полученные в Главе 1.

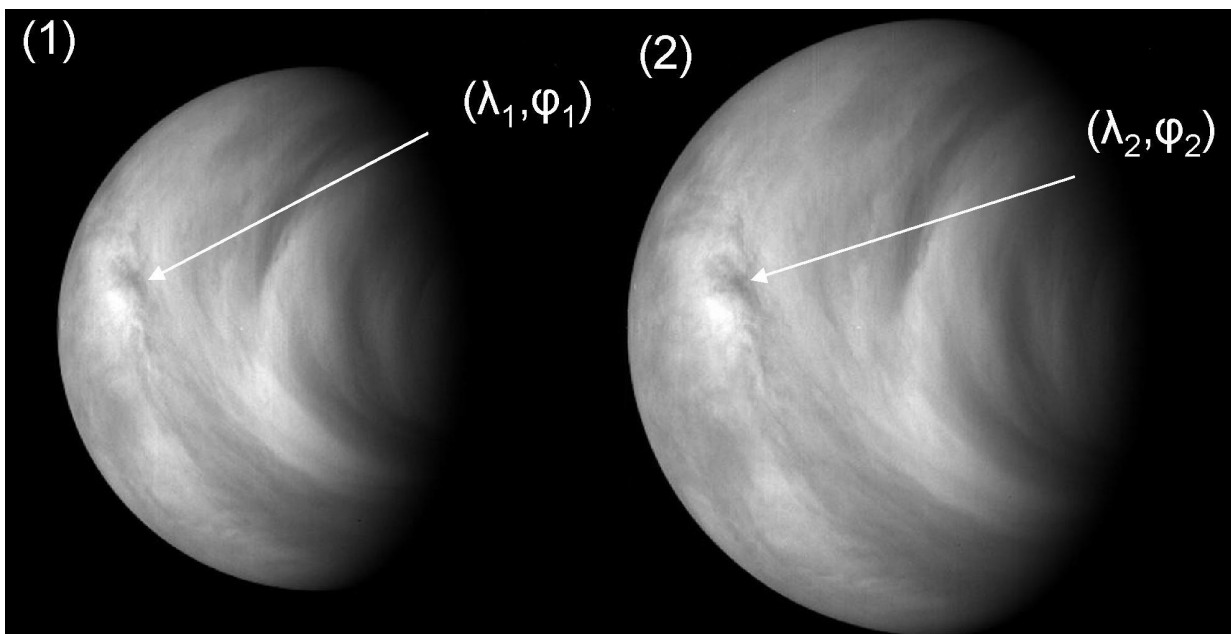


**Рис. 2.** Поле скоростей зонального термического ветра (вверху) и соответствующее поле температур (внизу), построенные на основе данных в интервале солнечных долгот от  $70^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ .

В главе 2 – «Циркуляция атмосферы по данным ультрафиолетовых наблюдений облачного покрова Венеры» – рассматриваются результаты измерений скорости перемещения облачного покрова Венеры по сериям УФ-изображений ( $365\pm 10$  нм), полученных камерой VMC (Markiewicz et al., 2007).

В параграфе 2.1 дается краткое описание прибора VMC, установленного на борту АМС Venus-Express, и исходных данных – УФ-изображений ( $365\pm 10$  нм). Высота облачного покрова, наблюдаемого в этой длине волны, была оценена по оптической глубине на уровне примерно 65-70 км (Tomasko et al., 1985).

В параграфе 2.2 обосновывается использование методики оценки скорости ветра, основанной на визуальной идентификации деталей облачного покрова на паре разнесенных по времени кадров.



**Рис. 3.** Пример пары УФ-изображений VMC для орбиты 0461 (1- кадр 0025; 2- кадр 0030), разделенных по времени на 1 час. Для каждого пикселя кадра рассчитывается полный комплект геометрических параметров (широта, долгота, солнечные углы, местное солнечное время и т.п.).



На рис. 3 представлен пример пары УФ-кадров, полученных VMC в ночь с 25 на 26 июля 2007 г. Зная интервал времени между снимками в паре ( $\Delta t$ ), а также широту ( $\varphi$ , радианы) и долготу ( $\lambda$ , радианы) идентифицированной детали на обоих снимках, легко вычислить зональную  $u_z$  и меридиональную  $u_M$  компоненты скорости по следующим формулам:

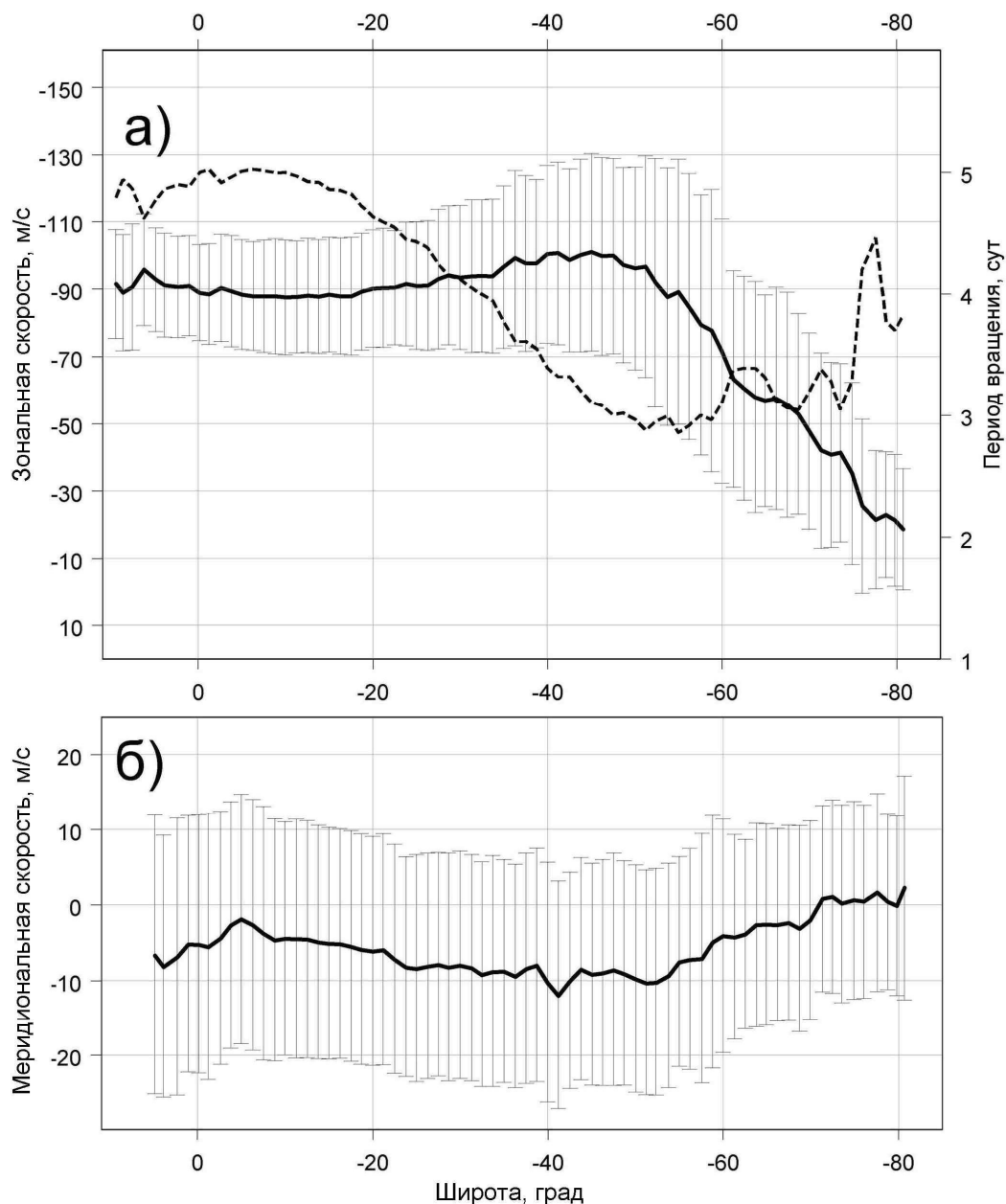
$$u_z = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(R + h) \cos(\varphi_1)}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

$$u_M = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)(R + h)}{\Delta t}, \quad (2.2)$$

где  $R$  – радиус Венеры,  $h$  – предполагаемая высота идентифицированной детали облачного слоя над поверхностью.

В параграфе 2.3 рассматриваются результаты измерения скорости ветра на примере двух типичных орбит: 0281 и 0462. Сравниваются зональные широтные профили ветра, измеренные для этих орбит. Обсуждаются проблемы точности измерений, ее зависимости от широты наблюдаемой детали облачного покрова. В частности, увеличение среднеквадратичной ошибки зональной компоненты на широтах 45-57 градусов (область среднеширотного джета) вызвана большой протяженностью идентифицируемых деталей по долготе. При этом меридиональная компонента демонстрирует примерно одинаковые значения для среднеквадратичной ошибки.

Вследствие естественных физических причин отличия в величинах зональной скорости для разных орбит могут достигать 20 м/с по абсолютной величине.



**Рис. 4.** Средний зональный профиль, полученный по измерениям с УФ-изображений VMC: зональная компонента скорости (верхний график, сплошная линия), меридиональная компонента (нижний график, сплошная линия). Пунктирная линия на верхнем графике показывает изменение зонального периода вращения атмосферы.

Параграф 2.4 посвящен среднему широтному профилю ветра, полученному усреднением по всей совокупности измерений. В процессе работы была создана статистически значимая база данных оценок скорости ветра: более 17 000 измерений по 57 орбитам с достаточно

равномерным покрытием по местному времени. Период наблюдений охватывает более трех венерианских лет. По всей совокупности полученных данных были построены средние зональный и меридиональный широтные профили ветра.

Средний широтный профиль позволяет сделать следующие выводы:

- В низких широтах средняя зональная скорость составляет около 90 м/с. Зональная скорость достигает максимума на широте около  $47^{\circ}$  и составляет 105 м/с. От широты  $50^{\circ}$  скорость линейно уменьшается по абсолютной величине в направлении к полюсу (рис. 4а);
- Период вращения атмосферы на экваторе составляет 5 земных суток, затем падает до минимума 3 суток на широте около  $50^{\circ}$  (см. рис. 4а);
- Меридиональная скорость составляет величину около 0 на экваторе, а затем линейно спадает до -10 м/с, достигая минимума на широте  $\sim 50^{\circ}$  («-» означает движение от экватора к полюсу) (рис. 4б). Полученный меридиональный широтный профиль подтверждает наличие ячейки Хэдли и позволяет достаточно надежно определить ее границы. Восходящая ветвь ячейки Хэдли находится на экваторе, а нисходящая – в области средних широт, на широтах  $\sim 50^{\circ}$  (Limaе et al., 2008; Moissl et al., 2008a и 2008б).

В параграфе 2.5 анализируются проявления солнечно-связанных зависимостей. Анализ оценок скорости, содержащихся в базе данных, способствовал получению следующих основных результатов:

- Положение максимума скорости зонального ветра варьируется от орбиты к орбите в пределах от  $35^{\circ}$  до  $55^{\circ}$  в зависимости от местного времени.

- Скорость зонального ветра демонстрирует зависимость от местного солнечного времени. Обнаруживаются возможные суточная и полусуточная составляющие. Наблюдаются два максимума зональных скоростей: утром, около 8<sup>h</sup>30<sup>m</sup> местного времени, и вечером, около 16<sup>h</sup>30<sup>m</sup>, т.е., учитывая ограниченность выборки дневной полусферой, максимальные скорости наблюдаются вблизи терминаторов.

В параграфе 2.6 суммируются основные результаты, полученные в главе 2.

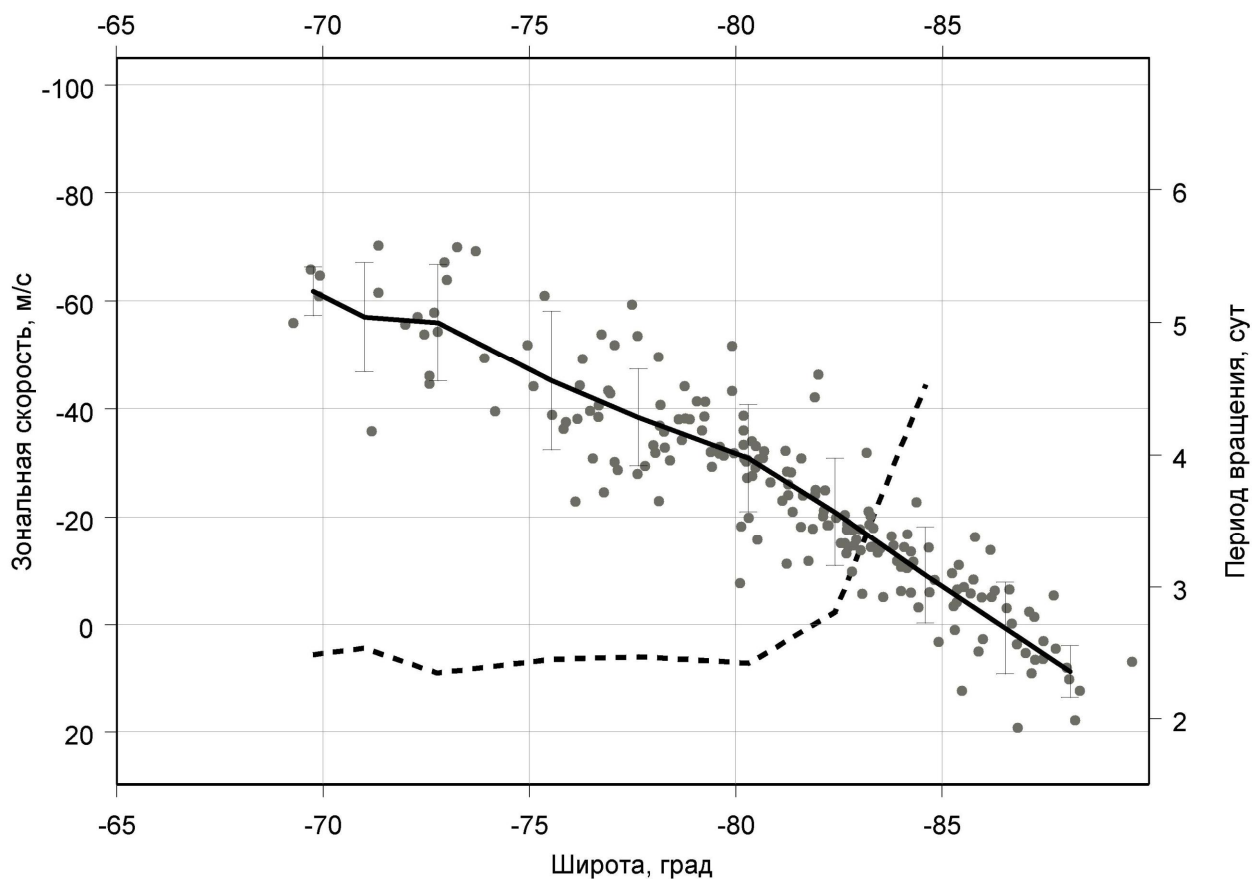
В главе 3 – «Динамика южной полярной области» – обсуждаются особенности циркуляции полярной области мезосферы Венеры.

В параграфе 3.1 дается краткая характеристика возможностей изображающего спектрометра VIRTIS (Drossart et al., 2007). Приводится спецификация исходных данных – кадров изображающего спектрометра VIRTIS-M, установленного на борту AMC Venus-Express. Особенность использования кадров изображающего спектрометра состоит в том, что на определенных длинах волн прибор видит разные слои мезосферы. Это дает возможность исследовать вертикальную структуру циркуляции мезосферы Венеры. Для исследования полярного диполя были использованы кадры в двух спектральных каналах – 1,74 мкм (высота слоя – ~ 50 км) и 3,70 мкм (высота около 63 км).

В параграфе 3.2 приведен краткий обзор сведений о структуре и динамике полярного диполя. До проекта Venus-Express все данные по циркуляции полярной области относились к северному полушарию планеты. Прибор VIRTIS благодаря своим уникальным свойствам позволил получить детальные изображения полярного диполя в южном полушарии.

Период вращения полярного диполя, вычисленный по первым 45 дням наблюдений, равен  $-2,48 \pm 0,05$  сут. (Piccioni et al., 2007).

В параграфе 3.3 рассматриваются результаты оценки скорости перемещения деталей полярного диполя, полученные в спектральном канале 1,74 мкм (высота слоя – около 50 км). Измерения проводились для двух орбит: 0352 и 0474. Диполь имеет почти максимальный размер для орбиты 0352 и минимальный для орбиты 0474. Такой выбор исходного материала позволил получить максимальные и минимальные оценки динамических параметров. Пример зонального широтного профиля, полученного для орбиты 0474, представлен на рис. 5.



**Рис. 5.** Зональный широтный профиль полярной области, полученный по изображениям 1,74 мкм для орбиты 0474. На рисунке пунктиром обозначена зависимость зонального периода вращения атмосферы от широты  $P(\varphi)$ .

В параграфе 3.4 рассматриваются результаты оценки скорости перемещения деталей полярного диполя, полученные в спектральном канале 3,7 мкм (высота слоя – ~ 63 км).

Параграф 3.5 посвящен исследованию зависимости меридиональной компоненты скорости ветра в полярном диполе от долготы и местного времени.

В параграфе 3.6 суммируются выводы сравнительного анализа циркуляции полярного диполя на разных высотах.

Получены следующие основные результаты:

- Полярный диполь демонстрирует вращение, близкое к твердотельному.
- Период вращения атмосферного слоя в высоких широтах на высотах около 50 км составляет переменную величину (от 2,4 до 2,7 земных суток). На высоте около 63 км скорость вращения увеличивается, и период составляет от 1,9 до 2,6 земных суток.
- Величина периода коррелирует с размером полярного диполя. Чем больше диаметр, тем больше период вращения, что свидетельствует о сохранении углового момента.
- Полярный диполь демонстрирует четко выраженную зависимость меридиональной скорости от местного солнечного времени.
- Для одного и того же диполя на большей высоте, 63 км (3,7 мкм), амплитуда изменения меридиональной компоненты скорости систематически выше, чем на высотах около 50 км (1,74 мкм).
- Область нулевых значений меридиональной компоненты смещается от орбиты к орбите, что является следствием прецессии полярного диполя относительно полюса.

**В главе 4 – «Режим циркуляции атмосферы вблизи верхней границы мезосферы по данным перемещения “кислородных облаков”»** – обсуждаются особенности циркуляции атмосферы Венеры на верхней границе мезосферы, на высотах около 100 км. В качестве индикаторов движения воздушных масс используются «кислородные облака».

Параграф 4.1 посвящен обсуждению особенностей циркуляции верхней мезосферы, так называемой солнечно-антисолнечной ячейки (Subsolar-Antisolar – SS-AS). Рассматриваются вопросы, связанные с наблюдением свечения молекулярного кислорода на длине волны 1,27 мкм на ночной стороне Венеры (Connes et al., 1979; Meadow & Crisp, 1996; Mills & Allen, 2007).

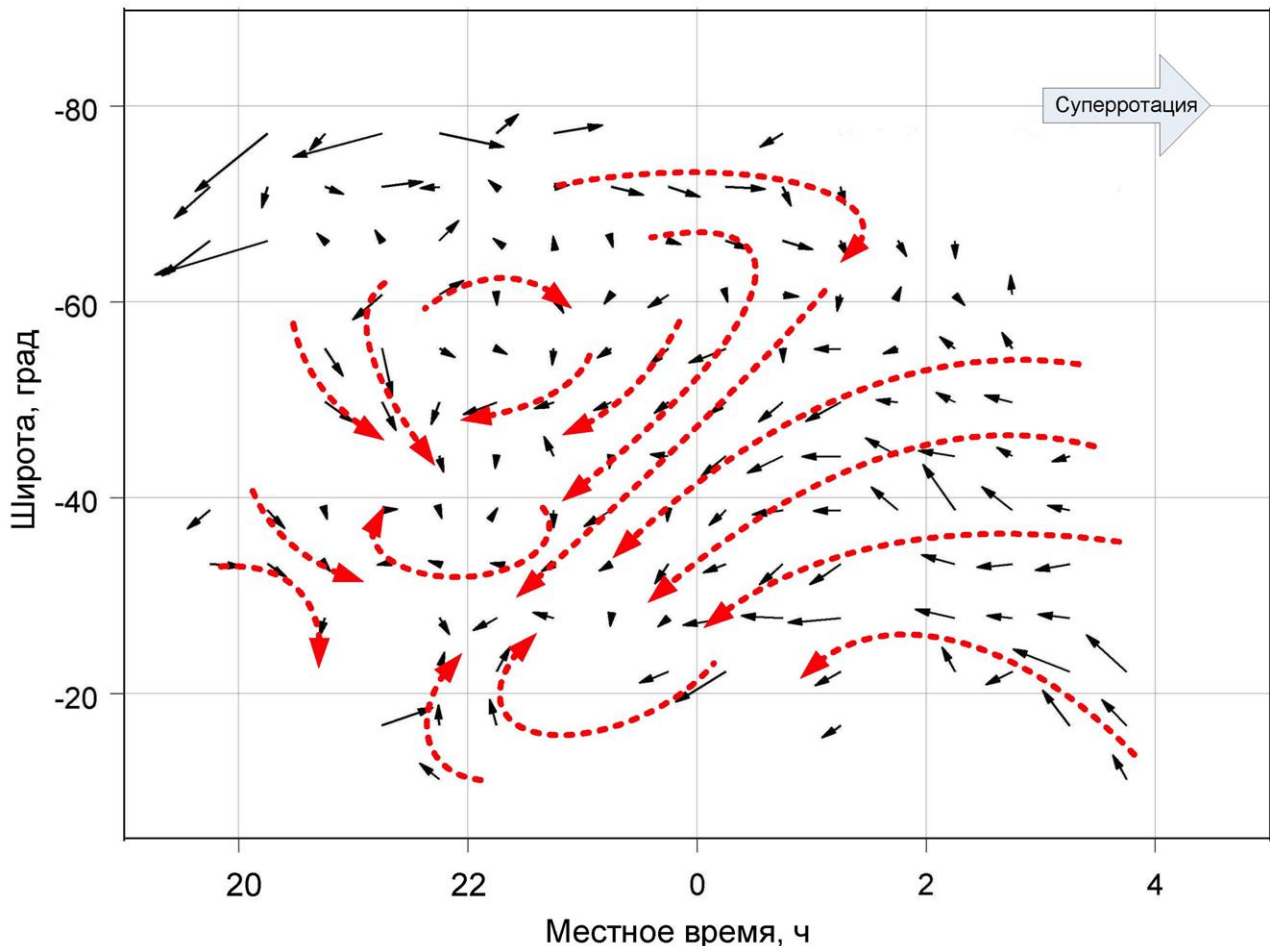
Дается спецификация исходных данных: изображение кислородных облаков в канале 1,27 мкм прибора VIRTIS. В настоящее время обработаны данные по 21 орбите, получено более 1000 векторов смещения кислородных облаков. Период наблюдений охватывает интервал с 2006-07-02 по 2007-04-07.

В параграфе 4.2 обсуждаются особенности измерения скорости перемещения кислородных облаков.

На основе анализа широтных профилей дается сравнение динамики кислородных облаков с динамикой основного облачного слоя. Значения как зональной, так и меридиональной скоростей могут изменяться от +100 м/с до -100 м/с (знак «-» означает ретроградное вращение). Рассматриваются примеры перемещения отдельных кислородных облаков по избранным орбитам.

В параграфе 4.3 обсуждается зависимость скорости перемещения кислородных облаков от местного солнечного времени. На примере

отдельных орбит рассматриваются характерные особенности перемещения облаков в высоких, средних и низких широтах.



**Рис. 6.** Среднее векторное поле скоростей для кислородных облаков, полученное по всей совокупности измерений. Жирным пунктиром изображены возможные линии тока. В правом верхнем углу стрелкой показано направление зональной суперротации атмосферы Венеры.

На рис. 6 показана средняя горизонтальная циркуляция на ночной стороне Венеры, полученная посредством пространственного и временного усреднения по совокупности видимых движений контрастных деталей кислородных облаков. На среднем векторном поле скоростей четко прослеживается структура средней циркуляции, которая является комбинацией режимов зональной суперротации и солнечно-антисолнечной ячейки.



Был проведен корреляционный анализ распределения зональной и меридиональной компонент по местному солнечному времени.

В параграфе 4.4 суммируются основные результаты, полученные в главе 4:

- Продемонстрирована солнечно-антисолнечная циркуляция «кислородных облаков»: перемещение атмосферных образований, подсвеченных кислородом, с дневной стороны на ночную через терминаторы с последующей концентрацией в среднеширотной и экваториальной областях около полуночи (см. рис. 6).
- Широтные профили зональной и меридиональной компонент скорости показывают принципиальное отличие параметров динамики «кислородных облаков» от суперротации основного облачного слоя, что свидетельствует о смене основного механизма циркуляции атмосферы Венеры на высотах 95-100 км.
- Линии регрессии эллипсов для зональной и меридиональной компонент демонстрируют взаимную антикорреляцию, свидетельствующую о круговом характере движения «кислородных облаков».

В **Заключении** подводятся основные итоги работы и делаются завершающие выводы. Основным итогом работы является создание методик, дающих возможность исследовать динамические характеристики циркуляции мезосферы Венеры. С их помощью был получен большой массив данных, который позволил провести анализ локальных характеристик мезосферы Венеры. При этом многие выводы и оценки, касающиеся циркуляции мезосферы Венеры, были получены впервые (см. раздел «Новизна работы»). В частности, впервые получены поля скоростей зонального термического ветра в зависимости от местного

времени. Несмотря на то, что работа представляет собой законченный этап исследования циркуляции атмосферы Венеры, ее результаты могут найти применение в изучении плотных атмосфер планет Солнечной системы и их спутников.

**Приложение 1** содержит спецификацию базы данных УФ-наблюдений VMC; **Приложение 2** - средний широтный профиль, полученный по УФ-наблюдениям VMC; **Приложение 3** - спецификацию базы данных измерений перемещения кислородных облаков (VIRTIS, 1,27 мкм).

Все перечисленные выше результаты диссертации являются новыми и актуальными и имеют практическое применение в области исследования динамики атмосфер планет.

#### **Цитируемая литература**

1. Засова Л.В., Линкин В.М., Хатунцев И.В. Зональный ветер в средней атмосфере Венеры // *Космич. исслед.* 2000. Т.38. №1. С.54-70.
2. Bougher S.W., Borucki W.J. Venus O<sub>2</sub> visible and IR nightglow: implications for lower thermosphere dynamics and chemistry // *J. Geophys. Res.* 1994. V.99. P.3759–3776.
3. Bougher, S. W., Alexander M. J., Mayr H. G. Upper atmosphere dynamics: Global circulation and gravity waves // 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. 259-291.
4. Bougher S.W., S. Rafkin, P. Drossart. Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express // *Planet. Space Sci.* 2006. V.54. P.1371-1380.
5. Connes P., Connes J. *et al.* O<sub>2</sub> emission in the day & night airglow of Venus // *Astroph. J.* 1979. V.233. L29-L32.
6. Counselman C.C., Gourevitch S.A., King R.W., Lorient G.B., Grinsberg E.S.; Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry // *J. Geophys. Res.* 1980. V.85. P.8026-8030.

7. Drossart P., Piccioni G. et al. Scientific goals for the observation of Venus by VIRTIS on ESA/Venus express mission // *Planet. Space Sci.* 2007. V.55. P.1653-1672.
8. 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.
9. Leovy C.W.; Rotation of the upper atmosphere of Venus; *J. Atmosph. Sci.* 1973. V.30. P.1218-1220.
- 10.Limaye S.S., Grassotti C., Kuetemeyer M.J. Venus: Cloud level circulation during 1982 as determined from Pioneer Cloud Photopolarimeter images // *Icarus.* 1988. V.73. P.193-211.
- 11.Limaye S., Khatuntsev I. et al. Cloud Level Circulation on Venus from Venus Monitoring Camera on Venus Express // *37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, Montréal, Canada.* 2008. P.1780.
- 12.Markiewicz W. J., Titov D. V. et al. Venus Monitoring Camera for Venus Express // *Planet. Space Sci.* 2007. V.55(12). P.1701-1711.  
doi:10.1016/j.pss.2007.01.004.
- 13.Meadows V.S., Crisp D. Ground-based near infrared observations of the Venus nightside: The thermal structure and water abundance near the surface // *J. Geophys. Res.* 1996. V.101. P.4595–4622.
- 14.Mills F.P, Allen M. A review of selected issues concerning the chemistry in Venus middle atmosphere // *Planet. Space Sci.* 2007. V.55. P.1729-1740.
- 15.Moissl R., Limaye S. S. et al. Results on Atmospheric Dynamics at the Venus Cloud Tops from Digital and Manual Wind Tracking in VMC Images // *American Astronomical Society, DPS meeting #40, #40.07, 2008DPS....40.4007M, 2008a.*
- 16.Moissl R., **I. Khatuntsev**, S.S.Limaye et al. Cloud top winds from tracking UV features in VMC Images // *J. Geophys. Res.* 2008b. V.113.  
doi:10.1029/2008JE003117.
- 17.Moroz V.I., Spankuch D. et al. Venus spacecraft infrared radiance spectra. Some aspects of their interpretation // *Applied Optics.* 1986. V.25, №10.
- 18.Murray B. C., Belton J. S. et al. Venus: Atmospheric motion and structure from Mariner 10 pictures // *Science.* 1974. V.183. P.1307-1315.

19. Newman M., Schubert G. *et al.* Zonal winds in the middle atmosphere of Venus from Pioneer Venus radio occultation data // *J. Atmosph. Sci.* 1984. V.41. P.1901-1913.
20. Oertel D., Moroz V.I. *et al.* Infrared spectrometry from Venera-15 and Venera-16 // *Adv. Space Res.* 1987. V.5. №9. P.25.
21. Piccioni G., Drossart P. *et al.* South-polar features on Venus similar to those near the north pole // *Nature.* 2007. V.450. P.637-640.
22. Schofield J. T., Diner D. J. Rotation of Venus's polar dipole // *Nature.* 1983. V.305. P.116-119.
23. Schubert G. General circulation and dynamical state of the Venus atmosphere // кн. Venus (Hunter D.M., Colin L., Donahue T.M., and Moroz V.I. Eds.), Univ. of Arizona Press, Tucson. 1983. P.681-765.
24. Taylor F.W., McCleese, D. J., Diner, D. J. Polar clearing in the Venus clouds observed from the Pioneer Orbiter // *Nature.* 1979a. V.279. P.613-614.
25. Taylor F. W., Diner D. J. *et al.* Temperature, cloud structure, and dynamics of Venus middle atmosphere by infrared remote sensing from Pioneer Orbiter // *Science.* 1979b. V.205. P.65-67.
26. Taylor H.A.Jr., Brinton H.C. *et al.* Global observations of the composition and dynamics of the ionosphere of Venus: Implications for the solar wind interaction // *J. Geophys. Res.* 1980. V.85. P.7765-7777.
27. Tomasko M.G., Doose L. R., Smith P. H. The absorption of solar energy and the heating rate in the atmosphere of Venus // *Adv. Space Res.* 1985. V.5(9). P.71-79.
28. Zasova L.V. The structure of the Venusian atmosphere at high latitudes // *Adv. Space Res.* 1995. V.16. P89-98.

### Публикации по теме диссертации

1. Засова Л.В., Линкин В.М., **Хатунцев И.В.** Зональный ветер в средней атмосфере Венеры // *Космич. исслед.* 2000. Т.38. №1. С.54-70.
2. Засова Л.В., Мороз В.И., Игнатьев Н.И., **Хатунцев И.В.**, Формизано В. Исследование Венеры с помощью ИК-фурье спектрометров: ФС на Венере-15 и ПФС – на Венере-Экспресс // *Космич. исслед.* 2006. Т.44. №4. С.365-380.
3. **Хатунцев И.В.** Баротропная неустойчивость в средней атмосфере Венеры по результатам расчетов зонального ветра, основанных на

данных ИК фурье-спектрометра АМС «Венера-15» // *Космич. исслед.* 2000. Т.38. С.4.

4. Grassi D., Migliorini A., Piccioni G., Drossart P., Ignatiev N., **Khatuntsev I.**, Piccialli A. Temperature fields in the Venus mesosphere: possible evidence of seasonal trends // *37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, in Montréal, Canada.* 2008. P.1070.
5. **Khatuntsev I. V.**, Zasova L. V. Wind on Venus: a new interpretation of Venera-15 data. *Planetary systems: the long view // 9th Rencontres de Blois: held June 22-28, 1997, at CHâteau de Blois, France. ISBN: 2-86332-237-0. Ed. by L. M. Celnikier, and J. Trân Thanh Van. Published by Editions Frontières.* 1998. P.275.
6. Limaye S., **Khatuntsev I.**, Markiewicz W., Titov D., Moissl R. Cloud Level Circulation on Venus from Venus Monitoring Camera on Venus Express // *37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, Montréal, Canada.* 2008. P.1780.
7. Markiewicz W., Titov D., Limaye S., Moissl R., Ignatiev N., Basilevsky A., Shalygin E., Kreslavsky M., **Khatuntsev I.**, Keller H., Jaumann R., Thomas N., Michalik H. Morphology and dynamics of the Venus upper cloud layer // *37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, in Montréal, Canada.* 2008. P.1918.
8. Moissl R., Limaye S. S., **Khatuntsev I.V.**, Markiewicz W. J., Titov D. V. Results on Atmospheric Dynamics at the Venus Cloud Tops from Digital And Manual Wind Tracking in VMC Images // *American Astronomical Society.* 2008. *DPS meeting #40, #40.07, 2008DPS...40.4007M.*
9. Moissl R., **I. Khatuntsev**, S.S.Limaye et al. Cloud top winds from tracking UV features in VMC Images // *J. Geophys. Res.* 2008. V.113. doi:10.1029/2008JE003117.
10. Hueso R., Sanchez-Lavega A., Piccioni G., Drossart P., Gerard J.C., **Khatuntsev I.**, Zasova L. and Migliorini A. Morphology and Dynamics of Venus Oxygen Airglow from Venus Express/VIRTIS observations // *J. Geophys. Res.* 2008. V.113. E00B02, doi:10.1029/2008JE003081.
11. Piccialli A., Titov D., Grassi D., **Khatuntsev I.**, Drossart P., Piccioni G. and Migliorini A. Cyclostrophic winds from the Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer temperature sounding: A preliminary analysis // *J. Geophys. Res.* 2008. V.113. E00B11, doi:10.1029/2008JE003127.
12. Piccialli A., Titov D., Grassi D., **Khatuntsev I.**, Drossart P., Piccioni G., Migliorini A. Retrieval of the cyclostrophic wind in the Venus mesosphere from the VIRTIS/Venus Express temperature sounding // *37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, Montréal, Canada.* 2008. P.2429.

13. Politi R., Piccioni G., Drossart P., Cardesín M., **Khatuntsev I.** Study of the Venus Southern polar vortex as seen by VIRTIS on Venus Express // 37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, Montréal, Canada. 2008. P.2473.
14. Zasova L.V. and **Khatuntsev I.V.** Thermal zonal wind in the Venus middle atmosphere according to Venera 15 IR-spectrometry // *Adv. Space Res.* 1997. 19. N8. P.1181–1190.
15. Zasova L. V., Moroz V. I., Ignatiev N. I., **Khatuntsev I. V.** Structure of the Mesosphere of Venus from the reanalyzed Venera 15 IR-spectrometry data. *American Astronomical Society, DPS meeting #30, #48.02 // Bulletin of the American Astronomical Society.* 1998. V.30. P.1105.
16. Zasova L. V., **Khatuntsev I. V.**, Moroz V. I., Ignatiev N. I. Structure of the Venus middle atmosphere: Venera 15 fourier spectrometry data revisited // *Adv. Sp. Res.* 1999. V.23, Issue 9. P.1559-1568.
17. Zasova L. V., **Khatuntsev I. V.** et al. Investigation of the middle atmosphere of Venus as a key to understand its dynamics. *American Astronomical Society, DPS Meeting #33, #10.08 // Bulletin of the American Astronomical Society.* 2001. V.33. P.1038.
18. Zasova L.V., **Khatuntsev I. V.**, Ignatiev N. I., Moroz V. I. Local time variations of the middle atmosphere of Venus: Solar-related structures // *Adv. Sp. Res.* 2002. V.29(2), P.243-248.
19. Zasova L., Formisano V., Moroz V., Ignatiev N., Khatuntsev I. Structure of the middle atmosphere of Venus and future observation with PFS on Venus Express // *35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18 - 25 July 2004, Paris, France.* 2004. P.3518
20. Zasova L., Ignatiev N., **Khatuntsev I.**, Linkin V. Structure of the Venus atmosphere // *Planet. Space Sci.* 2007. V.55(12). P.1712-1728.
21. Zasova L., Migliorini A., Piccioni G., Drossart P., **Khatuntsev I.**, Shakun A., Ignatiev N. Night airglows in Venus atmosphere from VIRTIS-M Venus Express data // *37th COSPAR Scientific Assembly. Held 13-20 July 2008, Montréal, Canada.* 2008. P.3593.

055(02)2

РОТАПРИНТ ИКИ РАН

117997, Москва, Профсоюзная 84/32

---

Подписано к печати 11.11.08

Заказ 2160

Формат 70x108 1/32

Тираж 100 1,2 уч.-зд.-л.