

**Российская Академия наук
Институт космических исследований**

На правах рукописи

Пацаева Марина Всеволодовна

**Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным
камеры VMC орбитальной станции «Венера Экспресс»**

Специальность: 01.03.02 – «астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Засова Л.В.

Москва 2020

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Автоматизированный корреляционный метод отслеживания смещения деталей облачного покрова Венеры	26
1.1 Venus Monitoring Camera на борту орбитальной станции «Венера Экспресс». УФ изображения облачного покрова	26
1.2 Постановка задачи	30
1.3 Описание корреляционного метода.....	31
1.4 Сравнение визуального и корреляционного методов	39
1.5 Ошибки и чувствительность метода, точность измерений	43
1.5.1 Зависимость стандартного отклонения от широты. Анализ рассеяния измерений	43
1.5.2 Изменение величины стандартного отклонения при учёте вариаций в поведении горизонтального потока 46	46
1.6 Ложные смещения	48
1.7 Средние широтные профили ветра. Сравнение с измерениями, полученными предыдущими миссиями.....	51
1.8 Орбиты, использованные в исследовании	53
1.9 Средние поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра в координатах местное время – широта.....	54
1.10 Выводы по Главе 1	56
Глава 2. Динамика атмосферы в экваториальной области	57
2.1 Введение	57
2.2 Зависимость среднего зонального потока от топографии и местного времени.....	63
2.3 Долготно-широтные вариации среднего зонального потока	67
2.4 Долготно-широтные вариации среднего меридионального потока	69
2.5 Роль солнечно-связанных эффектов в вариациях горизонтального потока	71
2.6 Долготно-широтные и солнечно-приливные вариации на отдельных орбитах	76
2.7 Выводы к главе 2	79

Глава 3. Динамика атмосферы в средних широтах	81
3.1 Введение	81
3.2 Отдельные орбиты	84
3.3 Угол отклонения горизонтального потока	89
3.4 Связь высоты верхней границы облачного слоя с расположением облачных структур на изображении и с направлением ветра на широтах от 35° до 80° ю.ш. 92	
3.5 Выводы по Главе 3.....	93
Заключение	95
Список сокращений	98
Список литературы	99
Основные публикации по теме диссертации.....	111
Приложение 1. Орбиты, изображения которых были использованы для получения векторов перемещения автоматизированным методом	116
Приложение 2. Количество векторов смещения в выборках по местному времени	118

Введение

Актуальность темы исследования. Венера – ближайшая к Земле и вторая по удалённости от Солнца планета Солнечной системы. Сидерический период обращения Венеры составляет 224.7 земных суток. При этом Венера медленно, с периодом 243 суток, вращается вокруг своей оси с востока на запад, т.е. в отличие от остальных планет Солнечной системы (за исключением Урана) имеет ретроградное вращение. Комбинация этих движений даёт величину солнечных суток, равную 116.8 земным суткам. Венера обладает массивной атмосферой, которая составляет $8.6 \cdot 10^{-7}$ от массы планеты. Это более чем на два порядка превышает аналогичное соотношение для Земли. Атмосфера Венеры в основном состоит из углекислого газа (CO_2) – 96,5%. Примесь азота (N_2) составляет 3,5%. Содержание остальных газов, таких как диоксид серы (SO_2), аргон (Ar), водяной пар (H_2O), окись углерода (CO), гелий (He) и прочих малых составляющих, не превышает 0,1%.

Венера окутана плотным слоем облаков, состоящих из капель 75-80% серной кислоты, толщиной около 20 км. Верхняя граница облачного слоя расположена в низких широтах на высоте около 70 км, снижаясь к полюсам до 65 км (Zasova et al., 2007; Ignatiev et al., 2009; Cottini et al., 2012; Lee et al., 2012; Haus et al., 2014). Над облачным слоем, до высоты 80-90 км, наблюдается переменная надоблачная дымка. Облака имеют чёткую нижнюю границу на высоте около 48 км, ниже, до 30 км высоты, расположена подоблачная дымка. Не исключено существование в облаках кристаллов неизвестного состава. Средняя температура на среднем уровне поверхности (~ 6051.5 км от центра масс планеты) близка к 740К при давлении около 93 бар (Basilevsky and Head, 2003).

Венера, несмотря на кажущееся простое устройство (отсутствие океанов, которые переносят тепло и момент вращения, и отсутствие сезонов) имеет сложную атмосферную динамику. Модели общей циркуляции для атмосферы Венеры не работают в полной мере. Понимание динамики атмосферы

формировалось благодаря наземным наблюдениям и космическим аппаратам. Спускаемые аппараты «Венера-8» - «Венера-13,14» (1972-1982 гг.), орбитальная станция «Венера-15» (1983 г.), спускаемые аппараты и аэростатные зонды ВЕГА-1 и ВЕГА-2 миссии «Венера Галлей» (1985 г.), а также Большой и Малые зонды миссии «Пионер Венера» (1978 г.) дали возможность получить вертикальные профили зонального ветра (Kerzhanovich and Limaye, 1985; Кержанович и др., 1987) от поверхности до верхней границы облаков. На основе этих измерений были сделаны выводы о суперротации атмосферы Венеры. Информация о меридиональных ветрах в ряде мест в отдельные моменты времени (Counselman et al., 1980) была также получена на основе измерений, сделанных Большим и Малыми зондами миссии «Пионер Венера». Аэростатные зонды ВЕГА-1 и ВЕГА-2, дрейфуя вдоль широты 7° в северном и южном полушарии в течение 48 часов, получили данные о скорости вертикального и горизонтального ветра (Crisp et al., 1990; Sagdeyev et al., 1992). Наблюдения, проведённые Фурье-спектрометром (ФС) на борту орбитальной станции «Венера-15» (1983 г.), позволили получить карты распределения скорости зонального термического ветра в зависимости от широты и высоты, а также исследовать меридиональную структуру зонального термического ветра в среднеширотном джете (струйное течение с относительно более высокой средней скоростью, наблюдаемое на средних широтах в обоих полушариях Венеры) (Засова и др., 2000; Засова и др., 2006; Zasova et al., 2007).

В верхнем облачном слое 58-70 км находится ультрафиолетовый (УФ) поглотитель, который отвечает за поглощение при $\lambda > 0.32$ мкм и наблюдаемые контрасты (до 30%). Неоднородное пространственное распределение неизвестного УФ поглотителя на уровне верхней границы облаков Венеры позволяет по измерению перемещения облачных деталей вычислять скорость горизонтального ветра. «Маринер 10» (1974 г.) был первым космическим аппаратом, передавшим УФ - изображения верхнего облачного слоя с высокой контрастностью, показавшие, что облачные детали движутся со скоростью до 100 м/с. По УФ - изображениям и наблюдениям контрастов были сделаны важные

выводы по динамике Венеры, подтвержден четырехсуточный период вращения наблюдаемых облаков. Изображения, полученные за 3.5 суток наблюдения при пролёте мимо Венеры, позволили исследовать морфологию облаков в небольших масштабах (пространственное разрешение изображений в УФ достигало 18 м), и получить представление о циркуляции на уровне верхнего облачного слоя в глобальном масштабе (Limaye and Suomi, 1981). Фотополяриметр ОСРР орбитального аппарата «Пионер Венера» получил изображения в шести каналах, включая УФ (365 нм), с пространственным разрешением около 30 км. Наблюдения покрывали пять временных интервалов продолжительностью приблизительно 80 дней каждый с 1979 по 1985 г. (Rossow et al., 1980). Они дали обзор Венеры от 50° ю.ш. до 50° с.ш. с лучшим покрытием южного полушария планеты. Полученные изображения были обработаны как с помощью визуальной методики (Limaye et al., 1988; Limaye, 2007), так и с помощью полностью автоматизированной процедуры (Rossow et al., 1990) отслеживания перемещения деталей облачного покрова. На УФ - снимках наблюдалось таинственное облачное образование в форме буквы Y (Y – структура). Оно было обнаружено в начале 60-х годов по наземным наблюдениям и только на ультрафиолетовых снимках (Boyer & Camichel, 1961; Boyer & Guerin, 1969). Облачное образование имело два рукава, симметричных относительно экватора, которые простирались до широт 45-50 градусов. На основании последних исследований сделан вывод, что эта структура представляет собой атмосферную волну Кельвина (Peralta et al., 2015).

Информация об облачном слое Венеры была также получена космическим аппаратом «Галилео» в течение 16 часов его полёта мимо Венеры в феврале 1990 года. Была сделана последовательная серия изображений, разделённых временным интервалом от 10 минут до 2 часов с пространственным разрешением 15 км. Несмотря на низкий контраст изображений на 410 нм и 865 нм, были сделаны выводы о характере циркуляции атмосферы Венеры (Belton et al., 1991; Toigo et al., 1994). Позже, изображения, полученные «Галилео», были заново проанализированы Peralta et al. (2007).

По результатам, полученным вышеперечисленными миссиями, было показано, что от поверхности до 80-90 км атмосфера вращается быстрее твёрдого тела планеты, т.е. имеет место зональная суперротация атмосферы Венеры, механизм возникновения которой до сих пор остаётся неясным (Gierasch et al., 1997; Schubert, 1983; Нои, 1990; Limaye, 2007). Циркуляция на уровне облаков характеризуется наличием гигантских планетарных вихрей над каждым из полюсов. Меридиональная циркуляция на уровне облаков представляет собой ячейку Хедли, которая образуется при подъёме воздушных масс на экваторе, перемещении их к полярным широтам и опускании в высоких широтах, выше 60° (Limaye and Suomi, 1981; Limaye, 1987; Limaye et al., 2009). Скорость зонального ветра достигает на верхней границе облаков величины около 100 м/с в экваториальных и средних широтах (Newman et al., 1984; Limaye et al., 1988; Peralta et al., 2007), тогда как вблизи поверхности её величина составляет 0-2 м/с (результат прямых измерений станциями Венера-ВЕГА). Таким образом, атмосфера в области верхней границы облаков, вращаясь приблизительно в 50-60 раз быстрее твёрдого тела Венеры, делает полный оборот вокруг планеты за 4-5 земных суток. Впервые эта величина была получена из наземных наблюдений за перемещением Y – структуры (Boyer & Camichel, 1961; Boyer & Guerin, 1969). Позднее планетарные волны с периодом 4 - 5 суток и амплитудой до 5 м/с были обнаружены как по измерениям яркости (Del Genio and Rossow, 1990), так и по измерениям скорости ветра. Величина средней зональной скорости изменялась от 90 м/с на экваторе до 100 м/с в средних широтах. В низких широтах были обнаружены вариации средней зональной скорости ветра до 10 м/с. Увеличение зональной скорости в средних широтах объясняется наличием среднеширотного джета (струйное течение с относительно более высокой средней скоростью, наблюдаемое в обоих полушариях Венеры). Вариации средней зональной скорости на 50-60° широты достигают 30 м/с (Newman et al., 1984; Limaye, 1985; Walterschied et al., 1985; Limaye et al., 1988; Rossow et al., 1990; Засова и др., 2000; Zasova et al., 2007). Измерения зональной скорости на широтах выше 60° показали уменьшение её величины к полюсам до ~20 м/с (Newman et al., 1984; Limaye,

2007; Peralta et al., 2007). Также было показано, что меридиональная компонента скорости демонстрирует постепенное увеличение от нуля на экваторе до 10-15 м/с на 50-60° широты в каждом полушарии (Limaye et al., 1988; Rossow et al., 1990). Зависимость от местного времени была найдена в поле зонального ветра по данным «Пионер Венера». В низких широтах минимумом скорости наблюдался до полудня в 10-11 ч (Limaye, 1988). Сильная солнечно-связанная зависимость была обнаружена в поведении среднеширотного джета (Засова и др., 2000; Zasova et al., 2007), так что максимальная скорость в 9-10 ч утра превышала минимальную скорость, наблюдаемую после полудня в 15-16 ч, на 30 м/с. Второй максимум скорости ветра, меньший по абсолютной величине наблюдался в 21-22 ч. Было обнаружено, что положение средне-широтного джета, широта и высота также изменяются солнечно-связанным образом (Засова и др. 2000).

Выше 110 км в термосфере основным режимом циркуляции является перемещение атмосферных масс от подсолнечной точки (SubSolar) к антисолнечной (AntiSolar), при котором атмосферные массы поднимаются в полдень (SS), затем через терминаторы движутся на ночную сторону и опускаются в полночь (AS), режим SS-AS (Bougher et al., 1997). На высотах 90-110 км в области мезопаузы находится «переходная» область между двумя режимами циркуляции. По данным ФС «Венеры – 15» была найдена асимметрия между терминаторами, при которой на высоте 95 км температура на вечернем терминаторе показывала значения на ~20К ниже, чем на утреннем. Эта особенность была связана с влиянием термического прилива (Zasova et al., 2007).

Представление о динамике облачного слоя на данный момент. При безусловной успешности вышеперечисленных 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 скорости ветра с максимально полным долготно-широтным покрытием в

зависимости от местного времени на разных уровнях в атмосфере, вплоть до поверхности.

Орбитальная станция «Венера Экспресс» европейского космического агентства ESA (VEX ESA), достигнув Венеры в апреле 2006 г., открыла новый этап в исследовании планеты после 20-летнего перерыва. Изображения, полученные камерой VMC/VEX в период 2006-2015 гг. (Titov et al., 2006; Svedhem et al., 2009) в четырёх каналах 365, 513, 965 и 1010 нм (Markiewicz et al., 2007) в течение 9 лет, позволили провести детальные измерения скорости горизонтального ветра в облачном слое на дневной стороне южного полушария Венеры. В частности, отслеживание перемещения облачных деталей в ультрафиолетовом (365 нм) и инфракрасном (965 нм) каналах дало большое количество новой информации о циркуляции на верхней границе (~70 км) и вблизи верхней границы среднего облачного слоя (~55 км).

Построенные средние широтные профили зональной и меридиональной компонент скорости ветра (Moissl et al., 2009; Hueso et al., 2012; Hueso et al., 2015; Kouyama et al., 2013; Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013) подтвердили основные закономерности в поведении циркуляции, обнаруженные ранее на верхней границе облачного слоя (~70 км). Солнечно-связанные зависимости были найдены для зональной компоненты скорости ветра (Moissl et al., 2009) и для обоих компонент, зональной и меридиональной (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013). В работе на основе долгосрочных измерений было установлено, что зональная скорость демонстрирует полусуточные вариации с минимумом от 11 до 14 ч и максимумами в утреннее (8-9 ч) и вечернее (15-16 ч) время, где она достигает наибольших значений на 40° ю.ш. Ярко выраженный максимум меридиональной компоненты, направленной к полюсу, был обнаружен на 50° ю.ш. от 13 до 15 ч. Однако ни в одной из вышеперечисленных работ не поднимался вопрос о возможной связи максимума зональной и меридиональной скорости в средних широтах с расположением облачных структур. Авторами статьи Khatuntsev, Patsaeva et al. (2013) было обнаружено увеличение зональной скорости от 85 до 110 м/с в экваториальных широтах за время миссии. С использованием Фурье-

анализа было проанализировано поведение зональной компоненты в шести 5-градусных широтных интервалах, центрированных на 10, 15, 20, 25, 30 and 35° ю.ш. Анализ проводился по интервалу наблюдений с 2006 г. по 2013 г. В частности, были обнаружены короткопериодические вариации зонального ветра со средним периодом 4.83 дня и средней амплитудой 4.28 м/с. Максимальная амплитуда около 17 м/с была обнаружена в экваториальной области. Подобное исследование для меньшего временного интервала было представлено в статье Kouyama et al. (2013). Нами было показано (Bertaux et al., 2016), что увеличение зональной скорости ветра в экваториальных широтах с 2006 по 2013 г связано с изменением рельефа поверхности. Была обнаружена связь минимума зональной скорости с горным массивом Земля Афродиты, расположенным в экваториальных широтах южного полушария Венеры. В результате вращения вокруг оси и орбитального движения вокруг Солнца, Венера медленно проворачивалась под станцией, находящейся на трёхосно-стабилизированной полярной орбите, и, соответственно, поле зрения камеры смещалось по долготе, т.е. наблюдаемое изменение скорости ветра коррелировало с рельефом поверхности. Исследования проводились на основе результатов, полученных визуальным методом из УФ изображений камеры VMC (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013) исключительно в широтном интервале $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. Зависимость минимума зональной скорости от местного времени в Bertaux et al. (2016) не обсуждалась.

Информация, полученная на дневной стороне планеты в глубине облачного слоя (~55 км), дала возможность восстановить широтные профили зональной и меридиональной компонент скорости ветра. В работе (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2017) было показано, что возвратная ветвь ячейки Хедли (меридиональная компонента направлена от полюса к экватору) наблюдается в области верхней границы среднего облачного слоя и простирается от экватора до ~ 60-65° ю.ш. Средняя зональная скорость в экваториальных и средних широтах оказалась равной 65-70 м/с, в то время как на верхней границе облачного слоя она достигает 95-100 м/с. Меридиональная компонента в обоих случаях менялась от 0 до 10 м/с, но в глубине облачного слоя была направлена к экватору, тогда как на верхней

границе – к полюсу. Анализ долготных зависимостей зональной и меридиональной компонент подтвердил влияние Земли Афродиты на горизонтальный поток вблизи верхней границы среднего обчного слоя. Построенные зависимости зональной и меридиональной компонент скорости ветра от широты и местного времени продемонстрировали заметное ослабление солнечно-связанных вариаций с глубиной в облачном слое от 70 км к 55 км высоты.

По изображениям картирующего спектрометра VIRTIS-M в двух каналах 3.8 мкм и 5.0 мкм, полученным на ночной стороне по излучению, приходящему из среднего и верхнего облачного слоя Венеры соответственно (высоты между 60 и 72 км) (Peralta et al., 2017), были рассчитаны зональные скорости ветра. Значения скорости в низких и средних широтах (~110 м/с и ~60 м/с в верхнем и среднем облачном слое соответственно) совпали со скоростями, рассчитанными на дневной стороне Венеры по спектральным изображениям VIRTIS-M в каналах 380 нм (62 - 70 км) и 980 нм (58 - 64 км) и в видимом диапазоне (570-680 нм), соответствующем среднему облачному слою (Sánchez-Lavega et al., 2008; Hueso et al., 2012, 2015). На дневной стороне было отмечено ослабление солнечно-связанных зависимостей с уменьшением высоты.

Исследование динамики в глубине облачного слоя (~ 50 км) на ночной стороне (1.74 мкм) дало значения для зональных и меридиональных скоростей в низких и средних широтах (Hueso et al., 2012, 2015; Sánchez-Lavega et al., 2008). Зональные скорости составили ~ 60-65 м/с. Меридиональные скорости, находящиеся в пределах от 0 до 10 м/с в верхнем облачном слое, в глубине облачного слоя уменьшились до нулевых значений. Таким образом, скорости, полученные на разных уровнях в облачном слое с помощью спектрометра VIRTIS-M, в целом совпали с результатами, полученными при анализе изображений, сделанных камерой VMC.

Спектрометром VIRTIS-M было осуществлено картирование распределения свечения молекулярного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ 1.27 мкм на ночной стороне планеты. По лимбовым наблюдениям были получены вертикальные профили

интенсивности свечения, определена высота максимума свечения, которая составляла 97 ± 2 км (Drossart, Piccioni, Gérard et al., 2007; Piccioni, G., Zasova, L., Migliorini, A et al., 2009). По наблюдению за перемещением ярких областей свечения молекулярного кислорода была обнаружена несимметричность двух противоположно направленных потоков от терминаторов к полуночи (режима SS-AS) (Shakun et al. 2010). В работе Shakun et al. 2010, построена глобально усредненная карта распределения свечения молекулярного кислорода на ночной стороне, обнаружено смещение максимума свечения от полуночи (как ожидалось бы в случае классической SS-AS циркуляции) в сторону вечернего терминатора. Характер вертикального профиля интенсивности свечения O_2 говорит о действии гравитационных волн с вертикальной длиной волны 10-14 км и горизонтальной 100 – 1000 км (Altieri et al., 2014).

По данным предыдущих миссий был сделан вывод, что на динамику в «переходной» области (90-110 км) оказывают влияние оба режима циркуляции (суперротация и SS-AS) (Bougher et al., 2006; Lellouch et al., 1997) и термический прилив (Zasova et al., 2007). Работа Gorinov et al. (2018) посвящена изучению скорости горизонтального ветра на этих высотах, полученной по движению областей свечения молекулярного кислорода (по данным VIRTIS-M). Типичное превышение «утренней» скорости ветра над «вечерней» составляет 20-40 м/с, т.е. в направлении, противоположном направлению зональной суперротации, говорит об отсутствии влияния суперротации на динамику в «переходной» области. В Gorinov et al. (2018) были обнаружены круговые движения над венерианскими высокогорьями (Область Атлы, Область Фебы). Горизонтальный поток (на высоте около 100 км) может "обтекать" контуры возвышенностей (высота поверхности в наблюдаемой области меньше 5 км), и «область свечения» может быть расположена непосредственно над деталью рельефа, либо смещена и повернута на несколько градусов в направлении основного потока, при этом форма области свечения кислорода нередко повторяет контуры этих высокогорных областей.

С помощью картирующего спектрометра VIRTIS-M были получены изображения южного полярного «диполя» (вихревая структура в полярной

области) с более высоким спектральным и пространственным разрешением, чем в предыдущих миссиях. Расчёт скоростей показал уменьшение зональной скорости в полярной области до 0-10 м/с как в верхнем облачном слое, так и в его глубине на ночной стороне (45-47 км), и наличие меридиональных скоростей, близких к нулевым значениям (Sánchez-Lavega et al., 2008; Luz et al. 2011; Mendonça et al., 2012; Hueso et al. 2012). При исследовании циркуляции южной полярной области было обнаружено, что полярный диполь имеет постоянно-меняющуюся внутреннюю структуру с центром вращения, смещённым на $\sim 3^\circ$ от географического Южного полюса, и дрейфует вокруг полюса с периодом 5-10 дней (Luz et al., 2011; Garate-Lopez et al., 2013).

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. Космическая станция «Акацуки» (Nakamura et al., 2016) японского космического агентства JAXA находится на орбите Венеры с декабря 2015 года. Результаты исследования динамики атмосферы, полученные на данный момент, подтверждают найденные ранее закономерности, включая зависимости, связанные с местным временем (Horinouchi et al., 2018; Gonçalves et al., 2020), не обнаруживая, в отличие от Bertaux et al. (2016), влияния поверхности на горизонтальный поток. Найденное по данным VMC увеличение зональной скорости за время миссии (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013; Kouyama et al., 2013), которое было объяснено влиянием поверхности (Bertaux et al., 2016), отмечалось ранее Del Genio и Rossow (1990). Основываясь на наблюдениях ОСРР миссии «Пионер Венера», они предположили существование долговременных изменений зональной скорости с периодом 5-10 лет. Вопрос, связаны ли эти изменения скорости ветра с долговременными изменениями в характере циркуляции на верхней границе облачного слоя или они явились результатом пространственной зависимости атмосферного потока или зависимости, связанной с местным временем, определенно не может быть решен

из-за ограниченного времени наблюдения и, соответственно, объема данных. В случае успешного осуществления, новый проект "Венера-Д" (Роскосмос – NASA), представляющий собой прорывную научную миссию для комплексных фундаментальных исследований планеты, позволит решить многие загадки Венеры.

Данная диссертационная работа направлена на исследование особенностей динамики атмосферы Венеры 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). 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% (Tomasko et al., 1980; Esposito, 1980). Термические приливы, возникающие при поглощении солнечной радиации в узком интервале высот (менее 10 км в верхнем облачном слое), могут поставлять энергию на поддержание суперротации (Gierasch et al., 1997), механизм возникновения которой остаётся до конца не ясным.

Объектом исследования является динамика атмосферы в области верхнего облачного слоя на дневной стороне Венеры.

Целью работы является исследование динамических характеристик горизонтального потока на дневной стороне Венеры на уровне верхней границы облаков в ультрафиолетовом диапазоне (365 нм). Исследование представляет собой анализ полей скоростей ветра, полученных автоматизированным корреляционным методом по данным многолетних наблюдений, выполненных камерой VMC на борту орбитальной станции «Венера Экспресс».

Методы исследования. Для анализа изображений с целью получения информации о перемещении облачных особенностей был разработан автоматизированный корреляционный метод и программное обеспечение. В рамках разработанного метода были решены две задачи. Первая - проекция пары последовательных изображений на единую долготно-широтную сетку, и вторая -

расчет корреляционных функций для выделенных областей изображений и их последующий анализ. Первая задача была решена редукцией обоих изображений на сетку с заданным постоянным шагом по долготе и широте методом треугольной интерполяции (Калиткин, 1978). Для решения второй задачи каждая выбранная область первого изображения в паре сравнивалась со всеми возможными областями того же размера в рамках заданной области на втором изображении посредством расчёта корреляционной функции. Полученные смещения фильтровались по величине корреляционного максимума и в зависимости от вида корреляционной функции на основе разработанных критериев. На основе отобранных смещений производился расчёт зональной и меридиональной компонент скорости ветра. База данных векторов скорости в последующем использовалась для поиска закономерностей в вариациях динамических характеристик горизонтального потока на верхней границе облачного слоя Венеры.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. 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 долгота-широта для индивидуальных орбит. На основе анализа полученного массива данных исследовано поведение горизонтального потока в зависимости от долготы, широты и местного времени;

2. Подтверждено влияние рельефа подстилающей поверхности на динамику верхнего облачного слоя (70 ± 2 км):

– Впервые показано, что «область» минимальной скорости зонального ветра наблюдается в полдень над горными массивами Земли Афродиты. Изолинии скорости ветра повторяют контуры рельефа подстилающей поверхности. В широтной полосе $10 \pm 5^\circ$ ю.ш., соответствующей наибольшей

высоте рельефа поверхности, средняя зональная скорость потока составляет 98.5 м/с, амплитуда суточной гармоника скорости зонального потока, составляет 13.4 м/с;

– Впервые показано, что минимум зональной скорости, связанный с Землёй 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.). Обширные материковые возвышенности Земли Афродиты и Области Атлы, расположенные вблизи экватора, вносят возмущение в средний меридиональный поток с амплитудой до 3.5 м/с;

3. Впервые обнаружено, 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) по сравнению с окружающим облачным слоем.

4. При сравнении с одновременно независимо полученными результатами по положению верхней границы облаков в области Y-структуры, впервые показано, что темные области направленной к южному полюсу ветви расположены на 1.5 – 2 км выше окружающего облачного слоя.

Степень достоверности и апробация работы. 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-S³), Школах-семинарах «Атмосферы планет: от земной группы к экзопланетам».

Всего по теме диссертации сделано 17 докладов на конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей в рецензируемых изданиях. Перечень 23 работ, включающий статьи и абстракты докладов на конференциях, приведен в конце диссертации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан и реализован автоматизированный корреляционный метод для определения скорости смещения деталей облачного покрова Венеры, основанный на вычислении и последующем анализе корреляционной функции. Метод был применён для обработки УФ изображений облачного покрова, полученных камерой VMC/VEX. Создана база данных векторов смещения идентифицированных деталей облачного покрова, проанализированы вариации зональной и меридиональной компонент скорости ветра в зависимости от долготы, широты и местного времени. Построены и проанализированы векторные поля скорости ветра для индивидуальных орбит;

2. Выявлены следующие закономерности в поведении горизонтального потока на верхней границе облаков Венеры (70 ± 2 км) в экваториальных широтах (0-30° ю.ш.):

– Наблюдается зависимость зональной и меридиональной компонент скорости горизонтального потока от рельефа подстилающей поверхности;

– Показано, что минимальная величина зональной скорости наблюдается в полдень над наиболее высокой областью Земли Афродиты (Область Овда). Изолинии скорости ветра повторяют контуры рельефа подстилающей поверхности. Амплитуда суточной гармоника скорости зонального потока составляет 13.4 м/с при средней скорости потока 98.5 м/с;

– Другой, менее ярко выраженный минимум зональной скорости ветра, связанный с солнечным приливом, обнаружен около 13-14 ч. Вместе с

минимумом зональной скорости в полдень (связанным с рельефом поверхности) это приводит к широкому минимуму зональной скорости над Областью Овды между 11 и 14 часами;

3. Ветвь Y-структуры, наблюдаемая на УФ изображениях VMC в средних широтах южного полушария, характеризуется изменением направления движения атмосферных масс и большей (до несколько десятков м/с) скоростью ветра. Сравнение с одновременно независимо полученными результатами по положению верхней границы облаков в области Y-структуры, показывают, что темные области направленной к южному полюсу ветви расположены на 1.5 – 2 км выше окружающего облачного слоя;

4. Поведение атмосферного потока в средних широтах (30-60° ю.ш.) (как направление, так и скорость) демонстрирует зависимость от местного времени.

Научная и практическая ценность работы. Для анализа УФ изображений (365 нм) камеры VMC/VEX разработан и реализован автоматизированный корреляционный метод. Он предоставил возможность обработать большие объёмы данных и получить более 170 тысяч векторов смещения идентифицированных деталей облачного покрова на верхней границе облаков Венеры (70 ± 2 км). Методика, используемая при анализе корреляционных функций, позволяет получить для индивидуальных орбит поле скоростей в зависимости от долготы и широты и исследовать изменение характера циркуляции от орбиты к орбите. С помощью данного метода был обработан самый продолжительный за всю историю исследования Венеры ряд наблюдений. На момент представления диссертации (2020 г.), полученный ряд векторов смещений является беспрецедентным по продолжительности наблюдений (7.5 лет) и обеспечивает лучшее долготно-широтное покрытие южного полушария Венеры, полученное по изображениям VMC.

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

В работе Vertaux 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, полученных корреляционным методом, было использовано в диссертации, что обеспечило более равномерное покрытие по местному времени. Была подтверждена (Patsaeva et al., 2019) зависимость зональной компоненты скорости ветра от рельефа поверхности, а также впервые было показано, что минимум зональной скорости наблюдается в полдень над наиболее высокой областью Земли Афродиты (Область Овда), а изолинии скорости ветра повторяют контуры рельефа поверхности. Исследование поведения горизонтального потока в экваториальной области планеты ($0-30^\circ$ ю.ш.), представленные в диссертации, демонстрируют смещение минимума зональной скорости, связанного с Землёй Афродиты, 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

частью (ветвью) Y-структуры. Впервые показано, что ветвь Y-структуры, наблюдаемая на изображениях VMC в средних широтах южного полушария Венеры, характеризуется изменением направления движения атмосферных масс и большей (до несколько десятков м/с) скоростью ветра. 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. На момент публикации результатов по соответствующей части диссертации (Patsaeva et al., 2015) представленные в работе исследования, связывающие крупномасштабные структуры облачного покрова Венеры с поведением горизонтального потока на средних широтах, были первыми и оставались единственными до 2019 года (Nara et al., 2019).

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 камерой UVI японской космической станции «Акацуки». 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.

Личный вклад автора. 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.

Объем и содержание работы. Работа состоит из введения, трёх глав и заключения. В конце представлен список литературы, список сокращений и приложения.

Введение. В данном разделе дается обзор исследовательских миссий к Венере и общий обзор работ, в которых были представлены основные результаты исследования динамики мезосферы Венеры, полученные с помощью научных приборов на орбитальных аппаратах. Обосновывается актуальность темы, указывается цель работы, методы исследования, отмечается научная новизна работы и описывается общая структура работы.

Глава 1 – «Автоматизированный корреляционный метод отслеживания смещения деталей облачного покрова Венеры» – посвящена описанию корреляционного метода, с помощью которого по УФ изображениям (365 нм) камеры VMC была получена база векторов смещения облачных особенностей (более 170 тысяч векторов).

В разделе 1.1 дается описание эксперимента Venus Monitoring Camera на борту орбитальной станции «Венера Экспресс» (VMC/VEX) (Titov et al., 2006; Svedhem et al., 2007, 2009) Европейского космического агентства. Описывается специфика наблюдения и особенность получаемых изображений.

Раздел 1.2 содержит постановку задачи автоматизированного расчета векторов смещения облачных особенностей, а также описание проблем, которые необходимо было решить при разработке автоматизированного корреляционного метода.

В разделе 1.3 даётся описание корреляционного метода. Рассмотрено решение первой задачи – проекция пары последовательных изображений на единую долготно-широтную сетку с заданным постоянным шагом по долготе и широте методом треугольной интерполяции (Калиткин, 1978), и решение второй задачи – нахождение корреляционных функций для выделенных областей изображения и их последующий анализ, который проводился согласно величине корреляционного максимума и в зависимости от вида корреляционной функции.

В разделе 1.4 приводится сравнение визуального и корреляционного методов. Показано, что при сопоставимости результатов, корреляционный метод позволяет получить больше векторов смещения. Отмечено, что в высоких широтах наблюдается как недостаток результатов, так и расхождение в имеющихся результатах. Причины рассмотрены в разделе 1.5.

В разделе 1.5 рассматриваются ошибки и чувствительность метода, оценивается точность получаемых значений скорости ветра и зависимость их рассеяния от широты. Рассмотрены причины зависимости стандартного отклонения от широты, а также приводится анализ рассеяния измерений. Представлен анализ изменения величины стандартного отклонения при учёте вариаций в поведении горизонтального потока, связанных с особенностями динамики атмосферы Венеры.

В разделе 1.6 обсуждается проблема возникновения ложных смещений, дающих значения скорости, отличные от основной массы результатов, представлены пути её решения.

В разделе 1.7 представлено сравнение с измерениями, полученными предыдущими миссиями.

В разделе 1.8 обосновывается выбор орбит для исследования.

В разделе 1.9 приведены средние поля зонального и меридионального ветра на верхней границе облачного слоя в координатах местное время – широта, являющиеся результатом работы автоматизированного корреляционного метода.

В разделе 1.10 суммируются основные результаты, полученные в Главе 1.

В Главе 2 – «Динамика атмосферы в экваториальной области» – 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. Рассмотрены зависимости зональной и меридиональной скоростей от рельефа подстилающей поверхности и от местного времени.

В разделе 2.1 (введение в Главу 2) дается обзор работ, рассматривающих связь ряда параметров атмосферы (УФ альbedo, содержание H_2O , скорость зонального ветра и др.) с влиянием поверхности, а также зависимость некоторых свойств атмосферы (скорость зонального ветра, скорость зонального термического ветра, высота верхней границы облачного слоя и др.) от местного солнечного времени. Дается обоснование исследований, представленных в Главе 2.

В разделе 2.2 анализируется зависимость среднего зонального потока над Землёй Афродиты от местного солнечного времени. В широтной полосе $10 \pm 5^\circ$ ю.ш., соответствующей наибольшей высоте Земли Афродиты (Область Овда), фрагменты профилей зональной скорости над Землёй Афродиты, полученные усреднением всех значений в заданном часовом интервале, были аппроксимированы по методу наименьших квадратов функцией Гаусса. Зависимость положения минимума зональной скорости от долготы была аппроксимирована синусоидой. Показано, что минимум зональной скорости наблюдается вблизи полудня над наиболее высокой областью Земли Афродиты (Область Овды; $90 \pm 5^\circ$ в.д.; $10 \pm 5^\circ$ ю.ш.). Амплитуда суточной гармоника, обеспечивающей торможение зонального потока, имеет величину 13.4 м/с при средней скорости потока 98.5 м/с.

В разделе 2.3 рассматривается влияние поверхности на средний зональный поток и зависимость скорости зонального потока от широты. Проанализировано

положение минимума зональной скорости и изменение его величины для усреднённых по местному времени (9-16 ч) профилей зонального ветра для 10° широтных полос, центрированных на 7, 10, 12, 15, 17, 20, 22 и 25° ю.ш.

В разделе 2.4 рассматривается влияние поверхности на средний меридиональный поток в зависимости от долготы и широты на примере двух долготных профилей меридиональной скорости, построенных для 10° широтных полос, центрированных на 7 и 25° ю.ш.

В разделе 2.5 анализируются солнечно-связанные зависимости в вариациях горизонтального потока над низменностью и над Областью Овды для двух 10° широтных полос, центрированных на 7 и 25° ю.ш.

В разделе 2.6 рассматриваются обнаруженные долготно-широтные и солнечно-связанные вариации на примере отдельных орбит.

В разделе 2.7 суммируются основные результаты, полученные в Главе 2.

В Главе 3 – «Динамика атмосферы в средних широтах» – рассмотрены особенности поведения горизонтального потока при появлении крупномасштабных структур облачного покрова. Представленные результаты относятся преимущественно к области средних широт (от 30° до 60° ю.ш.). Некоторое представление дано о динамике атмосферы в полярной области южного полушария планеты.

В разделе 3.1 (введение в главу) дается краткое описание проблемы “сглаживания” профиля зонального ветра в области джета. Дается обоснование исследований, представленных в Главе 3.

В разделе 3.2 на примере отдельных орбит описано поведение горизонтального потока при появлении на изображении крупномасштабной структуры облачного покрова (Y-структуры). Показано, что скорость и направление ветра в области джета меняются в зависимости от положения ветви Y – структуры на изображении.

В разделе 3.3 проанализировано изменение угла отклонения горизонтального потока и его скорости в зависимости от широты и местного времени по всем исследуемым 258 орбитам.

В разделе 3.4 рассмотрена связь высоты верхней границы облачного слоя с расположением облачных структур на изображении и с направлением ветра на широтах от 35° до 80° ю.ш.

В разделе 3.5 суммируются основные результаты, полученные в Главе 3.

В *Заключении* подводятся основные итоги работы и делаются завершающие выводы.

Приложение 1 содержит номера орбиты, изображения которых были использованы для получения векторов смещения автоматизированным методом;

Приложение 2 – количество векторов смещения в выборках по местному времени.

Глава 1. Автоматизированный корреляционный метод отслеживания смещения деталей облачного покрова Венеры

1.1 Venus Monitoring Camera на борту орбитальной станции «Венера Экспресс». УФ изображения облачного покрова

Европейская орбитальная станция «Венера Экспресс» была запущена 9 ноября 2005 года с космодрома Байконур российской ракетой-носителем «Союз» с разгонным блоком «Фрегат» и достигла Венеры 11 апреля 2006 г. Станция была выведена на полярную высокоэллиптическую орбиту с высотой в апоцентре около 66000 км (Рисунок 1.1) и периодом обращения около земных суток (24 часа). Перигентр (высота 250-350 км) находился в северном полушарии Венеры, около 78° с.ш. Орбитальная станция «Венера Экспресс» проработала на орбите около 9 лет (до 18 января 2015 года). Количество орбит превысило 3 тысячи.

Venus Monitoring Camera (VMC) (Markiewicz et al., 2007) на борту орбитальной станции «Венера Экспресс» получала изображения на восходящей ветви орбиты в течение 8-12 часов. Благодаря таким условиям наблюдений, с каждой орбиты были получены серии последовательных изображений облачного покрова планеты с переменным пространственным разрешением. Широкоугольная камера VMC с полем зрения 17.5° получила беспрецедентный по продолжительности ряд наблюдений облачного покрова в 4-х спектральных каналах: 365, 513, 965 и 1010 нм. Четыре изображения размером 512x512 пикселей одномоментно создавали единое изображение на общей ПЗС матрице размером 1032x1024 пиксела. Изображения облачного покрова, полученные в УФ (365 нм) диапазоне обладают наибольшей (более 30%) контрастностью. Последующий анализ смещения идентифицированных деталей облачного покрова по полученным сериям УФ изображений позволил детально исследовать атмосферную циркуляцию верхнего облачного слоя в дневные часы.

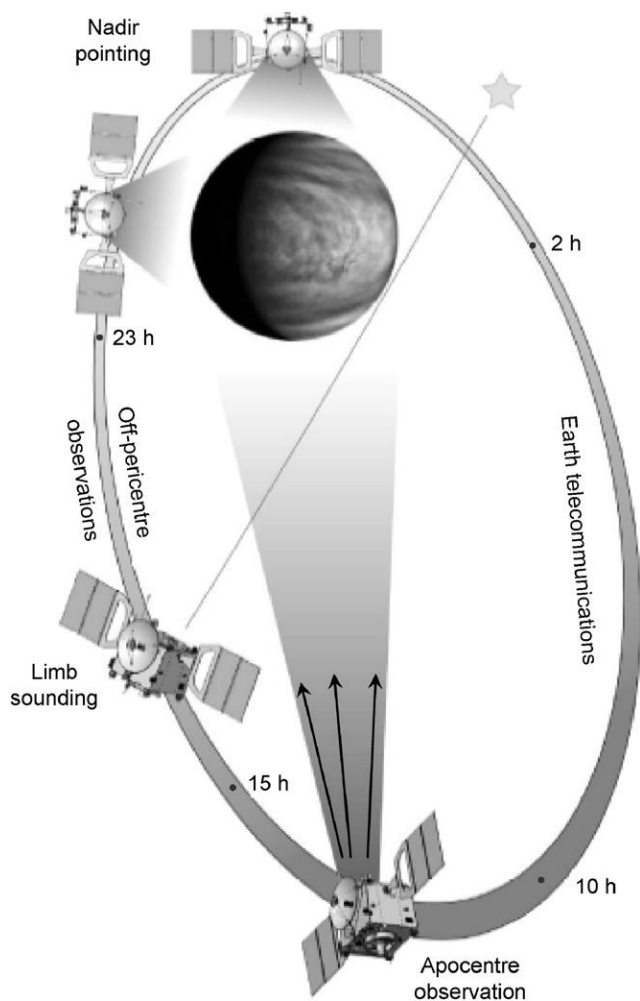


Рисунок 1.1 Схема орбиты станции «Венера Экспресс» и основные виды наблюдений (Markiewicz et al., 2007).

Для оценки векторов смещения использовались пары изображений, полученных на восходящей ветви орбиты с пространственным разрешением от 50 км/пиксель в апоцентре (расстояние до планеты 66000 км) до 10 км/пиксель (12000 км). Изображения с высоким разрешением, полученные вблизи перигея (менее 10000 км), не использовались из-за проблем с точностью навигации. Для изображений, полученных из апоцентра (между 12 и 9 часами до перигея) использовались 2-х часовые интервалы между снимками; в промежутке между 9 и 3 часами – 1 часовые интервалы. Для изображений, полученных от 3 часов до 50 минут до прохождения перигея, интервалы в паре снимков могли меняться от 45 до 20 минут.

Особенность облачного покрова Венеры на верхней границе облаков такова, что форма и относительный размер деталей существенно не менялся в течение ~10 часов (Рисунок 1.2), пока орбитальный аппарат приближался к планете по восходящей ветви орбиты. Это обстоятельство позволяло соединять вместе результаты, полученные от разных пар изображений, тем самым улучшая статистику по орбите.

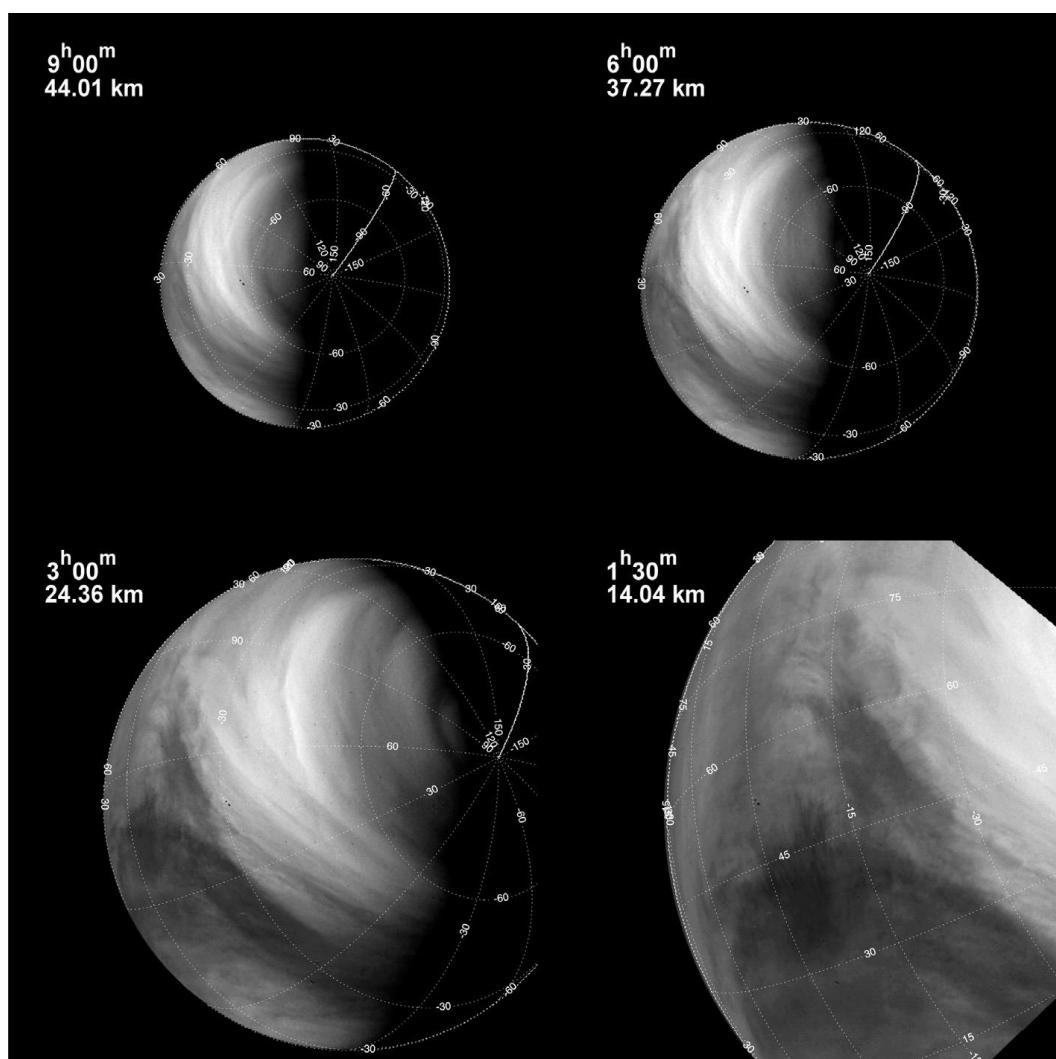


Рисунок 1.2 Примеры УФ изображений VMC, полученных на восходящей ветви орбиты #920. Орбитальное время (время, которое осталось до прохождения перицентра) и пространственное разрешение дано в верхнем левом углу каждого изображения. Разрешение изменяется от 44 км за 9 часов до перицентра до 14 км – за 1 ч 30 мин (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

Необходимо упомянуть об ограничениях, которые имеют место в данном исследовании при расчетах направления и скорости ветра путем измерения смещения УФ деталей. Наблюдения облачного покрова в ультрафиолете доступны только на освещённой Солнцем стороне. В связи с выбранной орбитой для станции «Венера Экспресс» для измерений было доступно только южное полушарие планеты. Полярные области наблюдались либо из апоцентра с плохим пространственным разрешением, либо под большим углом, что ухудшало точность измерений в высоких широтах. Ещё одной особенностью наблюдения является то, что из-за орбитального движения Венеры вокруг Солнца и трехосно стабилизированной орбиты станции «Венера Экспресс» дневные наблюдения планеты сгруппированы по 112 суток, разделенных 112 суточными "ночными паузами" (Рисунок 1.3).

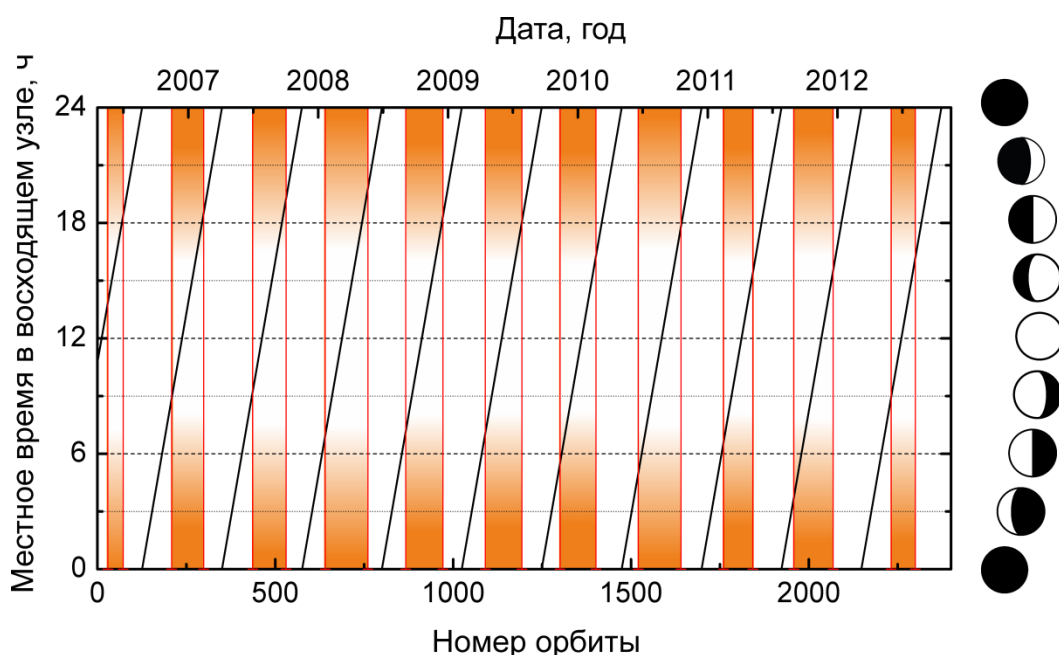


Рисунок 1.3 Эволюция местного времени (0-24 ч) в восходящем узле орбиты в течение миссии (сплошная линия). Эскиз справа показывает внешний вид планеты, если смотреть из восходящего узла в разное местное время. Цветные прямоугольники показывают периоды, в которые были получены изображения, используемые для отслеживания облачных перемещений. Затененные (оранжевые) области отмечают ночь в восходящем узле. Оптимальные условия освещения для наблюдений VMC на восходящей ветви орбиты присутствуют от 10 до 14 ч (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

1.2 Постановка задачи

Располагая рядом последовательных изображений облачного покрова планеты, разнесенных по времени, можно идентифицировать одинаковые детали на выбранной паре снимков и рассчитать для этих деталей координаты. По паре координат можно вычислить пройденный за интервал времени между снимками путь и, следовательно, скорость смещения детали (см. формулы (1.1) и (1.2)). Данный подход лежит в основе любого метода отслеживания смещения деталей облачного покрова. По способу идентификации деталей облачного покрова методы различают на визуальные, когда идентификация выполняется визуально оператором, и автоматизированные, когда при идентификации детали применяются какие-либо вычислительные методы (Rossow et al., 1990; Luz et al., 2008; Moissl et al., 2009; Ogohara et al., 2012; Kouyama et al., 2013; Ikegawa et al., 2016).

Оценка скорости перемещения облачных деталей визуальным методом является достаточно трудоемкой процедурой. Автоматизированный корреляционный метод (далее – корреляционный метод) отслеживания смещений деталей облачного покрова был разработан автором в связи с необходимостью обработки большого количества УФ изображений Венеры, полученных VMC. В корреляционном методе идентификация и сопоставление облачных деталей на изображениях в паре снимков, проводимая оператором, была заменена поиском максимума рассчитываемой корреляционной функции (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013; Patsaeva et al., 2015; Vázquez-Poletti et al., 2019).

Для автоматизированного расчёта невозможно было использовать изображения, полученные непосредственно камерой. Необходимо было учесть различие в условиях наблюдения между двумя изображениями в паре, связанные с перемещением подспутниковой точки и изменением линейного масштаба изображений вследствие орбитального движения аппарата. В этом заключалась первая часть задачи. Для её решения полученные камерой изображения редуцировались на заданную долготно-широтную сетку. Другая часть задачи

состояла в нахождении перемещений идентифицированных деталей облачного покрова. На данном этапе необходимо было разработать алгоритм, способный в автоматизированном режиме определять степень «похожести» выделенных фрагментов редуцированного изображения, т.е. выработать критерии, по которым программное обеспечение могло бы оценивать корректность получаемого результата.

В процессе решения задачи в части оценки правильности получаемых значений скорости автор опирался на результаты, полученные визуальным методом для идентичных пар изображений (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013). Метод, разработанный для УФ изображений, впоследствии был использован также для анализа ИК изображений VMC. В этом случае изображения подвергались предварительной обработке в целях усиления контраста (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2017).

Программное обеспечение, использованное при расчётах, разработано на языке программирования Паскаль.

1.3 Описание корреляционного метода

Для определения скорости ветра по перемещению деталей облачного покрова были использованы изображения, разнесённые по времени. Как и в случае визуального метода, временной интервал для пары исследуемых изображений (Δt) выбирался так, чтобы физическое смещение детали позволило определить ее положение с точностью, достаточной для вычисления зональной u и меридиональной v компонент скорости по следующим формулам:

$$u = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)(R + h) \cos(\varphi_1)}{\Delta t} \quad (1.1)$$

$$v = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1)(R + h)}{\Delta t} \quad (1.2)$$

где $\lambda_{1,2}$ и $\varphi_{1,2}$ – долгота и широта идентифицированной детали на первом и втором изображении, $R=6051.8$ км – радиус Венеры, $h=70$ км – предполагаемая высота

исследуемого облачного слоя над поверхностью. Интервал времени Δt зависел от расстояния аппарата до Венеры и выбирался, как и в случае визуального метода, таким образом, чтобы относительное смещение детали составляло не менее 5 пикселей.

В связи с особенностями траектории движения аппарата, изображения в паре имели разный масштаб и ориентацию относительно подспутниковой точки (Рисунок 1.1 и Рисунок 1.2). Проблема преобразования изображений к «единому знаменателю» решалась редукцией обоих изображений на регулярную сетку с заданным постоянным шагом по долготе и широте методом треугольной интерполяции (Калиткин, 1978). Нет необходимости в том, чтобы узлы сетки совпадали с пикселями изображения. В этом случае значение яркости в каждом узле определяется интерполяцией между тремя ближайшими пикселями оригинального изображения, формирующими треугольник, который включает в себя узел. При этом учитывается как величина интенсивности пикселя, так и его местоположение относительно узла. В целях повышения точности интерполяции было принято условие, при котором треугольник должен быть вписан в квадрат, образованный соседними узлами сетки. Допустим, узел редуцированной сетки с индексами (i,j) попадает в окружение трех точек исходного изображения с условными индексами k,l,m . В этом случае, зная для каждого пикселя исходного изображения координаты $r(\lambda,\varphi)$ и значение яркости B , можно найти интерполированную яркость $B_{i,j}$ в узле редуцированной сетки по формуле:

$$B_{i,j} = \frac{B_k \det(r_{i,j}, r_l, r_m) + B_l \det(r_k, r_{i,j}, r_m) + B_m \det(r_k, r_l, r_{i,j})}{\det(r_k, r_l, r_m)}, \quad (1.3)$$

Где

$$\det(r_k, r_l, r_m) = \begin{vmatrix} 1 & \lambda_k & \varphi_k \\ 1 & \lambda_l & \varphi_l \\ 1 & \lambda_m & \varphi_m \end{vmatrix} = \lambda_k(\varphi_l - \varphi_m) + \lambda_l(\varphi_m - \varphi_k) + \lambda_m(\varphi_k - \varphi_l), \quad (1.4)$$

где r - координатный вектор элемента изображения с долготой λ и широтой φ . В том случае, если невозможно было выделить такие три точки, сеточному узлу

приписывалось значение точки, ближайшей к узлу в рамках половины сеточного шага. Если и это оказывалось невозможным, узел оставался незаполненным, и ему приписывалось нулевое значение яркости. Такие «пустые узлы» обычно появлялись близко к планетному лимбу, где дистанция между пикселями оказывалась больше выбранного сеточного шага. Эти части изображения исключались из анализа.

Как правило, для эффективной и точной интерполяции регулярная сетка должна быть равна или немного грубее, чем пространственное разрешение исходных изображений. Слишком большой сеточный шаг приводит к низкой точности проекции изображения, а слишком маленький - к большому числу «пустых узлов». Оптимальная величина сеточного шага была найдена эмпирически, путём минимизации количества незаполненных узлов на низких широтах для разных групп изображений. Например, величина шага, равная 0.3° , давала удовлетворительный результат для изображений, взятых приблизительно за 2.5 часа до перицентра, в то время, как для изображений, сделанных из апоцентра, требовался больший шаг: 0.7° . На высоких широтах ($>75^\circ\text{S}$) количество «пустых узлов» возрастало из-за сходимости меридиан, т.к. переставало хватать данных для заполнения сеточных узлов. Поэтому шаг был увеличен. Для изображений, сделанных вблизи апоцентра, был использован шаг, равный 1.3° по долготе и 1° по широте, а на более близкой дистанции - 1° по долготе и 0.7° по широте. В ряде случаев на высоких широтах этот приём позволял получить дополнительные результаты. Одним из важных критериев для выбора сеточного шага было получение векторного покрытия по широте, соответствующего визуальному методу при его применении для расчёта векторов данной пары.

В результате интерполяции для выбранной пары снимков получались спроектированные на сетку изображения **1** и **2**, в которых расстояния между пикселями идентичны и равны сеточному шагу. Корреляционная функция для такой пары изображений рассчитывалась следующим образом. Изображение **1** делилось на области равного размера (Рисунок 1.4). Размер этих областей не

должен был быть слишком маленьким во избежание появления ложных смещений и выбирался несколько больше размера типичных облачных особенностей. Кроме того, область должна была содержать статистически значимое число узлов, для того, чтобы корреляция была достоверной (Тейлор, 1985).

Как и сеточный шаг, размер области корреляции зависел от расстояния до перицентра. Он был установлен эмпирически при сравнении с результатами ручного метода и варьировался от 200 до 900 узлов сетки на область. Для сетки с шагом 0.3 градуса оптимальным оказался размер $10^\circ \times 7.5^\circ$, для сетки с шагом 0.5 градуса - $15^\circ \times 10^\circ$. Для сеток с более крупным шагом использовался размер области $20^\circ \times 10^\circ$. Каждая следующая область для исследования выбиралась на изображении **1** с некоторым сдвигом относительно местоположения предыдущей. Долготный сдвиг варьировался в зависимости от размера области от 5 до 7 градусов по долготе. Широтный сдвиг всегда был равен 5 градусам.

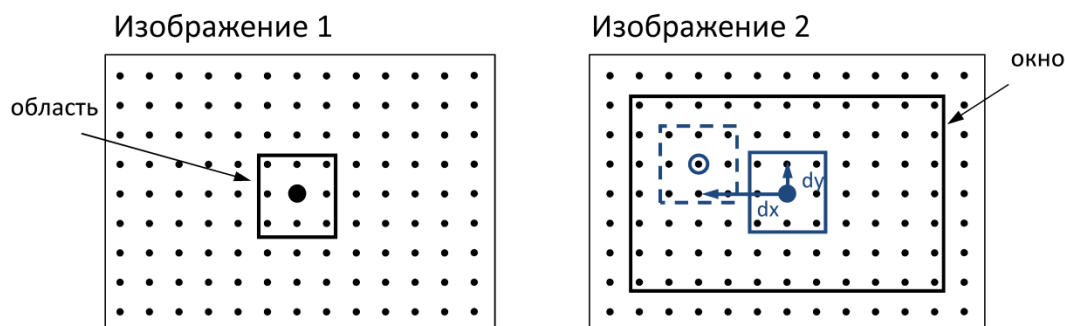


Рисунок 1.4 Схема корреляционного метода. Изображения 1 и 2 являются результатом интерполяции оригинальной пары изображений на регулярную сетку (точки). Перемещение облачных особенностей (dx , dy) под воздействием ветра определяется путём сравнения распределения яркости в квадратных областях (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

В целях сокращения времени счёта, на изображении **2** выделялось «окно», т.е. та часть изображения, в которой должен производиться поиск переместившейся облачной особенности. Выбор размера «окна» основывался на максимальной предположительной величине перемещения. Затем каждая

выбранная область изображения **1** сравнивалась со всеми возможными областями того же размера в рамках заданного «окна» на изображении **2** посредством расчёта корреляционной функции $C_{cor}(dx, dy)$ по формуле:

$$C_{cor}(dx, dy) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((A[i, j] - \bar{A}) * (B[i + dx, j + dy] - \bar{B}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (A[i, j] - \bar{A})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (B[i + dx, j + dy] - \bar{B})^2}}, \quad (1.5)$$

где A и B - двумерные массивы яркости, представляющие области для корреляции внутри изображений **1** и **2**, \bar{A} и \bar{B} - средние значения яркости в выбранных областях, dx, dy - перемещения по долготе и широте области в массиве B по отношению к выбранной области в массиве A , n, m - число узлов сетки по долготе и широте (размер области). Для расчёта корреляционной функции использовались только те узлы, в которых значение яркости было отлично от нуля. Корреляционный коэффициент рассчитывался только в том случае, если объединённое количество «пустых узлов» для исследуемой пары областей не превышало 10% от числа узлов в области выбранного размера.

Двумерное множество коэффициентов корреляции (корреляционная функция), полученное с помощью уравнения (1.5), отражает соответствие в количественном виде выбранной области из массива A и перемещённой $[dx, dy]$ по массиву B . Максимум корреляционной функции соответствует той области на изображении **2**, облачные особенности которой находятся в наибольшем соответствии с выбранной областью на изображении **1**. На этом этапе положение максимума определяется с точностью до величины сеточного шага.

Полученные смещения фильтровались по величине корреляционного максимума и в зависимости от вида корреляционной функции. При анализе корреляционной функции были использованы следующие критерии. (1) Рассматривались корреляционные функции с корреляционным максимумом равным или более 0.8. (2) Пик корреляционной функции $z(x, y)$ должен был быть хорошо выражен в 6-ти проекциях (по срезам xz, yz и срезам, повернутым на углы

30°, 60°, 120° и 150°). Ограниченное число проекций было взято в целях экономии счётного времени. Выраженность пика была определена следующим образом. В низких и средних широтах, вплоть до 45° ю.ш., было принято условие, при котором любой из минимумов каждой проекции должен отличаться от максимума не менее, чем на 0.3. Корреляционная функция на низких широтах обычно демонстрирует хорошо выраженный максимум благодаря наличию компактных облачных особенностей в сочетании с достаточным контрастом на изображении (Рисунок 1.2). На широтах выше 45° ю.ш. характер облачности меняется. Светлые и тёмные полосы (стрейки) на средних широтах, расположенные преимущественно вдоль параллелей, и большие области дымки в сочетании с плохо выраженными облачными особенностями на высоких широтах приводят к слабо выраженным корреляционным пикам. В связи с этим, необходимая разница между максимумом и минимумом была снижена до 0.05. Рисунок 1.5 демонстрирует типичную корреляционную функцию для средних широт. Функция показывает «сильную» корреляцию при смещении по широте (Рисунок 1.5а) и «слабую» при смещении по долготе (Рисунок 1.5б), соответствующую вытянутым облачным образованиям.

Также принималась во внимание острота корреляционного пика. Это значит, что корреляционная функция должна была понижать своё значение по крайней мере на 0.01 на интервале 5° по обе стороны от пика для любой из проекций. В том случае, если этот критерий не выполнялся (функция на этой дистанции могла иметь как первоначальный спад, так и последующий подъём), использовался альтернативный критерий: на интервале 2.5° функция должна была уменьшить своё значение по крайней мере на 0.025 от максимальной величины. Такая гибкость в использовании критерия позволяла увеличить количество получаемых результатов, не противоречащих тем, которые были получены по более строгому критерию. Прошедшие отбор функции маркировались в соответствии со степенью выраженности, что позволяло в дальнейшем варьировать количество полученных векторов скорости, отсеивая при необходимости менее надёжные результаты.

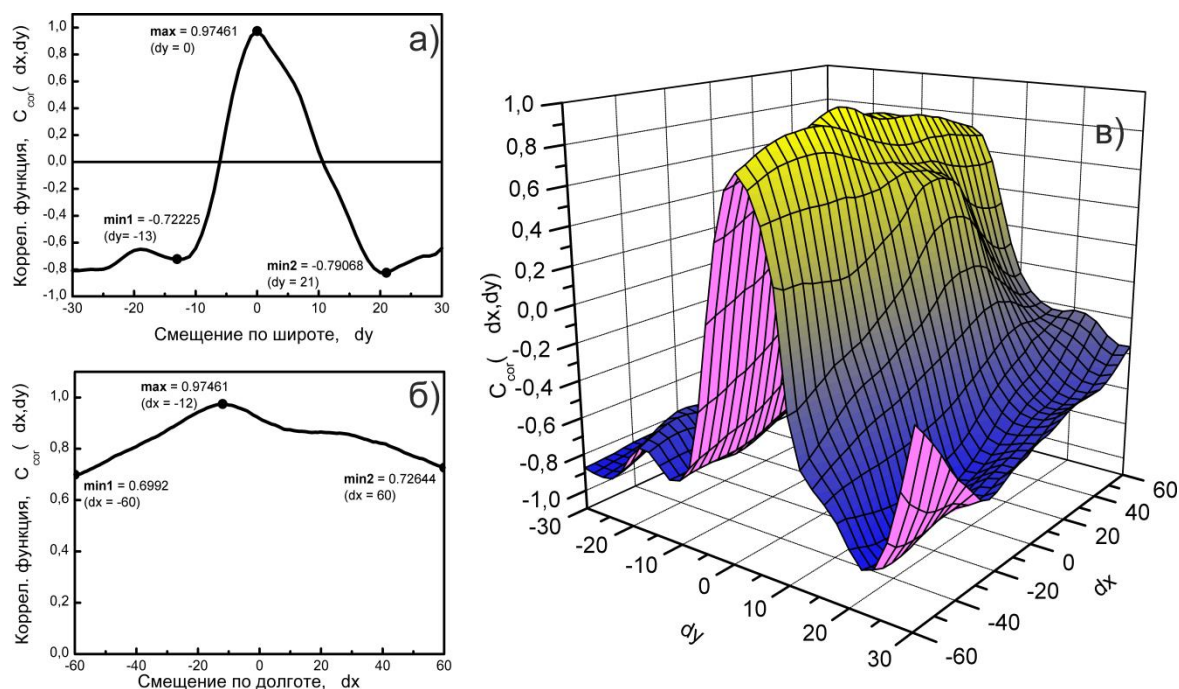


Рисунок 1.5 Долготная (а) и широтная (б) проекции корреляционной функции C_{cor} для орбиты #1324 (в) на 50° ю.ш. Шаг сетки по долготе и широте равен 0.5° . Максимальное перемещение области корреляции по долготе $\pm 30^\circ$ (± 60 шагов), по широте $\pm 15^\circ$ (± 30 шагов) (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

Для корреляционных функций, прошедших отбор, позиция максимума уточнялась повторением расчёта корреляционной функции в области максимума на вновь построенных сетках с тем же шагом, но сдвинутых на доли шага $[dx+dx', dy+dy']$ относительно начальной сетки. Это возможно, т.к. шаг сетки в любом случае больше, чем размер пиксела на изображении. Комбинация поиска максимума корреляционной функции на грубой регулярной сетке с последующей точной настройкой только для максимума значительно уменьшила время вычисления, которое существенно увеличивалось при изначальном использовании сетки с более мелким шагом, и уменьшило ошибку смещения как по широте, так и по долготе. Перемещение $[dx+dx', dy+dy']$ использовалось впоследствии для расчёта соответственно зональной и меридиональной компоненты вектора скорости. Во всех случаях ошибка единичного измерения компоненты скорости, связанная с размером сеточного шага, не превышала 5 м/с.

Рисунок 1.6 представляет изображение Венеры до (а) и после (б) интерполяции, а также области коррелируемых изображений (в, г), соответствующие максимуму корреляционной функции, показанной на предыдущем рисунке (Рисунок 1.5).

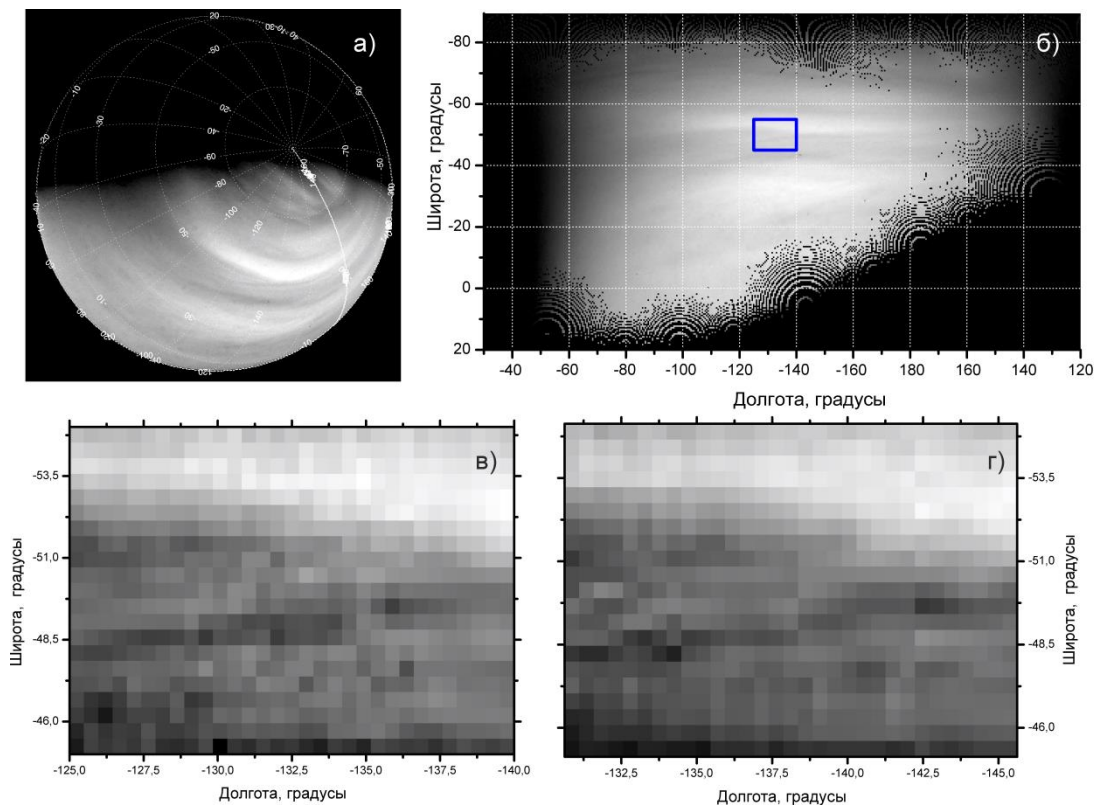


Рисунок 1.6 Иллюстрация процедуры корреляции. Орбита #1324, оригинальное изображение 0016 с координатной сеткой (а), интерполированное изображение с сеточным шагом 0.5° (б) с областью корреляции, отмеченной синим прямоугольником. Размер области корреляции $15^\circ \times 10^\circ$. Области, соответствующие максимуму корреляционной функции ($C_{\text{cor}} = 0,97$), представленной на Рисунок 1.5, принадлежат изображению 0016 (в) и 0020 (г) орбиты #1324 (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

По смещениям, соответствующим прошедшим отбор корреляционным функциям, согласно формулам (1.1) и (1.2) рассчитывались зональные и меридиональные компоненты скорости. Полученные векторы скорости подвергались селекции согласно дополнительным критериям, для того, чтобы

устранить ошибочные значения, возникающие из-за артефактов на изображении, связанных с дефектами матрицы, появившимися во время полёта аппарата к Венере. Эти критерии включали ограничения по зональной скорости $-250 \text{ м/с} < u < 0 \text{ м/с}$, по меридиональной скорости $-50 \text{ м/с} < v < +50 \text{ м/с}$, по местному времени (LT) $9:00 < \text{LT} < 16:00$, а также условие $|u/v| \geq 3.5$ на широтах ниже 40° ю.ш., которое устанавливало доминирование зональной скорости над меридиональной. Последнее условие, полученное экспериментально, устраняло векторы, сильно выпадающие из зонального потока. Как правило, для широт выше 40° ю.ш. условие было ослаблено до $|u/v| \geq 1.5$ в связи с появлением выраженной меридиональной составляющей для ряда орбит. Граница применимости этого условия могла варьироваться в зависимости от характера орбиты. Выбранные критерии, использовавшиеся как для отбора корреляционных функций, так и для селекции векторов скорости, были подтверждены тестовыми сравнениями с результатами ручного метода.

В связи с тем, что Венера имеет ретроградное вращение, т.е. вращается в сторону, противоположную вращению остальных планет Солнечной системы (за исключением Урана), принято обозначать перемещения, направленные в сторону вращения Венеры, знаком «минус». Здесь и далее знак «минус» зональной скорости соответствует перемещению с востока на запад и совпадает с направлением суперротации. Для меридиональной скорости знак «минус» соответствует направлению потока к Южному полюсу, знак «плюс» - к Северному полюсу.

1.4 Сравнение визуального и корреляционного методов

Результаты, полученные визуальным и корреляционным методом, вполне сопоставимы. Визуальный метод, как правило, позволяет более точно определять перемещения на средних и высоких широтах, т.е. там, где есть проблемы с идентификацией деталей облачного покрова. В том случае, если на изображении хорошо выраженные детали присутствуют на всех широтах, корреляционный

метод обладает преимуществом, т.к., позволяя получить большее количество надёжных векторов скорости, обеспечивает лучшее долготно-широтное покрытие.

Рисунок 1.7 демонстрирует сравнение зональной и меридиональной скоростей в зависимости от широты, полученных в результате корреляции изображений 0006 и 0007 орбиты #1335 с результатами, полученными визуальным методом для той же пары изображений. Векторное поле только для одной этой пары изображений (Рисунок 1.8) уже даёт возможность получить представление о перемещении воздушных масс. Результаты, полученные корреляционным методом, отмечены синим ($|u/v| \geq 3.5$) и красным ($|u/v| \geq 1.5$) в зависимости от ограничения, принятого для соотношения зональной и меридиональной компонент (см. п. 1.3). Ослабление соотношения $|u/v|$ до 1.5 для широт выше 35° ю.ш., обусловленное характером облачности на данной орбите, даёт возможность получить дополнительные векторы, улучшив долготно-широтное покрытие.

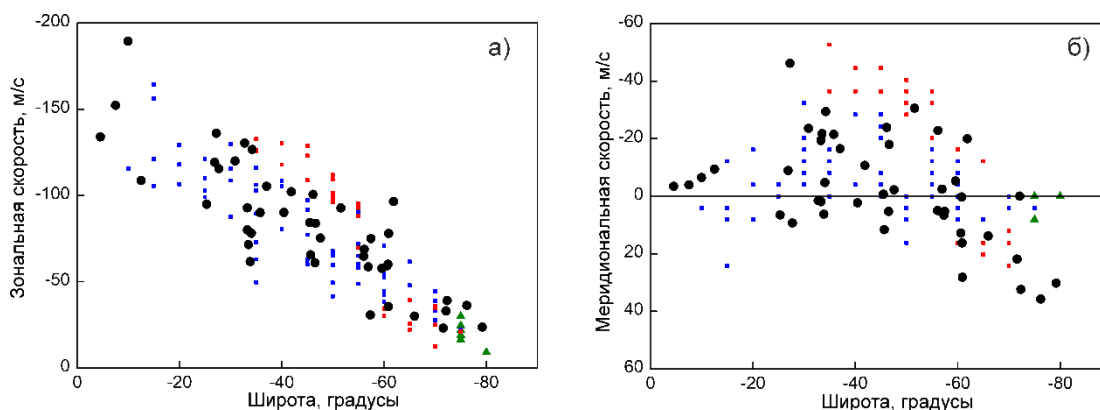


Рисунок 1.7 Сравнение визуального (чёрные точки) и корреляционного (другие символы) методов для зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости ветра, полученных для пары изображений 0006 и 0007 орбиты #1335. Синие квадраты получены при выполнении условия $|u/v| \geq 3.5$, красные – при условии $3.5 \geq |u/v| \geq 1.5$. Синие и красные квадраты – результаты, полученные на долготно-широтной сетке с шагом 0.5° , зелёные треугольники – на сетке с шагом 1.3° по долготе и 1° по широте (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

Рисунок 1.9 демонстрирует средние профили зональной скорости для 8 последовательных орбит (#1340-1347), полученные визуальным и корреляционным методами. В качестве ошибки показан 95% доверительный интервал, который соответствует $1.96 * \sigma_{\bar{x}}$, где $\sigma_{\bar{x}}$ - стандартная ошибка отклонения среднего, рассчитанная как σ/\sqrt{n} , где стандартное отклонение σ рассчитывается по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}, \quad (1.6)$$

где n - число значений x_i в группе, \bar{x} - средняя величина.

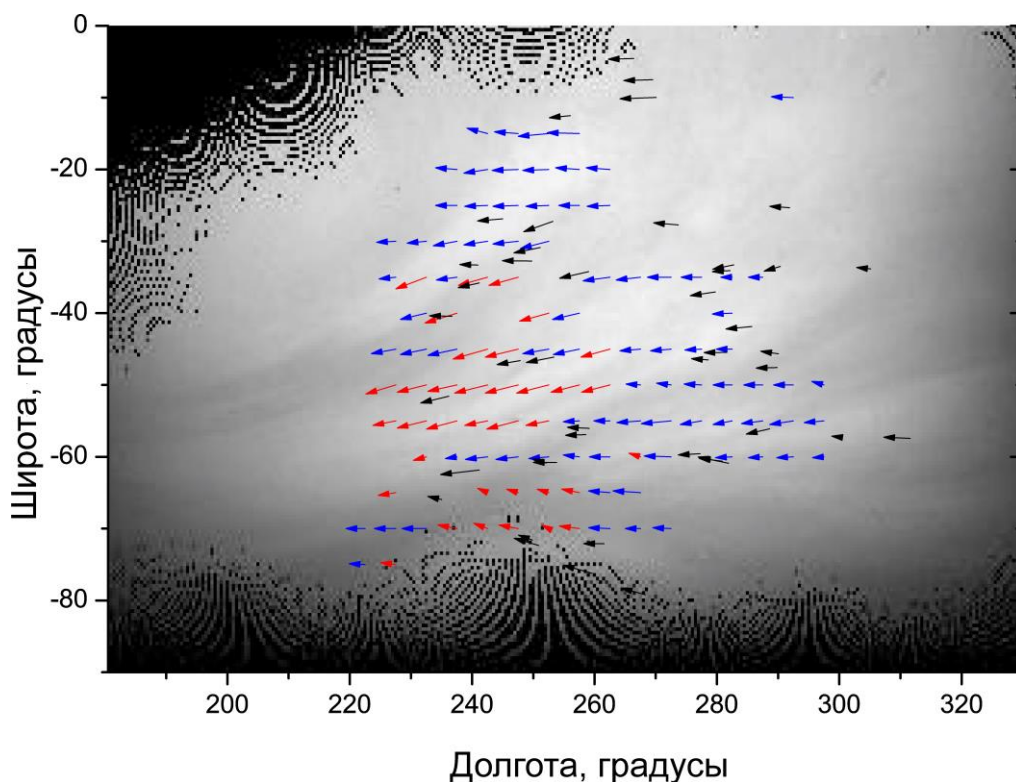


Рисунок 1.8 Изображение 0006 орбиты #1335, интерполированное на долготно-широтную сетку с шагом 0.5° . Синие векторы (согласно условию $|u/v| \geq 3.5$) и красные векторы ($3.5 \geq |u/v| \geq 1.5$) – результаты корреляции изображения 0006 и 0007 на сетке с шагом 0.5° , чёрные – результаты визуального метода.

Результаты, полученные корреляционным методом, сопоставимы с результатами визуального метода в пределах ошибок. Недостаток результатов в высоких широтах, как и наблюдаемое расхождение в имеющихся результатах,

обусловлены меньшей чувствительностью метода, связанной с характерными особенностями облачного покрова (см. п. 1.5). Тем не менее, корреляционный метод позволяет получить больше векторов смещения по сравнению с визуальным методом, обеспечивая лучшее долготно-широтное покрытие в низких и средних широтах.

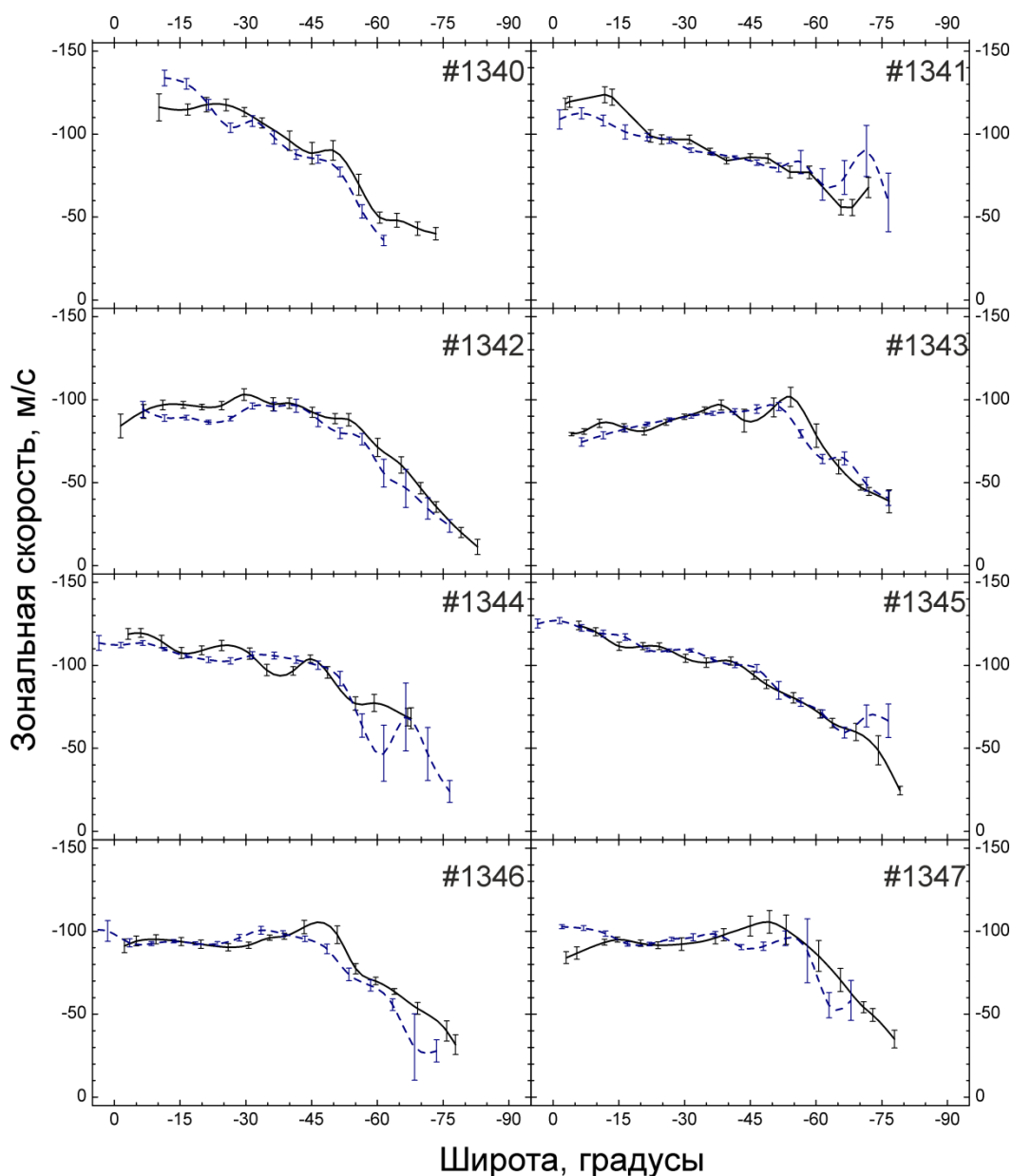


Рисунок 1.9 Широтные профили зональной скорости ветра для орбит 1340-1347, полученные визуальным (чёрный) и корреляционным (синий пунктир) методами. Ошибка соответствует $1.96 * \sigma_x$ (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

1.5 Ошибки и чувствительность метода, точность измерений

Надёжность результатов, получаемых корреляционным методом, зависит от ряда факторов. К ним относятся: (1) точность определения интерполированной интенсивности, связанной с точностью определения координатной привязки пикселей изображения (формулы (1.3) и (1.4)), (2) величина используемого сеточного шага, с которой связана дискретность в поиске максимума корреляционной функции (см. п. 1.3), (2) критерии, установленные для отбора корреляционных функций, позволяющие признать надёжными большее или меньшее количество результатов (см. п. 1.3), (4) точность определения зональной и меридиональной компонент скорости ветра, которая связана с точностью определения координат полученных сеточных узлов и величиной интервала времени между изображениями (чем он больше, тем точнее результат) (формулы (1.1) и (1.2)),. Все перечисленные факторы вносят свой вклад в разброс измерений.

Величина разброса измерений также связана с морфологией облачности и с её изменением в зависимости от широты, что сказывается на качестве корреляционных функций. Дополнительными причинами увеличения разброса измерений являются: (1) зависимость скорости от местного времени, (2) зависимость скорости от долготы (влияние топографии поверхности) и (3) изменения в поведении горизонтального потока, связанные с перемещением Y-структуры. Возникающий при этом разброс носит объективный характер.

1.5.1 Зависимость стандартного отклонения от широты. Анализ рассеяния измерений

В том случае, если на изображении мало ярко выраженных деталей и/или преобладают области с облачными структурами, вытянутыми вдоль параллелей, что характерно для средних и высоких широт, качество корреляционных функций снижается, количество измерений становится меньше, а их разброс увеличивается. Наибольший разброс результатов для зональной компоненты

скорости (Рисунок 1.10) для подобной орбиты (#1324) приходится на область 35-45° ю.ш., где границы деталей облачного покрова существенно размыты и вытянуты преимущественно вдоль параллелей (см. интерполированное изображение 0016 орбиты #1324, Рисунок 1.6б). Отсутствие заметных деталей приводит к меньшему количеству результатов с большим разбросом и большому количеству «слабых» корреляций (см. п. 1.3) выше 45° ю.ш. для обоих компонент скорости ветра.

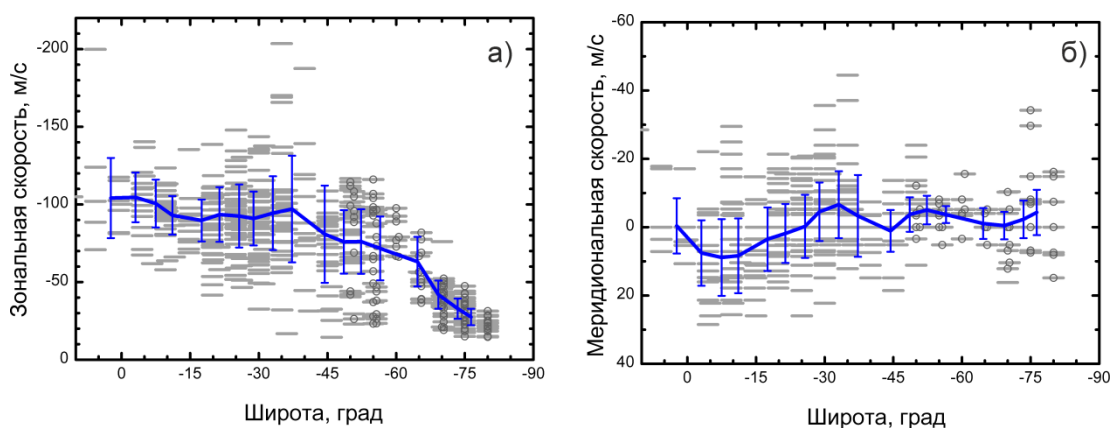


Рисунок 1.10 Широтные профили зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные с помощью корреляционного метода из пар УФ изображений VMC орбиты #1324. “—” хорошо выраженные «сильные» корреляции, окружности поверх штрихов – «слабые» корреляции (см. п. 1.3). Сплошная линия показывает усреднённый профиль скорости ветра. Стандартное отклонение σ дано для 10° широтных интервалов, центрированных на 10°, 20°, 30° и т.д. (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

Несмотря на видимый большой разброс измерений зональной скорости (Рисунок 1.10а), анализ рассеяния полученных результатов для двух широтных интервалов $10^{\circ} \pm 5^{\circ}$ и $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ю.ш. показал, что распределение близко к нормальному (согласно тестам по Колмогорову-Смирнову и Лиллефорсу) (Рисунок 1.11). Величина стандартного отклонения σ , равна 13 и 18 м/с, что очень близко к величине ошибки, установленной для визуального метода (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

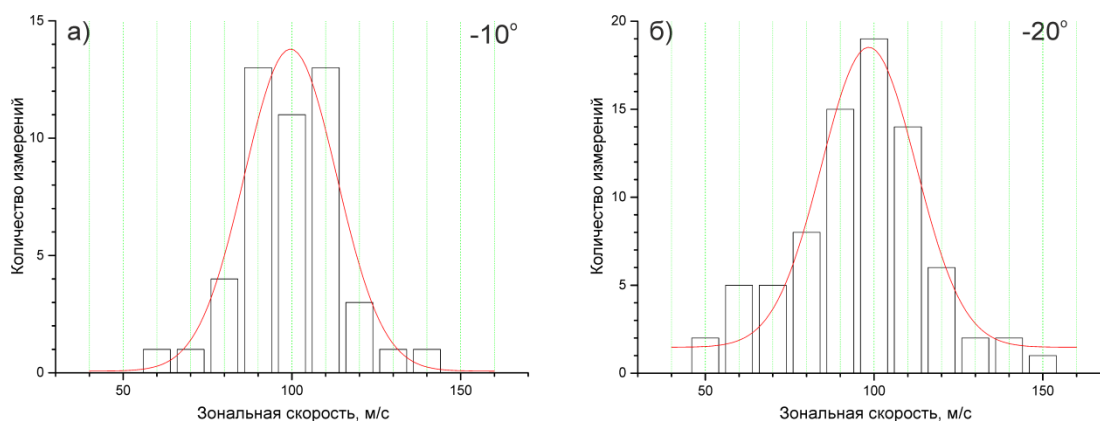


Рисунок 1.11 Гистограммы зональной скорости, полученной корреляционным методом для широтных интервалов $10^\circ \pm 5^\circ$ (а) и $20^\circ \pm 5^\circ$ (б) орбиты #1324. Сплошная линия показывает функцию Гаусса, наилучшим образом проходящую через точки. На оси абсцисс указана абсолютная величина зональной скорости.

Также как и в случае визуального метода, стандартное отклонение при определении скорости корреляционным методом менялось от орбиты к орбите. Как правило, при исследовании разброса результатов в зависимости от широты (без учёта особенностей поведения горизонтального потока, связанных с долготой и/или местным временем), для зональной компоненты на 20° ю.ш. стандартное отклонение составляло 10-20 м/с и могло увеличиться в два раза на средних широтах. Для меридиональной компоненты его величина была, как правило, в 1.5-2 раза меньше и, за редким исключением, мало изменялась с широтой, что является следствием более чётко выраженной широтной структуры облаков Венеры по сравнению с долготной.

Таким образом, при сопоставлении результатов, полученных корреляционным и визуальным методами, было получено, что они сравнимы в пределах ошибок.

1.5.2 Изменение величины стандартного отклонения при учёте вариаций в поведении горизонтального потока

При расчёте ошибки (п. 1.5.1) исследовались все измерения, попадающие в выделенный интервал широт, без учёта их изменения в силу возможных естественных причин как по долготе (см. Главу 2), так и по местному времени. Также не учитывались возможные изменения в направлении и скорости горизонтального потока, связанные с прохождением Y- структуры (см. Главу 3). Анализ ошибок зональной и меридиональной компонент скорости ветра показал, что в том случае, если ошибки рассчитываются для ограниченных по местному времени и широте групп, величина ошибки может заметно снижаться.

Примером может служить орбита #0471, векторное поле которой демонстрирует ярко выраженное изменение направления горизонтального потока на средних широтах (Рисунок 1.12). Для анализа были выбраны области, ограниченные по местному времени и широте, как в низких, так и в средних широтах, и рассчитаны стандартные отклонения для этих областей. Затем было проведено сравнение с величинами стандартного отклонения, рассчитанными для всего доступного интервала местного времени в тех же широтных диапазонах.

Рисунок 1.13 демонстрирует гистограммы для зональной и меридиональной компонент скорости для двух выбранных областей. Первая группа результатов соответствует широтному диапазону 20-25° ю.ш. и интервалу по местному времени от 11 до 14 ч. В выбранной области поток преимущественно зонален и обеспечен хорошей статистикой. В этой группе стандартное отклонение σ для зональной скорости равно 4.4 м/с, для меридиональной 4.8 м/с (Рисунок 1.13а,б). В случае расчёта ошибки в выбранном широтном диапазоне, но по всему доступному местному времени, от 9 до 16 ч, величина стандартного отклонения σ для обеих компонент скорости увеличилась приблизительно в два раза, до 8 м/с.

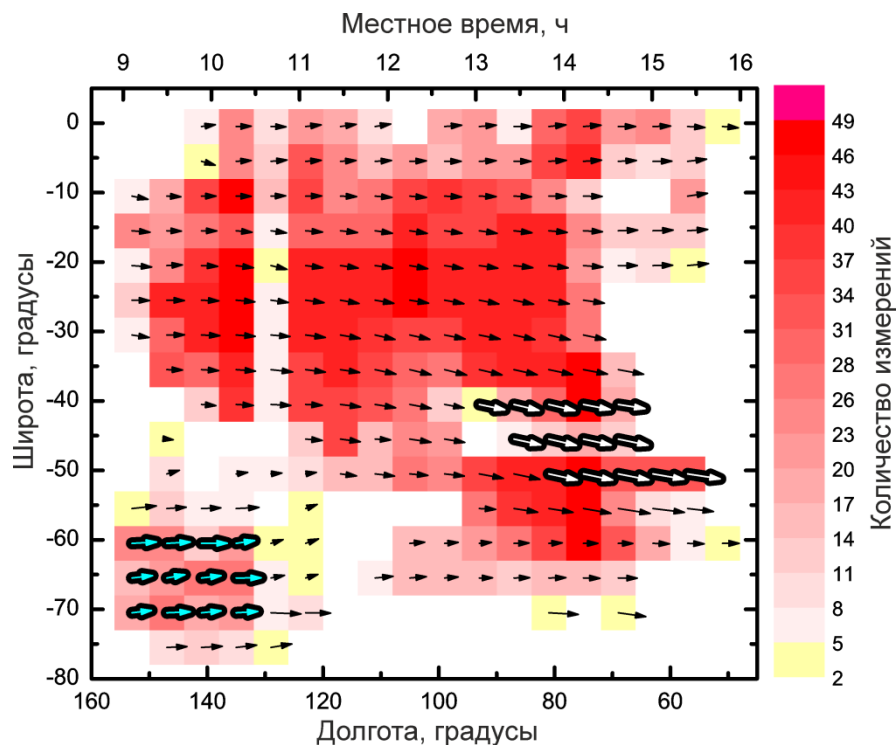


Рисунок 1.12 Векторное поле, демонстрирующее направление горизонтального потока для орбиты #0471, получено усреднением по областям $6^\circ \times 5^\circ$ (долгота \times широта). Двумерная цветная гистограмма показывает количество векторов в соответствующих областях. Векторы, имеющие ярко-выраженную меридиональную компоненту, направленную к полюсу, выделены белым (Patsaeva et al., 2015).

На средних широтах направление потока существенно меняется в зависимости от местного времени, поэтому для корректной оценки была найдена область (вторая группа), в пределах которой направление остаётся неизменным (Рисунок 1.12, белые векторы). Во второй группе σ оказалось равным 9.1 м/с для зональной скорости, и 5.5 м/с – для меридиональной (Рисунок 1.13в,г). Как и в случае первой группы, при расчёте σ для интервала по местному времени от 9 до 16 ч, его величина увеличилась и для зональной скорости (до 25 м/с), и для меридиональной (до 15 м/с), т.е., приблизительно в три раза для средних широт.

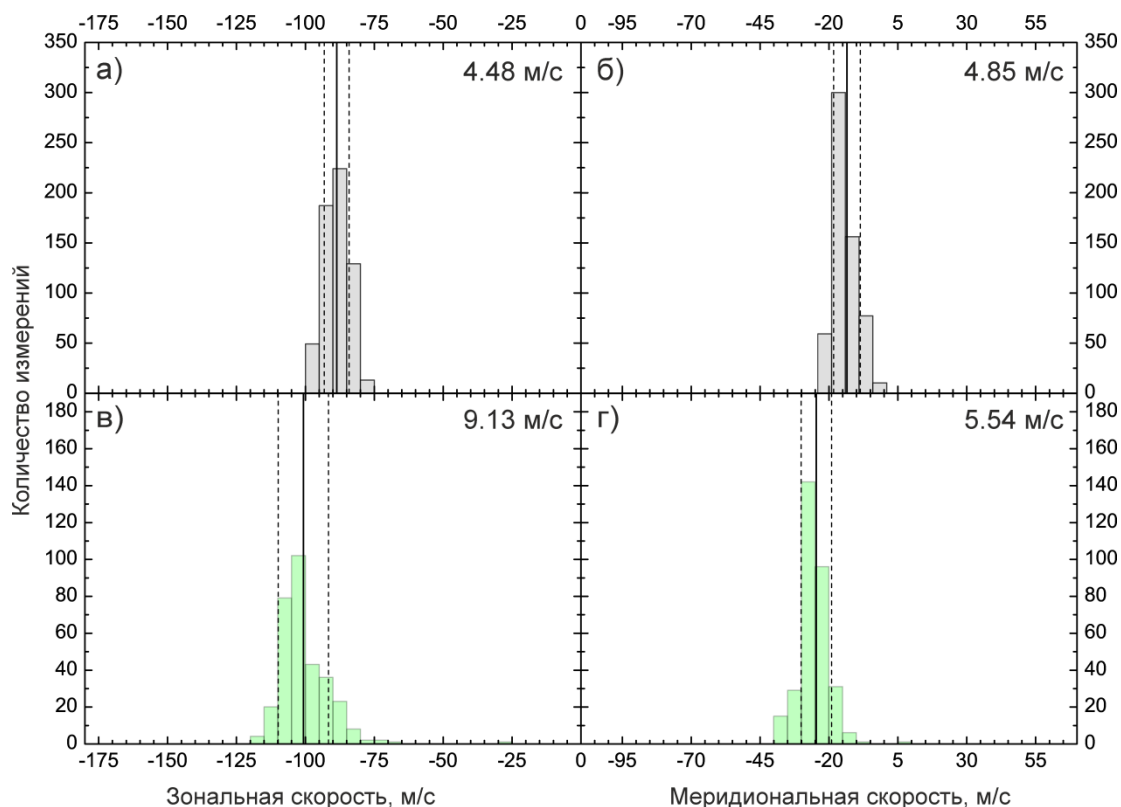


Рисунок 1.13 Гистограммы для зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости в широтном диапазоне $20-25^{\circ}$ ю.ш. для интервала по местному времени от 11 до 14 ч. Гистограммы для зональной (в) и меридиональной (г) компонент скорости для группы белых векторов (Рисунок 1.12). Сплошная и пунктирная линии показывают среднюю величину и стандартное отклонение (Patsaeva et al., 2015).

Таким образом, было получено, что величина стандартного отклонения уменьшается, если анализ измерений проводится для областей, ограниченных по местному времени и широте.

1.6 Ложные смещения

Ряд факторов, кроме разброса измерений, связанного с естественными причинами (п. 1.5) и с особенностями работы корреляционного метода (п.1.3), в той или иной степени вносили вклад в величину ошибки. Одним из них являлись возникающие проблемы с абсолютной точностью наведения космического аппарата на планету (баллистика), которые приводили к неправильному определению координат соответствующего пиксела изображения. Точность

наведения контролировалась датчиками ориентации и составляла 0,3-0,7 мрад, что не превышало размер пикселя VMC (0,7 мрад). Положение точки наблюдения VMC на Венере было рассчитано с помощью стандартных процедур SPICE (<http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>). Тем не менее, при приближении к планете по ряду причин, связанных как с точностью наведения аппарата, так и недостаточной точностью во времени съемки, представленной в заголовке кадра, рассчитанные координаты пикселей отличались от истинных значений координат. Это проявлялось в несовпадении лимба, которое для изображений, полученных близко к перицентру, приводило к заметному искажению зональной и меридиональной компонент скорости ветра. Совпадение измерений, полученных для разных пар изображений одной орбиты, отслеживалось визуально. Результаты, явно выпадающие из основной массы измерений рассматриваемой орбиты (Рисунок 1.14), не использовались. Тем не менее, результаты с менее очевидными отклонениями могли вносить вклад в ошибку как зональной, так и меридиональной компоненты.

Вклад в разброс данных также вносили артефакты, оставшиеся на изображениях после калибровки. Проблемы с матрицей VMC, возникшие во время полёта космического аппарата к Венере, явились причиной дефектов на изображении, от которых невозможно было полностью избавиться. При работе программы, даже не мешающие визуальному восприятию дефекты могут являться источником корреляционных функций хорошего качества, дающих ложные смещения. Принятые ограничения для зональной и меридиональной скорости (п. 1.3) помогли частично решить эту проблему, но не могли избавить от всех результатов, произведённых артефактами.

Ложные смещения возникают не только из-за дефектов изображения. Важную роль играет соответствие размера области корреляции размеру облачных структур на изображении. Если размер области меньше необходимого, в неё попадает только фрагмент исследуемой структуры. В этом случае вероятность появления ложного смещения возрастает, т.к. в корреляционном поиске принимают участие как части масштабных структур, так и структуры,

расположенные отдельно, которые могут стать причиной более высокого значения корреляции. Слишком большой размер области уменьшает вероятность появления ложных смещений, но показывает только глобальное перемещение при потере мелкомасштабных движений, доступных при данном разрешении изображения. Размер области также тесно связан с шагом долготно-широтной сетки. Количество узлов в выделенной области должно обеспечивать надёжность результата корреляции (Тейлор, 1985). Следовательно, чем меньше шаг сетки, тем меньше может быть размер области.

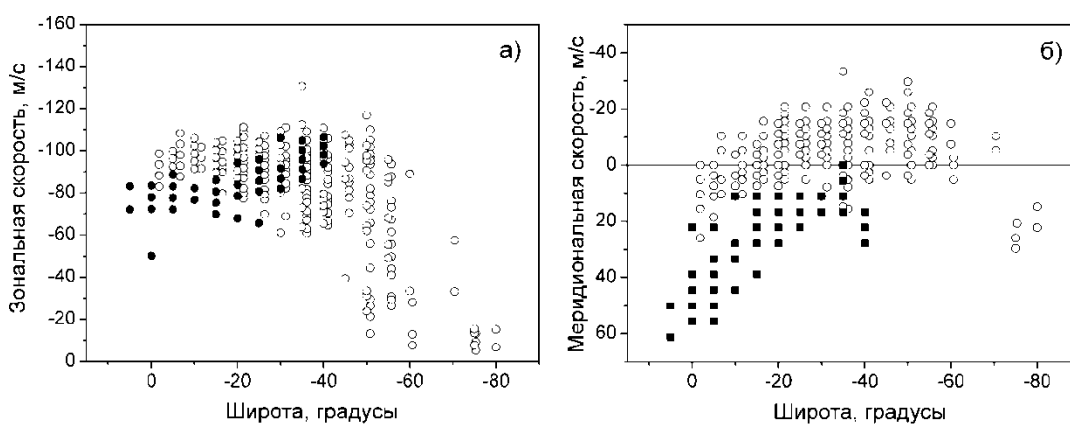


Рисунок 1.14 Искажение зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости ветра вследствие ошибок баллистики на примере орбиты #0920. Качественные единичные измерения, полученные при корреляции 8 пар изображений, представлены серыми окружностями. Единичные измерения, которые были исключены из рассмотрения (получены при корреляции пары изображений 0028-0036 той же орбиты), представлены чёрными кругами (а) и квадратами (б).

Ложные смещения также могли появляться при корреляции областей разного размера для одной и той же пары изображений (Рисунок 1.15).

Как было отмечено в п. 1.3, оптимальный размер области корреляции, единый для всех широт, подбирался эмпирически при сравнении с результатами визуального метода. Но в связи с тем, что характер облачности на Венере существенно меняется с широтой от компактных деталей до вытянутых структур,

невозможно было совершенно избавиться от ложных смещений, которые так же, как и наличие артефактов на изображении, могли давать дополнительный вклад в разброс данных.

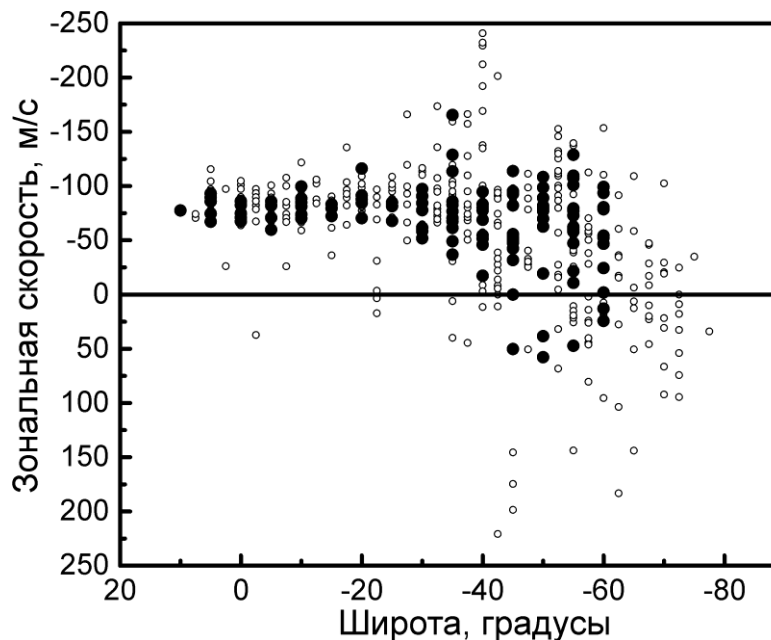


Рисунок 1.15 Зональная скорость, полученная при корреляции изображений 0088 и 0103 орбиты #0495, интерполированных на сетку с шагом 0.5° для областей корреляции разного размера. Результаты, полученные для областей, имеющих размер $8^\circ \times 5^\circ$ (серые окружности), $15^\circ \times 10^\circ$ (чёрные круги).

1.7 Средние широтные профили ветра. Сравнение с измерениями, полученными предыдущими миссиями

Возможность получения информации о скорости горизонтального потока по изображениям облачного слоя Венеры обусловлена, прежде всего, наличием облачных особенностей, остающихся неизменными в течение более 8-10 часов и сохраняющих своё местоположение относительно окружающего их рисунка облаков.

Рисунок 1.16 демонстрирует сравнение широтных профилей ветра, полученных по результатам работы корреляционного метода (более 170 тысяч

векторов) по УФ изображениям VMC, с измерениями скорости, полученными по данным других миссий.

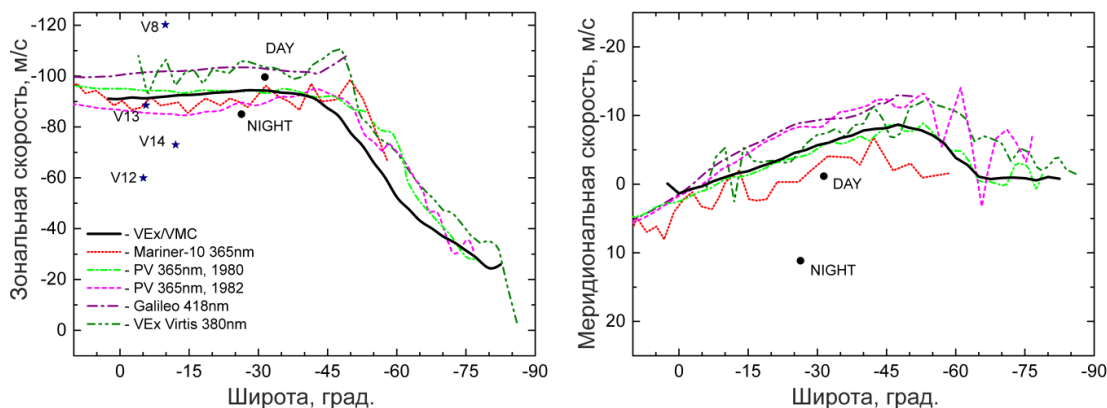


Рисунок 1.16 Средний зональный (слева) и меридиональный (справа) профили скорости ветра, восстановленные по УФ изображениям VMC корреляционным методом (чёрный), по сравнению с более ранними результатами, полученными по данным Маринер-10 (Limaye and Suomi, 1981), OCPP на борту «Пионер Венера» (Limaye, 2007), Галлилео (Belton et al., 1991), VIRTIS на борту орбитальной станции «Венера Экспресс» (Sanchez-Lavega et al., 2008; Hueso et al., 2012) и на основе данных, полученных спускаемыми аппаратами (Kerzhanovich and Limaye, 1985). Соответствие профилей перечисленным выше миссиям показано на левой панели рисунка. Результаты, восстановленные по данным спускаемых аппаратов Венера – 8, 12, 13, 14 отмечены синими звёздочками на левой панели, миссии «Пионер Венера» (спускаемые аппараты DAY и NIGHT) - чёрными точками на левой и правой панели рисунка.

Средние широтные профили демонстрируют постоянство среднего зонального потока на протяжении более четырёх десятилетий наблюдений. Средняя зональная циркуляция Венеры в низких и средних широтах характеризуется скоростью 90-100 м/с. На широтах 40-50° ю.ш. на отдельных кривых наблюдается максимум 100-110 м/с, который является следствием струйного течения – среднеширотного джета. Причина, по которой подобный максимум может отсутствовать на среднем широтном профиле зонального ветра, рассмотрена в Главе 3. От 50° ю.ш. зональная скорость быстро уменьшается по

направлению к полюсу. Знак меридиональной составляющей свидетельствует о направлении потока к полюсу, демонстрируя небольшой максимум (до 5-10 м/с) вблизи 50° ю.ш., а затем падая до нуля к 75° ю.ш.

Значения зональной скорости, полученные на основе данных, переданных спускаемыми аппаратами Венера – 13 и миссии «Пионер Венера» в дневное время соответствуют значениям среднего зонального и меридионального ветра. Соответствие прямых измерений значениям скорости, полученным при обработке изображений, подтверждает соответствие этих значений действительному перемещению атмосферных масс.

Значения зональной скорости, полученные на основе данных, переданных спускаемыми аппаратами Венера - 8, 12, 14, лежат вне среднего потока. Учитывая, что измерения проводились в разное время, и, принимая во внимание возможность существования короткопериодических вариаций зональной скорости в экваториальной области планеты (Рисунок 1.9; Khatuntsev, Patsaeva et al, 2013; Kouyama et al., 2013), можно утверждать, что эти значения не находятся в противоречии с остальными результатами.

1.8 Орбиты, использованные в исследовании

За весь период работы КА Венера-Экспресс на орбите VMC предоставила изображения более чем для 3000 орбит. В связи с тем, что оптимальные условия для отслеживания перемещения облаков в УФ канале возникают от 8-9 ч до 15-16 ч по местному времени, количество орбит, пригодных для исследования, не превышало половину от их общего числа (Рисунок 1.3). Часть изображений не могла быть использована из-за большого количества дефектов и проблем, связанных с наведением космического аппарата на планету (п. 1.6). По оставшимся изображениям корреляционным методом были получены векторные поля. В целях повышения надёжности получаемых значений скорости ветра, во внимание принимались только результаты с коэффициентом корреляции больше 0.8. Также, для того, чтобы избежать ошибок в интерпретации результатов, для

последующего анализа были отобраны орбиты, для которых удалось получить максимально полное долготно-широтное покрытие. Таким образом, для исследования динамики были использованы изображения 258 орбит в области средних широт и 262 орбит в экваториальной области, полученные камерой VMC в интервале с 2006 по 2013 г. Разница в 4 орбиты объясняется наличием достаточного количества надёжных результатов исключительно в приэкваториальных широтах. В связи с тем, что качество изображений к концу миссии ухудшалось, большая часть отобранных орбит сосредоточена в первой половине миссии (количество доступных орбит во второй половине миссии вдвое меньше, чем в первой). Меньшее количество и более низкое качество изображений во второй половине миссии привели к более разреженному пространственному покрытию векторами скорости, особенно в экваториальных широтах. В частности, покрытие высокогорной области Земля Афродиты хуже, чем у окружающих регионов. В результате обработки изображений VMC автоматическим методом было получено более 170000 векторов. Полный список орбит представлен в Приложении 1.

1.9 Средние поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра в координатах местное время – широта

Зональные и меридиональные компоненты скорости ветра были усреднены по всем исследованным орбитам (Приложение 1) и представлены как функции широты и местного времени (Рисунок 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. Стандартные

ошибки среднего, рассчитанные для этих областей ($1.5 \text{ ч} \times 10^\circ$), не превышают $0,5 \text{ м/с}$.

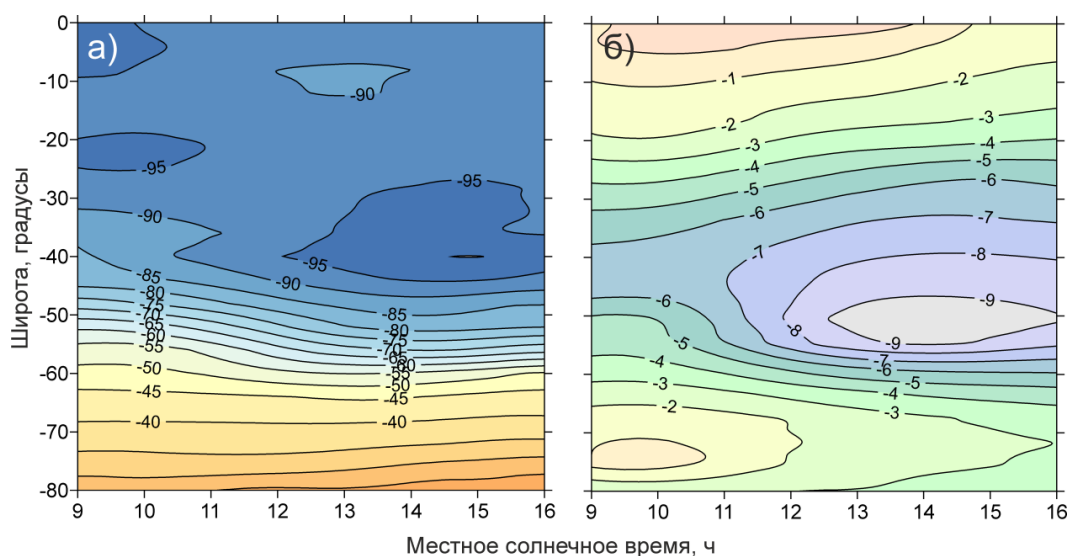


Рисунок 1.17 Средняя зональная (а) и меридиональная (в) компонента, как функция местного времени и широты. Скорости были усреднены за весь период наблюдений с мая 2006 по сентябрь 2013 г. (Patsaeva et al., 2015).

Средние поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра, полученные в течение длительного времени (около 7,5 лет), обеспечены результатами, имеющими хорошую статистику. Даже в высоких широтах, где покрытие данными существенно беднее, чем в низких и средних широтах, на интервал от 9 до 11 ч и от 70 до 80° ю.ш. приходится около 800 векторов. Представленные зависимости позволили выявить особенности динамики атмосферы Венеры на уровне верхнего облачного слоя в дневное время. Средние поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра (Рисунок 1.17) хорошо согласуются с аналогичными полями, построенными на основе результатов, полученных за тот же период наблюдений с помощью визуального метода (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013).

1.10 Выводы по Главе 1

- Разработан автоматизированный корреляционный метод измерения смещения облачных деталей по УФ изображениям VMC/VEH;
- Сопоставление результатов, полученных корреляционным и визуальным методами, показало, что они сравнимы в пределах ошибок. Корреляционный автоматизированный метод позволяет обрабатывать значительно бОльшие объёмы данных, обеспечивая лучшее долготно-широтное покрытие, преимущественно в низких и средних широтах;
- На основе измерений, полученных корреляционным методом, построены средние поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра в координатах местное время – широта и векторные поля для индивидуальных орбит в координатах долгота (местное время) – широта, позволяющие выявить особенности динамики атмосферы Венеры на уровне верхнего облачного слоя в дневное время.

Глава 2. Динамика атмосферы в экваториальной области

2.1 Введение

На протяжении всей миссии «Венера Экспресс» наблюдался рост средней зональной скорости ветра на верхней границе облаков (70 ± 2 км) (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013). С 2006 по 2013 гг. средняя скорость зонального ветра на широте $20^\circ \pm 2.5^\circ$ ю.ш. изменилась с 85 до 110 м/с. Kozyama et al. (2013), проанализировав набор данных VMC, выявили аналогичную долгосрочную тенденцию в поведении зональной скорости в низких широтах в интервале с 2006 по 2010 г. Ранее Del Genio и Rossow (1990), основываясь на наблюдениях ОСРР миссии «Пионер Венера», предположили существование долговременных изменений скорости зонального потока с периодом 5-10 лет. Возможные причины подобных долговременных изменений были исследованы в Bertaux et al. (2016). На основе результатов, полученных визуальным методом из УФ изображений камеры VMC, авторы обнаружили корреляцию скорости зонального ветра с рельефом подстилающей поверхности в широтном интервале $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. Было показано, что поведение зональной скорости связано с топографией поверхности таким образом, что область минимума скорости зонального ветра наблюдается над горным массивом Земля Афродиты, расположенным в экваториальной области Венеры. Наблюдаемое увеличение средней скорости зонального ветра за время миссии с 2006 по 2013 гг. было объяснено зависимостью зональной скорости от высоты рельефа подстилающей поверхности. Станция «Венера Экспресс» имела трехосно-стабилизированную полярную орбиту, вследствие чего долгота подспутниковой точки медленно дрейфовала от орбиты к орбите на Запад, от горной области к низменности. Следуя Lindzen (1981) и Young et al. (1987), Bertaux et al. (2016) предположили, что наблюдаемое уменьшение зональной скорости ветра над Землей Афродиты связано с распространением внутренних гравитационных волн (ВГВ), возникающих при обтекании горизонтальным потоком препятствия в виде горного массива Земли Афродиты.

Распространение ВГВ, или волн плавучести, возможно только в термодинамически устойчивой атмосфере (Лайтхилл, 1981). Устойчивость атмосферы зависит от вертикального профиля температуры (Хргиан, 1969; Трухин и др., 2005; Andrews, 2010). Условие статического равновесия атмосферы определяется разностью существующего в атмосфере температурного градиента $\frac{dT}{dz}$ [К/км] и адиабатического градиента $\Gamma = \frac{g}{c_p}$ [К/км], где g – ускорение свободного падения, c_p – теплоёмкость при постоянном давлении. При $\frac{dT}{dz} < \Gamma$ – атмосфера устойчива, при $\frac{dT}{dz} > \Gamma$ – возникает конвекция.

Рисунок 2.1 представляет профили статической стабильности атмосферы Венеры в зависимости от высоты, полученные по измерениям спускаемых аппаратов и данным радиопросвечивания (см. Figure 8 в Vertaux et al., 2016). Как видно из рисунка, атмосфера Венеры устойчива от ~5 км до нижней границы облачного слоя (~48 км). Нестабильный уровень наблюдается в облачном слое (48–60 км) (Limaye et al., 2018; Tellmann et al., 2009). Наличие неустойчивого уровня подтверждается недавним повторным анализом ряда данных радиопросвечивания от VeRa/VEX и «Акацуки» с помощью усовершенствованного метода, обеспечивающего лучшее вертикальное разрешение профиля температуры (Imamura et al., 2018). Авторы обнаружили множественные тонкие слои (несколько сотен метров) с высокой устойчивостью, чередующиеся с низкоустойчивыми слоями на высотах выше ~ 60 км. По мнению авторов это свидетельствует о чередовании слоёв, в которых возможны гравитационные волны, с турбулентными слоями. На данный момент механизм распространения ВГВ в атмосфере Венеры остаётся неясным и требует дальнейших исследований.

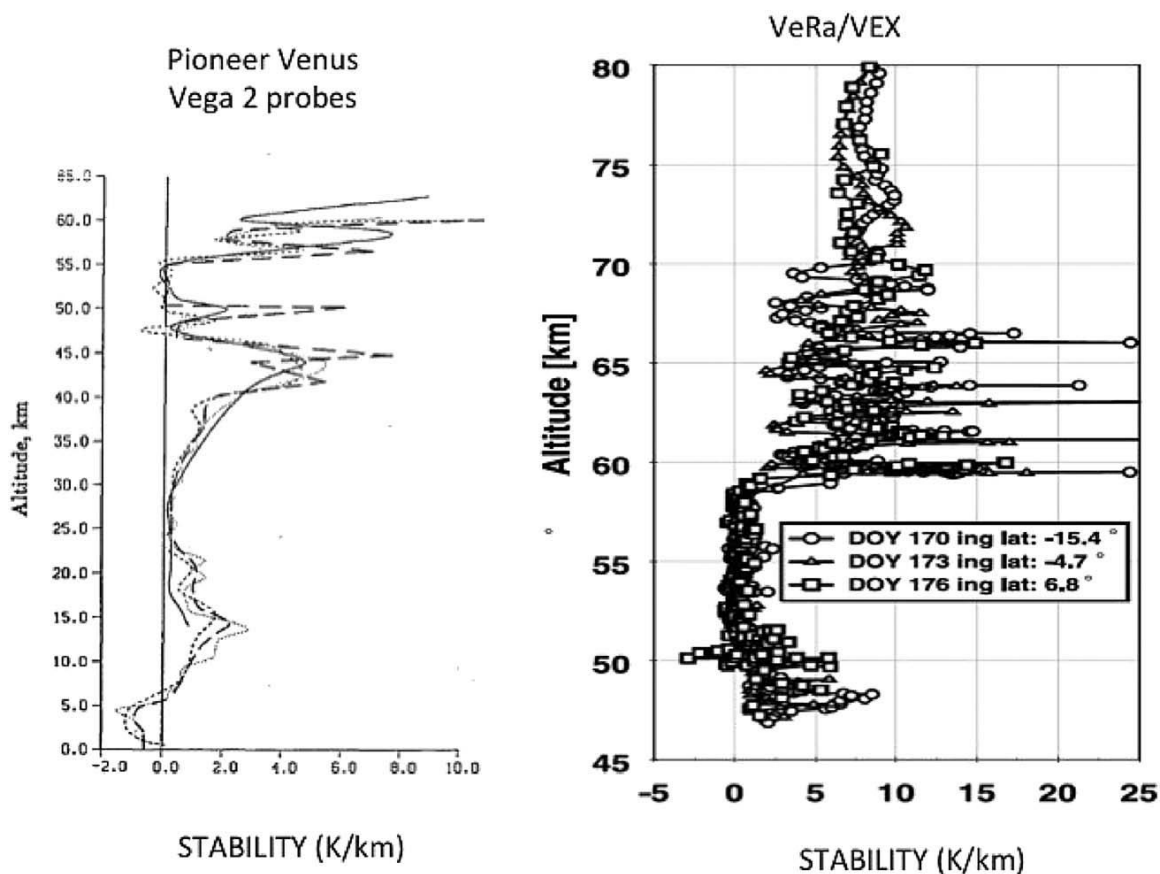


Рисунок 2.1 (слева) Профили статической стабильности в зависимости от высоты, полученные по измеренным профилям температуры (в единицах К/км). Сплошная кривая получена по измерениям спускаемого аппарата Пионер Венера (Seiff et al., 1980), и пунктирные кривые – профили стабильности, восстановленные разными методами по данным спускаемого аппарата ВЕГА-2 (Young et al., 1987). (справа) Профили стабильности для трех широт вблизи экватора (Tellmann et al., 2009), полученные по данным радиопросвечивания VeRa/VEX (К/км).

Bertaux et al. (2016) также сообщили о долготных вариациях УФ альbedo и содержания H_2O , связанных с Землёй Афродиты, самой большой горной местностью в экваториальной области. Долготно-широтные вариации водяного пара на уровне верхней кромки облаков, восстановленные по данным спектрометра SPICAV миссии «Венера Экспресс», представлены в Fedorova et al. (2016). Более ранние измерения проводились баллонами ВЕГА-1 и ВЕГА-2 миссии «Венера-Галлей» при дрейфе на высоте около 53 км в экваториальной области Венеры (около 7° северной и южной широты). Траектория ВЕГА-1 вблизи экватора в северном полушарии проходила почти вдоль параллели,

показывая близкие к нулю значения меридиональной скорости. Часть пути аэростата ВЕГА-2 пролегла над Землёй Афродиты, при этом отмечалось заметное смещение в сторону экватора с меридиональной скоростью около 2,5 м/с (Sagdeev et al., 1990; Blamont et al., 1993). Также были отмечены периодические изменения величины и направления вертикальной скорости при дрейфе баллона ВЕГА-2 над Землёй Афродиты (Crisp et al., 1990; Blamont et al., 1993).

В статье Fukuhara et al. (2017) сообщается о серповидной структуре планетарного масштаба над Областью Овды, которую наблюдала длинноволновая инфракрасная камера LIR на борту японского космического аппарата «Акацуки». Структура была интерпретирована как стационарная волна, связанная с Землёй Афродиты. Подобные структуры, ориентированные в меридиональном направлении и полусферически симметричные, наблюдались также над большими высокогорьями на поверхности Венеры, такими как Область Фетиды, Область Атлы и Область Бета. Не обсуждая механизм распространения внутренних гравитационных волн через нестабильные слои, Navarro et al. (2018) исследовали с помощью численного моделирования ВГВ, генерируемые суточным циклом атмосферной устойчивости возле поверхности. Авторы показали, что во второй половине дня, по мере прогрева приповерхностного слоя, в нём увеличивается устойчивость, в связи с чем в областях топографических максимумов ВГВ могут достигать облачного слоя и создавать стационарные дугообразные структуры, напоминающие наблюдаемые камерой LIR на борту «Акацуки». Kouyama et al. (2017) обнаружили, что появление дугообразной структуры над горными районами зависит от местного времени. Большая стационарная волна над Областью Овды чаще появлялась в послеполуденное время и за 10.5 земных суток наблюдения изменила свою локализацию, переместившись на восток по крайней мере на 20° относительно своего начального положения. Влияние топографии на атмосферную циркуляцию на 90-100 км было отмечено в Gorinov et al. (2018), где анализировалось перемещение областей ночного свечения молекулярного кислорода. Форма области свечения повторяла контуры возвышенности, находясь либо непосредственно над ней, либо могла быть смещена в направлении

основного потока и повернута на некоторый угол. Влияние поверхности на динамику атмосферы также наблюдалось на ночной стороне. Peralta et al. (2017) проанализировали 3,8 мкм и 5 мкм изображения, сделанные картирующим спектрометром VIRTIS-M орбитальной станции «Венера Экспресс», и обнаружили сильное торможение зонального потока (до 20-50 м/с) над горной местностью в южном полушарии, которое было объяснено влиянием стационарных волн, генерируемых поверхностью. Долготные вариации зональных и меридиональных компонент ветра в среднем облачном слое на дневной стороне, полученные Khatuntsev, Patsaeva et al. (2017) автоматизированным методом из анализа изображений ближнего инфракрасного (ИК) диапазона камеры VMC (965 нм), также можно объяснить стационарными волнами, связанными с Землёй Афродиты. Результаты численного моделирования, представленные в Yamamoto et al. (2019), воспроизводят уменьшение зональной скорости на высоте 69 км, связанное с Землёй Афродиты и демонстрируют усиление меридионального ветра в области этого горного массива.

Продолжительные солнечные сутки на Венере, равные 116.8 земным суткам, способствуют прогреванию массивной атмосферы планеты. Наблюдения, проведённые Фурье-спектрометром (ФС) на борту «Венера-15» показали, что изменения некоторых свойств атмосферы, таких как температурное поле на высотах 60–95 км, высота верхней границы облаков и скорость зонального термического ветра в среднеширотном джете (Засова и др., 2000), имеют зависимость от местного солнечного времени. Эти вариации были представлены в виде гармоник теплового прилива, амплитуда и фаза которых находятся в зависимости от широты и местного времени (Засова и др., 2002, 2007). Позже Zasova et al. (2015) обнаружили корреляцию мезосферного температурного поля и высоты верхней границы облачного слоя с топографическими особенностями, такими как Область Бета, Плато Лакшми и Равнина Аталанты. Noginouchi et al. (2018), проанализировав поле ветра, полученное по УФ изображениям камеры UVI космического аппарата Акацуки с декабря 2015 по март 2017 года, отметили

сильное замедление зонального ветра около полудня, предполагая значительное влияние солнечного прилива на циркуляцию, но при этом не нашли корреляции с топографией. Анализируя изображения, полученные камерой UVI космического аппарата «Акацуки» с 26 по 31 января 2017 г., Gonçalves et al. (2020) обнаружили уменьшение зональной скорости в области экватора от 12 до 14 ч. По данным VeRa/VEX заметная полусуточная приливная структура с наиболее высокой амплитудой в верхней мезосфере в области утреннего и вечернего терминаторов была найдена в температурном поле в экваториальном районе ($\pm 20^\circ$ широты) (Tellmann et al., 2012; Limaye et al., 2018). На основе численного моделирования Bills et al. (2019) получили минимум приповерхностного давления после полудня, что предполагает, как и в Navarro et al. (2018), реакцию глубоких слоёв атмосферы на солнечный прилив.

В целом вышеупомянутые наблюдения и их анализ 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, впервые предоставил такую возможность (Patsaeva et al., 2019).

В Главе 2 приведены результаты исследования поведения горизонтального потока на верхней границе облачного слоя в экваториальных широтах (от 0° до 30° ю.ш.) над высокогорной областью Земля Афродиты, рассмотрены зависимости зональной и меридиональной скоростей от топографии и местного времени.

2.2 Зависимость среднего зонального потока от топографии и местного времени

Большое количество векторов смещения, полученных автоматизированным методом (на экваториальную область, от 0° до 30° ю.ш. приходится более 44000 векторов), позволило исследовать зависимости зонального потока от местного времени. На начальном этапе результаты были разделены на выборки по 1 часу местного солнечного времени. Достаточное количество данных внутри каждой выборки (см. Приложение 2) и полное долготно-широтное покрытие предоставило возможность исследовать особенности поведения горизонтального потока для каждого из интервалов местного времени.

Пространственное распределение средней зональной скорости (Рисунок 2.2) позволяет проследить эволюцию поля зонального ветра от 10 до 16 ч. Главная особенность – это удлинившаяся структура над Землей Афродиты со скоростью ветра 84 ± 2 м/с, форма которой меняется с течением времени. В 10-11 ч область низкой скорости распространена по широкому долготному интервалу. В 11-12 ч форма структуры становится более выраженной, изолинии скорости ветра повторяют контуры рельефа подстилающей поверхности. Область низкой скорости, локализуясь на долготах Земли Афродиты, распространяется на юг до $\sim 25-30^\circ$ ю.ш. Позже структура деформируется и вытягивается в западном направлении, смещаясь от материковой возвышенности Земли Афродиты в сторону направления суперротации. Поскольку наиболее выраженные изменения зональной скорости обнаружены над Землей Афродиты (Рисунок 2.2), именно данный долготный интервал представляет наибольший интерес.

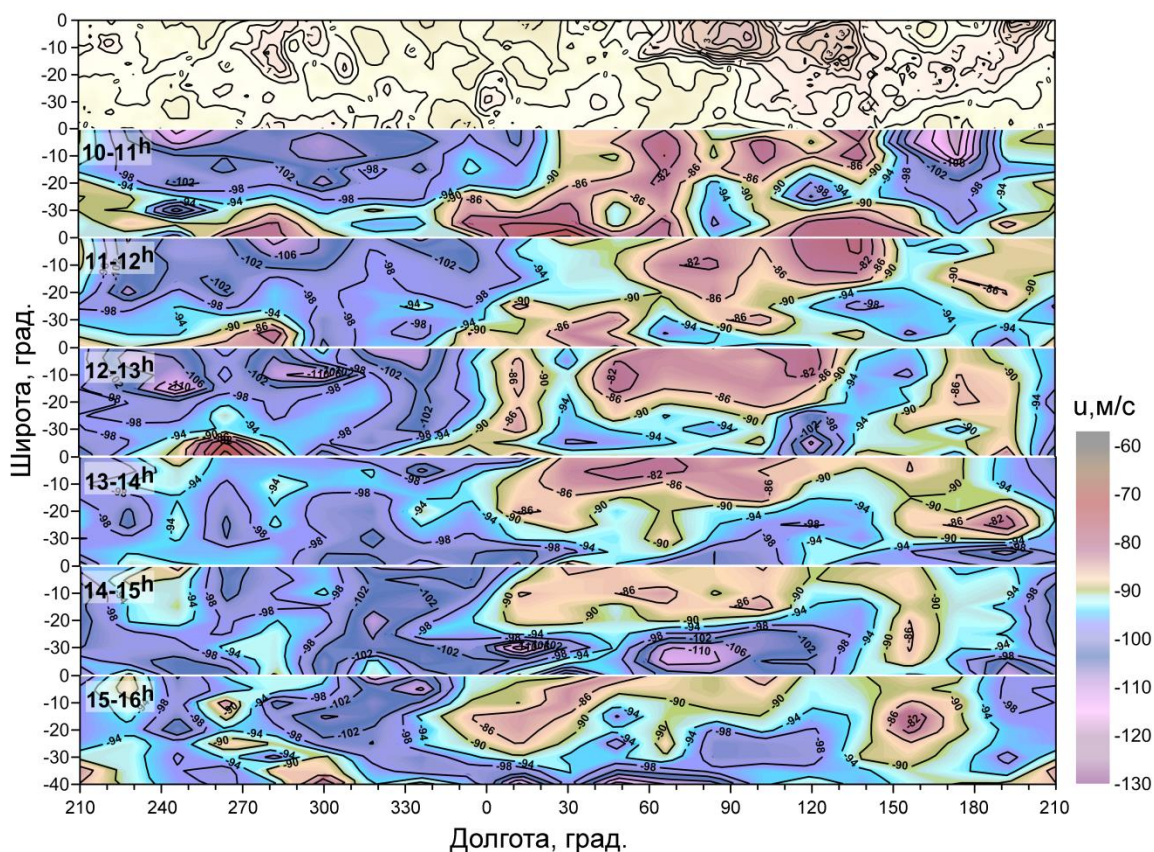


Рисунок 2.2 Пространственное распределение средней зональной скорости (u) на уровне верхней границе облаков, полученное для часовых интервалов местного солнечного времени. «Минус» зональной скорости соответствует перемещению с востока на запад и совпадает с направлением суперротации. Для всех точек каждой из карт местное время является одинаковым; оно обозначено в верхнем левом углу. Топографическая карта, полученная миссией Magellan (NASA), представлена на верхней панели (Patsaeva et al. 2019).

Для каждого часового интервала местного времени для широтной полосы $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. были построены долготные профили средней зональной скорости (Рисунок 2.3а). Широтная полоса $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. была выбрана как соответствующая наибольшей высоте Земли Афродиты (область Овда). Пять кривых, по одной на каждый часовой интервал местного времени, показывают одинаковую общую картину существенного торможения зонального потока над возвышенностью и последующего ускорения над низменностью (долгота от 0 до 150°). Это явление было ранее обнаружено Verhaux et al. (2016) на основе результатов, полученных с помощью визуального метода для всего доступного интервала местного времени.

Тот факт, что при большем количестве данных, разбитых на пять независимых наборов, отсортированных по местному времени, наблюдается тот же характер торможения, подтверждает существование этого явления. Профили зональной скорости для разного местного времени демонстрируют изменения положения минимума относительно наибольшей высоты на среднем профиле рельефа поверхности. Здесь и далее имеется в виду модуль зональной скорости, т.к. знак «минус» указывает исключительно на направление вращения Венеры и её атмосферы (см. п.1.3). Стандартная ошибка среднего σ_x (см. п.1.4) для каждого из профилей не превышает 1.5 м/с, что говорит о статистической значимости наблюдаемого явления.

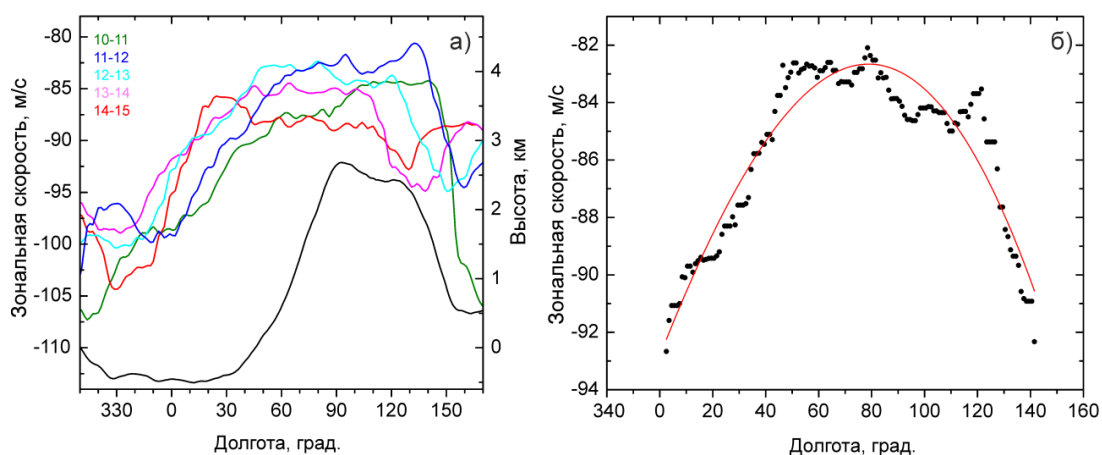


Рисунок 2.3 а) Средние профили высоты поверхности (чёрная линия) и зональной скорости для интервалов местного времени (цветные линии) для широтной полосы $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. Интервалы местного времени, соответствующие цветам, отмечены в левом верхнем углу. В связи с тем, что знак зональной скорости указывает направление потока (см. п. 1.3), минимальная скорость соответствует кажущемуся максимуму на профиле ветра. Каждая точка кривых получена усреднением всех значений зональной скорости, попадающих в рассматриваемую широтную полосу и в долготный интервал шириной 30° (скользящее среднее); б) пример аппроксимации профиля зонального ветра для интервала 12-13 часов (чёрные точки соответствуют голубой кривой на левой панели) функцией Гаусса (красная линия) (Patsaeva et al., 2019).

Для того чтобы определить, каким долготам соответствует минимальное значение зонального ветра над Землёй Афродиты для каждого временного интервала, был рассмотрен интервал долгот от 0° до 160° в.д. Фрагменты профилей зональной скорости, для которых $|u| < 93$ м/с, были аппроксимированы по методу наименьших квадратов функцией Гаусса (Рисунок 2.3б). Величина зональной скорости ветра определялась усреднением по значениям данного фрагмента. Процедура была повторена для часовых интервалов местного времени, разделённых половиной часа. Использовалось предположение, что экстремум функции Гаусса определяет долготу минимальной скорости зонального ветра. Рисунок 2.4 показывает полученные положения минимального значения средней зональной скорости в зависимости от долготы. С увеличением местного времени область торможения постепенно перемещается в направлении суперротации (суперротация на Венере направлена в сторону уменьшения долготы).

Зависимость положения минимума зональной скорости от долготы в интервале $45\text{-}120^\circ$ в.д. была аппроксимирована синусоидой:

$$u(\lambda) = u_0 - u_1 \sin(\lambda - \lambda_0),$$

где u_0 , u_1 и λ_0 были вычислены методом наименьших квадратов.

Таким образом, скорость зонального ветра над Землей Афродита описывается формулой

$$u(\lambda)|_{\lambda \in [45; 120]} = -98.5 - 13.4 \sin(\lambda - 183.2), \quad (2.1)$$

где $u_0 = 98.5 \pm 4.2$ м/с – средняя зональная скорость в широтной полосе $10 \pm 5^\circ$ ю.ш.,

$u_1 = 13.4 \pm 4.4$ м/с – суточная амплитуда изменения скорости,

$\lambda_0 = 183.2 \pm 5.3$ град – начальная фаза.

Эта функция имеет пик 85 м/с около 93° в.д., который совпадает с максимумом на кривой рельефа поверхности. В то же время, торможение зонального ветра в широтной полосе $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. связано с местным временем.

Таким образом, было получено, что минимум зональной скорости достигается в районе максимальной высоты Земли Афродиты (Область Овда, $90 \pm 5^\circ$ в.д.) в полдень по местному времени.

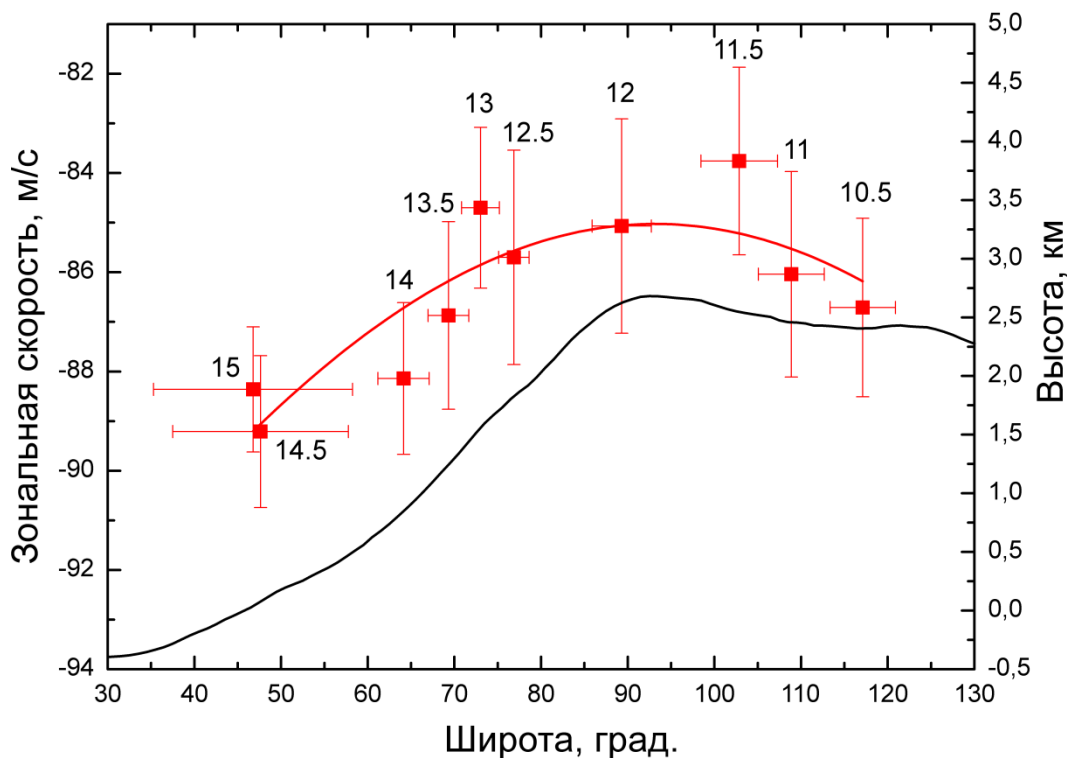


Рисунок 2.4 Положения минимума средней зональной скорости для разных интервалов местного времени (красные квадраты) над Aphrodite Terra в зависимости от долготы. Ошибка соответствует доверительному интервалу $3 \cdot \sigma_x$ или 99,7% доверительному уровню. Красная линия — аппроксимирующая кривая (уравнение (2.1)). Чёрная линия показывает среднюю высоту поверхности для широтной полосы $10 \pm 5^\circ$ ю.ш. (Patsaeva et al., 2019).

2.3 Долготно-широтные вариации среднего зонального потока

Долготные профили среднего зонального ветра были построены для 10° широтных полос (Рисунок 2.5а), центрированных на $7, 12, 15, 17, 20, 22$ и 25° ю.ш. ($7 \pm 5^\circ$ ю.ш., $12 \pm 5^\circ$ ю.ш. и т.д.).

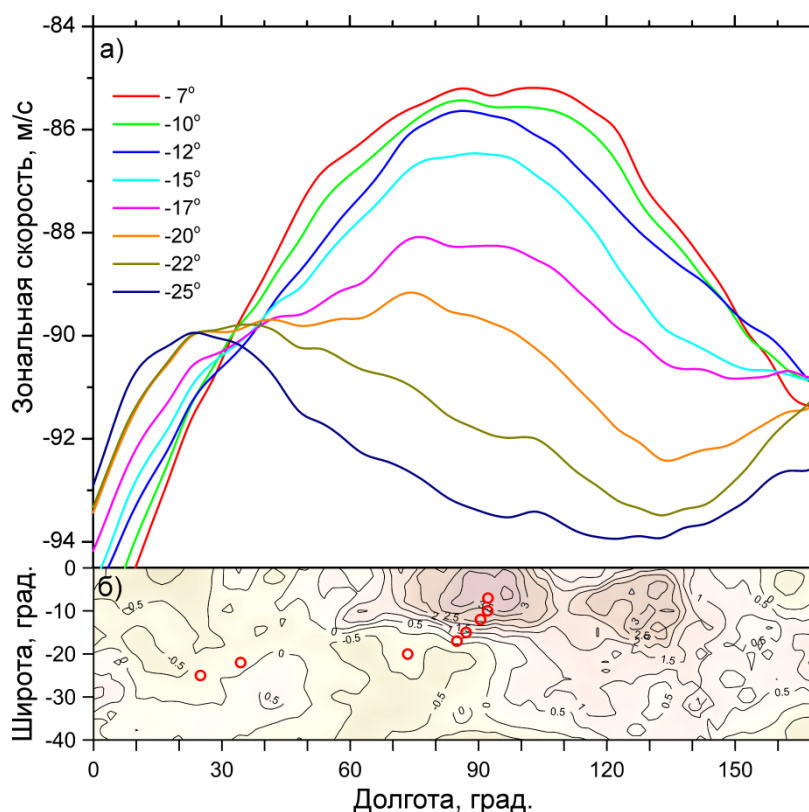


Рисунок 2.5 а) Усреднённые по местному времени (9-16 ч) профили зонального ветра для 10° широтных полос, центрированных на 7° , 10° , 12° , 15° , 17° , 20° , 22° и 25° ю.ш.; σ_x не превышает 0.4 м/с; б) положения экстремумов долготно-усреднённых профилей зонального ветра (красные кружки) на топографической карте Венеры (Patsaeva et al., 2019).

Покрывание данными в зависимости от местного времени совпадает для всех широтных полос, поэтому как для лучшей статистики, так и для исключения зависимости от местного времени, был использован временной интервал от 9 до 16 ч, включающий все имеющиеся данные. В целях определения положения минимума зональной скорости по долготе для каждой из широтных полос, долготные профили зонального ветра были аппроксимированы функцией Гаусса (см. п. 2.2). Рисунок 2.5б представляет фрагмент карты Венеры, на котором красные кружки отмечают положения экстремумов долготных профилей зональной компоненты скорости ветра. Из рисунка видно, что положение пика смещается от Области Овда в направление суперротации с уменьшением амплитуды примерно на 5 м/с к 30° ю.ш. Таким образом, замедление зонального

потока прослеживается от экватора до, по крайней мере, 30° ю.ш. Минимум зональной скорости, наблюдаемый над наиболее высокой областью Земли Афродиты, указывает на Область Овды, как на источник влияния на поведение зонального потока на уровне верхней границы облачного слоя в рассматриваемом широтном интервале.

2.4 Долготно-широтные вариации среднего меридионального потока

Для того чтобы исследовать влияние гор на меридиональную компоненту, были построены долготные профили среднего меридионального потока для 10° широтных полос, центрированных на 7° и 25° ю.ш. Первая широтная полоса включает в себя Землю Афродиты, вторая соответствует более ровной местности (Рисунок 2.6, нижняя панель). На верхней границе облачного слоя меридиональная составляющая скорости направлена от экватора к полюсу, величина меридиональной скорости растёт, достигая максимума на 50° ю.ш. (Рисунок 1.16). Для того чтобы исключить увеличение меридиональной компоненты с широтой и облегчить сравнение профилей среднего меридионального потока на разных широтах, из долготных профилей была вычтена средняя меридиональная скорость: -0.5 м/с для 7° ю.ш. и -4.4 м/с для 25° ю.ш. Средний меридиональный профиль ветра был восстановлен нашей группой также из наблюдений камеры VMC (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013, Fig. 10b). Отклонение меридиональной скорости от среднеширотной величины (Рисунок 2.6б, верхняя панель), демонстрирует отклонение горизонтального потока от среднеширотного направления для двух выбранных широтных полос. Отрицательные значения характеризуют отклонение потока к Южному полюсу, положительные – к Северному полюсу. Как и при исследовании долготно-широтных вариаций зональной скорости, в целях исключения зависимости от местного времени, были использованы все имеющиеся данные (в рамках временного интервала от 9 до 16 ч).

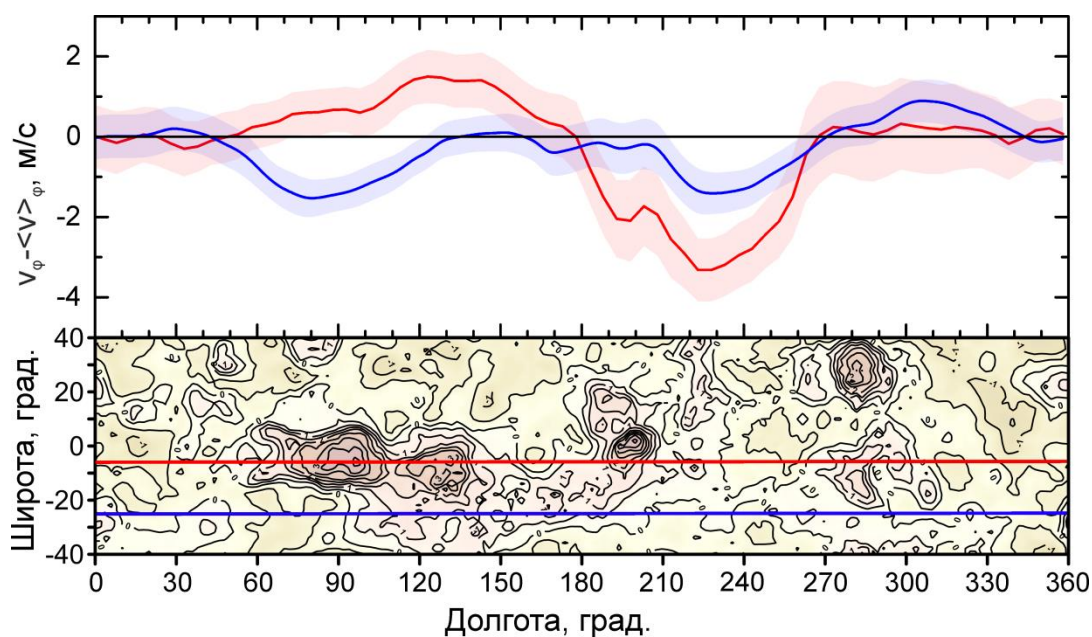


Рисунок 2.6 Долготные профили разности между меридиональной скоростью ветра v_ϕ , усреднённой по 10° широтным полосам, центрированным на 7° (красный) и 25° ю.ш. (синий) и средней меридиональной скоростью для данного широтного интервала $\langle v_\phi \rangle$, в рамках временного интервала от 9 до 16 часов. Знак «+» соответствует отклонению зонального потока к северу, знак «-» к Югу. Ошибка, отмеченная затенённой областью, соответствует $3 \cdot \sigma_x$ (верхняя панель); положения широт 7° ю.ш. (красный) и 25° ю.ш. (синий) отмечены линиями на топографической карте Венеры (нижняя панель). Северным широтам соответствует знак «+», южным - знак «-». Суперротация направлена в сторону уменьшения долготы.

На долготах, соответствующих низменности, от 270° до 360° в.д. и от 0° до 60° в.д., отклонение горизонтального потока незначительно для обеих широтных полос (Рисунок 2.6). Наибольшая разница между профилями наблюдается в долготном интервале 60° - 270° в.д. В этом долготном интервале разница между профилями (Рисунок 2.6, верхняя панель) превышает доверительный уровень 99.7% и, следовательно, является статистически значимой. При этом над Землёй Афродиты, практически целиком расположенной в южном полушарии, красная кривая (7° ю.ш.) демонстрирует отклонение потока к Северному полюсу, а синяя кривая (25° ю.ш.) – к Южному полюсу. В том случае, если бы Земля Афродиты

располагалась на уровне верхнего облачного слоя, можно было бы сказать, что зональный поток «обтекает» горную возвышенность. В долготном интервале 180-270° в.д. горная гряда Область Атлы простирается от группы трёх вулканов (с высотами от 6 до 9 км), расположенных у экватора около 200° в.д., на север до ~20° с.ш. и на юг до ~30° ю.ш., соединяясь с Землёй Афродиты (Рисунок 2.6). Таким образом, горная гряда, пересекая экватор с севера на юг, оказывается расположенной под углом к зональному потоку. На этих долготах обе кривые демонстрируют отклонение потока к Южному полюсу на обеих широтных полосах. Отклонение горизонтального потока тем больше, чем ближе к экватору расположена широтная полоса. Таким образом, в 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.

2.5 Роль солнечно-связанных эффектов в вариациях горизонтального потока

Усреднение по всему периоду наблюдений (7.5 лет) даёт возможность исключить короткопериодические вариации (4-5 суток), вызванные суперротацией и планетарными волнами. Большое число полученных векторов смещения позволяют исследовать зональные и меридиональные вариации скорости в зависимости от долготы, широты и местного времени. Три 60° долготных интервала 10-70°, 35-95° и 55-115° в.д. были рассмотрены в околополуденные часы (10-14 часов местного времени). Панели (Рисунок 2.7) показывают циркуляцию на уровне верхней границы облачного слоя, усреднённую за весь период наблюдений, когда линия «полдня» наблюдается на разных долготах, близких и далёких от Земли Афродиты. Их можно рассматривать как карты среднего поля ветра, полученные в те моменты, когда

Солнце в полдень находится на трех разных долготах (в пределах $\pm 0,5$ часа по местному времени).

Сильное торможение зонального потока обнаружено в полдень над Землей Афродиты, так что минимальная скорость ветра наблюдается над максимальной высотой рельефа, т.е. в полдень над Областью Овда (Рисунок 2.7а). По-видимому, эффект связан с влиянием стационарной орографической волны (Bertaux et al., 2016). Область торможения соответствует 11-13.5 ч по местному времени с абсолютным минимумом над Областью Овда; ярко выраженного солнечного прилива не наблюдается. При смещении линии полдня в область меньших высот (соответствует ~ 10.5 ч местного времени над Афродитой), область торможения зонального потока растягивается от 10.5 до 14 ч (Рисунок 2.7б). Минимум скорости ветра наблюдается в 13 часов, и объясняется, по-видимому, солнечным приливом. Когда линия полдня располагается над низменностью, такого заметного торможения, как в двух предыдущих случаях, не наблюдается (Рисунок 2.7в).

Термический прилив следует за Солнцем, и, несомненно, минимум зональной скорости в 13-14 ч должен также существовать над низменностью. Относительно небольшая величина минимума слабо заметна при относительно большом диапазоне изменения величины зональной скорости от минимума ~ 80 м/с над Областью Овды до максимума ~ 96 м/с над низиной (Рисунок 2.7). В связи с этим, вариации зональной, а также меридиональной компоненты, в зависимости от местного времени были рассмотрены отдельно для высокогорной области Земли Афродиты (Область Овда, $60-110^\circ$ в.д.) и низменной области ($335^\circ-25^\circ$ в.д.), находящейся на тех же широтах. Это позволяет отделить изменения в поведении горизонтального потока, связанные с местным временем, от тех, которые вызваны влиянием поверхности.

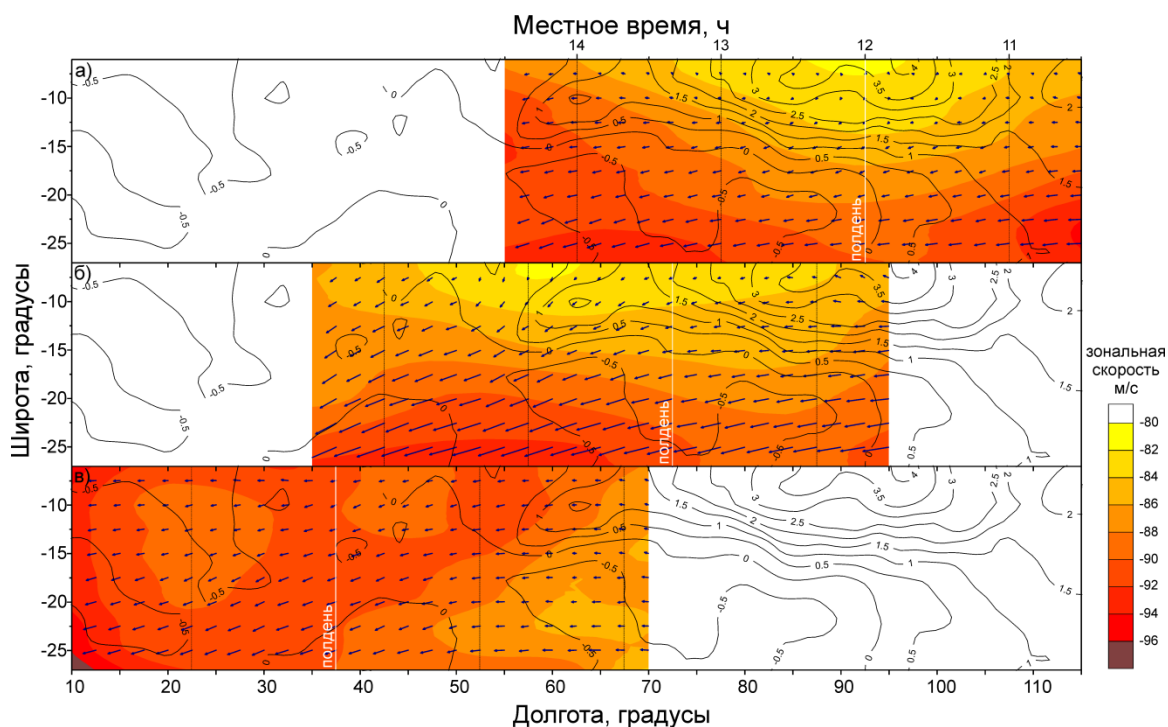


Рисунок 2.7 Среднее поле ветра как функция долготы и местного времени. Данные усреднены за весь период наблюдения. Поля ветра, как функции долготы и широты, были рассчитаны усреднением по области $15^\circ \times 10^\circ$ (долгота, широта) со сдвигом 2.5° по долготу и широте. Векторы демонстрируют поле ветра после вычитания среднего зонального ветра $u_0 \cdot \cos(\varphi)$ ($u_0 = -81.5$ м/с). Вариации зональной скорости показаны в цвете. Топография поверхности показана чёрным контуром. Линия полдня (белый) соответствует долготам 92.5° ю.ш. (а), 72.5° ю.ш. (б), 37.5° ю.ш. (в). Местное время на верхней панели соответствует только верхней панели (а) (Patsaeva et al., 2019).

Рисунок 2.8в и Рисунок 2.8е представляют участки топографической карты, соответствующие высокогорью и низменности. Рисунок 2.8 (а,б,г,д) демонстрирует средние профили зональной и меридиональной скоростей в зависимости от местного времени для двух 10° широтных полос, центрированных на 7° и 25° ю.ш. для высокогорной области (Рисунок 2.8а и 2.8б) и низменности (Рисунок 2.8г и 2.8д).

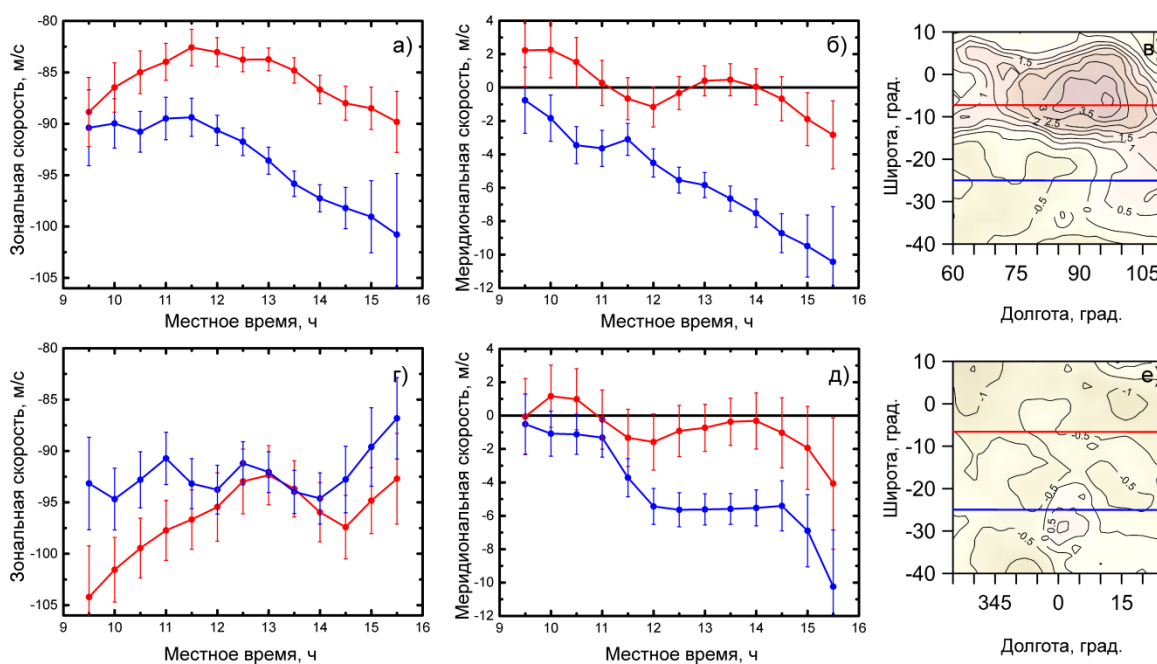


Рисунок 2.8 Средние профили зависимости от местного времени для зональной (а, г) и меридиональной (б, д) скоростей для 10° широтных полос, центрированных на 7° (красный) and 25° ю.ш. (синий) для высокогорья Область Овда ($60-110^\circ$ в.д.) (в) и низменности ($335^\circ-25^\circ$ в.д.) (е). Данные были усреднены по 1 часу со сдвигом 0.5 часа. Ошибка соответствует $3\sigma_x$ (Patsaeva et al., 2019).

Для высокогорья (Рисунок 2.8а) на 7° ю.ш. (красная кривая) широкий минимум зональной скорости наблюдается от 11 до 14 ч (83 – 86 м/с). Утром и вечером (в 9 и 16 ч) скорость достигает ~ 90 м/с. На 25° ю.ш. (синяя кривая) зональная скорость монотонно растет с 9 до 16 ч (от 90 до 100 м/с), демонстрируя слабо выраженный минимум в 11-12 ч.

Для низменности (Рисунок 2.8г) на 7° ю.ш. (красная кривая) с 9 до 13 часов зональная скорость падает от 105 до 93-95 м/с и растет после полудня. На 25° ю.ш. (синяя кривая) с 9 до 14 ч скорость ветра составляет 93-95 м/с, имеет экстремум около 13 ч, не выходящий за пределы экспериментальной ошибки. Для обеих кривых (красной и синей) после 14 ч наблюдается падение скорости к вечернему терминатору с одновременным увеличением ошибки.

Сравнение двух красных профилей (Рисунок 2.8а, высокогорье) и (Рисунок 2.8г, низменность), являющихся зависимостями зонального ветра от местного

времени на 7° ю.ш., показывает, что изменения скорости, связанные с местным временем, наблюдаются на обеих кривых и превосходят вариации в пределах ошибки. Скорость (по модулю) много меньше над высокогорьем, чем над низменностью, что является следствием торможения горизонтального потока горным массивом. Это замедление имеет широкий экстремум вблизи полудня над горной местностью, который шире аналогичного экстремума над низменностью. Минимум зональной скорости над низменностью (Рисунок 2.8г) на 7° ю.ш. (красная кривая) локализован около 13 ч, что позволяет его связать с солнечным приливом. Смещение отклика к послеполуденному времени в результате воздействия прилива согласуется с результатами имеющихся наблюдений и результатами численного моделирования (см. Введение к Главе 2).

Зональная скорость над Областью Овда (Рисунок 2.8а) на 7° ю.ш. (красная кривая) уменьшается по абсолютной величине в дневные часы, как было отмечено выше. Минимум зональной скорости над Областью Овда, вызванный влиянием поверхности, наиболее заметен в полдень (см. Рисунок 2.4). Минимум зональной скорости над низменностью (Рисунок 2.8г), связанный с местным временем, локализован около 13 часов и достаточно широк – около 2 часов. Предполагая существование подобного минимума над Областью Овда, можно ожидать, что торможение зонального потока около 13-14 ч, связанное с солнечным приливом, и торможение, связанное с рельефом поверхности, приведут к широкому минимуму зональной скорости между 11 и 14 часами, который наблюдается над Областью Овда (Рисунок 2.8а, красная кривая).

Формы синей и красной кривых зональной скорости на высокогорьем (Рисунок 2.8а) отличаются больше, чем над низменностью (Рисунок 2.8г), благодаря большому изменению высоты между 7 и 25° ю.ш. на долготах Области Овда. Зональная скорость на долготах Области Овда на 25° ю.ш., не имея выраженного минимума в 13-14 часов, имеет некоторый минимум в 11-12 часов (Рисунок 2.8а, синяя кривая), вызванный влиянием Области Овда на зональный поток на 25° ю.ш. (см. Рисунок 2.2).

Вариации меридиональной скорости в зависимости от местного времени на 7° ю.ш. для высокогорья и низины (Рисунок 2.8б и Рисунок 2.8д, красные кривые) похожи. Меридиональные скорости (до 2м/с) в 9-11 ч направлены к экватору, после 11 ч – к полюсу, имеют заметный экстремум в 13-14 ч, когда меридиональная компонента уменьшается до нуля, и растут до 2 м/с к 16 ч. Экстремум наблюдается примерно в то же время, что и экстремум зональной компоненты, что позволяет связать его с солнечным приливом.

Меридиональные скорости на 25° ю.ш. (синие кривые) и для высокогорья, и для низменности направлены к полюсу и растут от 1 до 10 м/с с 9 до 16 часов. Увеличение меридиональной скорости по абсолютной величине (от красной линии к синей) обусловлено общим увеличением средней меридиональной скорости в направлении полюса в экваториальных и средних широтах. Профили меридиональной скорости на 7° ю.ш. и на 25° ю.ш. над низменностью имеют похожую форму (Рисунок 2.8д), т.к. для них, в отличие от профилей для высокогорной области (Рисунок 2.8б), отсутствует разница в подстилающей поверхности (Рисунок 2.8е). Профиль на 25° ю.ш. (Рисунок 2.8д) не имеет выраженного экстремума в 13-14 ч.

Таким образом, 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.

2.6 Долготно-широтные и солнечно-приливные вариации на отдельных орбитах

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 в

зональном потоке (Titov et al., 2012; Peralta et al., 2015). “Y”- структура характеризуется сильным отклонением зонального потока к полюсу во фронтальной части (Patsaeva et al., 2015; Nara et al., 2019), что осложняет обнаружение солнечного прилива и стационарной волны над Землей Афродиты.

Зональный поток, представленный на изображении для орбиты #0461 (Рисунок 2.9а) отклоняется к полюсу слабее, чем это наблюдается в присутствии “Y”- структуры. В этом случае поток менее возмущен, и более ярко проявляется влияние рельефа и солнечного прилива. Замедление зональной скорости от 11 до 14 ч на широтах 5-15° ю.ш. включает область над Землей Афродиты, так что минимальная скорость наблюдается в 11-12 ч над максимальной высотой поверхности (Область Овда), соответствующей 85-95° ю.ш. Другой минимум наблюдается в 13-14 ч в соответствии с предположением о влиянии солнечного прилива. На широтах ниже 20° ю.ш. поток следует за контурами рельефа, на широтах выше 20° ю.ш. преобладает зональная суперротация.

Циркуляция, наблюдаемая на орбите #0462 (Рисунок 2.9б) отличается от орбиты #0461 и характеризуется наличием сильной меридиональной компоненты, связанной с фронтальной частью “Y”- структуры, которая видна в центре изображения и оказывает влияние на зональный поток. Солнечный прилив в 13-14 часов не обнаруживается. Замедление скорости наблюдается до полудня, в интервале 10-12 ч, над Землей Афродиты с минимумом над Областью Овда.

Для орбиты #0465 (Рисунок 2.9в) линия «полдня» совпадает с Областью Овда. Наиболее яркой особенностью этой орбиты является область минимальной зональной скорости ветра, наблюдаемая над Землей Афродиты и распространяющаяся от 5 до, по крайней мере, 30° ю.ш., и за которую вероятно ответственна планетарная стационарная волна. За исключением западной части изображения, где видна “Y”- структура, и области вблизи полудня, как на широтах выше, так и ниже 20° ю.ш., преобладает зональная суперротация.

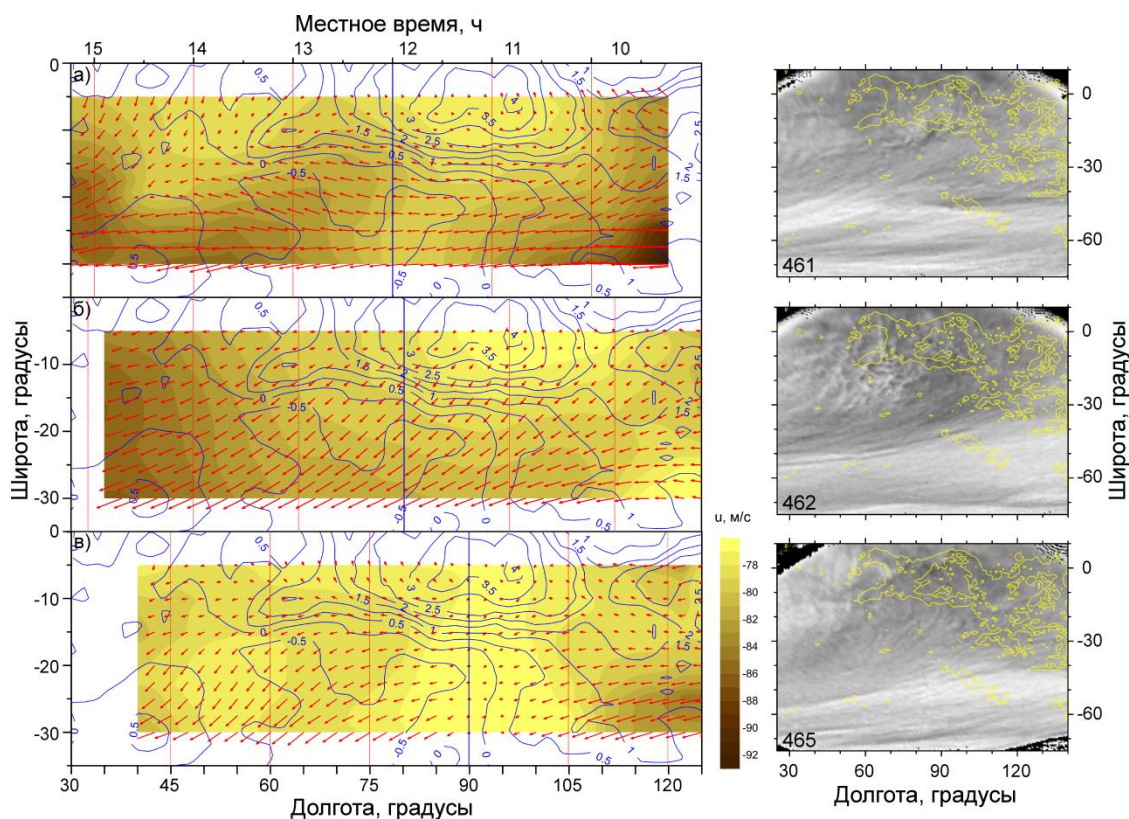


Рисунок 2.9 Поля ветра для орбит #0461(а), #0462(б) и #0465(в). Результаты были усреднены по областям $15^\circ \times 10^\circ$ (долгота \times широта) со сдвигом 2.5° по долготе и широте. Цветовая шкала у нижней панели показывает зональную скорость ветра. Векторы указывают направление потока в этих областях. Они представляют поле ветра после вычитания средней зональной скорости $u_0 \cos(\varphi)$, где $u_0 = -75 \text{ м/с}$ и φ - широта. Вычитание проведено для того, чтобы сделать направление потока более заметным. Синий контур соответствует рельефу поверхности. Вертикальные синие линии отмечают положение полдня. Соответствующие изображения в декартовой проекции представлены в правой колонке (Patsaeva et al., 2019).

В поле пространственного распределения скорости (Рисунок 2.2) область низкой скорости в 11-12 ч, располагаясь на долготах Земли Афродиты и повторяя контуры Земли Афродиты, распространяется до $\sim 25\text{-}30^\circ$ ю.ш., уже не коррелируя с подстилающим низменным рельефом (также как область низкой скорости для орбиты #0465 (Рисунок 2.9в). Стационарные волны, генерируемые Землей Афродиты и наблюдаемые на ряде изображений, полученных в тепловом ИК камерой LIR космического аппарата Акацуки, прослеживаются на север и на юг от Земли Афродиты до высоких широт. Те же стационарные волны менее

выражены на УФ изображениях камеры UVI и распространяются на север и на юг приблизительно до 30° (Fukuhara et al., 2017). Анализ поведения горизонтального потока, представленный в этой главе, как и изображения, полученные Акатсуки, демонстрируют, что влияние, которое оказывает Земля Афродиты на ряд атмосферных параметров, может наблюдаться в большом широтном диапазоне, т.е. имеет планетарный масштаб.

2.7 Выводы к главе 2

- Максимальное торможение зонального потока в результате действия стационарной волны наблюдается в полдень над Областью Овда, самой высокой областью Земли Афродиты ($90 \pm 5^\circ$ в.д.; $10 \pm 5^\circ$ ю.ш.). После полудня область торможения перемещается в направлении суперротации и постепенно исчезает к вечеру. Поведение потока описывается синусоидой, так что средняя зональная скорость $u_0 = 98.5$ м/с, и амплитуда суточной гармоника скорости зонального потока $u_1 = 13.4$ м/с;
- Амплитуда торможения зонального потока уменьшается, и область «медленного» ветра смещается в направлении суперротации при перемещении на юг от Земли Афродиты (от экватора до 30° ю.ш.);
- Рельеф подстилающей поверхности оказывает влияние на среднюю меридиональную составляющую ветра. Обширные экваториальные высокогорья от Области Атлы до Земли Афродиты возмущают средний меридиональный поток с амплитудой до 3.5 м/с на широтах от 0 до 30° ю.ш.;
- Солнечно-связанная зависимость (солнечный прилив) горизонтального потока на широтах, близких к экватору, проявляется около 13-14 ч в уменьшении величины как зональной, так и меридиональной компоненты скорости. Уменьшение величины зональной компоненты

скорости ярче проявляется над низиной, где отсутствует торможение потока, связанное с влиянием рельефа;

- Торможение зонального потока в полдень, связанное с рельефом поверхности, и торможение около 13-14 ч (солнечный прилив) приводят к широкому минимуму зональной скорости над Областью Овды между 11 и 14 часами.

Глава 3. Динамика атмосферы в средних широтах

3.1 Введение

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 (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013; Kouyama et al., 2013). 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).

Среднее поле температур, полученное по данным ИК Фурье-спектрометра (ФС) орбитального аппарата «Венера-15», обнаруживают наличие холодной области («холодного воротника»), расположенной на 60 - 75° с.ш. на высоте 60-65 км в Северном полушарии Венеры. Выше него, а также по направлению к полюсу и к экватору наблюдается рост температуры. На высоте 60-65 км падение температуры от экватора к 60 - 75° с.ш. составляет около 25К. Средняя атмосфера Венеры находится в состоянии циклострофического баланса: широтный градиент температуры на изобарических уровнях уравнивается центробежной силой. Связь скорости зонального термического ветра с широтным температурным градиентом (Newman et al., 1984) приводит к увеличению скорости ветра с высотой, и среднеширотный джет, который наблюдается в поле термического ветра, связан с «холодным воротником» (Засова и др., 2000; Zasova et al., 2007). Максимальный широтный градиент температуры наблюдается на широтах 50-70° с.ш. При этом увеличение скорости зонального термического ветра до 100-110 м/с отмечается на 40-60° с.ш. на высоте, соответствующей верхней границе облачного слоя (65-70 км). Среднеширотный джет наблюдался в течение 2-х месяцев в 1983 году в поле термического ветра, полученного ФС «Венеры-15». Скорость ветра в джете, которая имела солнечно-связанный характер, была представлена в зависимости от солнечной долготы L_s (или местного времени)

тригонометрическим полиномом с 4 гармониками от суточной до четвертьсуточной. Были получены значения для средней скорости потока $u_0 = 98.44$ м/с (практически совпадает со скоростью u_0 в экваториальной области (см. п. 2.2)), амплитуды суточной гармоники $u_1(Ls) = 5.8$ м/с, полусуточной $u_2(Ls) = 9.4$ м/с (имеет максимальное значение из всех гармоник), треть и четвертьсуточной гармоник $u_3(Ls) = 0.2$ м/с и $u_4(Ls) = 3.5$ м/с. Т.е. в среднеширотном джете, как было получено ФС, ярко выражена полусуточная солнечно-связанная волна с двумя максимумами скорости в 9 ч (115 м/с) и в 21 ч (105 м/с). Минимальная скорость ветра, около 90 м/с, наблюдалась после полудня. Одновременно солнечно-связанным образом изменяется положение джета: по широте от 45° до 60° , и по высоте от 65 до 70 км, что соответствует положению верхней границы облаков на той широте, на которой наблюдался джет (Засова и др., 2000; Zasova et al., 2007). Симметричная картина наблюдается и в Южном полушарии Венеры (Grassi et al., 2010; Piccialli et al., 2012; Haus et al., 2014).

Наличие «холодного воротника» является устойчивой особенностью атмосферы Венеры. Вместе с тем, среднеширотный джет, видимый на широтных профилях зонального ветра, полученных визуальным методом (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013), не всегда обнаруживается при использовании автоматизированных методов (Moissl et al., 2009; Patsaeva et al., 2015), в результате работы которых наблюдается большой разброс данных в средних широтах. Причиной этого обстоятельства является ряд факторов.

В экваториальных широтах, от экватора до $25 - 30^\circ$ ю.ш., атмосферный поток является преимущественно зональным. Для этих широт характерны компактные и легко идентифицируемые облачные особенности. В средних широтах «рисунок» облаков существенно отличается. Он состоит из тёмных и светлых полос, вытянутых в зональном направлении (Titov et al., 2012). Такие крупномасштабные структуры облачного покрова с одной стороны приводят к снижению статистики, а с другой, к ошибкам позиционирования, что проявляется в увеличении ошибки при определении зональной скорости и, конечно, вносит свой вклад в «сглаживание» профиля зонального ветра в области джета (см.,

например, Рисунок 1.10). Но не только этот фактор является причиной заметного разброса данных в средних широтах. В том случае, если на изображении присутствуют хорошо выраженные детали, корреляционный метод позволяет получить большее количество надёжных векторов скорости по сравнению с визуальным методом, обеспечивая лучшее долготно-широтное покрытие (см. Рисунок 1.8). Это обстоятельство позволило обнаружить, что разброс данных связан с периодическим изменением поведения атмосферного потока в средних широтах. Ранее, в ряде работ, отмечалось непостоянство средней зональной скорости (Rossow et al., 1990; Limaye et al., 1988) и увеличение средней меридиональной скорости от нуля на экваторе до 10-15 м/с на 50-60° в обеих полушарах (Limaye et al., 1988, 2007; Rossow et al., 1990; Peralta et al., 2007; Sánchez-Lavega et al., 2008; Hueso et al., 2012).

Для южной полушары максимум меридиональной скорости был обнаружен на 50° ю.ш. между 13 и 15 часами местного времени как по результатам визуального метода (Khatuntsev, Patsaeva et al., 2013), так и по результатам корреляционного метода (Рисунок 1.17). Именно эта область представляла особый интерес для исследования. На Венере разветвлённая часть хорошо известной Y-структуры присутствует на ряде изображений (в соответствии с периодом суперротации атмосферы) в виде крупномасштабной контрастной структуры, пересекающей параллели (Titov et al., 2012). Del Genio and Rossow (1990) связывали осцилляции зональной скорости, имеющие период около 4.5 суток, с вариациями яркости облачного слоя, имеющими период 4 и 5 суток. Это вариации они соотносили с волнами Кельвина и Россби (Rossow, Del Genio & Eichler, 1990). В Peralta et al. (2015) Y-структура отнесена к волне Кельвина, искажённой сферической геометрией, при которой фаза волны увеличивается по направлению к высоким широтам. Волновые эффекты такого масштаба могут оказывать влияние на направление атмосферных потоков подобно тому, как это происходит на Сатурне (Sayanagi et al., 2013) и Юпитере (Luz et al., 2008; Choi et al., 2007; Hueso et al., 2009). Но для исследования такого рода связей в атмосфере Венеры необходимо наличие векторных полей, имеющих полноценное долготно-

широтное покрытие и позволяющих проследить динамику атмосферы со временем. Такие векторные поля были получены с помощью корреляционного метода, описанного в Главе 1, и исследованы в Patsaeva et al. (2015).

В Главе 3 рассмотрена взаимосвязь поведения горизонтального потока с крупномасштабными структурами облачного покрова (Y-структура). Представленные результаты относятся преимущественно к области средних широт (от 30° до 60° ю.ш.).

Ввиду того, что полярные широты представлены на изображениях, сделанных VMC, лишь отчасти (см. Глава 1), о динамике атмосферы в полярной области южного полушария планеты дано только некоторое представление.

3.2 Отдельные орбиты

В связи с тем, что на изображениях, сделанных камерой VMC, представлено только южное полушарие Венеры, на ряде изображений можно наблюдать лишь часть Y-структуры, одну её «ветвь» (Y-ветвь), пересекающую параллели и простирающуюся от экваториальных широт до ~60° ю.ш. В случае отсутствия Y-ветви, характеризующей «фронтальную» часть Y-структуры, на изображении наблюдаются слабовыраженные УФ-контрастные структуры, преимущественно вытянутые вдоль параллелей и характеризующие «тыловую» часть Y-структуры. Рисунок 3.1а представляет пример изображения с ярко выраженной глобальной тёмной протяженной Y-ветвью. Поле ветра наложено на прямоугольную проекцию УФ изображения 0050 орбиты #0471 (5 августа 2007 г). Векторы, полученные для 42 пар изображений данной орбиты, были усреднены по областям, имеющим размер 6° x 5°. Каждый вектор на рисунке соответствует такой области. При усреднении зональной и меридиональной скоростей принимался в расчёт вес каждого измерения, который зависел от ошибки, возникающей при определении максимума корреляционной функции (см. п. 1.3).

Угол отклонения α был определён как угол между вектором скорости и параллелями. Положительное значение было определено для потока, отклоняющегося в сторону экватора.

Векторы, демонстрирующие максимальное отклонение к полюсу от зонального потока ($40\text{--}50^\circ$ ю.ш., 13–15 ч), располагаются на Y-ветви и отмечены белым (W – группа). Угол отклонения, рассчитанный для этой группы векторов, $\bar{\alpha}_W = -13.5^\circ \pm 0.5^\circ$. Здесь и далее ошибка соответствует σ_x . Левее и ниже этой области поведение потока существенно отличается. Векторы, показанные красным и голубым, имеют положительный угол отклонения.

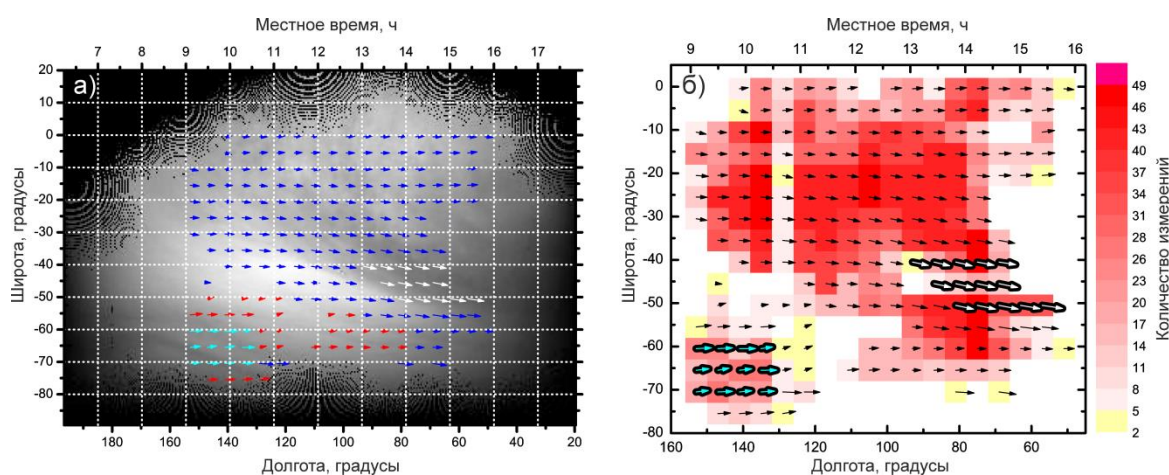


Рисунок 3.1 Векторы скорости, усреднённые по области $6^\circ \times 5^\circ$ и наложенные на прямоугольную проекцию УФ изображения 0050 (орбита #0471), содержащего крупномасштабную облачную структуру (а). Те же векторы, наложенные на двумерную гистограмму, представляющую количество векторов в области усреднения (б). Векторы, у которых меридиональная компонента направлена к полюсу, отмечены синим и белым; к экватору – красным и голубым (Patsaeva et al., 2015).

Группа красных векторов имеет относительно бедную статистику для этой орбиты (Рисунок 3.1б) из-за малого количества усредняемых векторов (не больше 10) в соответствующих областях. Для сравнения, на тех широтах, где на изображении присутствует много контрастных деталей ($20\text{--}30^\circ$ ю.ш.) число усредняемых векторов в области, имеющей размер $6^\circ \times 5^\circ$, может превышать 40. Группа голубых векторов (С-группа) в нижней части рисунка ($60\text{--}70^\circ$ ю.ш., 9–11ч) состоит из векторов с максимально положительным углом отклонения и имеет количество усредняемых векторов в каждой области больше 10. Угол отклонения

для С-группы $\bar{\alpha}_C = 7.6^\circ \pm 0.9^\circ$. Статистика для W-группы занимает промежуточное значение между экваториальными широтами и С-группой.

Орбита #0471 иллюстрирует типичный случай, когда Y-ветвь на средних широтах пересекает параллели под большим углом. Для такой орбиты направление меридиональной скорости на одной и той же широте отличается в области Y-ветви и вне её, т.е. наблюдается отклонение потока там, где присутствует Y-ветвь. Поиск максимального угла отклонения для всех исследуемых 258 орбит был проведён для области векторного поля размером $2 \text{ ч} \times 15^\circ$ в интервале местного времени 11-16 ч и в широтном интервале $30\text{-}60^\circ$ ю.ш. В зависимости от орбиты угол менялся от $-18.5^\circ \pm 0.6^\circ$ до $-0.4^\circ \pm 0.6^\circ$. Было обнаружено 30 орбит, для которых угол отклонения превышает 13° по абсолютной величине. Все рассмотренные орбиты демонстрировали взаимосвязь между величиной угла отклонения $\bar{\alpha}_W$ и расположением глобальных структур облачного покрова. Положение области векторного поля, имеющей максимальный угол отклонения, совпадало с положением ярко выраженной Y-ветви на изображении.

Если изображение соответствует «тыловой» части Y-структуры, векторное поле становится другим. Этот случай иллюстрирует орбита #0461 (26 июля 2007 г), которую отделяет от орбиты #0471 временной промежуток 11 суток. В связи с тем, что период суперротации в средних широтах приблизительно равен 4.5 суток, можно сказать, что мы наблюдаем почти противоположную сторону Y-структуры, видимую на орбите #0471.

На векторном поле для орбиты #0461, полученном из 11 пар изображений (Рисунок 3.2а) также выделены две группы векторов, в белом (W- группа) и голубом (С-группа) цвете. Угол отклонения для W- группы $\bar{\alpha}_W = -6.6^\circ \pm 0.9^\circ$. Эта величина примерно в половину меньше той, которая была получена для W- группы орбиты #0471.

Векторы С-группы (приполярные широты) для орбиты #0461 также демонстрируют отклонение к экватору. И хотя средний угол отклонения С-группы больше, чем для орбиты 0471 ($\bar{\alpha}_C = 12.1^\circ \pm 3^\circ$), ошибка для этой группы

в три раза больше, в связи с тем, что статистика по орбите #0461 существенно хуже (Рисунок 3.2б). Максимальное количество векторов в области усреднения $6^\circ \times 5^\circ$ на $20\text{--}30^\circ$ ю.ш. не превышает 15. Количество векторов в бинах С-группы меньше 10, и количество бинов меньше, чем в аналогичной группе орбиты 0471. Такая ситуация типична для С-группы на большинстве орбит. Статистика для W- группы, также как и в случае орбиты 0471, занимает промежуточное значение между экваториальными широтами и С-группой.

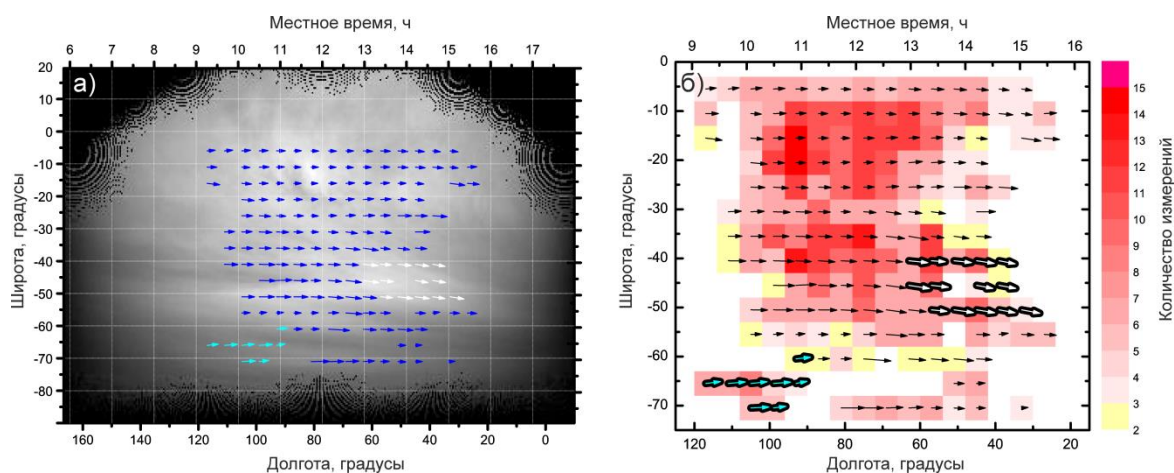


Рисунок 3.2 Векторы скорости, усреднённые по области $6^\circ \times 5^\circ$ и наложенные на прямоугольную проекцию УФ изображения 0030 (орбита #0461) (а). Те же векторы, наложенные на двумерную гистограмму, представляющую количество векторов в области усреднения (б). Векторы, у которых меридиональная компонента направлена к полюсу, отмечены синим и белым; к экватору - голубым (Patsaeva et al., 2015).

В отсутствии Y-ветви движение в средних широтах выглядит как почти чисто зональное течение, которое слегка отклоняется к полюсу во второй половине дня. Рисунок 3.3 представляет широтные профили зональной составляющей ветра для орбит #0471 (а) и #0461 (б), усредненные по долготе. Также показаны отдельные измерения, полученные для всех пар изображений представленных орбит. Среднеширотный джет (максимум скорости на $35\text{--}45^\circ$ ю.ш.) хорошо заметен на широтном профиле для орбиты #0461 (Рисунок 3.3б), но отсутствует на профиле для орбиты #0471 (Рисунок 3.3а), где разброс данных на этих и близких к ним широтах выше. Широтная полоса $50^\circ \pm 1^\circ$ ю.ш. этой орбиты

демонстрирует максимальный разброс данных и лучший охват в пределах местного времени (Рисунок 3.1).

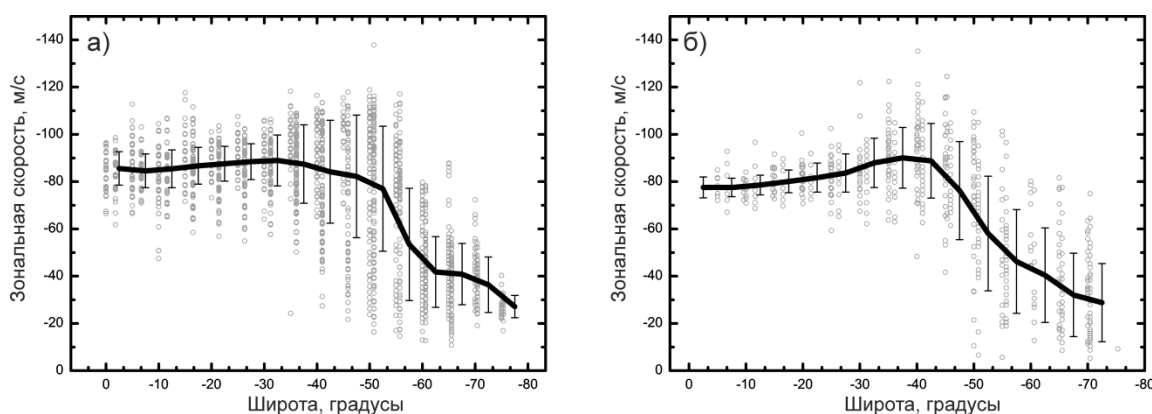


Рисунок 3.3 Широтные профили зонального ветра для орбит 0471 (а) и 0461 (б). Индивидуальные измерения обозначены кружками. Ошибки соответствуют σ в 10° широтных интервалах (Patsaeva et al., 2015).

Рисунок 3.4 представляет единичные измерения зональной скорости как функции местного времени для орбиты #0471 в этой широтной полосе. Принимая во внимание, что для интервала 10-12 часов средняя зональная скорость равна -32.9 ± 2.5 м/с, а для интервала 14-16 часов имеет величину -100.3 ± 0.8 м/с, можно утверждать, что средняя зональная скорость существенно отличается на противоположных сторонах широтной полосы.

Это иллюстрирует тот факт, что зональное течение на этой широте не является постоянным. Такое изменение зонального потока на орбите #0471 искажает форму усреднённого по долготе профиля зонального ветра, сглаживая максимум, связанный с джетом, так хорошо заметный на соответствующем профиле для орбиты #0461, где направление потока и его скорость слабо зависят от местного времени (Рисунок 3.2а, Рисунок 3.3б).

Таким образом, наблюдается корреляция поведения горизонтального потока с характерными особенностями облачного покрова на средних широтах (30–60° ю.ш.) – горизонтальный поток следует за положением Y – ветви на изображении.

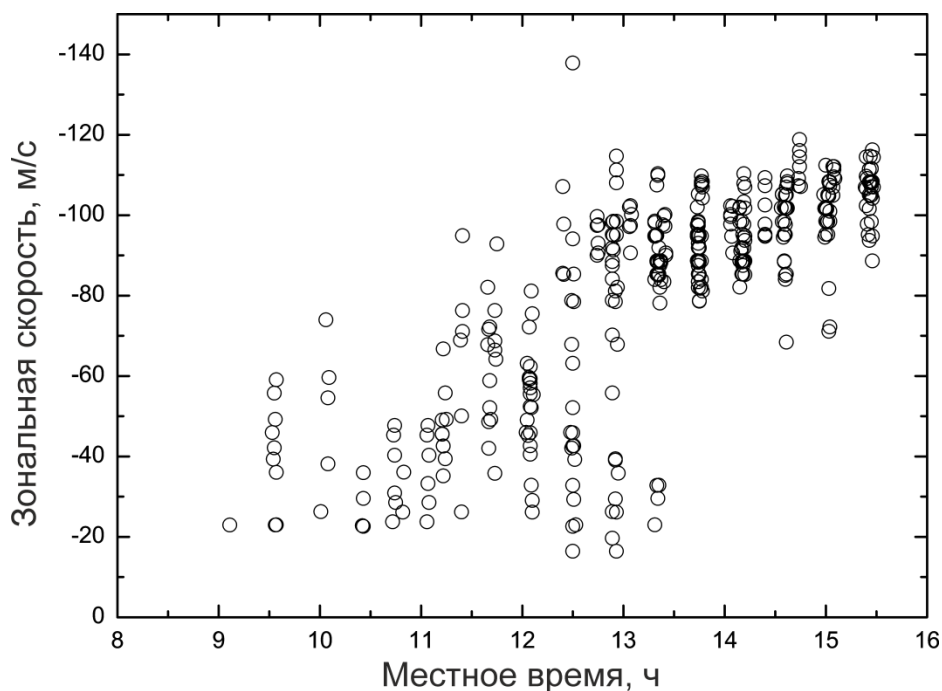


Рисунок 3.4 Индивидуальные измерения зональной скорости как функция местного времени в широтной полосе $50^\circ \pm 1^\circ$ ю.ш. для орбиты #0471 (Patsaeva et al., 2015).

3.3 Угол отклонения горизонтального потока

Рисунок 3.5а демонстрирует величину угла отклонения горизонтального потока как функцию широты и местного времени (результат усреднения по всем 258 исследуемым орбитам). Максимальное отклонение потока к полюсу было обнаружено на 50° ю.ш. в 14 часов по местному времени. В полярной области поток обнаруживает некоторое отклонение к экватору в утренние часы.

Рисунок 3.5б и 3.5в показывает гистограммы угла отклонения для двух областей, отмеченных пунктирными квадратами (Рисунок 3.5а). В области максимального отклонения горизонтального потока к полюсу ($45\text{-}55^\circ$ ю.ш., 13-14.5 ч) гистограмма близка к нормальному распределению (Рисунок 3.5б). Средняя величина угла отклонения в этой области равна $-7.7^\circ \pm 0.2^\circ$. Гистограмма, построенная для области $45\text{-}55^\circ$ ю.ш. и 10-11.5 ч, является бимодальной (Рисунок 3.5в). Средняя величина угла отклонения равна $-2^\circ \pm 0.2^\circ$. Но левый пик со средним углом отклонения к полюсу, равным $-6.4^\circ \pm 0.2^\circ$, является показателем того, что существует достаточно много орбит, когда поток в 10-11.5 ч демонстрирует то же отклонение к полюсу, что и в 13-14.5 ч. Правый пик со

средним углом отклонения $4.9^\circ \pm 0.4^\circ$ означает, что для ряда орбит в 10-11.5 ч доминирует отклонение потока к экватору. Бимодальность даёт основание полагать, что в этой области существует два доминирующих направления горизонтального потока на средних широтах, обнаруженных за 7.5 лет наблюдений. Первая мода, характеризующая направление потока к полюсу, ассоциируется с присутствием Y-ветви, пересекающей параллели, вторая мода указывает на направление потока к экватору, когда Y-ветвь на изображении наблюдается в послеполуночное время.

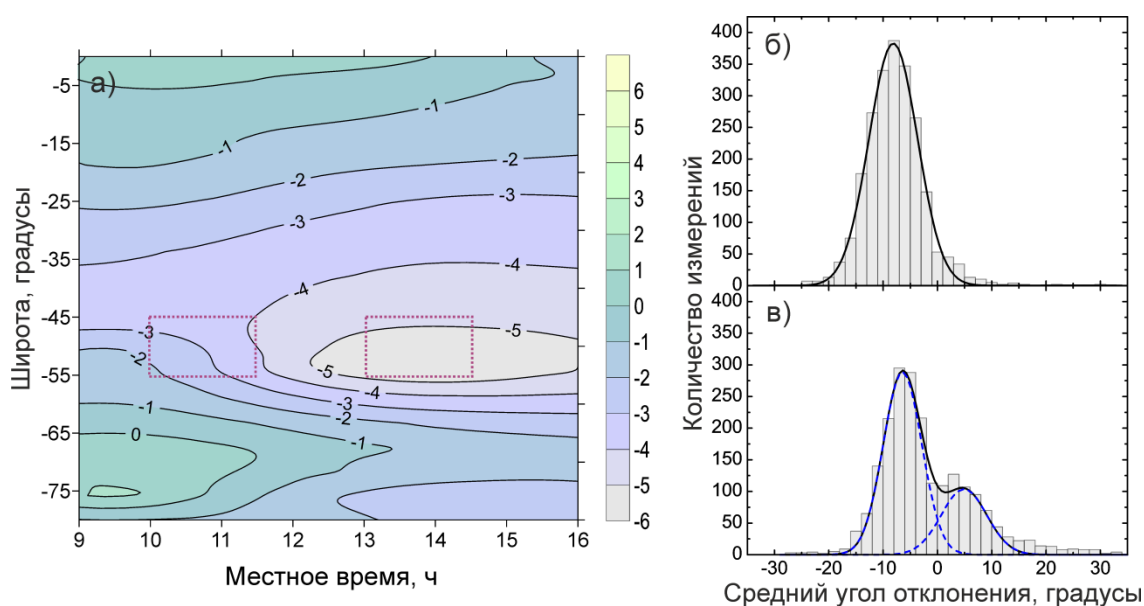


Рисунок 3.5 Контурный рисунок угла отклонения горизонтального потока как функция широты и местного времени (а). Угол отклонения был усреднён по 258 орбитам за период с мая 2006 по сентябрь 2013 г. Гистограммы углов отклонения построены для областей $45\text{-}55^\circ$ ю.ш., 13-14.5 ч (б) и $45\text{-}55^\circ$ ю.ш., 10-11.5 ч (в). «Минус» характеризует отклонение потока к полюсу (Patsaeva et al., 2015).

Типичным примером служит орбита #0471 (Рисунок 3.1). Положение Y-ветви на средних широтах ($40\text{-}60^\circ$ ю.ш.) согласуется как с увеличением зональной скорости, так и с увеличением меридиональной составляющей, направленной к полюсу (знак “минус”) (Рисунок 3.6). Направление потока к экватору наблюдается на тех же широтах в утренние часы.

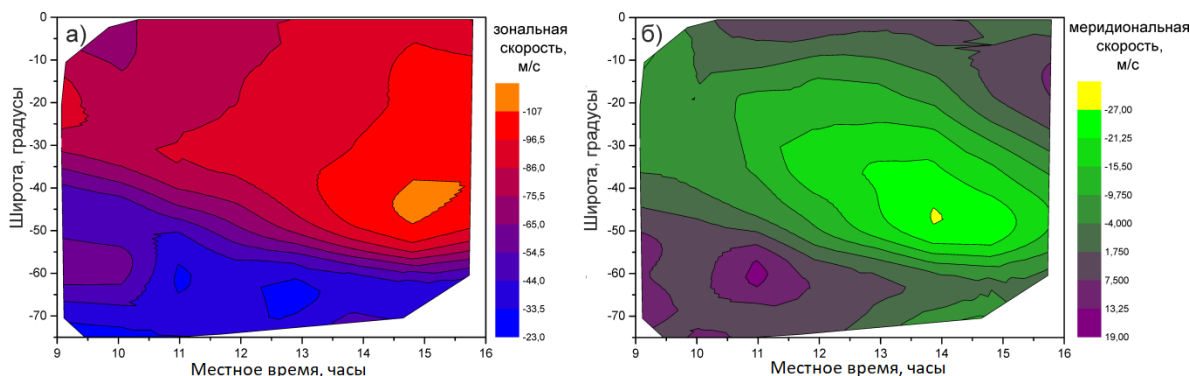


Рисунок 3.6 Поля зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости ветра орбиты #0471 как функции местного времени и широты. Знак «-» зональной компоненты соответствует направлению суперротации (с востока на запад), знак «-» меридиональной компоненты указывает на отклонение потока к южному полюсу.

Рисунок 1.17, представленный в главе 1 (п. 1.9), демонстрирует усреднённые за весь период наблюдения поля зональной и меридиональной компонент скорости, как функции местного времени и широты. В виду малости величины меридиональной компоненты относительно величины зональной, изменение скорости горизонтального потока соответствует изменению величины его зональной скорости. Как и зональная скорость, средняя скорость горизонтального потока имеет максимум в 14-15 ч вблизи 40° ю.ш.

Было получено, что в интервале широт от 35° до 45° ю.ш. в 14-15.5 ч средняя скорость горизонтального потока имеет максимальную величину 98.7 ± 0.3 м/с. В том же широтном интервале, но в утренние часы (10-11.5 ч) средняя скорость потока снижается до 89.2 ± 0.2 м/с, т.е. приблизительно на 10 м/с, демонстрируя ярко-выраженную зависимость от местного времени. Как отмечалось выше, направление горизонтального потока также демонстрирует зависимость от местного времени, которая наиболее ярко проявляется от 45° до 55° ю.ш. В 13-14.5 ч доминирующим является направление к полюсу со средним углом отклонения $-7.7 \pm 0.2^\circ$. В 10-11.5 ч существует два доминирующих

направления: со средним углом отклонения $-6.4 \pm 0.2^\circ$ (к полюсу) и $4.9 \pm 0.4^\circ$ (к экватору).

3.4 Связь высоты верхней границы облачного слоя с расположением облачных структур на изображении и с направлением ветра на широтах от 35° до 80° ю.ш.

Высокоширотная граница Y-структуры, тесно связанной с поведением горизонтального потока в средних широтах, расположена приблизительно на 60° ю.ш. (Рисунок 3.5). От этой широты в направлении полюса меняется как характер облачности, так и поведение горизонтального потока. В приполярных широтах преобладает динамика полярного вихря (Luz et al., 2011). Векторные поля некоторых орбит демонстрировали здесь отклонение горизонтального потока к экватору в утренние часы. Такое отклонение может быть связано с активностью полярного вихря, но в связи с ограниченностью наблюдения полярных широт камерой VMC и сложностью измерения скорости, связанной с отсутствием ярко выраженных облачных особенностей и большим углом наблюдения, невозможно в полной мере подтвердить это предположение.

Орбита #0471 одна из немногих, имеющих хорошее покрытие не только в средних, но и в полярных широтах. По измерениям картирующего спектрометра VIRTIS-M, также работавшего на борту орбитальной станции «Венера Экспресс», по глубине полосы поглощения CO_2 на 1.6 мкм для ряда орбит была восстановлена высота верхней границы облачного слоя (Ignatiev et al., 2009). Из представленного сравнения поля ветра орбиты #0471 с результатами альтиметрии (Рисунок 3.7) следует, что глобальная темная полоса в средних широтах (Y-ветвь), там, где векторы имеют наибольший угол отклонения (группа W, белый), расположена выше на 1.5 км, чем прилегающая яркая область. Хорошо заметно, что граница между темной полосой и светлой областью примерно совпадает с изогипсой на 73.5 км. С-группа векторов (голубой) соответствует области холодного воротника (Засова и др., 2007), где высота облаков ниже, чем у яркой

полосы, на 1.5 км. Следовательно, перепад высот между группами С и W составляет от 2 до 3 км.

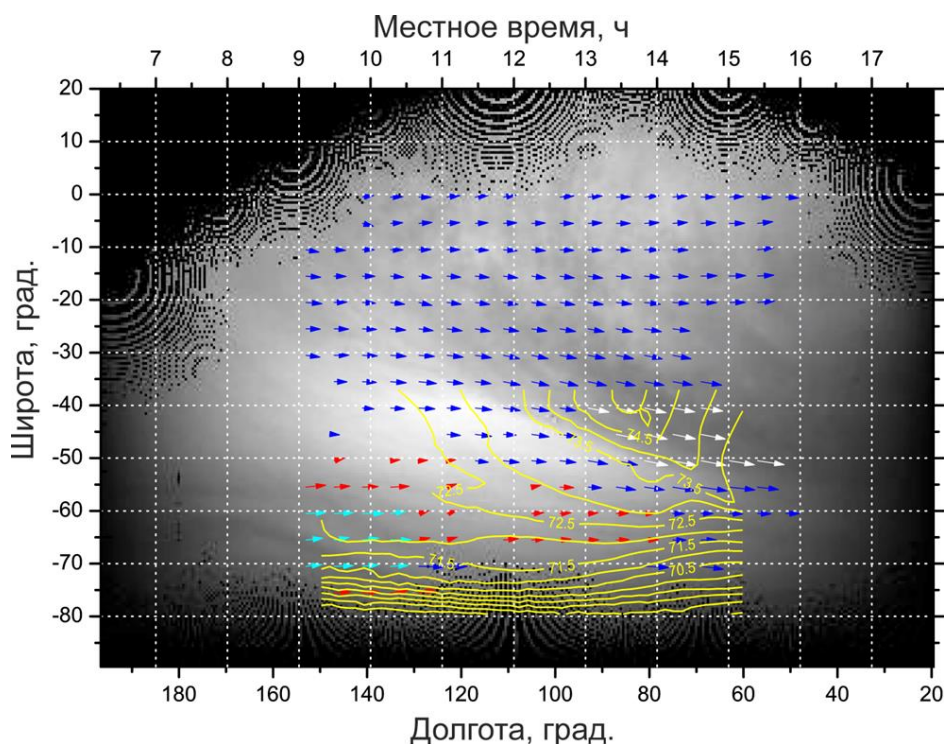


Рисунок 3.7 Поле ветра орбиты #0471 наложено на прямоугольную проекцию изображения 0050 этой же орбиты. Контурсы показывают высоту верхней границы облачного слоя, восстановленную по результатам спектроскопии прибора VIRTIS-M космического аппарата «Венера Экспресс» для данной орбиты (Patsaeva et al., 2015).

Таким образом, обнаружена связь особенностей облачного покрова и поведения горизонтального потока с высотой верхней границы облачного слоя на широтах от 40° до 80° ю.ш.

3.5 Выводы по Главе 3

- Наблюдается корреляция поведения горизонтального потока с крупномасштабными особенностями облачного покрова на средних широтах ($30\text{--}60^{\circ}$ ю.ш.) – скорость и направление горизонтального

потока изменяются в зависимости от положения ветви Y – структуры на изображении;

- Поведение горизонтального потока на средних широтах демонстрирует зависимость от местного времени. На широтах максимального отклонения горизонтального потока (45-55° ю.ш.) в 13-14.5 ч доминирующим является направление к полюсу со средним углом отклонения $-7.7 \pm 0.2^\circ$. В 10-11.5 ч существует два доминирующих направления: со средним углом отклонения $-6.4 \pm 0.2^\circ$ (к полюсу) и $4.9 \pm 0.4^\circ$ (к экватору). Средняя скорость горизонтального потока имеет максимум 98.7 ± 0.3 м/с в 14-15.5 ч на широтах 35-45° ю.ш. В 10-11.5 ч на тех же широтах значение скорости меньше на 10 м/с;
- Обнаружена связь облачных структур и поведения горизонтального потока с высотой верхней границы облачного слоя на широтах от 35° до 80° ю.ш. Темные в УФ области спектра детали Y-структуры расположены на 1.5 – 2 км выше окружающих светлых областей.

Заключение

Одним из основных итогов работы является создание автором автоматизированного корреляционного метода, дающего возможность измерения скоростей ветра по изображениям, получаемым камерами и изображающими спектрометрами, и исследовать характер циркуляции на разных уровнях в атмосфере Венеры. С его помощью было получено более 170 тысяч векторов смещения облачных особенностей, позволивших провести анализ поведения горизонтального потока на верхней границе облачного слоя в южном полушарии Венеры по УФ изображениям (365 нм), полученным камерой VMC орбитальной станции «Венера Экспресс» с 2006 по 2013 г. В связи с тем, что полярные широты представлены на изображениях лишь отчасти, фокус данной работы был направлен на исследование динамических характеристик в экваториальных и средних широтах.

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.

На основе анализа полученного массива данных удалось подтвердить влияние рельефа поверхности на зональную компоненту скорости ветра. Исследования проводились в экваториальных широтах южного полушария Венеры (0-30° ю.ш.), где располагается горный массив Земля Афродиты, оказывающий влияние на торможение зонального потока. Впервые было показано, что минимум зональной скорости, связанный с Землёй Афродиты, с ростом широты (от 0° до 30° ю.ш.) смещается в направлении суперротации при одновременном увеличении скорости в области минимума. Также впервые были получены результаты, свидетельствующие о влиянии рельефа на меридиональную компоненту скорости ветра, позволяющие сделать вывод о влиянии рельефа

подстилающей поверхности на горизонтальный поток на верхней границе облачного слоя Венеры в экваториальных широтах в целом.

Большой массив полученных данных предоставил возможность исследовать влияние поверхности на поведение горизонтального потока в зависимости от местного солнечного времени. Впервые было обнаружено, что минимум зональной скорости наблюдается в полдень над Областью Овда, наиболее высокой областью Земли Афродиты. Дополнительные исследования показали, что солнечно-связанная зависимость зональной компоненты скорости, наблюдаемая как над низменностью, так и над возвышенностью, способствует торможению зонального потока над Областью Овда в широком временном интервале.

Полученное долготно-широтное покрытие позволило исследовать изменение горизонтального потока от орбиты к орбите, и тем самым обнаружить короткопериодические изменения динамических характеристик, впервые связав их в средних широтах (30-60° ю.ш.) с присутствием на изображении характерной крупномасштабной структуры облачного покрова, являющейся частью Y-структуры. Впервые была обнаружена связь высоты верхней границы облачного слоя с расположением облачных структур на изображении и с направлением ветра. Также была исследована зависимость направления горизонтального потока и его скорости в области среднеширотного джета от местного солнечного времени.

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.

Список сокращений

ВГВ	внутренние гравитационные волны
ИК	Инфракрасный
Роскосмос	Российское космическое агентство
УФ	Ультрафиолетовый
ФС	Фурье-спектрометр
AS	AntiSolar (антисолнечная точка, полночь)
GCM	Global circulation model (модель общей циркуляции)
JAXA	Японское космическое агентство
LT	Local Time (местное время)
NASA	Американское космическое агентство
SS	SubSolar (подсолнечная точка, полдень)
UVI	камера миссии «Акацуки»
VeRa/VEX	эксперимент по радиопросвечиванию VeRa миссии «Венера Экспресс»
VIRTIS-M	картирующий спектрометр миссии «Венера Экспресс»
VMC/VEX	камера VMC миссии «Венера Экспресс»

Список литературы

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. Калиткин Н.Н., Численные методы, Москва, Наука. 1978. 512 с.
4. Кержанович В.В., Анцибор Н.М., Бакитько Р.В., Лысов В.П., Молотов Е.П. «Вега-1» и «Вега-2»: вертикальные профили скорости ветра по данным доплеровских измерений на спускаемых аппаратах // *Космич. исслед.* 1987. Т.25. С.673–677.
5. Лайтхилл Дж., Волны в жидкостях, Пер. с англ., Москва, Мир, 1981. 603 с.
6. Тейлор Дж., Введение в теорию ошибок, Пер. с англ., Москва, Мир, 1985. 272 с.
7. Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е., Общая и экологическая геофизика, Москва, Физматлит, 2005. 576 с.
8. Хргиан А.Х., Физика атмосферы, Ленинград, Гидрометеорологическое издательство. 1969. 646 с.
9. Alexander, M. J., Stewart, A. I. F., Solomon, S. C., & Bougher, S. W. Local time asymmetries in the Venus thermosphere // *J. Geophys. Res.* 1993. V.98(E6), P.10849-10871. <https://doi.org/10.1029/93JE00538>.
10. Altieri, F., Migliorini, A., Zasova, L., Shakun, A., Piccioni, G., & Bellucci, G. Modeling VIRTIS/VEX O₂(a₁Δg) nightglow profiles affected by the propagation of gravity waves in the Venus upper mesosphere // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2014. V.119, P.2300–2316. <https://doi.org/10.1002/2013JE004585>
11. Andrews D. G., An introduction to Atmospheric Physics, New York, Cambridge University Press, Second edition, 2010. 237 p.

12. Basilevsky, A. T., Head, J. W. The surface of Venus // *Rep. Prog. Phys.* 2003. V.66(10), P.1699-1734. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/66/10/R04>
13. Belton, M.J.S., Gierasch, P.J., Smith, M.D., Helfenstein, P., Schinder, P.J., Pollack, J.B., Rages, K.A., Morrison, D., Klaasen, K.P., Pilcher, C.B. Images from Galileo of the Venus cloud deck // *Science*. 1991. V.253(5027), P.1531–1536. <https://doi.org/10.1126/science.253.5027.1531>.
14. Bertaux, J.-L., Khatunstsev, I.V., Hauchecorne, A., Markiewicz W.J., Marcq E., Lebonnois, S., Patsaeva, M., Turin, A., Fedorova, A. (2016). Influence of Venus topography on the zonal wind and UV albedo at cloud top level: The role of stationary gravity waves // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2016. V.121, P.1087–1101. <https://doi.org/10.1002/2015JE004958>.
15. Bills, B.G., Navarro, T., Schubert, G. et al., Gravitational signatures of atmospheric thermal tides on Venus // *Icarus*. 2020. V.340. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113568>
16. Blamont, J., Boloh, L., Kerzhanovich, V., Kogan, L., Kurgansky, M. et al. Balloons on planet Venus: Final results // *Adv. Space Res.* 1993. V.13(2), P.145-152. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90289-N](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90289-N).
17. Boyer, C. & Camichel, H. Photographic observations of the planet Venus // *Ann. Astrophys.* 1961. V.24, P.531-535.
18. Bougher, S.W., Alexander, M.J., Mayer, 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.
19. Bougher, S. W., Rafkin, S. and Drossart, P. Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express // *Planet. Space Sci.* 2006. V.54, P.1371– 1380. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.04.023>.

20. Boyer, C. & Guérin, P. Study of the 4-day retrograde rotation of the upper atmospheric layer of Venus // *Icarus*. 1969. V.11(3), P.338–355.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(69\)90067-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(69)90067-0).
21. Cottini, V., Ignatiev, N. I., Piccioni, G., Drossart, P., Grassi, D., & Markiewicz, W. J. Water vapor near the cloud tops of Venus from Venus Express/VIRTIS dayside data // *Icarus*. 2012. V.217(2), P.561–569.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.018>
22. 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.
<https://doi.org/10.1029/JA085iA13p08026>.
23. Choi, David S., Banfield, Don, Gierasch, Peter, Showman, Adam P. Velocity and vorticity measurements of Jupiter's Great Red Spot using automated cloud feature tracking // *Icarus*. 2007. V.188(1), P.35-46.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.10.037>
24. Crisp, D., Ingersoll, A. P., Hildebrand, C. E., & Preston, R. A. (1990). VEGA balloon meteorological measurements // *Adv. Space Res.* 1990. V.10(5), P.109–124.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(90\)90172-V](https://doi.org/10.1016/0273-1177(90)90172-V).
25. Del Genio, A.D. and Rossow, W.B. Planetary scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus // *J. Atmos. Sci.* 1990. V. 47(3), P.293–318.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<0293:PSWATC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<0293:PSWATC>2.0.CO;2).
26. Drossart, P., Piccioni, G., Gérard, J. C., Lopez-Valverde, M. A., Sanchez-Lavega, A., Zasova, L., Hueso, R. et al. A dynamic upper atmosphere of Venus as revealed by VIRTIS on Venus Express // *Nature*. 2007. V.450(7170), P.641-645.
<https://doi.org/10.1038/nature06140>.
27. Esposito, L.W. Ultraviolet Contrasts and the Absorbers Near the Venus Cloud Tops // *J. Geophys. Res.* 1980. V.85, P.8151-8157.
<https://doi.org/10.1029/JA085iA13p08151>.

28. Fedorova, A., Marcq, E., Luginin, M., Korablev, O., Bertaux, J. L., & Montmessin, F. Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus' mesosphere from SPICAV/VEx observations // *Icarus*. 2016. V.275, P.143–162.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.04.010>.
29. Fukuhara, T., Futaguchi, M., Hashimoto, G. L., Horinouchi, T., Imamura, T., Iwagaimi, N., et al. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus // *Nature Geoscience*. 2017. V.10(2), P.85–88. <https://doi.org/10.1038/ngeo2873>.
30. Garate-Lopez, I., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., Peralta, J.; Piccioni, G., Drossart, P. A chaotic long-lived vortex at the southern pole of Venus // *Nature Geoscience*. 2013. V.6(4), P.254-257. <https://doi.org/10.1038/ngeo1764>.
31. 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.
32. Gonçalves, R., Machado, P., Widemann, T., Peralta, J., Watanabe, S. et al. Venus' cloud top wind study: Coordinated Akatsuki/UVI with cloud tracking and TNG/HARPS-N with Doppler velocimetry observations // *Icarus*. 2020. V.335, 113418. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113418>.
33. 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 O₂ 1.27 μm nightglow from VIRTIS-M (Venus Express) data // *Geophysical Research Letters*. 2018. V.45, P.2554–2562. <https://doi.org/10.1002/2017GL076380>.
34. Grassi, D., Migliorini, A., Montabone, L., Lebonnois, S., Cardesin-Moinelo, A., Piccioni, G., Drossart, P., Zasova, L.V. Thermal structure of Venusian night-time mesosphere as observed by VIRTIS-Venus Express // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2010. V.115, 9007. <https://doi.org/10.1029/2009JE003553>.
35. Haus, R., Kappel, D., & Arnold, G. Atmospheric thermal structure and cloud features in the southern hemisphere of Venus as retrieved from VIRTIS/VEX

- radiation measurements // *Icarus*. 2014. V.232, P.232–248.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.01.020>.
- 36.Horinouchi, T., Kouyama, T., Lee, Y. J., Murakami, S., Ogohara, K. Mean winds at the cloud top of Venus obtained from two-wavelength UV imaging by Akatsuki // *Earth, Planets and Space*. 2018. V.70(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0775-3>.
- 37.Hou, A. Y., Fels, S. B., Goody, R. M. Zonal superrotation above Venus' cloud base induced by the semidiurnal tide and the mean meridional circulation // *J. Atmos. Sci.* (ISSN 0022-4928). 1990. V.47(Aug. 1), P.1894-1901.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<1894:ZSAVCB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<1894:ZSAVCB>2.0.CO;2).
- 38.Hueso, R., Legarreta, J., García-Melendo, E., Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S. The jovian anticyclone BA. II. Circulation and interaction with the zonal jets // *Icarus*. 2009. V.203(2), P.499-515. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.004>.
- 39.Hueso, R., Peralta, J., & Sanchez-Lavega, A. Assessing the long term variability of Venus winds at cloud level from VIRTIS-Venus Express // *Icarus*. 2012. V.217(2), P.585–598. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.04.020>.
- 40.Hueso, R., Peralta, J., Garate-Lopez, I., Bandos, T. V., & Sánchez-Lavega, A. Six years of Venus winds at the upper cloud level from UV, visible and near infrared observations from VIRTIS on Venus Express // *Planetary and Space Science*. 2015. V.113-114(08), P.78–99. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.12.010>.
- 41.Ignatiev, N. I., Titov, D. V., Piccioni, G., Drossart, P., Markiewicz, W. J., Cottini, V., et al. Altimetry of the Venus cloud tops from the Venus Express observations // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114(E5), E00B43. <https://doi.org/10.1029/2008JE003320>.
- 42.Ikegawa, S., Horinouchi, T. Improved automatic estimation of winds at the cloud top of Venus using superposition of cross-correlation surfaces // *Icarus*. 2016. V.271. P.98-119. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.01.018>.
- 43.Imamura, T., Miyamoto, M., Ando, H., Häusler, B., Pätzold, M., Tellmann, S., et al. Fine vertical structures at the cloud heights of Venus revealed by radio holographic

- analysis of Venus Express and Akatsuki radio occultation data // *J. Geophys. Res: Planets*. 2018. V.123. P.2151–2161. <https://doi.org/10.1029/2018JE005627>.
- 44.Kerzhanovich, V. V., Limaye, S. S. Circulation of the atmosphere from the surface to 100 km // *Adv. Space Res.* 1985. V.5(11), P.59–83. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90198-X](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90198-X).
- 45.Kouyama, T., Imamura, T., Nakamura, M., Satoh, T., & Futaana, Y. Long-term variation in the cloud-tracked zonal velocities at the cloud top of Venus deduced from Venus Express VMC images // *J. Geophys. Res: Planets*. 2013. V.118, P.37–46. <https://doi.org/10.1029/2011JE004013>.
- 46.Kouyama, T., Imamura, T., Taguchi, M., Fukuhara, T., Sato, T. M. Topographical and Local Time Dependence of Large Stationary Gravity Waves Observed at the Cloud Top of Venus // *Geophysical Research Letters*. 2017. V.44(24), P.12098-12105. <https://doi.org/10.1002/2017GL075792>.
- 47.Khatuntsev, I. V., Patsaeva, M. V., Titov, D. V., Ignatiev, N. I., Turin, A. V., Limaye, S. S. et al. Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging // *Icarus*, 2013. 226(1), P.140–158. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.018>.
- 48.Khatuntsev, I. V., Patsaeva, M. V., Titov, D. V., Ignatiev, N. I., Turin, A. V., Fedorova, A. A., & Markiewicz, W. J. Winds in the middle cloud deck from the near-IR imaging by the Venus Monitoring Camera onboard Venus Express // *J. Geophys. Res: Planets*. 2017. V.122. P.2312–2327. <https://doi.org/10.1002/2017JE005355>.
- 49.Lee, Y. J., Titov, D. V., Tellmann, S., Piccialli, A., Ignatiev, N., Pätzold, M., Häusler, B., Piccioni, G., Drossart, P. Vertical structure of the Venus cloud top from the VeRa and VIRTIS observations onboard Venus Express // *Icarus*, 2012. V.217(2), P.599-609. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.07.001>.
- 50.Lellouch, E., Clancy, T., Crisp, D., Kliore, A., Titov, D., Bougher S.W. 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.
- 51.Limaye, S.S., Suomi, V.E. Cloud motions on Venus: Global structure and organization // *J. Atmos. Sci.* 1981. V.38, P.1220–1235.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<1220:CMOVGS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1220:CMOVGS>2.0.CO;2).
- 52.Limaye, S.S. Venus atmospheric circulation: Observations and Implications of the thermal structure // *Adv. Space Res.* 1985. V.5(9), P.51–62.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90270-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90270-4).
- 53.Limaye, S.S. Atmospheric dynamics on Venus and Mars // *Adv. Space Res.* 1987. V.7(12), P.39–53. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(87\)90201-8](https://doi.org/10.1016/0273-1177(87)90201-8).
- 54.Limaye, S. S., Grassotti, C., Kuetemeyer, M. J. Venus: Cloud level circulation during 1982 as determined from pioneer cloud photopolarimeter images I. Time and zonally averaged circulation // *Icarus*. 1988. V.73(2), P.193-211.
[https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90093-0).
- 55.Limaye, S.S. Venus atmospheric circulation: Known and unknown // *J. Geophys. Res.* 2007. V.112(E4), E04S09. <http://dx.doi.org/10.1029/2006JE002814>.
- 56.Limaye, S.S., Kossin, J.P., Rozoff, C., Piccioni, G., Titov, D.V., Markiewicz, W.J. Vortex circulation on Venus: Dynamical similarities with terrestrial hurricanes // *Geophysical Research Letters*. 2009. V.36(4), L04204.
<https://doi.org/10.1029/2008GL036093>.
- 57.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. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90093-0).
- 58.Limaye, S. S., Grassi, D., Mahieux, A., Migliorini, A., Tellmann, S., Titov, D. Venus Atmospheric Thermal Structure and Radiative Balance // *Space Science Reviews*. 2018. V.214(5). 71 pp. <https://doi:10.1007/s11214-018-0525-2>.
- 59.Lindzen, R. S. (1981), Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown // *J. Geophys. Res.* 1981. V.86, P.9707–9714.
<https://doi:10.1029/JC086iC10p09707>.

60. Luz, D., Berry, D. L., Roos-Serote, M. An automated method for tracking clouds in planetary atmospheres // *New Astronomy*. 2008. V.13(4), P.224-232.
<https://doi.org/10.1016/j.newast.2007.09.001>.
61. Luz, D., Berry, D. L., Piccioni, G., Drossart, P., Politi, R. et al. Venus's Southern Polar Vortex Reveals Precessing Circulation // *Science*. 2011. V.332(6029), P.577.
<https://doi.org/10.1126/science.1201629>.
62. Markiewicz, W. J., Titov, D. V. et al. Venus Monitoring Camera for Venus Express // *Planet. Space Sci.* 2007. V.55(12). P.1701-1711.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.01.004>.
63. Mendonça, J. M., Read, P. L., Wilson, C. F., Lewis, S. R. Zonal winds at high latitudes on Venus: An improved application of cyclostrophic balance to Venus Express observations // *Icarus*. 2012. V.217(2), P.629-639.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.07.010>.
64. Moissl, R., Khatuntsev, I., Limaye, S. S., Titov, D. V., Markiewicz, W. J., Ignatiev, N. I., et al. Cloud top winds from tracking UV features in Venus Monitoring Camera images // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114, E00B31.
<https://doi.org/10.1029/2008JE003117>.
65. Nara, Y., Imamura, T., Murakami, S., Kouyama, T., Ogohara, K., Yamada, M., Takagi, M., Kashimura, H., Sato, N. Formation of the Y Feature at the Venusian Cloud Top by Planetary-Scale Waves and the Mean Circulation: Analysis of Venus Express VMC Images // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2019. V.124(5), P. 1143-1156.
<https://doi.org/10.1029/2018JE005779>.
66. Navarro, T., Schubert, G., & Lebonnois, S. Atmospheric mountain wave generation on Venus and its influence on the solid planet's rotation rate // *Nature Geoscience*. 2018. V.11(7). P.487–491. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0157-x>.
67. 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<1901:ZWITMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<1901:ZWITMA>2.0.CO;2).

68. Nakamura, M., Imamura, T., Ishii, N., Abe, T., Kawakatsu, Y., et al. AKATSUKI returns to Venus // *Earth Planets Space*. 2016. V.68(1), 75.
<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0457-6>.
69. Ogohara, K., Kouyama, T., Yamamoto, H., Sato, N., Takagi, M., Imamura, T. Automated cloud tracking system for the Akatsuki Venus Climate Orbiter data // *Icarus*. 2012. V.217(2), P.661-668. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.05.017>.
70. 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>.
71. 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 // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2019. V.124, P.1864–1879. <https://doi.org/10.1029/2018JE005620>.
72. Peralta, J., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A. A reanalysis of Venus winds at two cloud levels from Galileo SSI images // *Icarus*. 2007. V.190(2), P.469–477.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.03.028>.
73. Peralta, J., Sánchez-Lavega, A., López-Valverde, M. A., Luz, D., & Machado, P. Venus's major cloud feature as an equatorially trapped wave distorted by the wind // *Geophysical Research Letters*. 2015. 42, 705–711.
<https://doi.org/10.1002/2014GL062280>
74. Peralta, J., Hueso, R., Sánchez-Lavega, A., Lee, Y. J., García-Muñoz, A., Kouyama, T., et al. Stationary waves and slowly moving features in the night upper clouds of Venus // *Nature Astronomy*. 2017. 1(8). <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0187>
75. Piccialli, A., Titov, D. V., Grassi, D., Khatuntsev, I., Drossart, P., Piccioni, G., Migliorini, A. Cyclostrophic winds from the Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer temperature sounding: A preliminary analysis // *J. Geophys. Res.* 2008. V.113(2), E00B11. <https://doi.org/10.1029/2008JE003127>.

76. Piccialli, A., 2010. Cyclostrophic Wind in the Mesosphere of Venus from Venus Express Observations // Ph.D. Thesis. 2010. University of Braunschweig, Germany.
77. Piccialli, A., Tellmann, S., Titov, D. V., Limaye, S. S., Khatuntsev, I. V., Pätzold, M., Häusler, B. Dynamical properties of the Venus mesosphere from the radio-occultation experiment VeRa onboard Venus Express // *Icarus*. 2012. V.217(2), P.669-681. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.07.016>.
78. Piccioni, G., Zasova, L., Migliorini, A., Drossart, P., Shakun, A., García Muñoz, A., et al. Near-IR oxygen nightglow observed by VIRTIS in the Venus upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114, E00B38. <https://doi.org/10.1029/2008JE003133>.
79. Rossow, W.B., Del Genio, A.T., Limaye, S.S., Travis, L.D., Stone, P. Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images // *J. Geophys. Res.* 1980. V.85(A13), P.8107–8128. <https://doi.org/10.1029/JA085iA13p08107>.
80. Rossow, W. B., Del Genio, A. T., & Eichler, T. Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images // *J. Atmosph. Sci.* 1990. V.47(17), P.2053–2084. [https://doi.org/10.1175/1520-469\(1990\)047%3C2053:CTWFVO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-469(1990)047%3C2053:CTWFVO%3E2.0.CO;2).
81. Sagdeyev, R. Z., Kerzhanovitch, V. V., Kogan, L. R., Kostenko, V. I., Linkin, V. M., Matveyenko, L. I. et al. Differential VLBI measurements of the Venus atmosphere dynamics by balloons: VEGA project // *Astronomy and Astrophysics*. 1992. V.254, P.387–392.
82. Sánchez-Lavega, A., Hueso, R., Piccioni, G., Drossart, P., Peralta, J., Pérez-Hoyos, S. et al. Variable winds on Venus mapped in three dimensions // *Geophysical Research Letters*. 2008. V.35(13), L13204. <https://doi.org/10.1029/2008GL033817>.
83. Sayanagi, K.M., Dyudina, U.A., Ewald, S.P., Fischer, G., Ingersoll, A.P., et al. Dynamics of Saturn's great storm of 2010–2011 from Cassini ISS and RPWS // *Icarus*. 2013. V.223, P.460–478. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.12.013>.
84. 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.

- 85.Svedhem, H., Titov, D. V., McCoy, D., Lebreton, J. -P., Barabash, S. et al. Venus Express—The first European mission to Venus // *Planetary and Space Science*. 2007. V.55(12), P.1636-1652. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.01.013>.
- 86.Svedhem, H., Titov, D. V., Taylor, F. W., & Witasse, O. The Venus Express mission // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114, E00B33. <https://doi.org/10.1029/2008JE003290>.
- 87.Tellmann, S., Pätzold, M., Häusler, B., Bird, M. K., & Tyler, G. L. Structure of the Venus neutral atmosphere as observed by the Radio Science experiment VeRa on Venus Express // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114, E00B36. <https://doi.org/10.1029/2008JE003204>.
- 88.Tellmann, S., Häusler, B., Hinson, D.P., Tyler, G.L., Andert, T.P., Bird, M.K., Imamura, T., Pätzold, M., Remus, S. Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa Radio Science Experiment on Venus Express // *Icarus*. 2012. V.221, P.471–480. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.08.023>.
- 89.Titov, D. V., Svedhem, H., Koschny, D., Hoofs, R., Barabash, S., Bertaux, J., et al. Venus Express science planning // *Planet. Space Sci.* 2006. V.54(13-14), P.1279–1297. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.04.017>.
- 90.Titov, D. V., Markiewicz, W. J., Ignatiev, N. I., Song, L., Limaye, S. S., Sánchez-Lavega, A., et al. Morphology of the cloud tops as observed by the Venus Express Monitoring Camera // *Icarus*. 2012. V.217(2), P.682–701. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.06.020>
- 91.Toigo, A., Gierasch, P.J., Smith, M.D. High resolution cloud feature tracking on Venus by Galileo // *Icarus*. 1994. V.109(2), 318–336. <https://doi.org/10.1006/icar.1994.1097>.
- 92.Tomasko, M. G., Doose, L. R., Smith, P. H., Odell, A. P. Measurements of the flux of sunlight in the atmosphere of Venus // *J. Geophys. Res.* 1980. V.85, P.8167-8186. <https://doi.org/10.1029/JA085iA13p08167>.
- 93.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>.
94. Walterscheid, R.L., Schubert, G., Newman, M., Kliore, A.J. Zonal winds and angular momentum balance of Venus' atmosphere within and above clouds // *J. Atmos. Sci.* 1985. V.42, 1982–1990. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<1982:ZWATAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<1982:ZWATAM>2.0.CO;2).
95. Yamamoto, M., Ikeda, K., Takahashi, M., Horinouchi, T. Solar-locked and geographical atmospheric structures inferred from a Venus general circulation model with radiative transfer // *Icarus*. 2019. V.321, P.232-250.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.11.015>.
96. Young, R. E., Walterscheid, R. L., Schubert, G., Seiff, A., Linkin, V. M., & Lipatov, A. N. Characteristics of gravity waves generated by surface topography on Venus: Comparison with the VEGA balloon results // *J. Atmos. Sci.* 1987. V.44(18), P.2628–2639.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044%3C2628:COGWGB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044%3C2628:COGWGB%3E2.0.CO;2).
97. Zasova L.V., Khatountsev 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. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00574-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00574-9).
98. Zasova, L. V., Ignatiev, N. I., Khatuntsev, I. V., & Linkin, V. M. Structure of the Venus atmosphere // *Planetary and Space Science*. 2007. V.55(12), 1712–1728.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2007.01.011>.
99. Zasova, L.V., Khatuntsev, I.V., Patsaeva M.V., Ignatiev, N. I, Rodin A.V., Turin A.V. Reflection of surface topography in Venus atmosphere // Moscow. Solar System Symposium. 2015. P.103–105.
http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3_abstract_book.pdf.

Основные публикации по теме диссертации

1. 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>.
2. 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>.
3. 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.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.

7. Patsaeva, M.; Khatuntsev, I.; Titov, D.; Markiewicz, W.; Ignatiev, N. Automatic correlation method to estimate wind velocity from UV images of Venus on VMC data // 38th COSPAR Scientific Assembly / 18-15.07.2010, in Bremen, Germany. p.6, C31-0034-10. www.cospar-assembly.org/abstractcd/OLD/COSPAR-10/abstracts/data/pdf/abstracts/C31-0034-10.pdf.
8. Patsaeva M., Khatuntsev I., Ignatiev N. Circulation of mesosphere of Venus according to wind tracking results obtained from VMC and VIRTIS onboard Venus Express // 39th COSPAR Scientific Assembly / 14-22.07.2012, in Mysore, India. C3.3-0004-12. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-12/abstracts/C3.3-0004-12.pdf>.
9. Patsaeva M., Khatuntsev I., Ignatiev N., Titov D., Markiewicz W., Turin A. Winds at the cloud top level of Venus from UV images obtained with VMC onboard Venus Express // 39th COSPAR Scientific Assembly / 14-22.07.2012, in Mysore, India. B0.8-0013-12. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-12/abstracts/B0.8-0013-12.pdf>.
10. Patsaeva, M.; Khatuntsev, I.; Ignatiev, N. Investigation of winds in Venus mesosphere by digital method using UV images from VMC aboard Venus Express // EGU General Assembly 2013 / 7-12.04.2013, in Vienna, Austria. EGU2013-5484, Vol.15. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-5484.pdf>.
11. Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Patsaev D.V., Ignatiev N.I. Titov D.V., Markiewicz W. Mesoscale Circulation At The Upper Cloud Level At Middle Latitudes From The Imaging By Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // 40th COSPAR Scientific Assembly / 2-10.08.2014, in Moscow, Russia. C3.1-0025 14. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-14/abstracts/C3.1-0025-14.pdf>.
12. Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Patsaev D.V., Ignatiev N.I. Titov D.V., Markiewicz W., Rodin A.V. Correlation of the cloud top wind pattern with cloud morphology at the upper cloud level of Venus at 25°S-75°S from VMC/Venus Express // European

- Planetary Science Congress / 2-7.09.2014, Cascais, Portugal. EPSC2014-161, Vol. 9.
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2014/EPSC2014-161.pdf>
13. M. V. Patsaeva, I. V. Khatuntsev, Jean-Loup Bertaux, A. V. Turin. Dependence of longitudinal distribution of zonal wind and UV albedo at cloud top level on Venus topography from VMC camera onboard Venus Express // European Planetary Science Congress / 27.09-2.10.2015, Nantes, France. EPSC2015-297, Vol. 10.
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2015/EPSC2015-297.pdf>
14. M. V. Patsaeva, I. V. Khatuntsev, Jean-Loup Bertaux, A. V. Turin. Dependence of longitudinal distribution of zonal wind and UV albedo at cloud top level on Venus topography from VMC camera onboard Venus Express // The Sixth Moscow Solar System Symposium (6M-S3) / 5-9.10.2015, Moscow, Russia. 6MS3-PS-35, p.241.
http://ms2015.cosmos.ru/sites/ms2015.cosmos.ru/files/6m-s3_abstract_book.pdf.
15. Patsaeva M., Khatuntsev I.; Influence of Venus topography on variations of zonal and meridional winds according to measurements in UV and IR channels of VMC/Venus Express // The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3) / 10-14.10.2016, Moscow, Russia, 7MS3-PS-45, p.245.
http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7ms3-2016_abstract_book_www.pdf
16. Пацаева М.В., Хатунцев И.В., Тюрин А.В., Засова Л.В. Зависимость скорости ветра в верхнем облачном слое Венеры от топографии и местного времени по данным VMC/VenusExpress // Школа-семинар «Атмосферы планет: от земной группы к экзопланетам» / 27-29.03.2017, Полярный геофизический институт, г. Апатиты.
http://docs.wixstatic.com/ugd/30b7d5_21d397ed1bd247a48165170c4e0ccd1c.pdf
17. Marina Patsaeva, Igor Khatuntsev, Alexander Turin, Ludmila Zasova, Jean-loup Bertaux. Dependence of wind speed and albedo at Venus top cloud layer on topography and local time revealed from VMC images // EGU General Assembly 2017 / 23-28.04.2017, in Vienna, Austria. EGU2017-7111, Vol. 19.
<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-7111.pdf>

18. Пацаева М.В., Хатунцев И.В., Засова Л.В., Ашекорн А., Титов Д.В., Берто Ж-Л. Влияние горного массива Aphrodite Terra и локального времени на циркуляцию на верхней границе облачного слоя по многолетним наблюдениям VMC с борта Venus Express // Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" / 12–16.11.2018, в Москве. doi:10.21046/2070-16DZZconf-2018a, с.357. http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6794
19. Patsaeva M., Khatuntsev I., Zasova L., Hauchecorne A., Titov D., Bertaux J-L. Interaction of solar-related effects and stationary gravity wave above Aphrodite Terra according to VMC/Venus-Express wind fields // 42nd COSPAR Scientific Assembly / 14-22.07.2018, Pasadena, California, USA, C3.1-0007-18. <https://www.cospar-assembly.org/abstractcd/COSPAR-18/abstracts/C3.1-0007-18.pdf>
20. Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., Hauchecorne A., A. Titov A., Bertaux J.-L. Influence of the local time and Aphrodite Terra topography on the cloud top circulation from VMC/Venus Express imaging // The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2018 / 11-14.09.2018, Niseko, Hokkaido, Japan. P36 venus2018-0008. https://www.cps.jp.org/~akatsuki/venus2018/program/IVC2018_Abstracts.pdf
21. Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., Hauchecorne A., A. Titov A., Bertaux J.-L. Influence of the local time and Aphrodite Terra topography on the cloud top circulation from VMC/Venus Express imaging // The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2019 / 31.05-3.06.2019, Niseko, Japan. P36 venus2019-0059. https://www.cps.jp.org/~akatsuki/venus2019/program/IVC2019_Abstracts.pdf
22. Patsaeva, Marina; Khatuntsev, Igor; Zasova, Ludmila; Hauchecorne, Alain; Titov, Dmitry; Bertaux, Jean-Loup. Influence of solar-related effects and topography on the cloud top circulation above Aphrodite Terra from VMC/Venus Express wind fields // EPSC-DPS Joint Meeting 2019 / 15-20.09.2019 in Geneva, Switzerland. EPSC-

DPS2019-510. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC-DPS2019/EPSC-DPS2019-510-1.pdf>

23. Patsaeva M.V., I.V. Khatuntsev, L.V. Zasova, A. Hauchecorne, D.V. Titov, J.-L. Bertaux. Dependence of cloud top circulation above Aphrodite Terra on solar-related effects and topography. Change in the behavior of zonal wind over mission time from VMC/Venus Express wind fields // The Tenth Moscow Solar System Symposium 2019 / 7-11.10.2019, ИКИ РАН, Москва, Россия, 10MS3-PS-27, p.314. <https://ms2019.cosmos.ru/docs/10m-s3-abstract-book.pdf>.

Приложение 1. Орбиты, изображения которых были использованы для получения векторов перемещения автоматизированным методом

Набор данных (номер)	Даты наблюдений (начало - конец)	Номера орбит
1	2006-06-19 - 2006-07-03	0060, 0073, 0074
2	2006-12-18 - 2007-02-13	0241, 0246, 0253, 0254, 0258, 0263, 0265, 0266, 0267, 0280, 0281, 0283, 0284, 0285, 0289, 0290, 0291, 0295, 0297, 0298
3	2007-06-30 - 2007-09-10	0436, 0437, 0441, 0443, 0445, 0446, 0452, 0457, 0458, 0461, 0462, 0465, 0469, 0470, 0471, 0472, 0474, 0475, 0480, 0481, 0484, 0485, 0497, 0508
4	2008-01-21 - 2008-05-09	0641, 0649, 0653, 0655, 0656, 0662, 0664, 0669, 0672, 0674, 0678, 0679, 0682, 0686, 0688, 0689, 0690, 0692, 0694, 0696, 0697, 0699, 0702, 0704, 0708, 0717, 0718, 0722, 0723, 0727, 0728, 0731, 0734, 0748, 0749
5	2008-09-04 - 2008-12-15	0868, 0871, 0872, 0875, 0876, 0877, 0879, 0880, 0882, 0884, 0887, 0889, 0892, 0893, 0894, 0895, 0898, 0900, 0901, 0902, 0903, 0906, 0910, 0911, 0913, 0914, 0916, 0919, 0920, 0922, 0924, 0926, 0931, 0932, 0933, 0936, 0937, 0938, 0940, 0942, 0963, 0964, 0966, 0967, 0969
6	2009-04-14 - 2009-07-26	1090, 1093, 1094, 1099, 1102, 1103, 1104, 1105, 1107, 1108, 1109, 1112, 1113, 1114, 1117, 1118, 1120, 1121, 1122, 1123, 1126, 1127, 1131, 1171, 1172, 1177, 1179, 1184, 1185
7	2009-11-19 - 2010-02-19	1309, 1312, 1315, 1320, 1325, 1332, 1335, 1336, 1340, 1341, 1342, 1343, 1344, 1345, 1346, 1375, 1377, 1380, 1386, 1391, 1398, 1400
8	2010-08-28 - 2010-10-13	1591, 1594, 1596, 1597, 1604, 1613, 1636
9	2011-02-23 - 2011-05-05	1770, 1774, 1782, 1786, 1795, 1796, 1802, 1804, 1812, 1815, 1816, 1818, 1822, 1823, 1827, 1828, 1840
10	2011-10-05 - 2011-12-15	1994, 1996, 2014, 2031, 2032, 2034, 2037, 2040, 2042, 2044, 2047, 2048, 2049, 2050,

		2052, 2053, 2059, 2062, 2064
11	2012-05-18 - 2012-08-01	2220, 2221, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2231, 2233, 2258, 2262, 2264, 2268, 2273, 2280, 2281, 2283, 2287, 2291, 2293, 2295
12	2012-12-23 - 2013-01-27	2439, 2441, 2442, 2453, 2454, 2456, 2466, 2469, 2472, 2473
13	2013-07-07 - 2013-09-15	2659, 2663, 2667, 2674, 2680, 2686, 2691, 2695, 2697, 2705
All	2006-06-19 - 2013-09-15	0060 – 2705

Приложение 2. Количество векторов смещения в выборках по местному времени

Интервал по местному солнечному времени	Количество индивидуальных векторов скорости 0-90° ю.ш./ 0-30° ю.ш.
10-11	27291 / 7623
11-12	32328 / 7488
12-13	35763 / 8220
13-14	34612 / 10387
14-15	21389 / 8120
15-16	6110 / 2372