

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

УДК 523.2 523.4 523.6

Номер государственной регистрации 122042500018-9

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Института космических исследований
Российской академии наук,
чл.-корр. РАН



А.А. Петрукович

« 20 » декабря 2022 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Миссия для комплексного исследования поверхности, атмосферы
и окружающей плазмы Венеры

По теме:
Венера-Д
(промежуточный, этап 1)

FFWG-2022-0002

Научный руководитель,
академик РАН

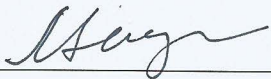
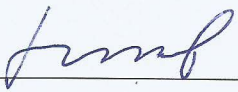
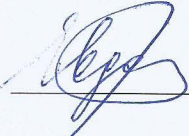
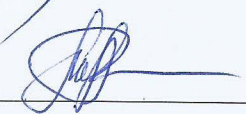
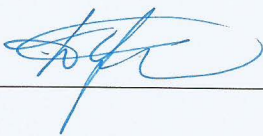
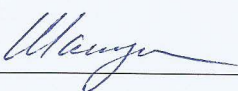
Л.М. Зелёный

« 20 » декабря 2022 г.

Москва

2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зам. Руководителя	19.12.2022		Засова Л.В. в.н.с., д.ф.-м.н.	Введение, Заключение, раздел 2
	19.12.2022		Игнатьев Н.И. с.н.с., к.ф.-м.н.	Введение
	19.12.2022		Хатунцев И.В. с.н.с., к.ф.-м.н.	Введение, раздел 2
	19.12.2022		Евдокимова Д.Г. н.с., к.ф.-м.н.	Введение, раздел 2
	19.12.2022		Пацаева М.В. н.с., к.ф.-м.н.	Раздел 2
	19.12.2022		Горинов Д.А. м.н.с.	Введение, Заключение, раздел 2
	19.12.2022		Шакун А.В. н.с., к.ф.-м.н.	Раздел 2
	19.12.2022		Пацаев Д.В. н.с.	Раздел 2
	19.12.2022		Ефременкова Е.В.	Нормоконтроль

РЕФЕРАТ

Настоящий документ содержит отчет о научно-исследовательской работе по теме FFWG-2022-0002. «Венера-Д» — космический комплекс для исследования поверхности, атмосферы, внутреннего строения и окружающей плазмы Венеры».

В результате выполнения работы были получены новые оригинальные результаты:

- В результате обработки данных видимого канала камеры VMC («Венера-Экспресс») было получено 250 000 векторов горизонтальной скорости ветра на уровнях внутри верхнего облачного слоя.
 - 1) Получены поля горизонтальных скоростей в области верхней границы облаков (70 ± 2 км), внутри верхнего облачного слоя (60 ± 3 км) и нижней границы верхнего или верхней границы среднего облачного слоя – (55 ± 2 км). На 30°S зональная скорость, направленная на запад, составляла 99,0 м/с в УФ, 78,6 м/с в 513 нм и 67,5 м/с в ближнем ИК.
 - 2) Выявленные особенности динамики облачного слоя включают ячейку Хэдли в верхнем облачном слое.
 - 3) Влияние термического прилива на зональную и меридиональную компоненты скорости ветра.
 - 4) Вариации поглотителей в верхнем облачном слое, приводящие к подъему уровня, наблюдаемого в видимом канале на 8 км, коррелируют с солнечным циклом.
- В нижнем облачном слое на ночной стороне по данным прибора IR2 («Акацуки») обнаружены зависимости зональной и меридиональной скоростей ветра от местного времени, выявлены значительные короткопериодические вариации.
- Предложена и аргументирована необходимость выбора в качестве места посадки молодых вулканических участков поверхности. Предложены земные аналоги для наземной отработки посадки и забора образцов грунта.

Текст отчета состоит из Введения, главы, посвященной описанию полученных результатов и Заключения. В конце отчета дана информация о публикационной активности исполнителей.

Номер государственной регистрации - 122042500018-9. Отчет содержит 21 страницу, 6 рисунков, 14 источников.

Ключевые слова: ВЕНЕРА, ПЛАНЕТА, АТМОСФЕРА, ПОВЕРХНОСТЬ, ДИНАМИКА, СУПЕРРОТАЦИЯ, АЭРОЗОЛЬ, ВУЛКАНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ, ПРОЕКТ «ВЕНЕРА-Д», НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ, КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ, СПЕКТРОСКОПИЯ.

Содержание

Список сокращений.....	6
1 Введение.....	7
2 Венера. Фундаментальные исследования.....	9
2.1 Динамика атмосферы Венеры по данным видимого канала (513 нм) VMC / Venus Express 9	
2.2 Циркуляция нижнего облачного слоя атмосферы Венеры на ночной стороне по данным прибора IR2 проекта «Акацуки».....	14
2.3 Выбор места посадки посадочного аппарата «Венера-Д». Геологически молодые поверхности.	15
3 Заключение	17
4 Список использованных источников	19
4.1 Список публикаций.....	19
4.2 Статьи в зарубежных изданиях.....	19
4.3 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах.....	19
4.4 Статьи в сборниках материалов конференций.....	19
4.5 Доклады, тезисы, циркуляры	20
4.6 Другие издания.....	21

Список сокращений

АМ	Атмосферный модуль
ЕКА	Европейское Космическое Агентство
ИК	Инфракрасный
ОМ	Орбитальный модуль
ПМ	Посадочный модуль
УФ	Ультрафиолетовый
IR2	InfraRed 2-μm
JAXA	Japanese Aerospace Agency (Японское Космическое Агентство)
LPI	Lunar and Planetary Institute
NASA	National AeroSpace Agency
VIRTIS	Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer
VMC	Venus Monitoring Camera

1 Введение

Настоящий документ содержит отчет о результатах исследований, проведенных в 2022 г. по теме FFWG-2022-0002 «ВЕНЕРА-Д». **Научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера.**

Тема FFWG-2022-0002 ВЕНЕРА-Д является частью государственного задания ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ.

Гос. рег. № 122042500018-9

Науч. рук.: академик РАН Зелёный Л.М.

Зам. рук.: д.ф.-м.н. Засова Л.В.

1. Фундаментальные исследования включают продолжение работы по обработке и интерпретации данных о планете Венера, полученных камерой VMC («Венера-Экспресс») (2006 – 2013 гг.) и камерами Акацуки/JAXA (2016 – настоящее время). Камера VMC на борту «Венера-Экспресс», работая на орбите вокруг Венеры в течение 8 лет (2006-2013), получала изображения дневной, стороны Венеры в трех спектральных диапазонах - УФ (365 нм), видимом (513 нм) и ближнем ИК (965 нм), соответственно, позволяя картировать движение облачных деталей и получая поля горизонтальных скоростей в области верхней границы облаков (70 ± 2 км), внутри верхнего облачного слоя (60 ± 3 км) и нижней границы верхнего или верхней границы среднего облачного слоя – (55 ± 2 км). На 30°S зональная скорость, направленная на запад, составляла 99,0 м/с в УФ, 78,6 м/с в 513 нм и 67,5 м/с в ближнем ИК. Уникальные алгоритмы, разработанные авторами для улучшения изображений (особенно важными для видимого и ближнего ИК-каналов VMC, где контрасты изображений не превышают 3-5%, по сравнению с 30% в УФ) для последующего изучения перемещения деталей облачного покрова и получения карт скоростей ветра на нескольких уровнях в атмосфере, позволили получить новые оригинальные результаты, касающиеся динамики атмосферы планеты.

Используя данные камеры IR2 космического аппарата «Акацуки», были рассчитаны и построены средние поля зональной и меридиональной компонент скоростей ветра в нижнем облачном слое на ночной стороне Венеры. Зональная скорость на экваторе достигает 80 м/с, равномерно снижаясь к полюсам.

2. Научное обоснование и концепция российской миссии «Венера-Д». Проект «Венера-Д» имеет целью получение фундаментальных знаний о Венере как планете, а также детальное изучение условий на поверхности и в атмосфере, климата и погоды, для понимания

возможной эволюции климата Земли, экзопланет (большинство из которых, с землеподобными размерами, сходны с Венерой, которую таким образом можно рассматривать «представителем экзопланет» в Солнечной системе), обеспечения будущих миссий, целью которых может быть доставка на Землю образцов атмосферы и грунта Венеры.

Для решения ключевых научных задач проекта, связанных с происхождением и эволюцией планеты, необходимо ответить на вопрос, почему столь разительно отличается от Земли ее сестра-близнец, и на каком этапе эволюции пути планет-сестер разошлись. Для этого, кроме долговременных измерений с орбиты эффективным современным комплексом научной аппаратуры, необходимы прямые измерения в атмосфере и на поверхности. Три категории прямых измерений включены в проект «Венера-Д»: 1) измерения сложными приборами, установленными внутри гермоконтейнера в течение 2 часов на поверхности, включая бурение, забор грунта и изучение его приборами внутри гермоконтейнера; 2) приборами, установленными внутри и снаружи гермоконтейнера, вертикального строения атмосферы и облачного слоя на этапе спуска; 3) прямые измерения с аэростатного зонда атмосферы, облачного слоя, возможных признаков существования микроорганизмов, признаков вулканической активности на ночной стороне.

В 2022 году продолжилось детальное изучение научных задач проекта «Венера-Д» и возможности различных инструментов для решения этих задач, научное обоснование экспериментов и формирование комплекса научной аппаратуры. В качестве места посадки предложены покрытые молодой лавой склоны вулкана Идунн, земным аналогом которых являются склоны вулкана Этна.

В формате онлайн-публикации вместе с коллегами NASA опубликован отчёт об астробиологической конференции Venera-D: Venus Cloud Habitability System Workshop (2021), организованной ИКИ и LPI NASA. Подробно описаны обсуждения условий для возникновения жизни в облаках, возможных биологических форм, способных к поддержанию экосистемы, моделей эволюции климата. Рассмотрены предложения экспериментов и методов для поиска жизни, которые предполагается включить в научную программу АМ «Венеры-Д».

2 Венера. Фундаментальные исследования

2.1 Динамика атмосферы Венеры по данным видимого канала (513 нм) VMC / Venus Express

В динамике атмосферы Венеры преобладает сильная зональная ретроградная циркуляция, называемая «суперротацией» (период обращения атмосферы растет от поверхности, так что на верхней границе облаков превышает период вращения поверхности в 60 раз). Физические механизмы, поддерживающие этот режим, недостаточно изучены. Непрерывные наблюдения за Венерой с борта орбитального аппарата ЕКА «Венера-Экспресс» продолжались в течение восьми лет, отслеживая движения элементов облачного покрова в трех спектральных диапазонах: ультрафиолетовом (УФ) (365 нм), видимом (513 нм) и ближнем инфракрасном (915 нм). Эти длины волн зондировали разные высоты: 70 ± 2 км, 60 ± 3 км и 55 ± 2 км соответственно, обеспечивая «томографию» поля ветра в области верхней границы облачного слоя (УФ), внутри верхнего облачного слоя (видимый) и в области нижней границы верхнего облачного слоя или верхней границы среднего (ближний ИК). В 2022 году были полностью обработаны данные, полученные в видимом канале. Получено более 250 000 векторов смещения деталей облачного слоя. Полученные результаты свидетельствуют об уменьшении ретроградной средней зональной скорости ветра с 76,5 до 61,5 м/с на 30° – 65° ю.ш. и ее увеличении до 82 м/с на 10° – 20° ю.ш. Также средняя зональная скорость демонстрирует выраженные вариации с местным солнечным временем, широтой и рельефом подстилающей поверхности. Внутри верхнего облачного слоя меридиональный ветер указывает на движение атмосферных масс к экватору со скоростью до 7 м/с (видимый и ближний ИК) в противоположность тому, что ранее было получено из УФ-изображений на верхней границе облаков.

Зависимость от местного времени. Поле скоростей, полученное по видимому каналу VMC (513 нм) в координатах широта — местное время демонстрирует наличие зависимости динамических параметров наблюдаемого слоя от местного солнечного времени (Рисунок 1). Как зональный, так и меридиональный ветер имеют дневной максимум вблизи 10° ю.ш. Зональная скорость имеет слабый максимум около 13-14 часов местного времени (Рисунок 1a), в то время как меридиональная скорость показывает широкий пик с центром в 11-14 часов (Рисунок 1b). Это очень похоже на то, что наблюдается в ближнем ИК-диапазоне (965 нм), однако резко контрастирует с полем ветра, полученным с помощью УФ-изображений VMC. Зональная и меридиональная составляющие УФ-ветров достигали своего максимума на $\sim 40^\circ$ ю.ш. Суточные вариации средней зональной скорости ветра уменьшаются с увеличением широты. Наибольшие вариации наблюдаются в экваториальной области, на 10° ю. ш.: зональная

скорость колеблется от -76 до -86 м/с (10 м/с). На 30° ю.ш. величина колебаний составляет всего 3 м/с (от -80 до -77 м/с). На 50° ю.ш., что соответствует среднеширотному джету на верхней границе облаков, зональная скорость снова возрастает на 6 м/с по абсолютной величине (от -76 до -70 м/с).

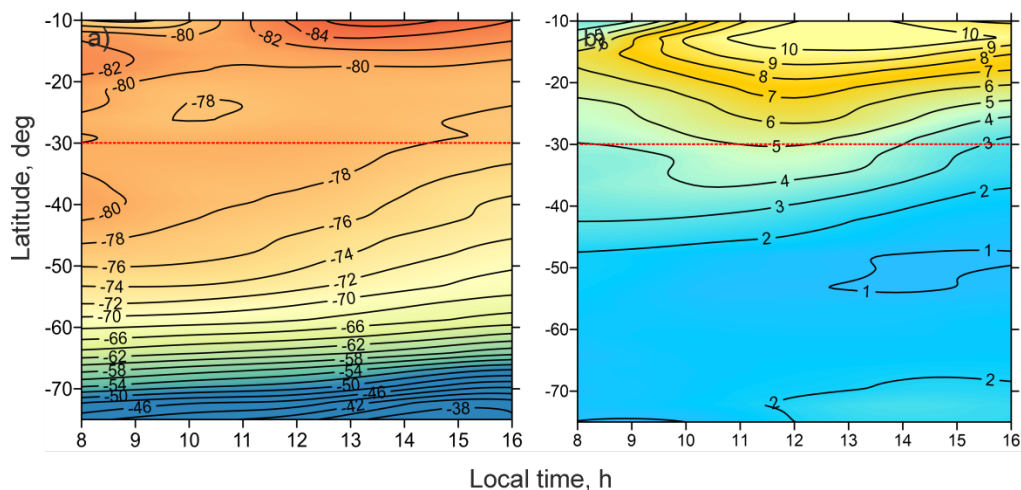


Рисунок 1 Суточные вариации средней зональной (а) и меридиональной (б) компонент скорости, полученных по изображениям в видимом (513 нм) канале. Красная пунктирная линия указывает на широту 30° ю.ш. (Khatuntsev et al., 2022)

Зональная циркуляция. В видимом канале (513 нм) VMC наблюдала слой облаков, расположенный между слоем, наблюдаемым в ближнем ИК (55 ± 2 км), и слоем на верхней границе облаков (70 ± 2 км), видимом в УФ (365 нм). В видимом канале также имеет место периодическое увеличение количества деталей облачного покрова, коррелирующих с деталями на УФ изображениях при одновременном росте средней зональной скорости ветра.

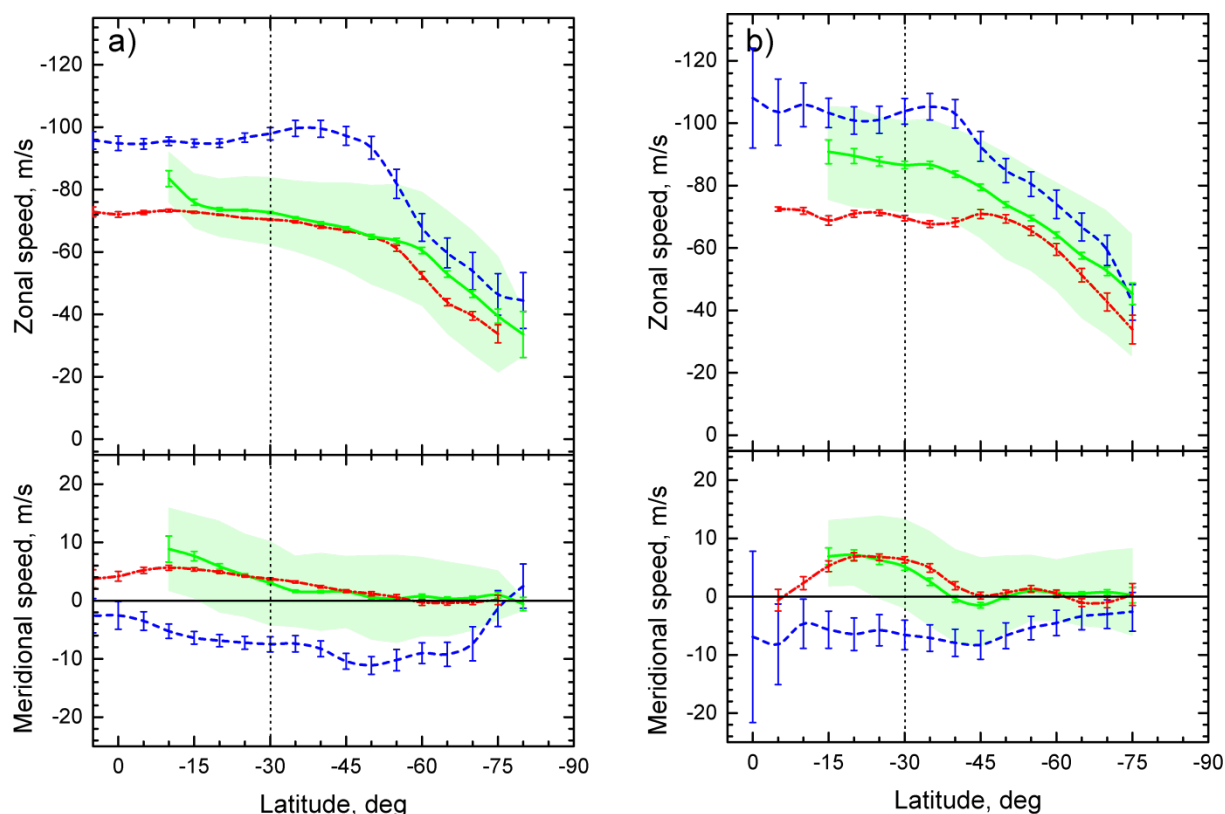


Рисунок 2. Средние широтные профили скорости ветра в первой (а) и второй (б) части миссии Venus Express, зональная (вверху) меридиональная (внизу). Планки ошибок соответствуют 99,6% ($3 \cdot \sigma_x$) доверительный интервал; затененные цветом области соответствуют стандартным отклонениям σ (Khatuntsev et al., 2022).

Рисунок 2 иллюстрирует различия в скоростях потока, полученных в первой и второй половинах миссии Venus Express. Два подмножества демонстрируют разный характер широтных профилей ветра. В первой, «медленной» части средние зональные скорости, полученные по видимому и ближнему ИК-каналам, практически совпадают (Рисунок 2а). Это говорит о том, что слои, наблюдаемые на изображениях в ближнем ИК и видимом диапазонах, совпадают по высоте в пределах ~ 1 км. Во второй, «быстрой», части разница скоростей составляет около 17 м/с, что свидетельствует о значительной разнице высот, $\sim 8,5$ км, между слоями, наблюдаемыми в видимом и ближнем ИК-каналах. Практически совпадающие меридиональные компоненты для обоих подмножеств, вероятно, говорят о постоянстве меридиональной скорости в пределах высот, наблюдаемых в видимом и ближнем ИК-каналах, что согласуется с измеренным спускаемым аппаратом «ВЕГА» вертикальным профилем меридиональной скорости на широте 30° ю.ш. (Рисунок 3). Увеличение высоты слоя, наблюдаемого в видимом канале, во второй половине миссии говорит о появлении дополнительного источника поглощения.

Меридиональная циркуляция. Средний широтный профиль меридиональной скорости ветра, полученный по изображениям видимого канала (Khatuntsev et al., 2022), указывает на перенос атмосферных масс от Южного полюса к экватору во всем интервале широт на дневной

стороне. Пик средней меридиональной скорости ветра приходится на $\sim 10^\circ$ ю.ш. $+9,4 \pm 1,3$ м/с ($\sigma = 7,0$ м/с), а затем постепенно уменьшается до $+1,1 \pm 0,1$ м/с ($\sigma = 7,4$ м/с) на 50° . -55°C . Далее к полюсу меридиональная составляющая возрастает до $+2 \pm 0,2$ м/с ($\sigma = 5,5$ м/с).

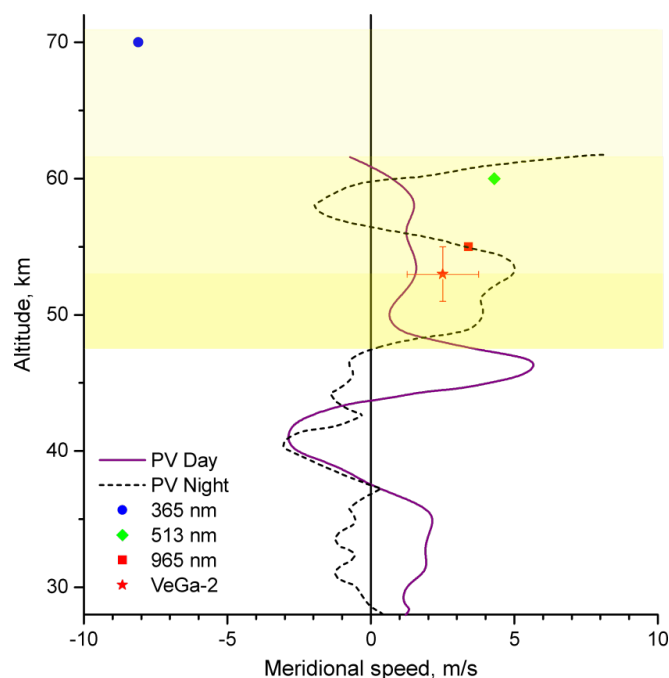


Рисунок 3 Сравнение полученных по изображениям VMC (синий, зеленый, красный значки) меридиональных скоростей в Южном полушарии с данными посадочного модуля Pioneer Day (фиолетовая линия) и модуля Night (штриховая линия), а также измерений скорости ветра, полученных с помощью аэростата ВЕГА-2 (звезда с планками погрешности), Положительный/отрицательный знак меридионального ветра соответствует направлению скорости к экватору/полюсу (в южном полушарии). Заштрихованная желтая область иллюстрирует облачный слой (Khatuntsev et al., 2022).

Меридиональная скорость ветра, полученная по изображениям VMC в УФ (365 нм), видимом (513 нм) и ближнем ИК (965 нм) диапазонах, хорошо согласуется с измерениями меридиональной скорости, выполненными с помощью посадочных зондов Pioneer Venus Day и Night, которые совершили посадку примерно на 30° ю.ш., а также с измерениями меридионального ветра, полученного по слежению за дрейфом аэростата ВЕГА-2, пересекшего как дневную, так и ночную сторону вблизи 7° ю.ш. (Рисунок 3). Меридиональные ветры, полученные из изображений VMC, указывают на перемещение атмосферных масс в направлении экватора как внутри верхнего облачного слоя и на высотах, соответствующих верхней части среднего облачного слоя (62-55 км), так и на меридиональный ветер в направлении полюса на верхней границе облаков. Такое меридиональное поле ветра предполагает следующие два возможных режима циркуляции: ячейка Хэдли, охватывающая примерно верхнюю часть облачного слоя (70-57 км), ветвь, направленная полюсу в области верхней границы, и возвратная ветвь к экватору – в области нижней границы верхнего облачного слоя. Среднеширотный джет, связанный с ячейкой Хэдли, наблюдается на широте 50 - 60° ю.ш.

Термический прилив, проявляющийся в зависимости скорости ветра от местного времени на верхней границе облаков (УФ), ослабевает с глубиной облачного слоя (слабые максимумы, наблюдающиеся после полудня в зональной и меридиональной скорости, вероятно, связаны с солнечным приливом). Таким образом, обнаружено проявление влияния обоих режимов циркуляции на динамику атмосферы в облачном слое Венеры.

Долговременные вариации скорости ветра. В силу орбитальных причин наблюдения VMC сгруппированы по «сезонам» наблюдений. Длительность «сезона» совпадает с венерианским годом (224.7 земных суток).

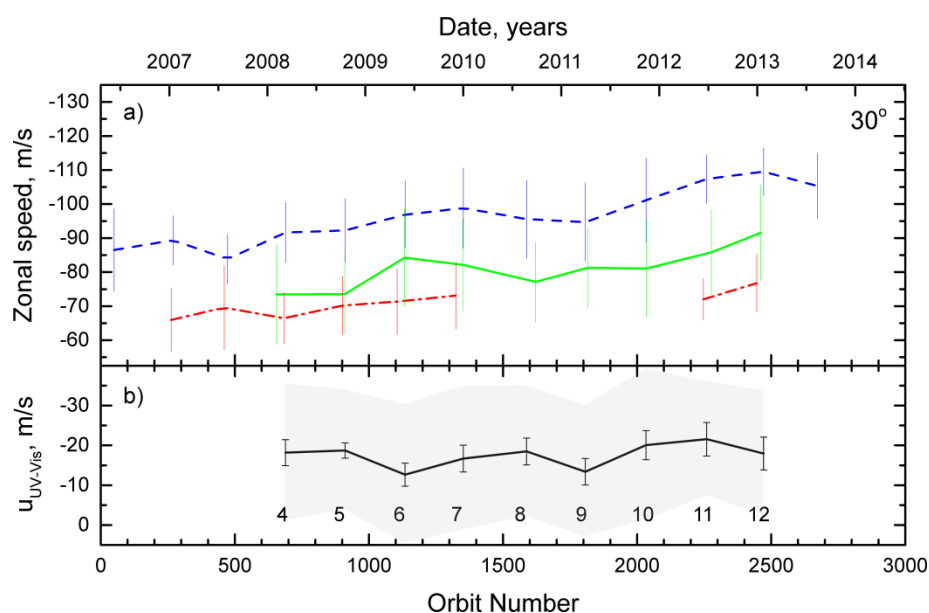


Рисунок 4 Долговременные вариации средней зональной скорости ветра на широте $30 \pm 5^\circ$ ю.ш.: а) УФ (синий), видимый (зеленый) и ближний ИК (красный). Погрешности соответствуют стандартным отклонениям σ ; б) разница между средними зональными скоростями, полученными по УФ и видимому каналам. Цифры обозначают «сезоны» наблюдений (венерианский год). Планки погрешностей соответствуют 99,6% доверительному интервалу ($3 \cdot \sigma_{\bar{x}}$). Затененная область соответствует стандартным отклонениям σ (Khatuntsev et al., 2022).

Чтобы минимизировать эффекты, связанные с тепловыми приливами, в исследовании была использована широтная полоса $30 \pm 5^\circ$ ю.ш. На этой широте колебания зональной скорости из-за солнечно-связанных эффектов не превышают 3 м/с, что значительно слабее многолетних вариаций. На широте $30 \pm 5^\circ$ ю.ш. покрытие измерениями максимально для всех «сезонов» наблюдения. Рисунок 4а демонстрирует долговременные вариации средней за венерианский год зональной компоненты скорости ветра для трех каналов VMC: УФ, видимого и ближнего ИК. Зеленая линия соответствует видимому каналу. Средняя зональная скорость изменяется от $-73,0 \pm 1,8$ м/с ($\sigma = 15,1$ м/с) в 2008 г. (сезон наблюдений № 4) до $-91,5 \pm 1,4$ м/с ($\sigma = 14,1$ м/с) в 2013 г. (сезон наблюдений №12), что свидетельствует о явном ускорении зонального потока на 18,5 м/с за 8 венерианских лет (Рисунок 4а). Соответствующие стандартные отклонения σ составили 10-15 м/с.

Амплитуда вариаций скорости растет с высотой наблюдаемого слоя, т.е. от ближнего ИК к УФ каналу. Тренд скорости немонотонный: он имеет несколько ярко выраженных относительно краткосрочных минимумов, не коррелирующих между каналами. Изображения в ближнем ИК-диапазоне не имеют непрерывного покрытия, подходящего для отслеживания ветра; поэтому на 30° ю.ш. запись ветра в ближнем ИК-диапазоне имеет пробелы. Данные УФ и видимого канала обеспечивают непрерывное покрытие для 4-12 «сезонов» наблюдений, т.е. 8 венерианских лет. Мы взяли разницу между средней зональной скоростью в УФ и видимом каналах за венерианский год, чтобы исследовать возможные «биения» между слоями (Рисунок 4b). Обнаружены долговременные квазипериодические колебания с четкими минимумами на наборах данных №6 (орбита №1100), №9 (орбита №1800) и, возможно, №12 (орбита №2500). Период колебаний составляет около 3 венерианских лет (674,1 земных дня) с амплитудой около 10 м/с.

Причины обнаруженных «биений» не ясны. Одна из причин может быть связана с поглощением УФ-излучения в видимом спектральном канале (513 ± 25 нм) или наличием дополнительных неизвестных поглотителей на верхней границе облаков. Не исключено, что мы наблюдаем в атмосфере Венеры аналог квазидвухлетних колебаний в атмосфере Земли.

Результаты, представленные в данном разделе, получены в 2022 году и опубликованы в журнале *Journal of Geophysical Research. Planets*:

Khatuntsev, I.V.; Patsaeva, M.V.; Zasova, L.V.; Titov, D.V.; Ignatiev, N.I.; Gorinov, D.A.; Turin, A.V. Winds From the Visible (513 nm) Images Obtained by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express. // *J. Geophys. Res. Planets* – 2022 – vol. 127 – e2021JE007032. <https://doi.org/10.1029/2021JE007032>.

2.2 Циркуляция нижнего облачного слоя атмосферы Венеры на ночной стороне по данным прибора IR2 проекта «Акацуки»

Изображения облачного покрова Венеры на ночной стороне в инфракрасных «окнах прозрачности» позволяют увидеть их структуру на различных уровнях высот. В настоящей работе были использованы изображения на длине волны 1,74 мкм, полученные ИК-камерой IR2 космического аппарата «Акацуки» Японского космического агентства. Эти данные соответствуют нижнему облачному слою Венеры. Было обработано полное количество изображений, полученных IR2 за всё время работы (в течение 2016 года).

По перемещениям облачных деталей были рассчитаны горизонтальные скорости ветра и построены карты распределения зональной и меридиональной компонент (Рисунок 5). Обнаружены вариации обеих компонент с местным временем и широтой. В частности, к экватору зональная скорость растет до 80 м/с при средней скорости в средних широтах 60 м/с.

Меридиональный поток направлен на юг в северном полушарии и на «вечерней» части южного полушария до средних широт, и наоборот, направлен на север в южном полушарии и «утренней» части северного полушария. Проведён анализ короткопериодических вариаций скорости ветра, а также сравнение результатов с результатами предыдущих миссий, в особенности, «Венеры-Экспресс».

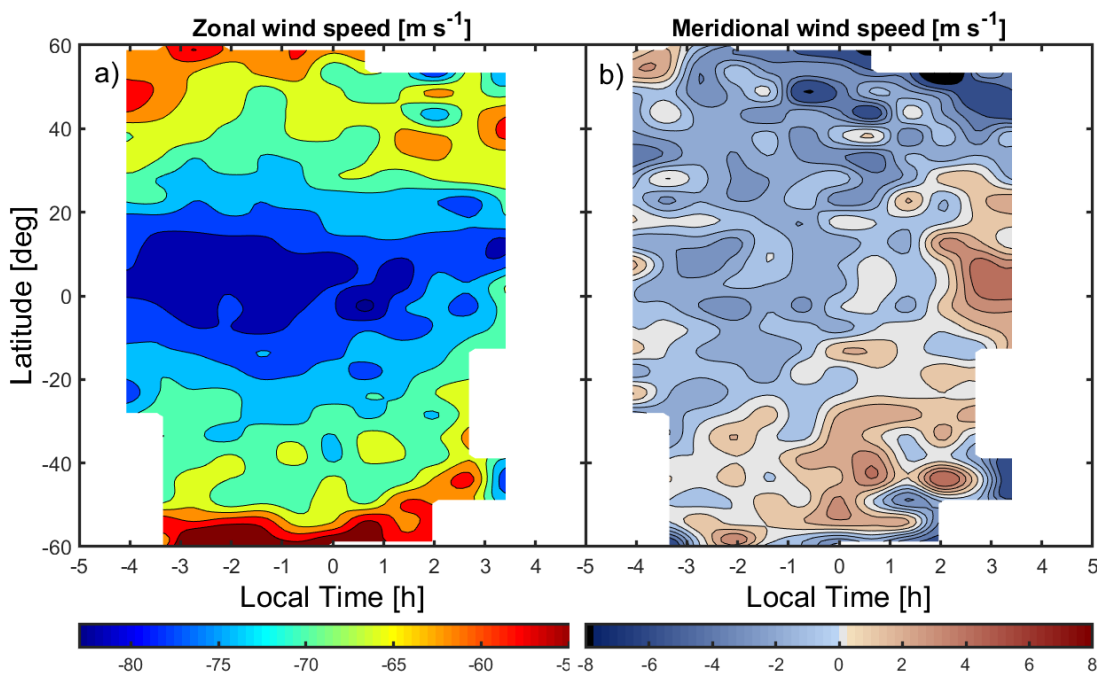


Рисунок 5 (а) Распределение зональной скорости в координатах местное время – широта (б) Распределение меридиональной скорости в координатах местное время – широта. Результат обработки изображений IR2, последующего расчета скоростей ветра и взвешенного усреднения по всему периоду наблюдений.

2.3 Выбор места посадки посадочного аппарата «Венера-Д». Геологически молодые поверхности.

Идентификация вулканически активных областей на Венере важна для решения фундаментальных задач проекта «Венера-Д», связанных с эволюцией поверхности и атмосферы. Анализ состава поверхности таких областей также способен дать информацию о составе мантии Венеры.

Предыдущие исследования показали, что присутствие диэлектрических материалов в составе поверхности увеличивает ее отражающую способность для орбитального радара. При этом, согласно моделям, диэлектрические материалы могут формироваться при химическом взаимодействии атмосферы и поверхности. Таким образом, диэлектрические измерения являются своего рода «хронометром» для определения возраста поверхности.

Для планируемых миссий, в т.ч. «Венеры-Д», таким образом, важна синергия орбитальных (радарных и оптических в ИК-диапазоне) и *in situ* измерений (с помощью ПМ в месте посадки). С научной точки зрения возрастает важность посадки на геологически молодой

вулканической поверхности. Примером такой поверхности (а также наиболее молодой известной нам поверхности на Венере, возраст которой оценивается в 10^0 – 10^3 лет) являются склоны вулкана Идунн области Имд в средних широтах южного полушария.

В качестве земного аналога подобного типа венерианского рельефа приведен вулкан Этна (Рисунок 6). Склоны Этны пригодны в качестве испытательной поверхности для отработки технологии посадки, а также бурения поверхности, забора и анализа грунта.

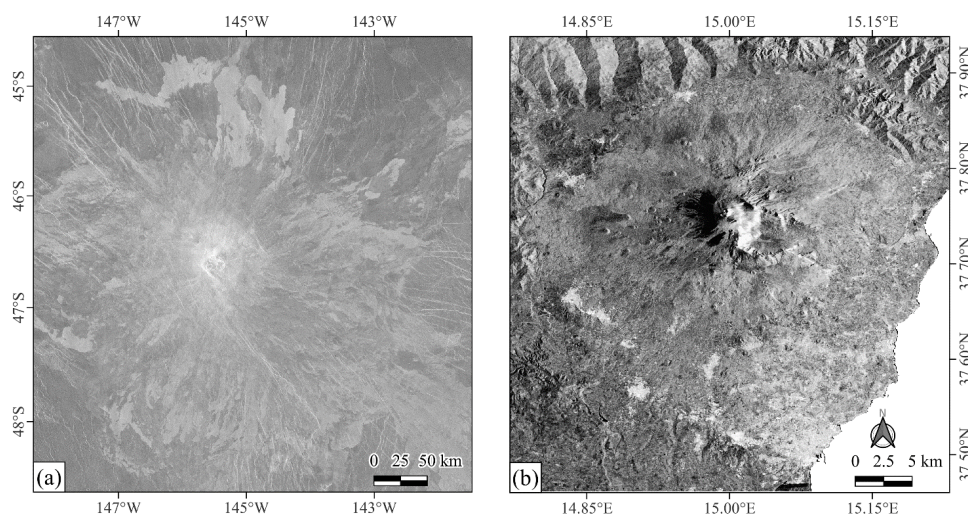


Рисунок 6 (а) Топографическая карта венерианского вулкана Идунн (46° ю.ш., 146° з.д.) по данным аппарата «Магеллан» с линейным разрешением ~75 м. (b) Топографическая карта земного вулкана Этна (37,75° с.ш., 14,99° в.д.) по данным аппарата «Сентинел-1» с линейным разрешением ~75 м.

Результаты, представленные в данном разделе, получены в 2022 году и опубликованы в журнале *Geophysical Research Letters*:

D’Incecco, P., Filiberto, J., López, I., Eggers, G. L., Di Achille, G., Komatsu, G., **Gorinov, D.A.**, Monaco, C., Aveni, C., Mari, N., Mastroguseppe, M., Cardinale, M., El Yazidi, M. Geologically recent areas as one key target for identifying active volcanism on Venus. *Geophysical Research Letters* – 2022 – 49, e2022GL101813. <https://doi.org/10.1029/2022GL101813>.

3 Заключение

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2022 г. по теме «ВЕНЕРА-Д — научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера».

- Камера VMC («Венера-Экспресс»): получены новые результаты, касающиеся динамики облачного слоя Венеры на основе измерений в трех спектральных диапазонах (использовано дополнительно 250000 векторов скорости в видимом канале), которые позволяют зондировать три высотных уровня в облачном слое:

- 1) Впервые отождествлена ячейка Хэдли в верхнем облачном слое, положение обеих ветвей (прямой – горизонтальный поток направлен к полюсу) и возвратной – к экватору, а также среднеширотный джет, связанный с ячейкой.
- 2) В зависимости скорости ветра от местного времени проявляются термические приливы в виде послеполуденных максимумов. Интенсивность падает с глубиной в облачном слое.
- 3) Вариация поглотителей в облачном слое, зависимость от солнечного цикла: усиление поглощения в видимом канале приводит к подъему наблюдаемого слоя во второй половине миссии (максимум солнечной активности) на 8 км по сравнению с первой половиной (минимум солнечного цикла).
- 4) Зависимость горизонтального ветра от рельефа поверхности через орографические волны, которые генерируются при обтекании атмосферным потоком горных массивов, наиболее ярко проявляется на верхней границе облаков (УФ) и верхней границе среднего облачного слоя (ближний ИК).
- 5) В результате рассмотрения всей последовательности данных VMC были обнаружены колебания разности зональной скорости ветра между слоями, наблюдаемыми в УФ и видимом канале, с периодом 3 года.

- Камера IR2 («Акацуки»): получено распределение средних зональной и меридиональной скоростей на ночной стороне за все время наблюдений. Проведен анализ короткопериодических вариаций и зависимостей от местного времени и широты, проведено сравнение с результатами аналогичных измерений предыдущими миссиями.

- Для выбора места посадки ПМ «Венера-Д» предложены молодые вулканические поверхности, примером которых является вулкан Идунн в возвышенной области Имд. Совместные спектральные измерения с орбиты (дистанционно) и с поверхности (непосредственно образца грунта) способны качественно решить ряд научных задач проекта,

таких как определение внутреннего строения Венеры и эволюция климата. В качестве ближайшего земного аналога для отработки технологии посадки и забора образцов грунта предложен вулкан Этна.

4 Список использованных источников

4.1 Список публикаций

Всего научных публикаций в 2020 г: 2

- Число публикаций работников в базе Web of Science: 2
- Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 1
- Статьи в зарубежных изданиях: 2
- Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 0
- Статьи в сборниках материалов конференций: 2
- Доклады, тезисы, циркуляры: 9
- Статьи в научно-популярных изданиях: 0
- Другие издания: 1

4.2 Статьи в зарубежных изданиях

1. Khatuntsev, I.V., Patsaeva, M.V., Zasova, L.V., Titov, D.V., Ignatiev, N.I., Gorinov D.A., Turin, A.V. Winds From the Visible (513 nm) Images Obtained by the Venus Monitoring Camera Onboard Venus Express // Journal of Geophysical Research: Planets – 2022 – Volume 127, Issue 4, article id. e07032. <https://doi.org/10.1029/2021JE007032>
2. D’Incecco, P., Filiberto, J., López, I., Eggers, G. L., Di Achille, G., Komatsu, G., Gorinov, D.A., Monaco, C., Aveni, C., Mari, N., Mastrogiuseppe, M., Cardinale, M., El Yazidi, M. Geologically recent areas as one key target for identifying active volcanism on Venus. Geophysical Research Letters – 2022 – 49, e2022GL101813. <https://doi.org/10.1029/2022GL101813>

4.3 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

4.4 Статьи в сборниках материалов конференций

1. Хатунцев И.В., Пацаева М.В., Титов Д.В., Засова Л.В., Игнатьев Н.И., Горинов Д.А. Двенадцатилетний цикл в циркуляции атмосферы Венеры на верхней границе облаков по данным УФ наблюдений VMC/Venus Express и UVI/Akatsuki // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С.253. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

2. Горинов, Д.А., Засова, Л.В. Циркуляция нижнего облачного слоя атмосферы Венеры на ночной стороне по данным прибора IR2 проекта "Акацуки" // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2022. С.238. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

4.5 Доклады, тезисы, циркуляры

1. Khatuntsev, I.V., Zasova, L.V., Patsaeva, M.V., Titov, D.V., Ignatiev, N.I., Gorinov D.A., Turin, A.V. Wind tracking from the visible (513 nm) images obtained by VMC/VEX // 44th COSPAR Scientific Assembly / 16-24.07.2022, Abstract B4.1-0035-22 (oral)
2. Gorinov D.A., Zasova, L.V., Khatuntsev, I.V. Winds in the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 um Images // 44th COSPAR Scientific Assembly / 16-24.07.2022, Abstract B4.1-0005-22 (oral)
3. Zelenyi, L., Zasova, L., Korablev, O., Sedykh, O., Gorinov, D. The Venera-D mission for comprehensive study of Venus // 44th COSPAR Scientific Assembly / 16-24.07.2022, Abstract B4.1-0027-22
4. Port, S. T., Bhattacharya, A., Dattani, S., Eubanks, M., Gregg, T. K. P., Kriuchkova, M., Mckaig, J., Punt, N., Gorinov, D., Cordova, J. A., Economou, T., Jessup, K. L., Limaye, S. S., Milojevic, T., Ocampo, A., Treiman, A. H., Voytek, M. A., Zasova, L. Venera-D: Venus Cloud Habitability System Workshop // 53rd Lunar and Planetary Science Conference, 7-11.03.2022, The Woodlands, Texas. No. 2678, 2022, id.1259
5. M.V. Patsaeva, I.V. Khatuntsev, N.I. Ignatiev, D.V. Titov, L.V. Zasova, A.V. Turin, D.A. Gorinov. From VMC/Venus Express to UVI/Akatsuki. Long-term and longitude variations of zonal wind speed at the cloud top level near noon // The Thirteenth Moscow Solar System Symposium / 10-14.10.2022, 13MS3-VN-PS-02, Abstract book, p. 342.
https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
6. I.V. Khatuntsev, M.V. Patsaeva, L.V. Zasova, D.V. Titov, N.I. Ignatiev, D.A. Gorinov, A.V. Turin. Winds from the visible (513 nm) images obtained by the Venus Monitoring Camera onboard Venus Express // The Thirteenth Moscow Solar System Symposium / 10-14.10.2022, 13MS3-VN-PS-01, Abstract book, p. 340.
https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
7. P. D'Incecco, R. Ghail, L.V. Zasova, J. Filiberto, D.A. Gorinov, I. Lopez, G. Di Achille, M. Mastrogiuseppe, S. Aveni, G.L. Eggers, G. Komatsu, C. Monaco, N. Mari, M. Blackett, M. Cardinale, A. Martynov. Idunn Mons as the landing site of the Venera-D mission: scientific relevance and possible operational tests on Mount Etna // The Thirteenth Moscow Solar

System Symposium / 10-14.10.2022, 13MS3-VN-07, Abstract book, p. 317-318.

https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf

8. D.A. Gorinov, L.V. Zasova, I.V. Khatuntsev. Winds in the lower cloud level on the nightside of Venus from IR2 (Akatsuki) 1.74 μm images // The Thirteenth Moscow Solar System Symposium / 10-14.10.2022, 13MS3-VN-08, Abstract book, p. 319.
https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf
9. L.M. Zelenyi, L.V. Zasova, O.I. Korablev, O.Yu. Sedykh, N.A. Eismont, M.V. Gerasimov, D.A. Gorinov, N.I. Ignatiev, D.V. Strelnikov. The Venera-D mission: progress in study // The Thirteenth Moscow Solar System Symposium / 10-14.10.2022, 13MS3-VN-10, Abstract book, p. 322. https://ms2022.cosmos.ru/docs/2022/13-MS3_BOOK_final.pdf

4.6 Другие издания

1. Venera-D: Venus Cloud Habitability System Workshop – Workshop Report // Space Science Research Institute (IKI), Russian Academy of Science, Roscosmos and NASA, 2022. <https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/Venera-D-Workshop-2021-Final-Report.pdf>