

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 АААА-А18-118052890092-7

УТВЕРЖДАЮ

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



А.А. Петрукович

« 18 » декабря 2020 г.

М.П.

### ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Миссия для комплексного исследования поверхности, атмосферы  
и окружающей плазмы Венеры  
(промежуточный)

Тема: Венера-Д

0028-2019-0002

Научный руководитель,  
академик РАН

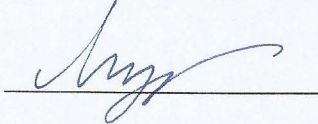
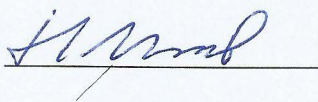
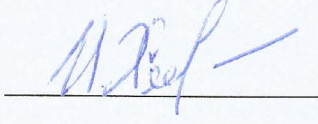
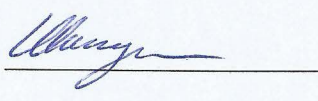
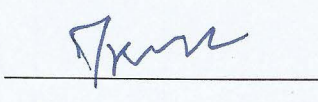
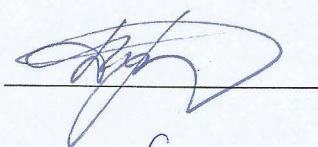
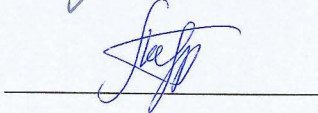
« 18 » декабря 2020 г.

Л.М. Зелёный

Москва

2020

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зам. Руководителя	18.12.2020		Засова Л.В. в.н.с., д.ф.-м.н.	Введение, Заключение, разделы 2, 3
	18.12.2020		Игнатьев Н.И. с.н.с., к.ф.-м.н.	Разделы 2, 3, 5
	18.12.2020		Хатунцев И.В. с.н.с., к.ф.-м.н.	Разделы 2, 3, 5
	18.12.2020		Шакун А.В. н.с., к.ф.-м.н.	Раздел 3
	18.12.2020		Пацаев Д.В. н.с.	Раздел 3
	18.12.2020		Горинов Д.А. м.н.с.	Разделы 2, 3, 5
	18.12.2020		Пацаева М.В. м.н.с.	Разделы 2, 5

## РЕФЕРАТ

Настоящий документ содержит отчет о научно-исследовательской работе по теме 0028-2020-0002 «Венера-Д. Настоящий документ содержит отчет о научно-исследовательской работе по теме 0028-2019-0002. «Венера-Д» — совместный с НАСА космический комплекс для исследования поверхности, атмосферы, внутреннего строения и окружающей плазмы Венеры». Целью работы является

1) дальнейшая проработка научной концепции проекта исследования планеты Венера с учетом результатов работы в рамках международной кооперации, в частности, Объединенной научной рабочей группы (ОНРГ) ИКИ/Роскосмос–НАСА по проекту «Венера-Д». На основе выводов совещаний в ИКИ рабочей группы «Выбор места посадки для проекта Венера-Д» и «Возможная обитаемость облачного слоя Венеры», проведенных ОНРГ в ИКИ опубликован отчет. Тема обитаемости облаков Венеры является актуальной, в связи с наличием необходимых и достаточных условий для существования микробной жизни в облаках Венеры, в связи с возможным обнаружением фосфина — биомаркера, и простейшей аминокислоты — глицина, распространенного в межзвездной среде. Микроорганизмы могут существовать в среде среди сернокислотного аэрозоля в облаках, они могут поддерживать свое существование, поглощая CO<sub>2</sub>, образующуюся при окислении серо- и железосодержащих компонентов, стационарные гравитационные волны от поверхности поддерживают их существование на определенной высоте, некоторые классы бактерий имеют полосы поглощения в УФ-области спектра, могли бы объяснить природу «неизвестного» УФ-поглопителя. Предложены, сформулированы и обоснованы научные задачи для двух малых спутников в точках Лагранжа L1 и L2. Прорывные задачи связаны с одновременным мониторингом дневной и ночной стороны, изучением распределения и вариации УФ-поглопителя, возможно связанного с проблемой жизни в облаках Венеры;

2) продолжение научных фундаментальных исследований связанных с обработкой и интерпретацией данных предыдущих миссий, с использованием новых алгоритмов для улучшения данных для получения новой информации о Венере и ее атмосфере, важных для постановки и уточнения научных задач; организации и участия в международных конференциях по проблемам Венеры для привлечения международного сообщества ученых и специалистов к обсуждению научных задач и экспериментов проекта «Венера-Д».

Получены новые оригинальные результаты:

- Показано, что влияние рельефа Земли Афродиты на скорость зонального ветра на верхней границе облачного слоя Венеры проявляется в периодическом ускорении и замедлении горизонтального потока над этим горным массивом (по данным VMC и UVI Акацуки);
- В результате измерений скорости ветра в канале 1.74 мкм (по данным VIRTIS) в области нижнего облачного слоя на высотах 44-50 км обнаружена подоблачная ячейка Хэдли (до сих пор экспериментально известна была только одна, хотя теория допускает существование нескольких ячеек);
- Обнаружено влияние рельефа поверхности на динамику нижнего облачного слоя по измерениям в канале 1.74 мкм. Наблюдалось замедление зонального ветра, связанное с вулканом Имдр. Эта область отличается наличием молодой лавы, а также избыточным потоком теплового излучения.

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

Номер государственной регистрации - АААА-А18-118052890092-7. Отчет содержит 20 страниц, 5 рисунков, 12 источников.

Ключевые слова: ВЕНЕРА, ПЛАНЕТА, АТМОСФЕРА, ПОВЕРХНОСТЬ, ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ, ПЛАЗМА, ДИНАМИКА, СУПЕРРОТАЦИЯ, ПРОЕКТ «ВЕНЕРА-Д», НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ, ДОРОЖНАЯ КАРТА, КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ, ОНРГ, ОРБИТА, СВЕЧЕНИЕ, СПЕКТРОСКОПИЯ.

## Содержание

Список сокращений.....	6
1 Введение.....	7
2 Венера. Фундаментальные исследования.....	10
2.1 Долговременные вариации средней зональной скорости в южных экваториальных широтах по наблюдениям VMC/VEX и UVI/Akatsuki .....	10
2.2 Меридиональная циркуляция в облачном слое Венеры, ячейки Хедли .....	12
2.3 Влияние рельефа поверхности на динамику нижнего облачного слоя по измерениям в канале 1.74 мкм.....	15
3 Заключение .....	16
3.1 Новое о динамике атмосферы Венеры на основе данных VMC/Venus Express и UVI/Akatsuki .....	16
3.2 Концепция проекта «Венера-Д» .....	16
4 Список использованных источников .....	18
4.1 Список публикаций .....	18
4.2 Статьи в зарубежных изданиях.....	18
4.3 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах.....	18
4.4 Статьи в сборниках материалов конференций.....	18
4.5 Доклады, тезисы, циркуляры .....	19

## Список сокращений

AM	Атмосферный модуль
КА	Космический аппарат
ОМ	Орбитальный модуль
ОНРГ	Объединенной научной рабочей группы
ПМ	Посадочный модуль
УФ	Ультрафиолет
ESA	European Space Agency
IR2	Infrared 2
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
VIRTIS	Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer
VMC	Venus Monitoring Camera

## 1 Введение

Настоящий документ содержит отчет о результатах исследований, проведенных в 2020 г. по теме 0028-2020-0002 «ВЕНЕРА-Д». **Научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера.**

Тема 0028-2020-0002 ВЕНЕРА-Д является частью государственного задания ЧАСТЬ 2: ГОСУДАРСТВЕННЫЕ РАБОТЫ.

Гос. рег. № АААА-А18-118052890092-7

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 и картирующим спектрометром VIRTIS на орбитальном аппарате Венера-Экспресс (ESA, 2006–2015 гг.), а также камерами аппарата Акацуки» (JAXA, с 2015 г. до настоящего времени работающего на орбите вокруг Венеры). Уникальные алгоритмы, разработанные авторами для улучшения изображений 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. Зональная суперротация — основной режим циркуляции атмосферы Венеры, атмосфера вращается с востока на запад со скоростью, которая на верхней границе облаков (100 м/с) превышает в 60 раз скорость вращения поверхности. На предыдущих этапах работы было обнаружено влияние рельефа поверхности, особенно больших материковых возвышенностей Земли Афродиты, на динамику верхнего облачного слоя Венеры, а именно замедление скорости ветра, связанное с горным массивом. На настоящей стадии исследования показано, что влияние горного массива проявляется в периодической смене замедления скорости ветра ускорением. Меридиональная циркуляция, согласно теории, организована в виде ячеек Хедли, прямых и обратных. Прямая ячейка Хедли, где движение атмосферных масс на уровне верхней границы облаков, поднимающихся на экваторе, направлено в сторону высоких широт, где поток опускается, наиболее точно описана в наших предыдущих работах по UV наблюдениям. Были также определены уровни в средней атмосфере, где поток возвращается к экватору. Таким образом, измерения меридиональных скоростей, на трех уровнях по высоте в облачном слое, обнаруживают существование прямой ячейки Хедли, относящихся к облачному слою Венеры

на дневной стороне Венеры и позволяют определить высоту уровней, принадлежащих облачной ячейке.

На длине волны 1.74 мкм, где эффективный уровень излучения на ночной стороне Венеры соответствует высоте нижнего облачного слоя и несколько глубже, были измерены зональные и меридиональные скорости ветра. В этой области высот в поле зональных скоростей выявлен рост скорости ветра в экваториальной области, с одновременным изменением направления меридиональной скорости (к полюсу). В средних широтах меньшие зональные скорости ветра (говорят о более низком уровне в атмосфере, чем в экваториальной области) наблюдаются одновременно с противоположным направлением меридиональной скорости (к экватору). Вблизи нижней границы облачного слоя наблюдаются фрагменты подоблачной прямой ячейки Хедли. Подоблачная ячейка Хедли наблюдалась впервые.

Было обнаружено замедление скорости ветра над областью Имдр (46.5°S/214.5°E). Эта область — молодое в геологическом плане возвышение, самая известная вулканическая структура которого, Идунн Монс, свидетельствует о недавней активности. Кроме того, используя данные VIRTIS на борту Venus Express, Smrekar et al. (2010) выявили наличие относительно высоких аномалий излучательной способности поверхности на 1 мкм над вершиной и восточным склоном Идунн Монс. Поэтому можно ожидать воздействие вулкана на состояние подоблачной атмосферы и циркуляцию нижнего облачного слоя.

**2. Научное обоснование и концепция международной флагманской миссии для изучения Венеры на основе проекта «Венера-Д».** Целью проекта «Венера-Д» — совместной с НАСА миссии к Венере является исследование поверхности, атмосферы, внутреннего строения и окружающей плазмы. Венера покрыта облачным слоем, 20 км толщиной, без разрывов, поэтому наблюдения подоблачной атмосферы и поверхности затруднены. Для решения ключевых научных задач проекта, связанных с происхождением и эволюцией планеты, ответить на вопрос почему столь разительно отличается от Земли ее сестра-близнец, на каком этапе эволюции пути планет-сестер разошлись, необходимы прямые измерения в атмосфере и на поверхности. Три категории прямых измерений включены в проект «Венера-Д»: 1) прямые измерения с аэростатного зонда, дрейфующего в атмосфере; 2) измерения сложными приборами, установленными внутри и снаружи гермоконтейнера в течение 2 часов на поверхности, включая бурение, забор грунта и изучение его приборами внутри гермоконтейнера; 3) измерения долгоживущими на поверхности станциями для сейсмических и атмосферных исследований. Продолжалось детальное изучение научных задач проекта Венера-Д, возможности различных инструментов для решения этих задач научное обоснование экспериментов и включения новых элементов миссии. Было предложено при доставке



космического аппарата к Венере вывести два малых спутника (субспутника) в точки Лагранжа L1 и L2 системы Солнце-Венера. Установленные УФ и ИК камеры позволяют решать прорывные задачи связанные с непрерывным мониторингом состояния облачного слоя одновременно на дневной и ночной стороне ультрафиолетовыми и инфракрасными камерами. соответственно, изучение метеорологии, поведение УФ контрастов, возможной их биологической природы. Плазменные научные задачи для таких аппаратов заключаются в координированном измерении магнитного поля и потоков заряженных и нейтральных частиц вместе с приборами, установленными на основном орбитальном модуле (ОМ), изучения космической погоды у Венеры. Доставка малого спутника осуществляется при помощи торможения космического аппарата в перицентре подлетной гиперболы. Допустимая масса каждого малого спутника — 50 кг, срок активного существования — 3 года. Эти спутники позволяют решать прорывные задачи, путем одновременного мониторинга дневной и ночной стороны Венеры.

Проработаны сценарии миссии для дат запуска 2026, 2029 и 2031 гг. Для каждой из дат рассчитаны массы космического аппарата, которые удастся доставить к Венере, подлетные скорости и другие орбитальные характеристики. Проведен анализ достижимости точек посадки на поверхности Венеры в зависимости от даты запуска. При этом возможно достижение областей в высоких широтах Северного полушария, что согласуется с предварительным выбором мест посадки Объединенной научной группой (наличие равнин, безопасных для посадки и состоящих из репрезентативных пород). Показана реализуемость вывода орбитального модуля на высокоэллиптическую орбиту с перицентром над Южным полюсом при условии поддержки непрерывной связи с посадочным модулем в течение его срока активной службы, а также с долгоживущими станциями на поверхности в течение 60–120 дней.

Постановка и решение научных задач проекта Венера-Д имеет целью не только получения фундаментальных знаний о и Венере, но и изучение условий на поверхности и в атмосфере, климата и погоды для обеспечения будущих миссий, целью которых может быть доставка на Землю образцов атмосферы и грунта Венеры.

## 2 Венера. Фундаментальные исследования

### 2.1 Долговременные вариации средней зональной скорости в южных экваториальных широтах по наблюдениям VMC/VEX и UVI/Akatsuki

В верхнем облачном слое Венеры присутствует неизвестный УФ поглотитель, благодаря которому детали облачного покрова Венеры на высоте  $70 \pm 2$  км имеют контрастность более 30%. Тёмные детали хорошо различимы на УФ изображениях дневной стороны планеты, полученных в спектральном канале 365 нм. По перемещению облачных деталей на изображениях, полученных камерой VMC в 2006–2013 гг. в УФ диапазоне, была получена информация о скорости горизонтального потока. При этом в УФ Khatuntsev и др. (2013) обнаружили в экваториальной области рост усредненной по венерианскому году (224 земных суток) зональной скорости, так называемый тренд, от 85 до 115 м/с.

С 2015 г. на орбите Венеры работает аппарат Akatsuki (JAXA), на борту которого установлена УФ камера UVI, получающая изображения Венеры в диапазоне 365 нм. Изображения для первых 100 орбит (2016–2018 гг.) были обработаны точно так же, как это было сделано ранее в отношении изображений VMC.

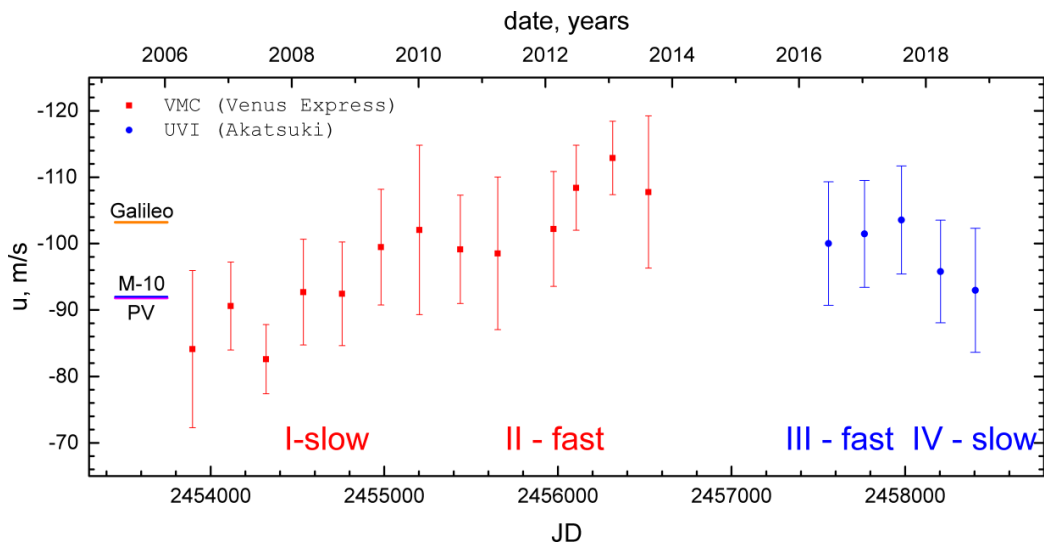


Рисунок 1. — Долговременные вариации средней зональной скорости горизонтального потока для  $20 \pm 2.5^\circ$  ю.ш. на верхней границе облаков по наблюдениям VMC на борту Venus Express (красное) и UVI на борту Akatsuki (синее) в 2006-2018 годах. Римскими цифрами обозначены условные «быстрые» (fast) и «медленные» (slow) интервалы восходящего и нисходящего ветвей тренда.

Сравнительно монотонный рост скорости в 2006-2013 гг. с 85 до 115 м/с (восходящая ветвь тренда) сменился постепенным снижением до 92 м/с в 2018 г. (нисходящая ветвь). В экваториальной области наиболее заметное влияние оказывают горные массивы материковой возвышенности Земли Афродиты, замедляя горизонтальный поток (Patsaeva et al.2019).

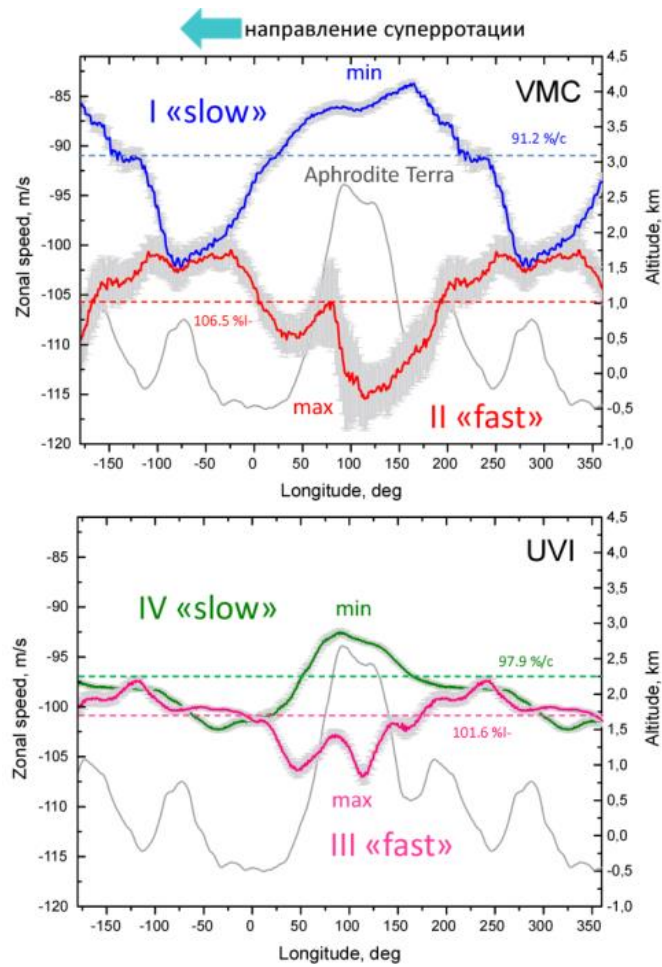


Рисунок 2. — Долготные профили средней зональной скорости ветра, построенные для «быстрых» и «медленных» интервалов. Восходящая ветвь тренда (VMC) вверху, Нисходящая ветвь (UVI) внизу. Стрелкой наверху указано направление суперротации.

Данные восходящего (VMC) и нисходящего (UVI) участков тренда были разделены пополам на условно «медленную» (интервалы I и IV, Рисунок 1) и «быструю» (интервалы II и III, Рисунок 1) фазы. В медленной фазе (I) наблюдается торможение зонального потока горным массивом, минимальные скорости наблюдаются над Землей Афродиты. Минимальная скорость ~85 м/с отличается от средней для фазы I скорости (91.2 м/с) на -7м/с. Долготный профиль зональной скорости ветра повторяет контуры рельефа подстилающей поверхности. В быстрой фазе (II) наблюдается иная картина: над областью максимальной высоты поверхности наблюдается ускорение зонального потока, а скорость зонального потока над Землей Афродиты составляет 115м/с, что на +9 м/с превышает среднюю для фазы скорость (106.5 м/с) (верхняя панель, Рисунок 2). Более короткий ряд наблюдений Акацуки также можно формально разделить на быструю (III) и медленную (IV) фазы со средними скоростями по фазе 98 м/с и 102 м/с соответственно (нижняя панель, Рисунок 2). Как и для VMC (фаза II), в «быстрой» фазе III над Землей Афродиты наблюдается ускорение зонального потока, а в «медленной» фазе IV — торможение.

## 2.2 Меридиональная циркуляция в облачном слое Венеры, ячейки Хедли

Была продолжена работа по исследованию меридиональной циркуляции в облачном слое Венеры. Данные по динамике атмосферы, полученные из спектральных изображений VIRTIS-M ночной стороны планеты в окне прозрачности 1.74 мкм, дают информацию о динамике нижнего яруса облаков на высотах ~48 км.

Признаки восходящей к полюсам ячейки Хедли наблюдаются в нижнем облачном слое. Рисунок 3 представляет средний широтный профиль зональной (а) и меридиональной (b) компонент скорости ветра. В диапазоне высот 44-48 км зональная скорость ветра практически постоянна и составляет -60 м/с между (участок профили между 20 и 40° ю.ш.). Скорость постепенно увеличивается при  $\varphi < 20^\circ$  ю.ш. и при  $\varphi > 40^\circ$  ю.ш. Для широт  $\varphi$  от 40 до 60° ю.ш. наблюдается увеличение скорости зонального ветра на 3-5 м/с (это типичные широты для нахождения среднеширотного джета). При  $\varphi > 60^\circ$  ю.ш. средняя зональная скорость ветра уменьшается по направлению к Южному полюсу. Средняя меридиональная скорость ветра (Рисунок 3b) положительна на широтах выше 20° ю.ш., то есть средний горизонтальный поток направлен к экватору, среднее значение меридиональной скорости составляет 1–2 м/с.

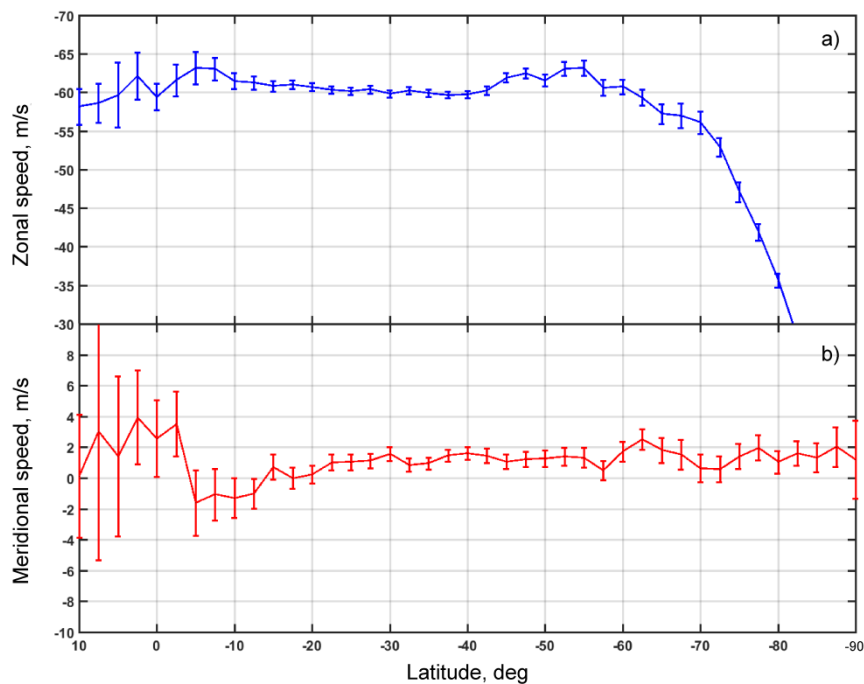


Рисунок 3. — Средние широтные профили зонального (а) и меридионального (b) компонент скорости ветра в нижнем облачном слое Венеры на ночной стороне, полученные из полного набора данных VIRTIS-M. Средние значения были рассчитаны для интервалов широты 2.5°. Ошибки указаны для доверительного интервала 99%.

В спектральных диапазонах 365 и 965 нм камера VMC позволила определить на дневной стороне планеты разницу высот уровней, на которых измерялась скорость ветра в УФ и ИК (Пацаева и др., 2019; Хатунцев и др., 2013, 2017). Эта разность высот составляет около 15

км (высоты 68-72 км в УФ и 54-58 км в ИК). Таким образом, получена возможность исследовать циркуляцию независимо на двух уровнях, которые соответствуют верхней и нижней ветвям ячейки Хедли: верхней ветви, направленной к полюсу, и нижней ветви, направленной к экватору. В спектральном окне 1.74 мкм на ночной стороне изображения позволяют увидеть структуру нижнего облачного слоя. Измерения скорости ветра на разных уровнях в атмосфере можно получить только в случае пространственного изменения строения облаков. По данным канала 1.74 мкм было обнаружено увеличение средней зональной скорости в экваториальной области (Рисунок 3а) на 3-5 м/с. Такое увеличение зональной скорости (наблюдаемое также Акацуки) обычно интерпретируется как присутствие экваториального джета. С другой стороны, известно, что скорость зонального ветра практически монотонно растет с высотой в атмосфере, и можно предположить, что увеличение скорости ветра в экваториальной области означает, что мы наблюдаем более высокие атмосферные слои. При широте  $\varphi < 20^\circ$  ю.ш. (область I) увеличение скорости зонального ветра составляет до 3-5 м/с вблизи экватора, -63 - -65 м/с. Если предположить, что вертикальный сдвиг составляет менее 1 м/с (Sánchez-Lavega et al., 2008), тогда в экваториальной области наблюдаемый слой находится примерно на 3-5 км выше, чем слой, наблюдаемый на широтах от 20 до 40° ю.ш. (область II), где зональная скорость составляет ~60 м/с.

На широтах выше 20° ю.ш., средняя меридиональная скорость ветра (Рисунок 3б) положительна, что указывает на зональный поток, направленный к экватору, и имеет среднее значение ~1 м/с. Знак меридиональной скорости изменяется на широте 20°S, знак отрицателен до области вблизи экватора, это говорит о том, что зональный поток направлен в сторону Южного полюса, (область I). Если сравнить Рисунок 3а и б, то можно заметить, что величина средней зональной скорости ветра изменяется одновременно со знаком меридиональной скорости: т.е. на широтах выше 20° ю.ш., на высоте примерно на 3 км ниже (область II) зональный поток направлен к экватору. При этом знак меридиональной скорости изменяется на широте 20° ю.ш. (область I), а меридиональный ветер меняет свое направление в сторону Южного полюса, и знак становится отрицательным для диапазона широт области I. Другими словами, разница между экваториальной областью I и среднеширотной областью II состоит в том, что в первом случае наблюдаемый уровень на несколько километров выше, чем во втором, и зональный поток в широтной области I направлен к Южному полюсу, а в области II он направляется к экватору. Мы можем предположить, что отождествляем фрагмент подоблачной прямой ячейки Хедли, так что направленная к полюсу верхняя ветвь наблюдается в области I (высота 48-50 км), а направленная к экватору нижняя возвратная ветвь в области II (высота 44-46 км).

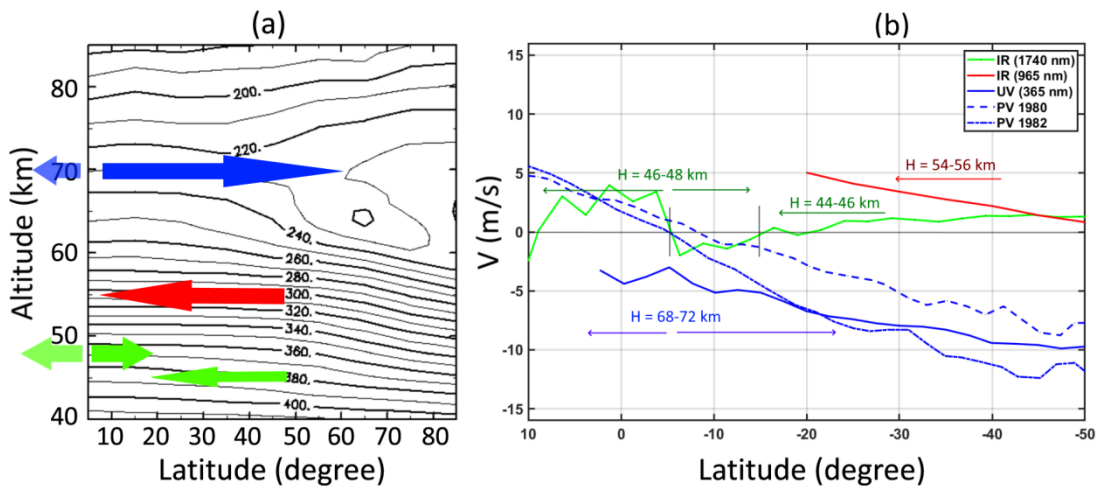


Рисунок 4. — (а) Направление меридиональной скорости ветра на различных высотах (стрелки) поверх среднего температурного поля (Ando et al., 2020) Синие стрелки – данные УФ (VMC/VEХ и Pioneer Venus), красная стрелка – ИК VMC, зеленые стрелки – 1.74 мкм VIRTIS/VEХ; (б) средние широтные профили меридионального ветра по данным различных УФ (Пионер-Венера и VMC), — синие кривые, ИК VMC – красная кривая, зеленая кривая – 1.74 мкм VIRTIS. Цвет стрелок соответствует цвету кривых, около стрелок цифры указывают соответствующие высоты в атмосфере. Вертикальные отрезки на оси x обозначают интервал, где наблюдается фрагмент подоблачной ячейки Хэдли, где поток направлен к полюсу.

От экватора и до  $10^\circ$  с.ш. (данные VIRTIS по динамике для более высоких северных широт отсутствуют) меридиональный ветер меняет знак на положительный, горизонтальный поток меняет свое направление в сторону Северного полюса. На этих широтах горизонтальный поток, направленный к Северному полюсу, вероятно, соответствует ветви прямой ячейки Хэдли в северном полушарии (Рисунок 4).

Мы сравнили наши измерения широтных профилей меридионального ветра под облачным слоем с измерениями, полученными PV, VMC (Khatuntsev et al., 2013) на верхней границе облаков (70 км), где наблюдается восходящая к полюсу ветвь облачной ячейки Хэдли. В экваториальной области в обоих случаях (выше облаков и ниже) средний горизонтальный поток направлен к полюсам, изменяя южное направление вблизи экватора на северное. В 1.74 мкм на широтах выше  $20^\circ$  ю.ш. (высота 44-46 км) направление ветра к экватору совпадает с тем, что наблюдалось Хатунцевым и др. (2017) в ИК примерно на 54-58 км на дневной стороне. Рисунок 4 демонстрирует наложенное на усредненное по полушариям температурное поле из эксперимента по радиопросвечиванию Акацуки (Ando et al., 2020), полученные из наблюдений скорости ветра. Стрелки показывают измеренную скорость и направление ветра на нескольких высотах в атмосфере, описанные выше.

### 2.3 Влияние рельефа поверхности на динамику нижнего облачного слоя по измерениям в канале 1.74 мкм

Было обнаружено замедление скорости ветра над областью Имдр (46.5°S/214.5°E). Эта область – молодое в геологическом плане возвышение, самая известная вулканическая структура которого, Идунн Монс, свидетельствует о недавней активности.

Долготные профили для средних широт, 40-60°, демонстрируют замедление средней зональной скорости (на 3-4 м/с) между 210 и 260° в.д. (Рисунок 5). Это замедление находится над областью Имдр со смещением в сторону, противоположную направлению суперротации. Согласно опубликованным ранее результатам анализа излучения поверхности на длине волны 1 мкм (Smrekar et al., 2010), в области Имдр на склонах вулкана Идунн (Idunn Mons) обнаружено аномально высокое тепловое излучение, которое может быть объяснено вулканической активностью. Как следствие, можно ожидать воздействие температурной аномалии на состояние подоблачной атмосферы и циркуляцию нижнего облачного слоя.

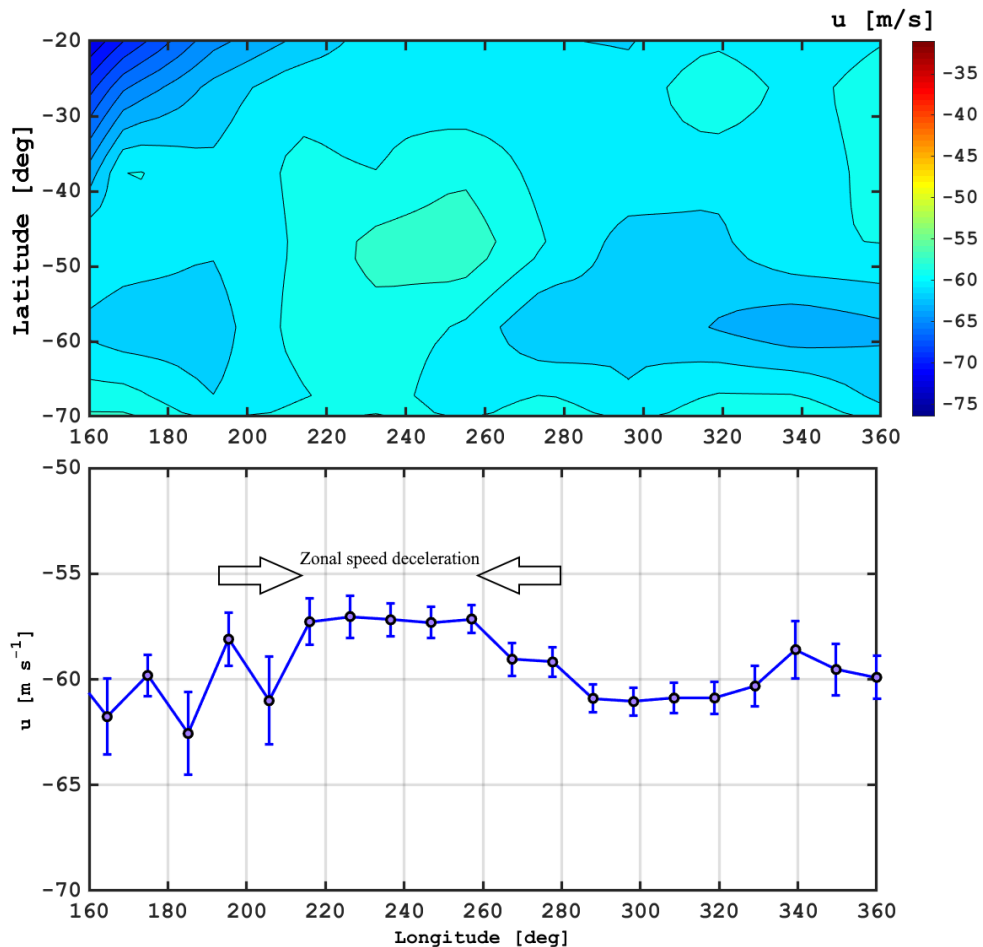


Рисунок 5. — Вверху: поле зональных скоростей в нижнем облачном слое на ночной стороне по данным инфракрасных измерений прибора VIRTIS в диапазоне долгот 160–360°. Внизу: долготный профиль зональной скорости в широтной ячейке 40-50° в соответствующем диапазоне долгот. Вулкан Идунн (Idunn Mons), высшая точка области Имдр, имеет координаты 46.5°S/214.5°E; диаметр области Имдр составляет около 1000 км.

### 3 Заключение

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2020 г. По теме ВЕНЕРА-Д — научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера.

#### 3.1 Новое о динамике атмосферы Венеры на основе данных VMC/Venus Express и UVI/Akatsuki

По изображениям камеры VMC/VEX (2006–2013 гг.) в УФ диапазоне (365 нм) (Khatuntsev и др., 2013) был обнаружен практически монотонный рост усредненной за венерианский год (224 суток) скорости зонального потока ( $u$ ) с 85 до 115 м/с в экваториальной области за наблюдаемый период. По изображениям камеры UVI/Akatsuki в УФ, 365 нм, (2016–2018 гг.) наблюдаемый ранее по данным VMC рост скорости сменился постепенным снижением до 92 м/с в 2018 г.

Впервые обнаружена прямая ячейка Хедли, охватывающая нижний облачный слой. Это вторая ячейка, до сих пор достоверно была известна одна — в верхнем и среднем облачном слое, хотя теория допускает существование ещё одной ячейки над облаками и, может быть, одной или нескольких. под облачным слоем, наблюдательных указаний на это не было. При изучении циркуляции на ночной стороне (1.74 мкм) в нижнем облачном слое Венеры (44–50 км), обнаружено увеличение скорости в экваториальной области в поле зональных скоростей по сравнению со средними широтами. Было показано, что наблюдаемые области в экваториальных широтах расположены на несколько километров выше, чем в средних. Эти области отличаются знаком меридиональной скорости, так что в экваториальной области, <20° ю.ш., зональный поток направлен к Южному полюсу, в средних широтах — направлен к экватору. Таким образом, мы видим «кусочно» подоблачную прямую ячейку, т.е. ее ветвь на высоте 48–50 км направленную к южному полюсу, тогда как возвратная ветвь на высоте 44–46 км направлена к экватору.

В долготных вариациях в средних широтах (40–60°) обнаружено замедление зональной скорости (на 3–4 м/с) между 210 и 260° долготы (Рисунок 5). Это замедление находится над областью Имдр со смещением в сторону, противоположную направлению суперротации.

#### 3.2 Концепция проекта «Венера-Д»

Продолжалось детальное изучение научных задач проекта Венера-Д, возможности различных инструментов для решения этих задач, научное обоснование экспериментов и возможность включения новых элементов миссии. В частности, предложено оригинальное решение для мониторинга состояния облачного слоя одновременно на дневной и ночной



стороне предложено использование двух субспутников в точках Лагранжа с комплексами ультрафиолетовых и инфракрасных камер для изучения метеорологии, поведения УФ-контрастов, возможной их биологической природы. Плазменные научные задачи для таких аппаратов заключаются в координированном измерении магнитного поля и потоков заряженных и нейтральных частиц вместе с приборами, установленными на основном орбитальном модуле (ОМ), изучения космической погоды у Венеры. Таким образом, спутники позволяют решать прорывные задачи, путем одновременного мониторинга дневной и ночной стороны Венеры.

Проработаны сценарии миссии для дат запуска 2026, 2029 и 2031 гг. Для каждой из дат рассчитаны массы космического аппарата, которые удастся доставить к Венере, подлетные скорости и другие орбитальные характеристики. Проведен анализ достижимости точек посадки на поверхности Венеры в зависимости от даты запуска.

Постановка и решение научных задач проекта Венера-Д имеет целью не только получения фундаментальных знаний о Венере, но и изучение условий на поверхности и в атмосфере, климата и погоды для обеспечения будущих миссий, целью которых может быть доставка на Землю образцов атмосферы и грунта Венеры.

## **4 Список использованных источников**

### **4.1 Список публикаций**

Всего научных публикаций в 2020 г: 12

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

### **4.2 Статьи в зарубежных изданиях**

### **4.3 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах**

1. Eismont, N.A., Zasova, L.V., Simonov, A.V., Kovalenko, I.D., Gorinov, D.A., Abbakumov, A.S., Bober, S.A. Venera-D Mission Scenario and Trajectory. // Solar System Research – 2020 - vol. 53 -no 7 - pp. 578-585.  
<https://doi.org/10.1134/S0038094619070062>
2. Zasova, L.V., Gorinov, D.A., Eismont, N.A., Kovalenko, I.D., Abbakumova, A.S., Bober, S.A. Venera-D: A Design of an Automatic Space Station for Venus Exploration // Solar System Research. – 2020 - vol. 53 - no. 7 - pp.506-510.  
<https://doi.org/10.1134/S0038094619070244>

### **4.4 Статьи в сборниках материалов конференций**

1. Пацаева М.В., Хатунцев И.В., Тюрин А.В., Засова Л.В. Ветер на верхней границе облачного слоя по результатам многолетних наблюдений VMC (Венера Экспресс) и UVI (Акацуки) // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 ноября 2020. Москва, ИКИ РАН, 2020. С. 276. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a  
<http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=174&thesis=8351>

#### 4.5 Доклады, тезисы, циркуляры

1. Gorinov D. A., Khatuntsev I. V., Zasova L. V., Patsaeva M. V., Turin A. V. Horizontal winds in the lower clouds on the nightside of Venus from VIRTIS/VEX 1.74  $\mu\text{m}$  data // THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2020 / 5-9.10.2020, ИКИ РАН, Москва, Россия, 11MS3-VN-03, с.370.  
[https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract\\_book\\_full\\_version\\_05.pdf](https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf)
2. Helbert, J., Dyar, M. D., Izenberg, N. R., Ghail, R. C., Garvin, J. B., Byrne, P. K., Smrekar, S. E., Gilmore, M., Widemann, T., Beauchamp, P. M., Shaji, N., Zasova, L. Why We Need a Long-Term Sustainable Venus Program // 51st Lunar and Planetary Science Conference, held 16-20 March, 2020 at The Woodlands, Texas. LPI Contribution No. 2326, 2020, id.1427.  
<https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/1427.pdf>
3. Patsaeva M. V., Khatuntsev I. V., Turin A. V., Zasova L. V. Long-term variations of zonal wind speed at the cloud top level over mission time from VMC/Venus Express and UVI/Akatsuki UV images // THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2020 / 5-9.10.2020, ИКИ РАН, Москва, Россия, 11MS3-VN-02, с.367.  
[https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract\\_book\\_full\\_version\\_05.pdf](https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf)
4. Khatuntsev I. V., Patsaeva M. V., Turin A. V., Zasova L. V. Cloud level winds from VMC (Venus Express) and UVI (Akatsuki) imaging // THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2020 / 5-9.10.2020, ИКИ РАН, Москва, Россия, 11MS3-VN-PS-04, с.391.  
[https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract\\_book\\_full\\_version\\_05.pdf](https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf)
5. Zasova L. V. VENERA-D: a perspective planetary mission // THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2020 / 5-9.10.2020, ИКИ РАН, Москва, Россия, 11MS3-VN-04, с.371.  
[https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract\\_book\\_full\\_version\\_05.pdf](https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf)
6. Zasova Ludmila, Lev Zeleny, Tracy Gregg, Thanasis Economou, Natan Eismont, Mikhail Gerasimov, Dmitry Gorinov, Nikolay Ignatiev, Mikhail Ivanov, Igor Khatuntsev, Oleg Korablev, Tibor Kremic, Kandis Jessup, Sanjay Limaye, Илья Lomakin, Adriana Ocampo, Oleg Sedykh Oleg Vaisberg, Victor Voron, Victor Vorontsov: Venera-D: a potential Roscosmos-NASA mission to explore Venus' atmosphere, surface, interior and plasma environment, Abstract 27936, 43 COSPAR Scientific Assembly, Sydney, Australia.
7. Zubko V. A., Belyaev A. A., Eismont N. A., Fedyaev K. S., Zasova L. V., Gorinov D. A. VENERA-D: a perspective planetary mission // THE ELEVENTH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM 2020 / 5-9.10.2020, ИКИ РАН, Москва, Россия, 11MS3-VN-05,

c.372.

[https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract\\_book\\_full\\_version\\_05.pdf](https://ms2020.cosmos.ru/docs/Abstract_book_full_version_05.pdf)

8. Zasova, L. and the Venera-D IKI/Roscosmos-NASA Joint Science Definition Team.  
Venera-D - perspective mission to Venus // Venus panel of the NASA/NSF Decadal Survey  
on Planetary Science and Astrobiology / 20-27.10.2020
9. Zasova, L. and the Venera-D IKI/Roscosmos-NASA Joint Science Definition Team.  
Venera-D // 18th Meeting of the Venus Exploration Analysis Group (VEXAG) / 16-  
17.11.2020