

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

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



А.А. Петрукович

« 20 » декабря 2023 г.

М.П.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Миссия для комплексного исследования поверхности, атмосферы  
и окружающей плазмы Венеры

По теме:  
Венера-Д  
(промежуточный, этап 2)

FFWG-2022-0002

Научный руководитель,  
академик РАН

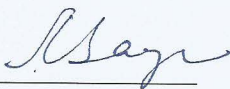
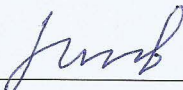
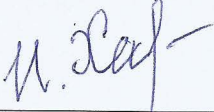
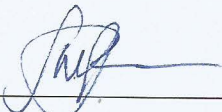
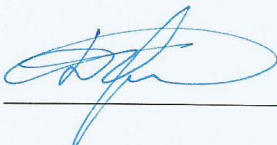

Л.М. Зелёный

« 20 » декабря 2023 г.

Москва

2023

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зам. Руководителя	19.12.2023		Засова Л.В. в.н.с., д.ф.-м.н.	Введение, Заключение, раздел 2
	19.12.2023		Игнатъев Н.И. с.н.с., к.ф.-м.н.	Введение
	19.12.2023		Хатунцев И.В. с.н.с., к.ф.-м.н.	Введение, раздел 2
	19.12.2023		Пацаева М.В. н.с., к.ф.-м.н.	Заключение, раздел 2
	19.12.2023		Горинов Д.А. м.н.с.	Введение, Заключение, раздел 2
	19.12.2023		Пацаев Д.В. н.с.	Раздел 2

## 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:

- Термические приливы являются важным фактором, влияющим на динамику мезосферы Венеры. Показано, что в верхней мезосфере основной SS-AS режим не является симметричным, наблюдается смещение области конвергенции горизонтальных потоков от терминаторов, совпадающее с максимумом свечения  $O_2$ , от полуночи к  $22 \pm 0.5$  часам. Этот сдвиг объясняется влиянием термического прилива: на кривой  $T(LT)$  на уровне 0.1 мбар (близком к максимуму высоты свечения  $O_2$ ) ночной максимум температуры также наблюдается в 22 часа. На уровне 100 мбар термический прилив ярко выражен в зависимости скорости ветра среднеширотного джета от местного времени: два максимума скорости ветра в 10 и 22 часа соответствуют дневному и ночному максимумам температуры (10 и 22 часа) на кривой  $T(LT)$ .
- Анализ трехмерных полей температуры (ФС «Венера-15») для северного полушария показал, что в изотермах на изобарических уровнях (55-95 км), так же, как и в положении верхней и средней границы облаков, отображаются детали рельефа: вертикально распространяющаяся орографическая волна оставляет «след» в атмосфере. Эти результаты должны быть дополнены будущими результатами прибора СВЕТ «Венеры-Д», который будет зондировать термическое строение атмосферы от поверхности до 100 км и сможет наблюдать распространение гравитационных волн в тропосфере и мезосфере.
- Совместный анализ данных приборов VMC (КА «Венера-Экспресс») и UVI (КА «Акацуки») показал, что высокогорные участки поверхности оказывают более значимое воздействие на долговременные квазипериодические вариации поля скоростей на верхней границе облаков.
- Участники работы по теме «Венера-Д» принимали участие в составлении научного обзора “Venus evolution through time: key science questions, selected mission concepts and future investigations”. «Эволюция Венеры сквозь время» включает обзор ключевых научных задач, которые надо решить для понимания Венеры, обоснование и описание принятых миссий и концепций миссий к Венере,

необходимость синергии между миссиями, а также наземными наблюдениями и лабораторными исследованиями и др. Была опубликована статья, коллектив авторов которой включает наиболее известных в мире ученых и специалистов в области исследования Венеры.

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 19 страниц, 3 рисунка, 16 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 Циркуляция в мезосфере Венеры и термические приливы.....	9
2.2 Долгопериодические вариации зональной и меридиональной скорости над областями поверхности разной высоты.....	10
2.3 Орографические гравитационные волны и возможность наблюдения их распространения в атмосфере Венеры в проекте «Венера-Д».....	12
2.4 Научный обзор предстоящих проектов по исследованию Венеры космическими аппаратами.....	13
2.5 Перспективы наблюдения ночного свечения кислорода на Венере с Земли с обсерватории Кампо-Императоре.....	14
2.6 Приборный комплекс «Венеры-Д» - прибор ВОЛНА.....	15
3 Заключение.....	16
4 Список использованных источников.....	17
4.1 Список публикаций.....	17
4.2 Статьи в зарубежных изданиях.....	17
4.3 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах.....	17
4.4 Статьи в сборниках материалов конференций.....	17
4.5 Доклады, тезисы, циркуляры.....	18

## Список сокращений

AM	Атмосферный модуль
EКА	Европейское Космическое Агентство
ИК	Инфракрасный
КА	Космический аппарат
ОА	Орбитальный аппарат
ПМ	Посадочный модуль
УФ	Ультрафиолетовый
IR2	InfraRed 2- $\mu$ m
ISRO	Indian Space Research Organisation
NASA	National AeroSpace Agency
SS-AS	Subsolar-to-Antisolar
UVI	UltraViolet Imager
VIRTIS	Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer
VMC	Venus Monitoring Camera

## 1 Введение

Настоящий документ содержит отчет о результатах исследований, проведенных в 2023 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 изучение циркуляции в мезосфере Венеры, одной из наиболее важных областей для понимания динамики всей атмосферы, где в верхнем облачном слое, толщиной около 10 км, в ближней УФ-области спектра поглощается половина всей солнечной энергии. Поглощение солнечной энергии приводит к возникновению термических приливов, которые по современным представлениям поставляют энергию на поддержание суперротации всей атмосферы от близких к поверхности слоев до 100 км высоты. Наиболее детально термические приливы изучались Фурье-спектрометром ФС на «Венере-15» благодаря нахождению на полярной орбите, наиболее благоприятной для изучения солнечно-связанных структур. Картирующий спектрометр VIRTIS-M (КА «Венера-Экспресс») изучал распределение интенсивности ночного свечения кислорода  $O_2$  1.27 мкм, которое является маркером динамики атмосферы, и максимум свечения которого соответствует высоте  $97 \pm 2$  км (верхняя мезосфера). Была обнаружена асимметрия SS-AS циркуляции: максимум свечения  $O_2$  и область конвергенции потоков от терминаторов с дневной стороны наблюдается в  $22 \pm 0.5$  часа вместо полуночи. Направление смещения противоположно направлению суперротации. На кривой термического прилива  $T(P, LT)$  на уровне 0.1 мбар наблюдается максимум температуры в 22 часа, т.е. асимметрия SS-AS циркуляции связана с влиянием термического прилива.

Анализ трехмерных полей температуры (ФС «Венера-15») для северного полушария показал, что в изотермах на изобарических уровнях, так же, как и в положении верхней и средней границы облаков, отражаются детали рельефа: земля Иштар, равнина Аталанта, область Бета. Таким образом, распространяющаяся вертикально орографическая волна оставляет «след» в атмосфере. На «Венере-Д» предполагается зондировать атмосферу от поверхности до 100 км высоты прибором СВЕТ. С его помощью можно будет проследить распространение гравитационной волны, а также область ее формирования.

**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, и механизмов их взаимодействия, для понимания будущей эволюции климата Земли и экзопланет (большинство из которых схожи с Венерой, которую таким образом можно рассматривать «характерным представителем экзопланет» в Солнечной системе), обеспечения будущих миссий, целью которых будет 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 его анализ внутри гермоконтейнера; 2) измерения вертикального строения атмосферы и облачного слоя на этапе спуска приборами, установленными внутри и снаружи гермоконтейнера; 3) прямые измерения атмосферы, облачного слоя, поиск признаков жизни, а также признаков вулканической активности на ночной стороне с аэростатного зонда. Прямые измерения на поверхности приборами ПМ и в облачном слое экспериментами АМ в проекте «Венера-Д» являются уникальными среди всех миссий, планирующихся для запуска к Венере в 2030-е годы.

В 2023 году продолжилось детальное изучение научных задач проекта «Венера-Д» и возможности различных инструментов для решения этих задач, в частности, ключевых приборов ОА для изучения динамики атмосферы Венеры, впервые используемых для изучения Венеры, – УФ-спектрометра ВОЛНА и комплекса СВЕТ, состоящего из Фурье-спектрометра для средней атмосферы (мезосферы) и миллиметрового радиометра для мониторинга нижней, наименее изученной, подоблачной атмосферы (тропосферы). Эта уникальная задача будет выполняться впервые.



## 2 Венера. Фундаментальные исследования

### 2.1 Циркуляция в мезосфере Венеры и термические приливы

Основные моды циркуляции атмосферы Венеры – зональная суперротация в тропосфере и мезосфере и SS-AS (от подсолнечной точки к антисолнечной) в термосфере. В области мезопаузы (примерно 95-115 км) циркуляция более сложная. Маркером динамики в этой области является распределение ночного свечения кислорода  $O_2$  1,27 мкм, максимум интенсивности которого наблюдается на высоте  $97 \pm 2$  км. Несимметричность SS-AS циркуляции впервые была обнаружена Шакуном и др. (2010) по данным VIRTIS-M/VEh: максимум свечения, который соответствует рекомбинации атомарного кислорода в области конвергенции потоков, идущих с дневной стороны от терминаторов, наблюдался смещенным в сторону вечернего терминатора, в направлении, противоположном направлению зональной суперротации.

Углубленный анализ всех данных VIRTIS-M (КА «Венера-Экспресс»), относящихся к низким и средним широтам южного полушария, не только свечения  $O_2$ , но и горизонтальной скорости ветра, показал, что основная мода циркуляции SS-AS, однако, как максимум свечения, так и область сходимости горизонтальных потоков от терминаторов с дневной стороны (т.н. область конвергенции) соответствуют местному времени  $22 \pm 0.5$  часа вместо полуночи (Рис. 1б). Влияния зональной суперротации в средней картине не обнаружено.

Важным фактором, влияющим на динамику атмосферы Венеры, являются термические приливы, которые детально были исследованы в эксперименте Фурье-Спектрометр на «Венере-15» (Zasova et al., 2007) благодаря полярной орбите, наиболее пригодной для изучения солнечно-связанных зависимостей. На Рис. 1а приведены кривые температуры  $T(p, LT)$  для нескольких уровней в атмосфере. На уровне 0,1 мбар (около 95 км) наблюдается максимум температуры около 22 часов, то есть, как и максимум свечения, он коррелирует с нисходящим потоком. Термический прилив определяет смещение максимума свечения. Надо отметить, что это неодновременные измерения.

Термические приливы играют важную роль в поддержании суперротации, поставляя энергию, и ярко проявляются в мезосфере. Примером может служить изменение скорости ветра в среднеширотном джете (Рис. 1в). Фаза прилива изменяется с высотой, но на уровне 100 мбар (высота среднеширотного джета) максимум температуры приходится на местное время около 10 и 22 часов, то есть совпадает с максимумами скорости в джете.

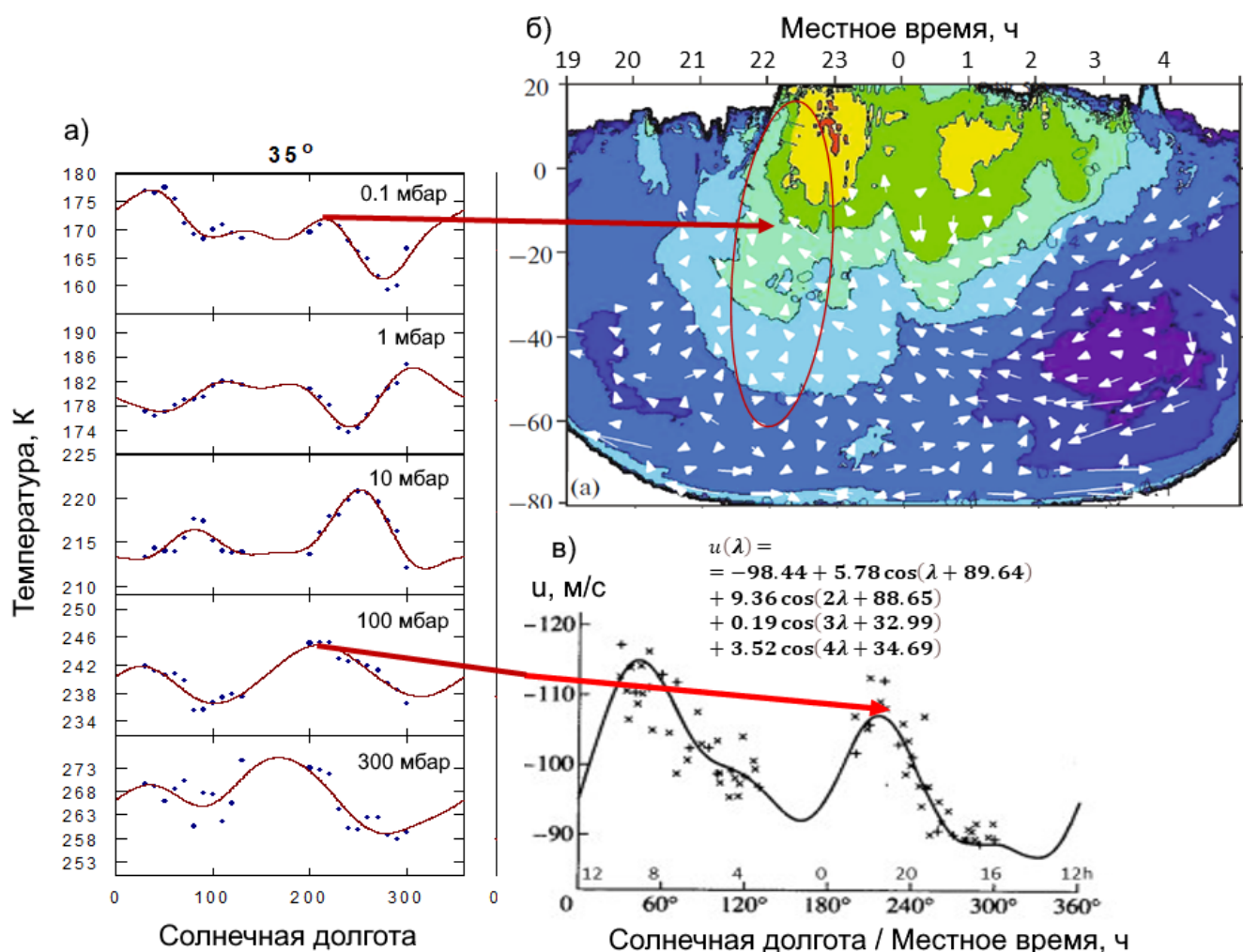


Рисунок 1. а) зависимость температуры атмосферы от солнечной долготы (местного времени), аппроксимированной термическим приливом, по данным ФС «Венера-15»; б) карта яркости ночного свечения  $O_2$  1,27 мкм и поле горизонтального ветра; в) скорость ветра в среднеширотном джете в зависимости от солнечной долготы (местного времени).

Результаты, представленные в данном разделе, получены в 2023 году и опубликованы в журнале Solar System Research:

Shakun, A.V., Zasova, L.V., Gorinov, D.A., Khatuntsev, I.V., Ignatiev, N.I., Patsaeva, M.V., Turin, A. V.  $O_2$  ( $a^1\Delta_g$ ) Airglow at 1.27  $\mu\text{m}$  and upper Mesosphere Dynamics on the Night Side of Venus // Solar System Research – 2023 – Volume 57, Issue 3, p.200-213. <https://doi.org/10.1134/S0038094623030085>

## 2.2 Долгопериодические вариации зональной и меридиональной скорости над областями поверхности разной высоты

УФ (365 нм) изображения, полученные VMC/Venus Express с 2006 по 2013 и UVI/Akatsuki с Декабря 2015 по Август 2021, были использованы для исследования динамики мезосферы. Исследования проводились в широтной полосе  $10^\circ \pm 5^\circ$  ю.ш., соответствующей наибольшей высоте Земли Афродиты, в околополуденное время и с ограничением по фазовому углу  $60^\circ$ - $90^\circ$ .

В 2006 – 2013 VMC зарегистрировала увеличение средней зональной скорости в экваториальных широтах с 85 до 115 м/с (Khatuntsev и др., 2013). По данным, полученным с 2006 по 2020 на 20° ю.ш. была открыта периодичность зональной скорости с периодом  $12.5 \pm 0.5$  земных лет (Khatuntsev и др., 2022). С 2006 по 2021 на 10° ю.ш. был обнаружен тот же период. Зональная компонента имеет амплитуду  $10.6 \pm 1.0$  м/с при среднем значении  $-98.9 \pm 0.7$  м/с. Амплитуда меридиональной компоненты составляет  $-3.4 \pm 0.4$  м/с при среднем значении  $-0.8 \pm 0.3$  м/с.

Мы исследовали изменение долгопериодических вариаций зональной и меридиональной скоростей ветра в зависимости от высоты подстилающей поверхности. Были выбраны две тестовые площадки: над Областью Овды ( $10^\circ \pm 5^\circ$  ю.ш.,  $60^\circ - 120^\circ$  в.д.), где наблюдается максимальное торможение горизонтального потока, и над низменностью, соответствующей Равнинам Навки и Тинатин ( $10^\circ \pm 5^\circ$  ю.ш.,  $330^\circ - 30^\circ$  в.д.). Максимальный перепад высот между рассматриваемыми долготами составляет около 4.5 км, что соответствует, согласно VIRA (Seiff и др., 1985), разнице давлений 23.4 бар, от 92.1 бар у поверхности до 68.7 бар на высоте 4.5 км. По обоим наборам данных были проведены аппроксимирующие синусоиды (Рис. 2), соответствующие периоду  $12.5 \pm 0.5$  г. Над областью Овды амплитуды синусоид для зональной и меридиональной компоненты увеличились относительно показателей средних синусоид. Для зональной скорости наблюдается увеличение до  $16.7 \pm 2.4$  м/с при среднем значении скорости  $-101.2 \pm 1.9$  м/с, для меридиональной - до  $5.3 \pm 1.4$  м/с при среднем  $+1.6 \pm 1.1$  м/с. При этом над низиной наблюдается уменьшение амплитуды: для зональной компоненты до  $9.7 \pm 4.5$  м/с при среднем  $-99.5 \pm 3.2$  м/с, для меридиональной до  $1.6 \pm 0.7$  м/с при среднем  $-1.0 \pm 0.7$  м/с.

Исследование позволяет сделать вывод, что высокогорные участки поверхности оказывают более значительное воздействие на долговременные квазипериодические вариации поля скоростей у верхней границы облаков.

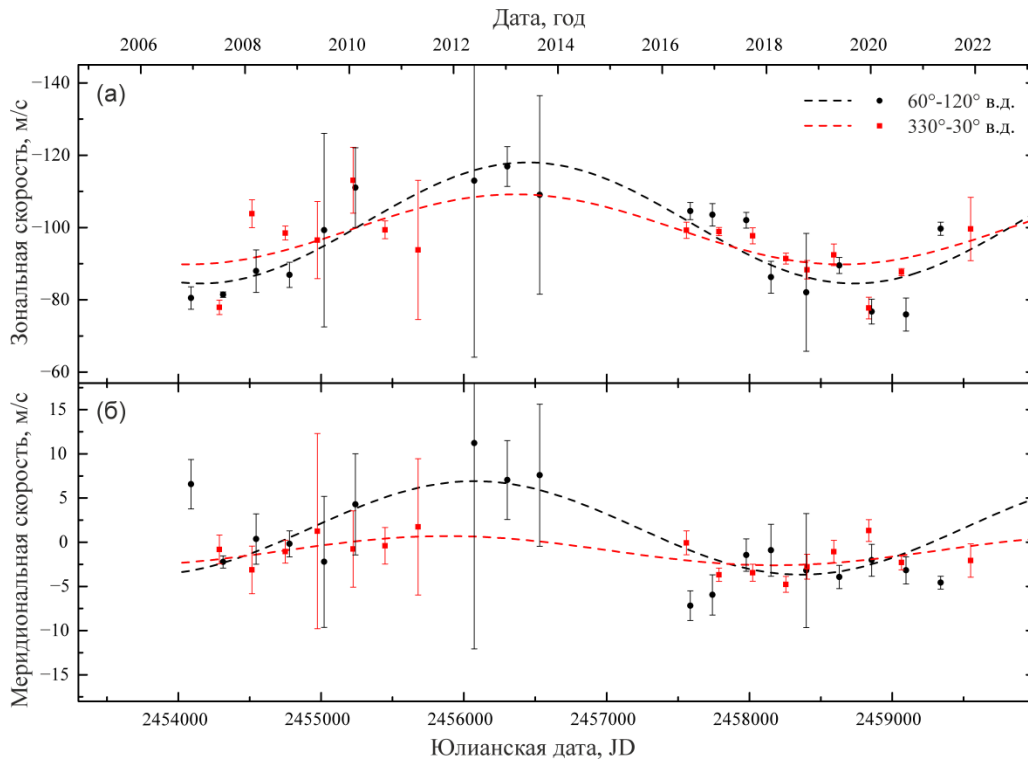


Рисунок 2. Долгопериодические вариации зональной (а) и меридиональной (б) компонент средней скорости горизонтального потока с периодом 12.5 лет на широте  $10^{\circ} \pm 5^{\circ}$  ю.ш. вблизи полудня ( $12 \pm 1$ ч) над возвышенностью (черный цвет) - Область Овда,  $60^{\circ}$ - $120^{\circ}$  в.д. - и низменностью (красный цвет) – Равнины Навка, Тинатин,  $330^{\circ}$ - $30^{\circ}$  в.д. Точками обозначены средние по венерианскому году скорости для выборки измерений с ограничением по фазовому углу  $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$ .

Для средних показан доверительный интервал 99.6% ( $3 \cdot \Sigma_{\bar{x}}$ ). Пунктиром обозначены синусоиды с периодом  $12.5 \pm 0.5$  г.

### 2.3 Орографические гравитационные волны и возможность наблюдения их распространения в атмосфере Венеры в проекте «Венера-Д»

Наблюдаемое прибором VMC (КА «Венера-Экспресс») проявление влияния рельефа в облачном слое (Patsaeva et al. 2019) объясняется орографическими волнами, связанными с обтеканием гористого рельефа горизонтальным потоком. Из-за практически отсутствующего ветра у поверхности предполагается (в моделях), что это «обтекание» происходит на некоторой высоте порядка шкалы высоты над горами.

*ФС «Венера-15».* Было обнаружено, что орографические гравитационные волны, возникающие при обтекании рельефа поверхности, вертикально распространяясь в атмосфере, оставляют «следы» рельефа на разных уровнях по пути распространения волны, например, на изобарических уровнях в температурных полях до 95 км высоты, и на высоте верхней границе верхнего и среднего облачного слоя (Рис. 3). Следует отметить, что при восстановлении температурных профилей никакой информации о поверхности не закладывалось (использовалась модель VIRA с граничными условиями на высоте 50 км: изменение температуры с широтой в 5 точках).

*СВЕТ «Венера-Д».* При мониторинге с полярной орбиты будут получены вертикальные температурные профили от поверхности до 100 км высоты, и, соответственно, 3D-поля температуры. Мы предполагаем, что при этом можно будет проследить не только путь распространения гравитационной волны в нижней и средней атмосфере, но и, возможно, область формирования орографической волны.

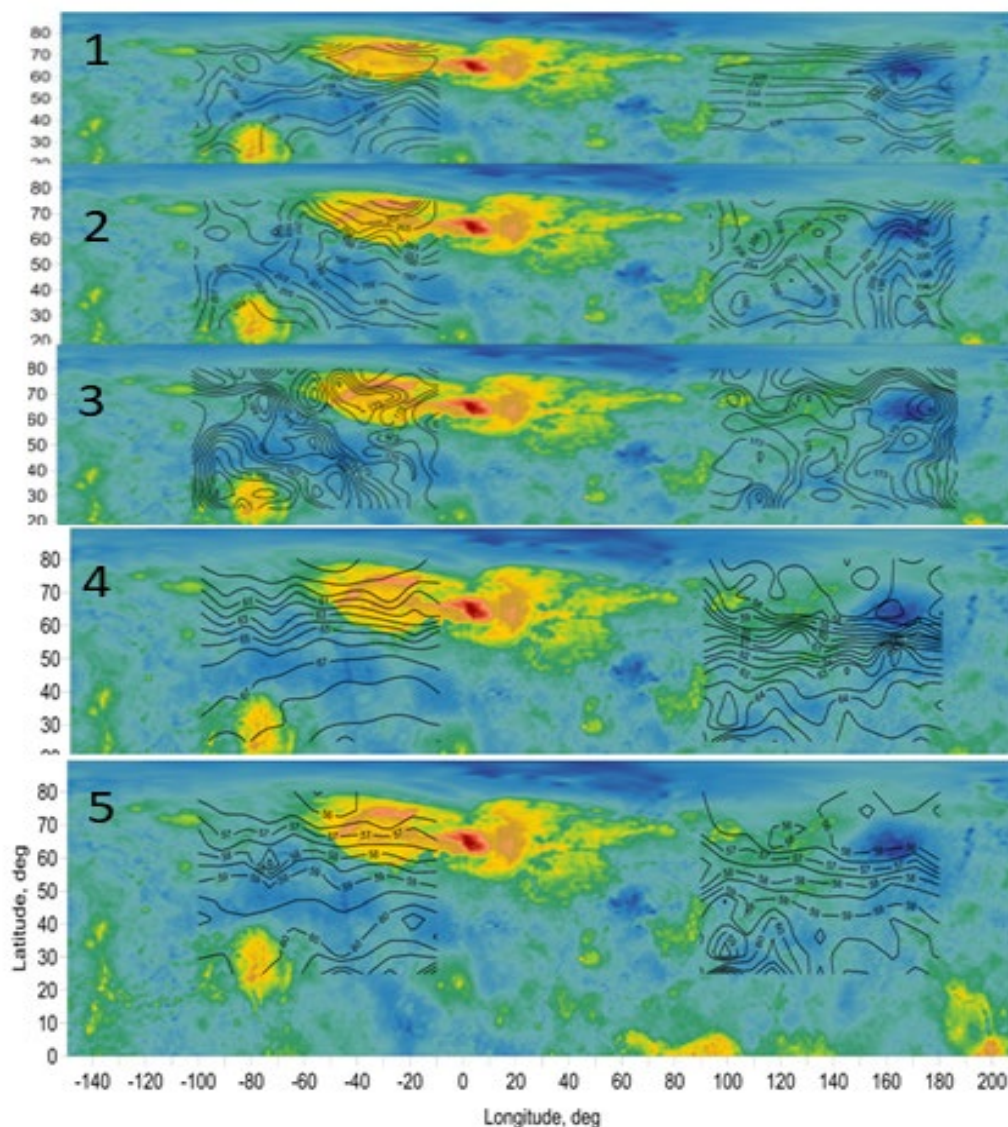


Рисунок 3. Результаты ФС «Венеры-15». Изолинии, наложенные на карту рельефа поверхности (Магеллан): 1) изотермы на верхней границе облаков; 2) на высоте 81 км; 3) на высоте 93-95 км; 4) высота верхней границы облаков; 5) высота верхней границы среднего облачного слоя.

## 2.4 Научный обзор предстоящих проектов по исследованию Венеры космическими аппаратами

Интерес к планете Венера со стороны международного научного сообщества неуклонно возрастает в течение последнего десятилетия. Ряд наиболее крупных научных космических агентств в настоящее время разрабатывает космические аппараты для отправки к соседней планете в 2030-х годах.

Основные фундаментальные задачи, стоящие перед исследователями, в настоящий момент, включают в себя:

- 1) Сравнение Венеры с экзопланетами-аналогами;
- 2) поиск жизни в атмосфере Венеры;
- 3) изучения происхождения и эволюции Венеры (в т.ч. древних океанов);
- 4) исследование геологической истории Венеры, вулканической активности и катастрофических событий;
- 5) исследование стабильности и временных вариаций атмосферных параметров.

Для этих целей, помимо «Венеры-Д», к запуску планируются следующие миссии (все достигнут Венеры не раньше 2030 года):

- 1) VERITAS (NASA) – орбитальный аппарат для радарного зондирования поверхности и поиска вулканической активности;
- 2) DAVINCI (NASA) – спускаемый аппарат для изучения вертикальной структуры атмосферы и анализа газовых составляющих для высотного интервала 70-0 км;
- 3) EnVision (ЕКА) – орбитальный аппарат для радарного зондирования поверхности и поиска вулканической активности;
- 4) Shukrayaan-1 (ISRO) – орбитальный аппарат для поляриметрического радарного зондирования поверхности.

Обзор, представленный в данном разделе, опубликован в журнале Space Science Reviews:

Widemann, T., Smrekar, S.E., Garvin, J.B., ..., Korablev, O., Zelenyi, L., Zasova, L., Gorinov, D., et al. Venus Evolution Through Time: Key Science Questions, Selected Mission Concepts and Future Investigations // Space Science Reviews – Volume 219, Issue 7, id. 56. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00992-w>

## **2.5 Перспективы наблюдения ночного свечения кислорода на Венере с Земли с обсерватории Кампо-Императоре**

Для улучшения интерпретации будущих научных данных миссии «Венера-Д» можно использовать как данные параллельно работающих на орбите Венеры аппаратов, так и данные наземных наблюдений. Так, для более точного определения интенсивности и пространственного распределения ночного свечения кислорода на Венере данные прибора ВОЛНА могут быть дополнены одновременными наблюдениями с наземного инфракрасного прибора.

Предлагается использовать рефлекторный 1,1-метровый телескоп АЗТ-24 (обсерватория Кампо-Императоре, Италия), оснащённый инфракрасной камерой Swigcam с охлаждаемым до  $-198^{\circ}$  детектором. В настоящий момент прорабатывается возможность использования достаточно узкого волнового фильтра для венерианских спектральных «окон» 1,18 и 1,28 мкм.

## **2.6 Приборный комплекс «Венеры-Д» - прибор ВОЛНА**

В процессе подготовки к этапу эскизного проекта миссии «Венера-Д» продолжилось развитие приборного комплекса. В настоящем отчёте представлен оптический прибор ВОЛНА, предназначенный для установки на борт орбитального аппарата (ОА).

Ультрафиолетовый диапазон спектра является ключевым для исследований фотохимии и микрофизики образования облачных частиц, динамики атмосферы в верхней части плотного облачного слоя планеты, полностью опоясывающего Венеру и занимающего высоты 47-70 км. Измерения спектра излучения атмосферы Венеры в диапазоне 0,19-0,5 мкм с одновременным построением изображений открывает новые возможности в исследовании атмосферы вблизи верхней границы облаков.

Основные научные задачи эксперимента состоят в следующем:

- 1) Картирование содержания  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}$  и  $\text{O}_3$  на дневной стороне, а также, возможно, других малых составляющих ( $\text{OCS}$ ,  $\text{OSSO}$  и др.), в диапазоне 0,19-0,32 мкм и их корреляции с УФ-поглостителем.
- 2) Измерение вертикальных профилей содержания малых составляющих атмосферы  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{O}_3$  и др. на высотах 80-110 км на терминаторе планеты.
- 3) Исследование «неизвестного» источника УФ-поглощения на дневной стороне в диапазоне 0,32-0,49 мкм, и возможное установление его природы.
- 4) Изучение ночных неравновесных свечений атмосферы:  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ .
- 5) Исследование строения облаков.
- 6) Исследование динамики атмосферы путем измерения скоростей ветра по движению деталей на изображениях (0,19-0,49 мкм).

### 3 Заключение

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2023 г. по теме «ВЕНЕРА-Д — научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера».

- Подтверждена важная роль термических приливов в атмосфере Венеры: в верхней мезосфере (на уровне 0.1 мбар) циркуляция отличается от симметричной SS-AS, смещение области конвекции горизонтальных потоков и максимума свечения O<sub>2</sub> от полуночи к 22 часам связано с влиянием термического прилива.

- Изучение 3D полей температуры мезосферы 55-100 км, полученных ФС «Венеры-15», показало корреляцию с деталями рельефа на изобарических уровнях («след» распространения гравитационной волны в атмосфере). Комплекс СВЕТ «Венеры-Д» будет зондировать термическое строение атмосферы от поверхности до 100 км и, возможно, будет наблюдать распространение гравитационной волны и в тропосфере.

- Совместный анализ данных приборов VMC и UVI показал, что высокогорные участки поверхности оказывают более значимое воздействие на долговременные квазипериодические вариации поля скоростей на верхней границе облаков.

- Участники работы по теме «Венера-Д» принимали участие в составлении научного обзора “Venus evolution through time: key science questions, selected mission concepts and future investigations”. Была опубликована статья, коллектив авторов которой включает наиболее известных в мире ученых и специалистов в области исследования Венеры.



## **4 Список использованных источников**

### **4.1 Список публикаций**

Всего научных публикаций в 2023 г: 3

- Число публикаций работников в базе Web of Science: 3
- Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 1
- Статьи в зарубежных изданиях: 2
- Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 1
- Статьи в сборниках материалов конференций: 3
- Доклады, тезисы, циркуляры: 10
- Статьи в научно-популярных изданиях: 0
- Другие издания: 0

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

1. Shakun, A.V., Zasova, L.V., Gorinov, D.A., Khatuntsev, I.V., Ignatiev, N.I., Patsaeva, M.V., Turin, A. V. O<sub>2</sub> ( $a^1\Delta_g$ ) Airglow at 1.27  $\mu\text{m}$  and upper Mesosphere Dynamics on the Night Side of Venus // Solar System Research – 2023 – Volume 57, Issue 3, p.200-213. <https://doi.org/10.1134/S0038094623030085>
2. Widemann, T., Smrekar, S.E., Garvin, J.B., ..., Korablev, O., Zelenyi, L., Zasova, L., Gorinov, D., et al. Venus Evolution Through Time: Key Science Questions, Selected Mission Concepts and Future Investigations // Space Science Reviews – Volume 219, Issue 7, id. 56. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00992-w>

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

1. Шакун А.В., Засова Л.В., Горинов Д.А., Хатунцев И.В., Игнатъев Н.И., Пацаева М.В., Тюрин А.В. O<sub>2</sub> ( $a^1\Delta_g$ ) Свечение молекулярного кислорода O<sub>2</sub> ( $a^1\Delta_g$ ) в полосе 1.27 мкм и динамика верхней мезосферы на ночной стороне Венеры. // *Астрономический вестник* – 2023 – Том 57, Издание 3, с.209-224. <https://doi.org/10.31857/S0320930X23030088>

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

1. Засова Л.В., Игнатъев Н.И., Хатунцев И.В., Горинов Д.А., Косов А.С., Пацаева М.В. Термическое строение атмосферы Венеры на основе данных прошлых миссий и будущего проекта «Венера-Д» // *Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из*

- космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2023. С. 427. DOI 10.21046/21DZZconf-2023a
2. Зелёный Л.М., Кораблёв О.И., Засова Л.В., Стрельников Д.В., Игнатъев Н.И., Герасимов М.В., Эйсмонт Н.А., Иванов М.А., Горинов Д.А. «Венера-Д» – проект для комплексного исследования атмосферы, поверхности, внутреннего строения и окружающей плазмы Венеры // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2023. С.429. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a
  3. Пацаева М.В., Хатунцев И.В., Титов Д.В., Игнатъев Н.И., Засова Л.В., Горинов Д.А., Тюрин А.В. Вариации скорости ветра на верхней границе облаков Венеры над Землёй Афродиты по многолетним УФ наблюдениям VMC/Venus Express и UVI/Akatsuki // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2023. С.436. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a

#### **4.5 Доклады, тезисы, циркуляры**

1. Gorinov, D.A., Zasova, L.V. Winds In the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from IR2 (Akatsuki) 1.74  $\mu\text{m}$  Images // Venus Surface and Atmosphere / 30.01-01.02.2023, Houston, USA. No. 2807, id.8037
2. Zelenyi, L.M., Zasova, L.V., Korablev, O.I., Gorinov, D.A., Gerasimov, M.V., Ignatiev, N.I., Eismont, N.A., Ivanov, M.A., Strelnikov, D.V., Venera-D Team. Venera-D: A Mission for Comprehensive Study of Venus // Venus Surface and Atmosphere / 30.01-01.02.2023, Houston, USA. No. 2807, id.8065
3. D'Incecco, P., Filiberto, J., Garvin, J.B., Arney, G.N., Getty, S.A., Di Achille, G., Ghail, R., Zelenyi, L.M., Zasova, L.V., Ivanov, M.A., Gorinov, D.A. et al. The Project "Analog for VENUS' GEologically Recent Surfaces" (AVENGERS): A Comprehensive Database of Terrestrial Active Volcanoes for the Analysis of Ongoing Volcanism on Venus // 54th Lunar and Planetary Science Conference / 13-17.03.2023, The Woodlands, USA, No. 2806, id.2476
4. Belyaev D.A., Dobrolenskiy Y.S., Ignatiev N.I., Evdokimova D.G., Dzuban I.A., Viazovatskiy N.A., Korablev O.I. Scientific concept of VOLNA experiment to study spectroscopy of Venus atmosphere // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium /

- 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-10, p. 206.  
[https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
5. L.M. Zelenyi, L.V. Zasova, O.I. Korablev, D.A. Gorinov, M.V. Gerasimov, N.I. Ignatiev, N.A. Eismont, M.A. Ivanov, D.V. Strelnikov, and the Venera-D team. Venera-D Mission Update // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium / 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-01, p. 185-186.  
[https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
6. I.V. Khatuntsev, M.V. Patsaeva, L.V. Zasova, D.V. Titov, N.I. Ignatiev, D.A. Gorinov, A.V. Turin. Twelve Years Cycle in the Cloud Top Winds on Venus // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium / 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-03, p. 189-190.  
[https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
7. L.V. Zasova, I.V. Khatuntsev, M.V. Patsaeva, D.A. Gorinov, N.I. Ignatiev, D.V. Titov, A.V. Turin. Some Peculiarities of the Venusian Mesosphere Dynamics // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium / 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-04, p. 191-192.  
[https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
8. P. D’Incecco, J. Filiberto, J.B. Garvin, G.N. Arney, S.A. Getty, I. López, R. Ghail, P. Mason, L. M. Zelenyi, L.V. Zasova, M.A. Ivanov, D.A. Gorinov et al. Introducing The “Analog for Venus’ Geologically Recent Surfaces” Initiative: An Opportunity For Identifying And Analyzing Recently Active Volcanotectonic Areas Of Venus Trough A Comparative Study With Terrestrial Analogs // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium / 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-09, p. 202-205.  
[https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
9. P. D’Incecco, D.A. Gorinov, M. Dolci, L. Tartaglia, F. De Luise, G. Valentini, M. Cantiello, J. Filiberto, S.S. Bhiravarasu, E. Brocato, G. Di Achille. The Campo Imperatore Advanced Venus’ Night Airglows Near-Infrared Telescope (ADVENANT) Project As A Ground-Based Segment For Future Missions To Venus // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium / 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-12, p. 208-210.  
[https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)
10. M.V. Patsaeva, I.V. Khatuntsev, D.V. Titov, N.I. Ignatiev, L.V. Zasova, D.A. Gorinov, A.V. Turin. Influence Of The Underlying Surface On The Zonal And Meridional Speed At The Cloud Top Level Near Noon From VMC/Venus Express And UVI/ Akatsuki Images // The Fourteenth Moscow Solar System Symposium / 9-13.10.2023, Moscow. 14MS3-VN-PS-01, p. 215-216. [https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3\\_ABSTRACT\\_BOOK-2023-12-06.pdf](https://ms2023.cosmos.ru/docs/2023/14ms3_ABSTRACT_BOOK-2023-12-06.pdf)