

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

_____ декабря _____ 2021 г.

М.п.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Миссия для комплексного исследования поверхности, атмосферы
и окружающей плазмы Венеры

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

0024-2021-0010

Научный руководитель,
академик РАН

_____ Л.М. Зелёный

« 27 » _____ декабря _____ 2021 г.

Москва

2021

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зам.
Руководителя

27.12.2021



Засова Л.В.
в.н.с., д.ф.-м.н.

Введение,
Заключение,
раздел 2

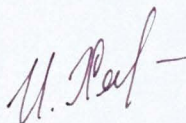
27.12.2021



Игнатьев Н.И.
с.н.с., к.ф.-м.н.

Введение

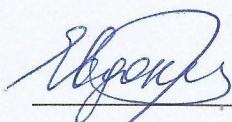
27.12.2021



Хатунцев И.В.
с.н.с., к.ф.-м.н.

Введение,
раздел 2

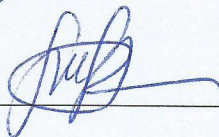
27.12.2021



Евдокимова Д.Г.
н.с., к.ф.-м.н.

Введение,
раздел 2

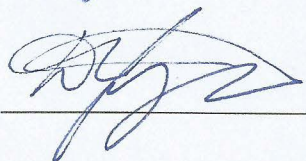
27.12.2021



Пацаева М.В.
н.с., к.ф.-м.н.

Раздел 2

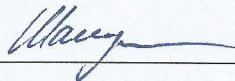
27.12.2021



Горинов Д.А.
м.н.с.

Введение,
Заключение,
раздел 2

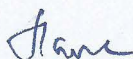
27.12.2021



Шакун А.В.
н.с., к.ф.-м.н.

Раздел 2

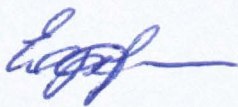
27.12.2021



Пацаев Д.В.
н.с.

Раздел 2

27.12.2021



Ефременкова
Е.В.

Нормоконтроль

РЕФЕРАТ

Настоящий документ содержит отчет о научно-исследовательской работе по теме 0024-2021-0010. «Венера-Д» — 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». В декабре 2021 года проведена международная онлайн-конференция «Венера-Д: вопросы обитаемости облаков Венеры». Тема обитаемости облаков Венеры является актуальной: условия в облаках, температура, давление, наличие воды в каплях серной кислоты, кажутся пригодными для существования микробной жизни. Это предположение было усилено сообщением об обнаружении фосфина — биомаркера, и простейшей аминокислоты — глицина, распространенного в межзвездной среде. Микроорганизмы могли бы существовать в среде сернокислотного аэрозоля в облаках, поддерживать свое существование, поглощая углекислый газ (CO_2), образующийся при окислении серо- и железосодержащих компонентов. Стационарные гравитационные волны от поверхности поддерживали бы их существование на определенной высоте. Некоторые классы бактерий имеют полосы поглощения в УФ-области спектра, их существование могло бы объяснить природу «неизвестного» УФ-поглотителя.
- 2) Продолжение научных фундаментальных исследований. Новые научные результаты появляются благодаря использованию новых алгоритмов и возможностей вычислительной техники для обработки (улучшения) данных предыдущих миссий и их интерпретации, для получения новой информации о Венере и ее атмосфере, которые имеют фундаментальное значение не только для понимания планеты как системы, но и для постановки и уточнения научных задач, подготовки комплекса научной аппаратуры для всех модулей космического комплекса «Венера-Д»; 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:

- Впервые проведен анализ полной базы данных изображений нижнего облачного слоя Венеры, полученных VIRTIS на длине волны 1,74 мкм. Получено среднее

распределение горизонтальных скоростей ветра на ночной стороне, обнаружены вариации от местного времени;

- Измерения в диапазоне 1,74 мкм дали возможность впервые сравнить поведение меридиональной скорости на верхней границе облаков (в УФ-диапазоне) и вблизи верхней границы нижнего облачного слоя (1,74 мкм). Сравнение показало сходный характер циркуляции;
- Благодаря геологическому и спектроскопическому анализу возраст склона вулкана Идунн Монс (область Имд) был оценен в 0–10000 лет (средний возраст поверхности составляет 500 млн лет), что предполагает вулканическую активность в настоящее время;
- Апробирована обновленная фотохимическая модель верхней атмосферы Венеры с учетом фотохимии димера (SO)₂ на основании вертикальных распределений SO₂ измеренных прибором SPICAV космической миссии «Венера-Экспресс».

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

Номер государственной регистрации - АААА-А18-118052890092-7. Отчет содержит 19 страниц, 2 рисунка, 14 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 Анализ циркуляции в нижнем облачном слое Венеры по наблюдениям VIRTIS/Venus Express.....	10
2.2 Валидация фотохимической модели с учетом димера монооксида серы в верхних слоях атмосферы Венеры	12
2.3 Ночные свечения в верхней атмосфере Венеры и перспективы наблюдений	13
2.4 Вопросы обитаемости атмосферы Венеры.....	14
3 Заключение	15
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.....	18
4.4 Статьи в сборниках материалов конференций.....	18
4.5 Доклады, тезисы, циркуляры	18

Список сокращений

АМ	Атмосферный модуль
ИК	Инфракрасный
КА	Космический аппарат
ОМ	Орбитальный модуль
ОНРГ	Объединенной научной рабочей группы
ПМ	Посадочный модуль
УФ	Ультрафиолет
ESA	European Space Agency
SPICAV	Spectroscopy for Investigation of Characteristics of the Atmosphere of Venus
SS-AS	Subsolar-to-Antisolar
VIRTIS	Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer
VMC	Venus Monitoring Camera

1 Введение

Настоящий документ содержит отчет о результатах исследований, проведенных в 2021 г. по теме 0024-2021-0010 «ВЕНЕРА-Д». **Научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера.**

Тема 0024-2021-0010 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, картирующим спектрометром VIRTIS и УФ-спектрометром SPICAV на орбитальном аппарате «Венера-Экспресс» (ESA, 2006–2015 гг.). 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. 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. Кроме того, было показано, что влияние горного массива проявляется в периодической смене замедления скорости ветра ускорением.

На данном этапе работы была проверена гипотеза о возможном влиянии рельефа поверхности на циркуляцию в нижнем облачном слое (44–48 км). Ранее было обнаружено замедление скорости ветра в нижнем облачном слое над областью Имд (46.5°S/214.5°E) на 4–5 м/с по данным VIRTIS («Венера-Экспресс»). Эта область — молодое в геологическом плане возвышение, самая известная вулканическая структура которого, Идунн Монс, свидетельствует о недавней активности. В работах этого года было показано, что геологический возраст Идунн Монс составляет всего лишь 0–2.5 млн лет, что гораздо моложе среднего возраста поверхности (500 млн лет). Выдвинута гипотеза о возможном влиянии активного вулканизма в области Имд на циркуляцию атмосферы Венеры.

Новая фотохимическая модель была создана (апробирована) на основе анализа данных спектрометра SPICAV («Венера-Экспресс»). Было показано, что химические реакции с (SO)₂

являются важным источником S_2O и соединений серы высокого порядка, которые могут быть ответственны за поглощение УФ-излучения в верхнем облачном слое Венеры.

2. Научное обоснование и концепция международной флагманской миссии для изучения Венеры на основе проекта «Венера-Д». Целью проекта «Венера-Д» является комплексное 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, 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 гермоконтнера в течение 2 часов на поверхности, включая бурение, забор грунта и изучение его приборами внутри гермоконтнера;
- 2) приборами, установленными внутри и снаружи гермоконтнера, 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.

Продолжалось детальное изучение научных задач проекта «Венера-Д», возможности различных инструментов для решения этих задач, научное обоснование экспериментов и формирование комплекса научной аппаратуры.

Особое внимание было уделено вопросам астробиологии – поиску жизни в облаках Венеры. На организованной в декабре конференции обсуждались условия для возникновения жизни в облаках, возможные биологические формы, способные к поддержанию экосистемы, модели эволюции климата. Кроме того, рассматривались предложения экспериментов и методов для поиска жизни, которые можно включить в научную программу предстоящих космических миссий, в т.ч. «Венеры-Д». Результаты предыдущей конференции по обитаемости Венеры были опубликованы в виде сборника статей.

Проработаны сценарии миссии для дат запуска 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. Показано, что при гравитационном маневре возможно увеличить точность посадки до трех порядков. При этом возможно

достижение областей как в Северном, так и Южном полушарии. В свете вероятного активного вулканизма в области Имд был проведен анализ ее достижимости для посадки.

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.

2 Венера. Фундаментальные исследования

2.1 Анализ циркуляции в нижнем облачном слое Венеры по наблюдениям VIRTIS/Venus Express

Нижний облачный слой Венеры находится на высоте 44–50 км. Будучи более плотным, он дает существенный вклад в полную оптическую толщину облаков, влияя существенно на динамику атмосферы. Одним из эффективных методов анализа являются измерения в ближней ИК области на ночной стороне. В результате измерений скорости ветра по перемещению облачных деталей на изображениях на 1,74 мкм (VIRTIS/VEX) изучалась циркуляция нижнего облачного слоя Венеры.

Впервые был проведен анализ полной базы данных изображений, полученных VIRTIS в канале 1,74 мкм. По результатам построены поля горизонтальных скоростей ветра на ночной стороне (Рисунок 1). Обнаружены вариации от местного времени как для зональной, так и меридиональной компоненты скорости. Так, зональная скорость замедляется на 2-3 м/с в направлении от вечернего к утреннему терминатору. Для средних широт характерна смена знака меридиональной скорости ветра: на большей части ночной стороны знак положителен (меридиональная скорость направлена к экватору), при этом максимум в 3-4 м/с находится в высоких широтах вблизи утреннего терминатора; однако в низких широтах вблизи утреннего терминатора скорость меняет знак на отрицательный и становится направленной к южному полюсу.

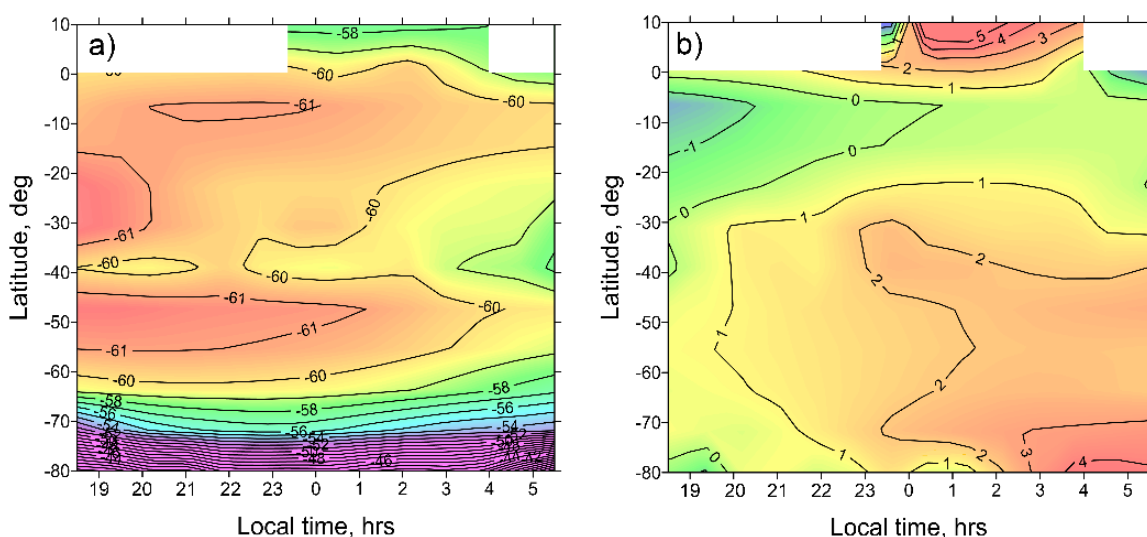


Рисунок 1. — Средняя зональная (а) и меридиональная (б) компоненты горизонтальной скорости ветра в нижнем облачном слое в зависимости от местного времени и широты по данным VIRTIS.

Отсутствие рассеянного солнечного излучения на ночной стороне упрощает задачу наблюдения различных уровней в атмосфере в одном спектральном канале (1.74 мкм)

благодаря изменению оптической толщины облаков с широтой и долготой, и следовательно, уровня формирования излучения. В нижнем облачном слое наблюдались фрагментарно вдоль широты (рисунок 1) области с разнонаправленной меридиональной скоростью, изменение знака меридиональной скорости коррелировало с изменением величины зональной скорости. (Следует отметить, что исходя из прямых измерений на посадочных аппаратах, зональная скорость растет с высотой). Большие значения зональной скорости соответствовали меридиональной скорости, направленной к полюсу (как в северных, так и южных широтах), и наоборот. Так как поведение меридиональной скорости, как на верхней границе облачного слоя (по УФ-наблюдениям, «Пионера-Венеры»), так и вблизи верхней границы нижнего облачного слоя совпадает, то можно предположить о схожей циркуляции в этих слоях, разделенных конвективным средним облачным слоем. В обоих случаях в слое, расположенном на большей высоте, меридиональная скорость направлена к соответствующему полюсу, как в южных, так и в северных широтах. Меридиональная скорость меняет знак на широте 5°S и в УФ, и в $1,74$ мкм. Среднеширотный джет наблюдается также в обоих случаях (верхний и нижний облачные слои разделены конвективным средним облачным слоем). Одним из вариантов объяснения может быть указание на то, что циркуляция организована в виде ячеек Хэдли в нижнем облачном слое, так же, как и в верхнем. Необходимо детальное измерение вертикального строения атмосферы от поверхности до верхней атмосферы (которое планируется на ОМ и ПМ «Венеры-Д» в диапазоне 0–100 км). При недостаточности данных моделирование является особенно важно, но, к сожалению, работающей модели общей циркуляции для моделирования Венеры в данный момент в России не существует.

Таким образом, впервые показано, что меридиональная циркуляция нижнего облачного слоя организована в виде ячеек Хэдли: в нижнем облачном слое ячейка наблюдалась фрагментарно. В экваториальной области облачный слой расположен приблизительно на 2 км выше, и в северных широтах (от $+10^{\circ}$ до -5°) наблюдался меридиональный поток, направленный к северному полюсу, а в южных широтах: от -5° до -20° - к южному полюсу – фрагменты прямой ветви ячейки Хэдли (как в южном, так и северном полушарии). На широтах $>20^{\circ}$ ю.ш. движение атмосферных масс направлено к экватору – возвратная ветвь.

Обнаружено замедление зонального ветра над горными массивами, наиболее ярко выражен эффект над массивом Имд. Анализ долготно-широтных вариаций зональной компоненты скорости ветра в южном полушарии показал, что в средних широтах в долготах 220 – 260° наблюдается замедление на 4 – 5 м/с. Этот эффект нельзя объяснить вариациями по местному времени, так как они составляют лишь 1 – 3 м/с. Координаты области, где наблюдается замедление, совпадают с координатами области Имд на поверхности Венеры.

По данным орбитальных наблюдений этой области с помощью спектрометра VIRTIS на борту миссии «Венера-Экспресс», была обнаружена спектральная аномалия в диапазоне длин волн 1 микрон. Такие аномалии принято связывать с отражательными способностями молодой лавы, которая ещё не успела подвергнуться выветриванию. По предположениям, подкрепленным совокупностью спектрального анализа, лабораторного моделирования, и геоморфологического исследования, возраст поверхности в этом районе не превышает 10 000 лет. При этом в пределах этого района находится характерная деталь ландшафта – кратер Сандел, 17 км в поперечнике. По существующим радарным данным, он практически не разрушен, кроме участка стенки с южной стороны, что может быть следствием более поздней тектонической активности. Возраст кратера оценивается в 350–75 миллионов лет. Совокупность этих результатов позволяют выдвинуть гипотезу, что Идунн Монс является активным вулканом, а его дальнейшее исследование рекомендуется в рамках будущих космических миссий, в т.ч. «Венеры-Д».

2.2 Валидация фотохимической модели с учетом димера монооксида серы в верхних слоях атмосферы Венеры

В 2021 году на основании вертикальных распределений двуокиси серы (SO_2) в диапазоне высот 85-105 км на терминаторе и ночной стороне Венеры, полученных из наблюдений УФ канала спектрометра SPICAV космической миссии «Венера-Экспресс» в режимах звездных и солнечных просвечиваний, была протестирована обновленная фотохимическая модель верхней атмосферы Венеры с учетом фотохимии димера SO , $(\text{SO})_2$ (Рисунок 2). Было показано, что химические реакции с $(\text{SO})_2$ являются важным источником S_2O , и, возможно, оксидов серы более высокого порядка, и полисеры. Все эти вещества поглощают излучение в ультрафиолетовой области спектра, где доминирует поглощение до сих пор неустановленным УФ поглотителем.

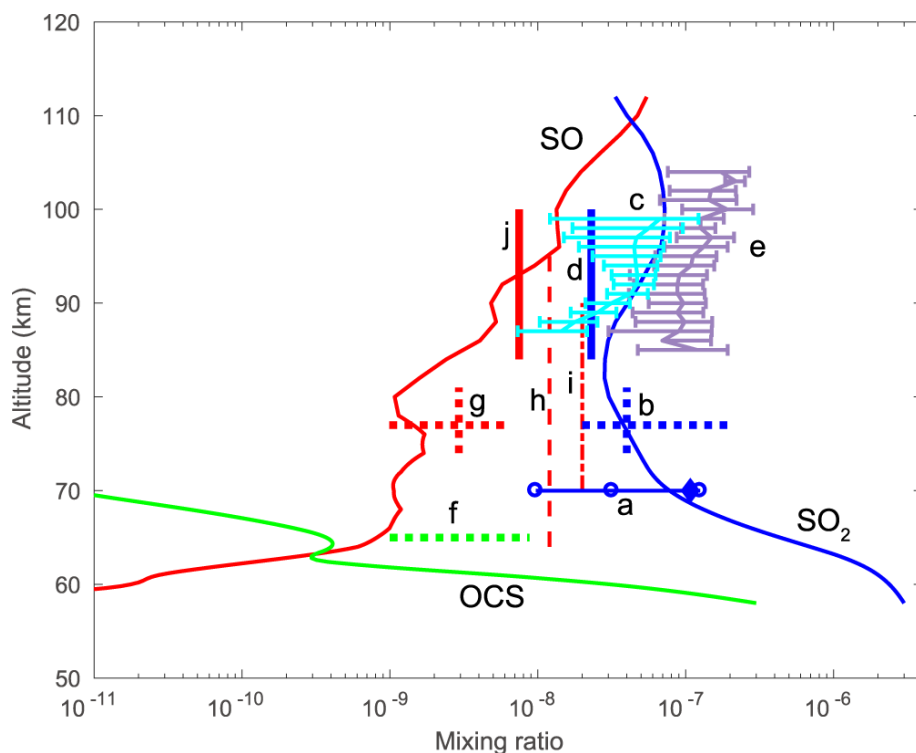


Рисунок 2. — Сравнение модельных профилей SO_2 , OCS и SO с наблюдениями. Профили модели представлены тонкими сплошными линиями. SO_2 - синий цвет, SO - красный цвет. Источники данных: a - SO_2 : Marcq E. et al. Climatology of SO_2 and UV absorber at Venus' cloud top from SPICAV-UV nadir dataset // *Icarus*. – 2020. – Т. 335. – С. 113368. b - SO_2 : Jessup K. L. et al. Coordinated Hubble space telescope and Venus express observations of Venus' upper cloud deck // *Icarus*. – 2015. – Т. 258. – С. 309-336. c - SO_2 : данные солнечных затмений с дисперсией 1 σ ; d - SO_2 : Sandor B. J. et al. Sulfur chemistry in the Venus mesosphere from SO_2 and SO microwave spectra // *Icarus*. – 2010. – Т. 208. – №. 1. – С. 49-60. e - SO_2 : данные звездных затмений с дисперсией 1 σ ; f - OCS: Krasnopolsky V. A. Spatially-resolved high-resolution spectroscopy of Venus 2. Variations of HDO, OCS, and SO_2 at the cloud tops // *Icarus*. – 2010. – Т. 209. – №. 2. – С. 314-322. g - SO: Jessup K. L. et al. Coordinated Hubble space telescope and Venus express observations of Venus' upper cloud deck // *Icarus*. – 2015. – Т. 258. – С. 309-336. h - SO: Plane J. M. C. Cosmic dust in the earth's atmosphere // *Chemical Society Reviews*. – 2012. – Т. 41. – №. 19. – С. 6507-6518. i - SO: Belyaev D. A. et al. Night side distribution of SO_2 content in Venus' upper mesosphere // *Icarus*. – 2017. – Т. 294. – С. 58-71. j - SO: Sandor B. J. et al. Sulfur chemistry in the Venus mesosphere from SO_2 and SO microwave spectra // *Icarus*. – 2010. – Т. 208. – №. 1. – С. 49-60. (Источник: Pinto J. P. et al. Sulfur monoxide dimer chemistry as a possible source of polysulfur in the upper atmosphere of Venus // *Nature communications*. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 1-6.)

2.3 Ночные свечения в верхней атмосфере Венеры и перспективы наблюдений

Ночные свечения в атмосфере Венеры наблюдались в верхних слоях (70–120 км), в малоизученной переходной зоне между динамическими режимами суперротации и SS-AS. Наиболее интенсивными свечениями на Венере являются свечения O_2 и NO. При этом исследование свечений является практически единственным способом понять, каким образом работает динамика атмосферы в этой области. Перемещение деталей свечения позволяет рассчитывать горизонтальные скорости ветра. Эти данные, в свою очередь, необходимы для создания моделей общей циркуляции атмосферы.

В связи с этим, для будущих орбитальных миссий, в т.ч. «Венеры-Д», исследование свечений является одной из самых важных научных задач. В статье, опубликованной Royer et

al. (2021), предлагается включить в научную программу миссий долговременный орбитальный мониторинг интенсивности и пространственного распределения свечений путем надирных наблюдений, а также вертикальных профилей путем лимбовых наблюдений. При этом необходимо получить как можно более полное распределение по долготе, широте и местному времени, так как из предыдущих исследований стало ясно, что вариации интенсивности свечений по этим параметрам существенно велики. Для дополнения к пониманию процессов в верхней атмосфере, в т.ч. химических реакций и атмосферной диссипации, целесообразна синергия с приборами-анализаторами плазмы и взаимодействия атмосферы с солнечным ветром.

2.4 Вопросы обитаемости атмосферы Венеры

Вопрос о наличии жизни в облачном слое является одной из главных фундаментальных научных задач исследования Венеры. Интерес к этой теме значительной возрос в 2020 году после открытия в атмосфере фосфина – вещества, в земных условиях являющегося биомаркером. В 2019 г. в рамках проекта «Венера-Д» был организован воркшоп по вопросам обитаемости Венеры. По результатам воркшопа была опубликована коллекция статей.

Согласно данным многолетних наблюдений с Земли и космических аппаратов, для облачного слоя Венеры характерно поглощение УФ-излучения неизвестными компонентами. Одна из гипотез, объясняющих УФ-поглощение, предлагает в качестве поглотителя бактерии-экстремофилы, подобные земным, которые отличаются схожим спектром поглощения в УФ-области.

Вопрос обитаемости заключается не только в исследовании облачного слоя, но и в оценке того, могла ли жизнь на Венере существовать в прошлом. Некоторые модели эволюции климата показывают, что вода в жидкой фазе (а значит, и условия для жизни) могла существовать на Венере в первые 1,5 млрд лет. Для будущих миссий важно получить атмосферные данные (малые составляющие, изотопные соотношения, свойства аэрозоля), которые помогут уточнить климатические модели, а также понять, что могло привести к изменению климата в сторону условий, менее пригодных для жизни. В случае установления установлении невозможности существования жизни на ранней Венере, результаты работы все равно окажутся полезными для сравнительного анализа атмосфер и климата экзопланет, находящихся в т.н. «венерианской зоне».

Новый воркшоп, посвященный вопросам обитаемости Венеры, был организован 30.11–3.12.2021 в рамках проекта «Венера-Д» и во многом основывался на результатах предшествующего мероприятия.

3 Заключение

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2021 г. по теме «ВЕНЕРА-Д — научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера».

Впервые было проанализировано полное количество изображений, полученных спектрометром VIRTIS («Венера-Экспресс») на длине волны 1,74 мкм. Обнаружена зависимость зональной и меридиональной компонент горизонтальной скорости ветра от местного времени. В зависимости от долготы также обнаружена аномалия – значительное замедление зональной скорости в координатах, соответствующих области Имд. Параллельный геологический анализ показал, что поверхность вулкана Идунн в области Имд имеет чрезвычайно молодой возраст и таким образом, совокупность всех факторов может указывать на текущую вулканическую активность.

В результате совместной интерпретации результатов измерений зональной и меридиональной компонент скорости ветра по изображениям картирующего спектрометра VIRTIS («Венера-Экспресс») на длине волны 1,74 мкм, относящихся к нижнему облачному слою и ранее полученных данных по измерениям камеры VMC («Венера-Экспресс») в УФ-области, относящихся к верхнему облачному слою, позволило впервые сравнить характер циркуляции в области верхней границы как верхнего, так и нижнего облачного слоя. В обоих случаях направление меридиональной скорости коррелирует с величиной зональной скорости (зональная скорость растет с высотой в атмосфере), так что большие значения зональной скорости (следовательно, и большие высоты в атмосфере) соответствуют меридиональной скорости, направленной к полюсу, как в южных, так и северных широтах.

Новая фотохимическая модель с учетом димера оксида серы была апробирована на основе анализа данных спектрометра SPICAV («Венера-Экспресс»). Моделирование показало, что реакции с участием димера способны производить S_2O , полисеру и оксиды серы высоких порядков. Эти вещества могут быть ответственны за наблюдаемое УФ-поглощение в верхнем слое атмосферы Венеры.

Обсуждается важность измерения ночных эмиссий (свечений) для понимания условий в переходной области между зональной суперротацией и SS-AS модой циркуляции (80-90 – 120 км). Мониторинг свечений O_2 и NO является практически единственным методом анализа динамических процессов в этой области. При этом, вследствие высокой изменчивости распределения и интенсивности ночных эмиссий, крайне важно получить полное покрытие данными по широте, долготе и местному времени.

Опубликованы результаты воркшопа 2019 г., посвященного вопросам обитаемости Венеры. Коллекция статей посвящена моделям эволюции климата, исследованию возможных биогенных процессов, анализу земных экстремофилов – возможных прототипов венерианских микроорганизмов, методам атмосферных исследований, с помощью которых в будущих миссиях рекомендуется осуществлять поиск следов жизни, применимости знаний об атмосфере и климате Венеры к исследованию венероподобных экзопланет.

В рамках темы «Венера-Д» М.В. Пацаева защитила диссертацию на тему «Динамика верхнего облачного слоя Венеры по данным камеры VMC орбитальной станции «Венера-Экспресс» под руководством Л.В. Засовой.

4 Список использованных источников

4.1 Список публикаций

Всего научных публикаций в 2020 г: 8

- Число публикаций работников в базе Web of Science: 6
- Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 8
- Статьи в зарубежных изданиях: 8
- Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 0
- Статьи в сборниках материалов конференций: 1
- Доклады, тезисы, циркуляры: 5
- Статьи в научно-популярных изданиях: 0
- Другие издания: 0

4.2 Статьи в зарубежных изданиях

1. Gorinov D.A., N.A., Zasova, L.V., Khatuntsev, I.V., Patsaeva, M.V., Turin, A.V. Winds in the Lower Cloud Level on the Nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 μm Images. // Atmosphere – 2021 - vol. 12 - no 186.
<https://doi.org/10.3390/atmos12020186>
2. Limaye, S., Head, J.W., Bullock, M.A., Zasova, L.V., Kovalenko, I.D., Nakamura, M., Cutts, J., Wilson, C., Martynov, A., Kosenkova, A., Helbert, J., Marcq, E., Vandaale, A.C., Ghail, R.C., Izenberg, N., Kremic, T. Future Exploration of Venus: International Coordination and Collaborations // Bulletin of the American Astronomical Society – 2021 - vol. 53 - no 4 – e-id. 509. <https://doi.org/10.3847/25c2cfef.e9d9adfe>
3. Limaye, S.S., Zelenyi, L., Zasova, L. Introducing the Venus Collection—Papers from the First Workshop on Habitability of the Cloud Layer // Astrobiology – 2021 - vol. 21 - no 10 – pp. 1157-1162. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0142>
4. Royer, E., Gray, C., Brecht, A., Gorinov, D., Bougher, S. Importance of airglow and auroral emissions as tracers of Venus' upper atmosphere dynamics and evolution // Bulletin of the American Astronomical Society – 2021 - vol. 53 - no 4 – e-id. 186.
<https://doi.org/10.3847/25c2cfef.265c70b6>
5. D’Incecco, P., Filiberto, J., López, I., Gorinov, D.A., Komatsu, G., Martynov, A., Pisarenko, P. The Geologically Supervised Spectral Investigation as a Key Methodology for Identifying Volcanically Active Areas on Venus // Journal of Geophysical Research: Planets – 2021 - vol. 126 - no 7 – e-id. e06909. <https://doi.org/10.1029/2021JE006909>

6. D’Incecco, P., Filiberto, J., López, I., Gorinov, D.A., Komatsu, G., Martynov, A., Pisarenko, P. The Young Volcanic Rises on Venus: a Key Scientific Target for Future Orbital and in-situ Measurements on Venus // Solar System Research – 2021 - vol. 55 - no 4 – pp. 315-323. <https://doi.org/10.1029/10.1134/S0038094621040031>
7. D’Incecco, P., Filiberto, J., López, I., Gorinov, D.A., Komatsu, G. Idunn Mons: Evidence for Ongoing Volcano-tectonic Activity and Atmospheric Implications on Venus // The Planetary Science Journal – 2021 - vol. 2 - no 5 – id. 215. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac2258>
8. Pinto, J.P., Li, J., Mills, F.P., Marcq, E., Evdokimova, D., Belyaev, D., Yung, Y.L. Sulfur monoxide dimer chemistry as a possible source of polysulfur in the upper atmosphere of Venus. // Nature Communications – 2021 – vol. 12 – id. 175. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20451-2>

4.3 Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах

4.4 Статьи в сборниках материалов конференций

1. Patsaeva, M.V., Khatuntsev, I.V., Turin, A.V., Zasova, L.V. Variations of the wind speed at the top cloud layer in equatorial latitudes according to results of long-term observations of VMC (Venus Express) and UVI (Akatsuki). Astronomy at the epoch of multimessenger studies. Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 2021 — Moscow, 2021, C.242. <https://www.vak2021.ru/wp-content/uploads/2021/12/VAKproceedings.pdf>

4.5 Доклады, тезисы, циркуляры

1. Zasova, L.V. Venera-D: a potential Roscosmos-NASA mission to explore Venus' atmosphere, surface, interior and plasma environment // 43rd COSPAR Scientific Assembly / 28.01-4.02.2021, Abstract B0.7-0014-21 (oral), id.251.
2. Zasova, L.V. Venera-D And Decade of Venus Exploration // The Twelfth Moscow Solar System Symposium / 11-15.10.2021, 12MS3-VN-08 https://ms2021.cosmos.ru/docs/2021/12ms3_book_5.pdf
3. Gorinov, D.A., Zasova, L.V., Shakun, A.V., Khatuntsev, I.V. O₂ Nightglow and Dynamics of Venus Atmosphere Around 100 km from VIRTIS-M/VEX // The Twelfth Moscow Solar System Symposium / 11-15.10.2021, 12MS3-VN-15 https://ms2021.cosmos.ru/docs/2021/12ms3_book_5.pdf
4. Засова Л.В. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021.; «Венера-Д»: миссия для комплексного исследования атмосферы, поверхности, внутреннего строения и окружающей плазмы Венеры. Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова, 23–28 августа 2021 года. с.11. https://www.vak2021.ru/wp-content/uploads/2021/08/vak2021_abstracts.pdf

5. Хатунцев И.В., Пацаева М.В., Титов Д.В., Игнатьев Н.И., Засова Л.В., Тюрин А.В. Циркуляция облачного слоя Венеры по многолетним наблюдениям дневной стороны планеты камерой VMC/Venus Express в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 23–28 августа 2021 года. С.254. https://www.vak2021.ru/wp-content/uploads/2021/08/vak2021_abstracts.pdf