

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
пл.-корп. РАН



А.А. Петрукович
2018 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Научный проект для комплексных фундаментальных исследований атмосферы,
поверхности, окружающей плазмы Венеры.

Тема ВЕНЕРА-Д

0028-2018-0013

Научный руководитель
академик РАН

Л.М. Зелёный
« » 2018 г.

Москва

2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Зам. руководителя

 Засова Л.В.
в.н.с., д.ф.-м.н.

Мошкин Б.Е.
в.н.с., к.ф.-м.н.

 Хатунцев И.В.
с.н.с., к.ф.-м.н.

 Игнатъев Н.И.
с.н.с., к.ф.-м.н.

 Шакун А.В.
н.с., к.ф.-м.н.

 Пацаев Д.В.
н.с.

 Пацаева М.В.
м.н.с.



СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Раздел 1 Венера. Фундаментальные исследования.....	6
2 Раздел 2 Научное обоснование международной флагманской миссии для изучения Венеры на основе проекта Венера-Д.....	10
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	13
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	15

РЕФЕРАТ

Отчет 21 стр., 2 рис., 31 источник.

ВЕНЕРА, ПЛАНЕТА, АТМОСФЕРА, ПОВЕРХНОСТЬ, ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ, ПЛАЗМА, ДИНАМИКА, СУПЕРРОТАЦИЯ, ПРОЕКТ ВЕНЕРА-Д, НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ, ДОРОЖНАЯ КАРТА, КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ, ОНРГ, ОРБИТА, СВЕЧЕНИЕ, СПЕКТРОСКОПИЯ

ВВЕДЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2018 г. по теме 0028-2018-0013 «ВЕНЕРА-Д». **Научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера.**

Тема 0028-2018-0013 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.

Работа включает два направления:

1. Фундаментальные исследования Венеры: получение новых данных о планете Венера на основе информации, полученной предыдущими миссиями, такими как «Венера-Экспресс» (ESA) и работающей в настоящее время «Акацуки» (JAXA).

- В результате работы картирующего спектрометра VIRTIS, а также камер «Акацуки» получено огромное количество качественных детальных изображений Венеры в разных спектральных интервалах, позволяющих изучать динамику на разных уровнях атмосферы, измеряя скорости ветра по движению облачных деталей. Динамика атмосферы – одна из «загадок» планеты, и эти работы являются исключительно важными для определения механизмов, определяющих характер циркуляции. Эта тема актуальна и в настоящее время находится на переднем крае венерианской науки: коллективы из Японии, Европы, США, также как и научный коллектив темы «Венера-Д», работают над этой проблемой. Благодаря уникальным алгоритмам, разработанным членами коллектива, получены результаты о влиянии рельефа поверхности на циркуляцию атмосферы в мезопаузе (90-110 км) – в переходной области между двумя основными модами циркуляции атмосферы Венеры, а также на высотах 68-70 км;

- Сделан обзор строения и свойств облаков на основании имеющихся данных;

- В октябре 2017 в ИКИ была проведена международная конференция «Venera-D: Venus Modeling Workshop», целью которой было обоснование и уточнение научных задач проекта «Венера-Д», а также определения необходимых измерений для построения моделей и решения научных проблем Венеры. Материалы конференции опубликованы в 2018 в электронном и бумажном виде.

2. Научное обоснование международной флагманской миссии для изучения Венеры на основе проекта «Венера-Д» и создание концепции «сбалансированной» миссии:

- В 2018 году продолжила работу Объединенная Научная Рабочая Группа (ОНРГ) ИКИ/Роскосмос - НАСА по проекту «Венера-Д» (Venera-D Joint Science Definition Team, JSdT). Участниками проекта – членами JSdT, в кооперации с учеными НАСА, изучался научный аспект миссии, предварительно определялись вклады сторон в проект. В результате предложен концепт «сбалансированной» миссии;

- Один из важных приборов на борту «Венеры-Д» - планетный фурье-спектрометр PFS-VD. Обоснование и постановка научных задач, проработка концепции, изучение прототипов (TIRVIM/ACS) и анализ возможных ошибок также включены в тему «Венера-Д».

Раздел 1. ВЕНЕРА. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Проект "Венера-Д" представляет собой научную миссию для комплексных фундаментальных исследований атмосферы, поверхности, окружающей плазмы Венеры. Научные задачи проекта нацелены на решение фундаментальных проблем Венеры, понимания эволюции климата Венеры: почему эволюционные пути двух планет-близнецов так сильно разошлись и привели к комфортным условиям для жизни на Земле и «адскому» климату на Венере. Не движется ли наш климат в направлении венерианского? Фундаментальные задачи изучения Венеры связаны также с вопросами сравнительной планетологии и проблемы обитаемости, в частности, в связи с открытием землеподобных экзопланет, которые в своем большинстве похожи на Венеру.

Отсутствие океанов и смены сезонов на Венере не делает ее атмосферу простой для построения моделей общей циркуляции (General Circulation Models, GCM). Имеющиеся на данный момент модели не работают в полной мере и не могут объяснить многих ее особенностей. В 2017 году было организовано два международных совещания по моделированию Венеры – одно в г. Кливленд, США, другое в октябре в Москве под названием “Venera-D: Venus Modeling Workshop” – «Моделирование Венеры для целей проекта «Венера-Д». Значение, которое придается американской стороной фундаментальным исследованиям при подготовке и обосновании миссии говорит факт полной финансовой поддержки НАСА 12 приглашенных докладчиков на этом мероприятии. Цель совещания – постановка вопросов к ученым, занимающимся численным моделированием, для определения научных задач «Венеры-Д», а также формулирование вопросов, необходимых для моделей, на которые должен ответить проект (в 2018 году материалы опубликованы в электронном и бумажном вариантах).

Совершенно очевидна важность фундаментальных исследований, связанных с получением новых сведений о динамике, составе и строении атмосферы на основе измерений прошлых миссий – «Венера-Экспресс» (Европейское космическое агентство) или продолжающих работать – «Акацуки» (Японское космическое агентство).

1.1. Циркуляция атмосферы Венеры на высоте 90–100 км на основании движения областей свечения $O_2(a^1\Delta_g)/1,27$ мкм по данным прибора VIRTIS-M

Картирующим спектрометром VIRTIS, Venus Express с апреля 2006 по август 2008 получено большое количество качественных детальных изображений Венеры, позволяющих изучать динамику на разных уровнях в атмосфере, измеряя скорости ветра по движению «облачных» деталей. Эти работы являются исключительно важными для выявления механизмов, определяющих характер циркуляции. Картирование распределения свечения молекулярного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ 1.27 мкм на ночной стороне представляет собой одну из таких задач.

На высотах 90-110 км в области мезопаузы находится «переходная» область между двумя режимами циркуляции. Ниже 90 км – ретроградная зональная суперротация (RZS), скорость западного ветра растет от 1 м/с вблизи поверхности до максимума 100 м/с на верхней границе облаков. Выше 110 км в термосфере – основной режим циркуляции (SS-AS) от подсолнечной точки (SubSolar) к антисолнечной (AntiSolar): атмосферные массы поднимаются в полдень (SS), через терминаторы движутся на ночную сторону и опускаются в полночь (AS).

Максимум свечения кислорода соответствует высоте 97 ± 2 км (по лимбовым измерениям VIRTIS), и его горизонтальное распределение является индикатором динамики в области мезопаузы Венеры – практически единственным дистанционным методом изучения динамики этой области. «Облака» свечения молекулярного кислорода возникают в результате рекомбинации атомарного кислорода в областях конвергенции атмосферных потоков, приходящих с дневной стороны. Наблюдение за перемещением

идентифицированных деталей ярких областей свечения позволяет вычислять соответствующие горизонтальные скорости ветра.

Режим SS-AS на этих высотах присутствует, но не симметричен: в среднем потоки с утренней и вечерней стороны встречаются в секторе 22.5 ± 0.5 h вместо полуночи, т.е. наблюдается смещение в направлении на восток, обратном зональной суперротации, при этом «утренняя» скорость ветра превышает «вечернюю» на 20-40 м/с. Влияния RZS на динамику в «переходной» области не было отмечено.

Анализ данных показывает, что поле скоростей, как и свечение кислорода изменчиво от орбиты к орбите, т.е. на временном масштабе земных суток. В рамках анализа вариаций скорости ветра были отобраны орбиты, на протяжении которых было получено более 100 векторов при географическом покрытии площади более $50^\circ \times 50^\circ$. Как правило, поля скоростей на отдельных орбитах повторяют асимметричную картину: "утренний" поток на восток преобладает над "вечерним". Наблюдаются круговые течения, отклонения от потока, наблюдающиеся над венерианскими высокогорьями (область Атлы, Фебы и т.д.). В этих случаях поток "обтекает" контуры возвышенностей, либо расположенных непосредственно под ним, либо смещенных на несколько градусов в направлении основного потока. За весь период наблюдений характерный размер круговых течений варьировался от 500 до 4000 км.

Форма области свечения кислорода нередко повторяет контуры возвышенности, находясь либо непосредственно над ней, либо со смещением в направлении основного потока. Ниже рассмотрен пример орбиты №367, в течение которой наблюдалась максимальная интенсивность свечения $O_2(a1\Delta g)$, ~ 6 МРл, за весь период работы прибора VIRTIS-M (Рис. 1). В данном случае область свечения расположена между 290° и 320° долготы (0.5–2.5 ч местного времени) и между $40^\circ S$ и $10^\circ N$ широты. Размер и морфология области свечения совпадает с расположенным в этой же части диска Венеры горным массивом Феба. Область свечения была смещена против направления потока и повернута по часовой стрелке до совпадения с контурами массива Феба. Рассчитана функция корреляции между высотой рельефа и интенсивностью свечения, максимум функции корреляции на сетке $5^\circ \times 5^\circ$ оказался равен 0,61 при смещении области свечения на 20° на запад, 7° к экватору (на север) и повороте на 14° по часовой стрелке.

Наблюдаемое явление качественно интерпретируется как действие стационарных орографических волн. Проявления рельефа поверхности на высоте ~ 100 км, влияние на циркуляцию на этих высотах обнаружены впервые. Ранее было показано, что в «переходной» области особенности в горизонтальном распределении температуры (асимметрия между утренней и вечерней температурой) объясняются термическими приливами. Моделирование показало, что форма вертикальных профилей свечения O_2 1.27 мкм объясняется действием гравитационных волн.

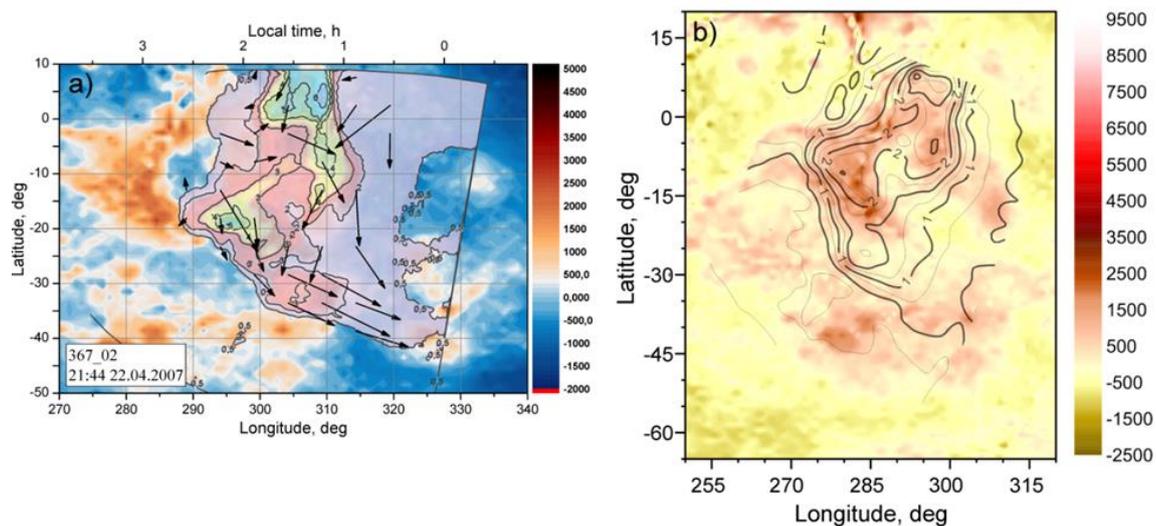


Рисунок 1. Орбита №367, область Феба. (а) На топографическую карту (Magellan) наложены: скорость ветра - стрелки; интенсивность свечения O_2 , (MR) - изолинии; (b) изолинии свечения, наложенные на топографическую карту, после смещения на 20° на запад, 7° на север и поворота на 14° по часовой стрелке повторяют контуры рельефа.

1.2. Исследование влияния рельефа материковой возвышенности Земля Афродиты (Aphrodite Terra) и местного времени на циркуляцию на верхней границе облачного слоя по многолетним наблюдениям VMC с борта Venus Express

Камера VMC, работавшая на борту аппарата Венера-Экспресс с 2006 по 2013 год, позволила получить цифровым корреляционным методом (Khatuntsev et al., 2013; Patsaeva et al., 2015) по сериям УФ (365 нм) изображений Венеры, беспрецедентный по продолжительности ряд векторов скорости горизонтального потока на верхней границе облаков (70 ± 2 км). Этот набор данных позволил детально исследовать атмосферную циркуляцию, включая широтные и долготные вариации скорости ветра. При этом изучалась корреляция этих вариаций с рельефом подстилающей поверхности, а также их зависимость от местного времени.

Зональная и меридиональная компоненты скорости демонстрируют корреляцию с рельефом подстилающей поверхности. Минимальная зональная скорость наблюдается в полдень над Ovda Regio (10° ю.ш., 93° в.д.) (Рис.2), наивысшей областью Земли Афродиты, которая является одной из наиболее высоких горных образований в экваториальных широтах. Область относительно медленного зонального потока простирается от экватора до, по крайней мере, 30° ю.ш. В это же время скорость ветра увеличивается приблизительно на 5 м/с от экватора до 30° ю.ш. с одновременным смещением минимума скорости в направлении суперротации. Другая область уменьшения величины зональной и меридиональной скорости наблюдается в экваториальной области около 13-14 часов местного времени и может быть связана с солнечным приливом. Влияние топографии и солнечного прилива на зональный поток над Землей Афродиты проявляется в существовании протяжённой области торможения в интервале от 11 до 14 часов местного времени.

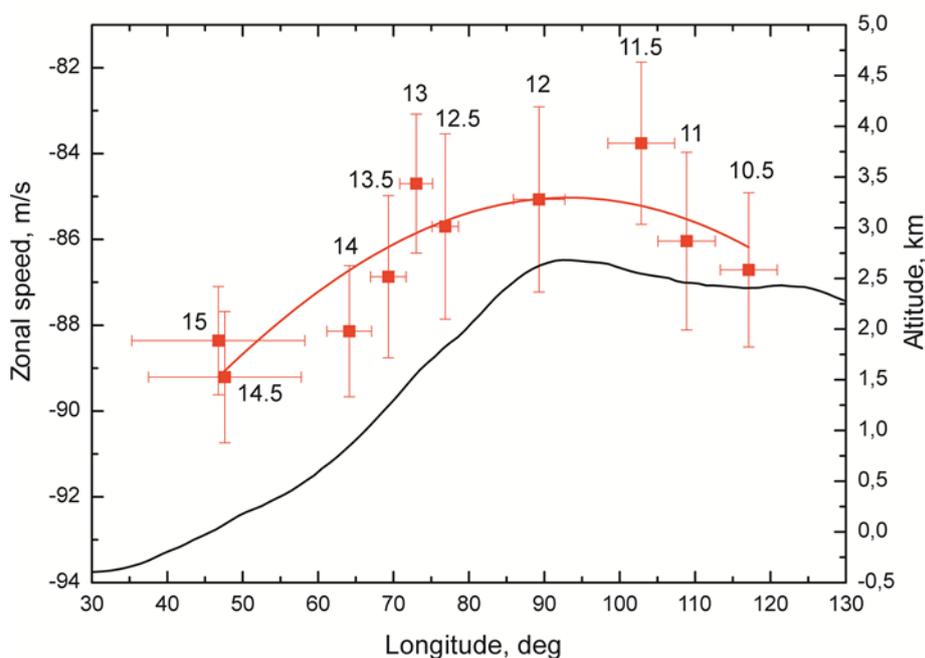


Рисунок 2. Положение минимума скорости зонального потока для различных интервалов местного времени (красные квадраты) над Землей Афродиты как функция долготы. Показаны доверительные интервалы 99.7% ($3 \cdot \text{SEM}$, где SEM – стандартная ошибка среднего).

1.3 Облака и дымки в атмосфере Венеры

Работа представляет обзор современных представлений о системе облаков Венеры, основываясь в основном как на результатах, полученных миссиями *in situ* «Венера», «Пионер-Венера» и «ВЕГА», пролетным аппаратом «Галилео», орбитальным «Венера Экспресс».

Благодаря *in situ* измерениям спускаемых аппаратов удалось определить основные свойства системы облаков Венеры, вертикальную структуру, состав и микрофизические параметры. С тех пор был осуществлен значительный прогресс за счет дистанционного зондирования с пролетных аппаратов «Галилео» и «Мессенджер» и орбитальных «Венеры-Экспресс» и «Акацуки». Они позволили детально исследовать мезосферные дымки с помощью солнечно- и звезднозатменного просвечивания в широком спектральном диапазоне от УФ до теплового ИК. Изображающая спектроскопия в «окнах прозрачности» в ближнем ИК-диапазоне на ночной стороне открыла новый и эффективный способ зондирования глубокой атмосферы. Вместе с почти одновременной съемкой УФ-приборами данный метод позволил полноценно изучить облачную морфологию от верхней границы до глубоких слоев. КА «Венера-Экспресс» работал на орбите с апреля 2006 г. по декабрь 2014 г. и собрал базу данных измерений, характеризующих облака и дымки Венеры на протяжении почти 14 венерианских лет, предоставляя возможность изучать в том числе временные и пространственные вариации. Полярная орбита «Венеры-Экспресс» с перицентром над северным полюсом позволила изучать и широтные вариации. Все эти исследования дополняются исследованиями орбитального аппарата «Акацуки», который начал измерения в мае 2016 г. Работа суммирует имеющиеся на данный момент сведения о системе облаков Венеры, концентрируясь на результатах, полученных проектами «Венера», «Пионер-Венера» и «ВеГа».

Раздел 2. НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ФЛАГМАНСКОЙ МИССИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЕНЕРЫ НА ОСНОВЕ ПРОЕКТА ВЕНЕРА-Д

2.1. Совместный с НАСА проект «Венера-Д»

Объединенная Научная Рабочая Группа по проекту «Венера-Д» в 2018 году продолжила свою работу (за время работы с 2015 года проведено 62 общих телеконференции, более 30 технологических и атмосферных, 9 очных встреч в Москве). Совместный с НАСА проект строится на основе детального изучения элементов миссии, научных приборов, научных задач, которые были поставлены перед оригинальным проектом «Венера-Д», сравнения с целями и задачами, дорожной картой изучения Венеры НАСА и отождествления «пробелов», т.е. тех научных задач, которые не могут быть выполнены без потенциального вклада НАСА в проект. Итоговый отчет по результатам работы группы в 2015-2016 гг. был представлен и опубликован на сайтах Роскосмоса, ИКИ и НАСА. По результатам работы американской стороной (НАСА) было продлено финансирование на два года 2017-2018. Отчет Этапа II работы группы за 2017-2018 будет опубликован 31 января 2019 года.

Венера – ближайшая к Земле планета, самый яркий объект на небе после Солнца и Луны. Она образовалась во внутренней области Солнечной Системы из того же протопланетного материала, что и Земля, имеет близкий размер, массу и плотность, а следовательно, и состав, и часто называется «сестрой Земли». Но на этом сходство заканчивается: на Земле – комфортный климат для жизни, на Венере – «адские» условия на поверхности.

Климат Венеры управляется массивной атмосферой из углекислого газа с давлением у поверхности 92 атм. Гигантский парниковый эффект обеспечивает температуру поверхности +470°C. Атмосфера Венеры является естественной лабораторией для изучения парникового эффекта, который играет важную роль не только для Венеры, но и для земного климата. Для сравнения, на Земле парниковый эффект поднимает среднюю температуру планеты до комфортных +15°C (в противном случае она была бы равна -20°C, и высокоразвитая жизнь на нашей планете вряд ли была бы возможна). Актуален вопрос: почему и когда эволюционные пути двух планет-близнецов разошлись, и не движется ли постепенно климат Земли в сторону венерианского?

Покрытая слоем серникоислотных облаков толщиной около 20 км, и имея «адские» условия на поверхности, Венера сложна для исследования. Она фактически была заново открыта космическими аппаратами. Но, несмотря на интенсивные космические исследования 70-80-90 годов, а также 2000х (АМС «Венера», «Маринер», «Пионер-Венера», «ВЕГА», «Магеллан», «Венера-Экспресс», «Акацуки»), Венера по-прежнему остается мало понятной планетой, «планетой загадок». Для решения фундаментальных «загадок» Венеры, таких, как причина суперротации атмосферы; природа «неизвестного» УФ-поглопителя в верхнем облачном слое (не исключено, что за УФ поглощение отвечают бактерии); крайне низкое содержание воды (на 5 порядков ниже, чем на Земле); гигантские вулканические извержения последнего миллиарда лет; состав не залитой лавой древней поверхности; вопрос о том, существовал ли океан, а следовательно, и возможная жизнь, в ранней истории планеты, и многих других научных проблем, необходимы комплексные измерения непосредственно в атмосфере и на поверхности, сопровождаемые дистанционными измерениями с орбиты.

Концепция миссии «Венера-Д», предлагаемая ОНРГ

Проект состоит из базовых элементов (базовая миссия) и дополнительных – потенциальный вклад НАСА.

Базовые элементы миссии

Проект «Венера-Д» включает «базовые» элементы: орбитальный и посадочный аппараты (Россия):

- Орбитальный аппарат (ОА) на 24-часовой полярной орбите, с комплексом самой современной научной аппаратуры. Помимо российских приборов, предложены спектрометры (Италия), а также камеры, покрывающие спектральные диапазоны от УФ до теплового ИК (Германия, Япония).

- Посадочный аппарат (ПА) типа «Венера-ВЕГА». Созданный в СССР ПА совершил 10 успешных посадок на поверхность Венеры. До сих пор эти посадки остаются единственными в истории освоения ближайшей планеты, поэтому Венера заслуженно имела титул «русская планета». В состав комплекса научной аппаратуры (КНА), кроме российских, включены 3 прибора НАСА. Планируется грунтозаборное устройство, которое доставит образцы грунта внутрь гермоотсека ПА для исследования. Не исключается доставка внутрь образцов атмосферы во время спуска. Рассчитывается, что ПА проработает на поверхности 2-3 часа.

- В состав КНА ПА включена малая долгоживущая станция LLISSE (НАСА). Она продолжит работу в течение 60 дней после завершения работы ПА. Орбита и место посадки ПА рассчитаны так, чтобы иметь возможность передать всю информацию, полученную ПА, а затем поддерживать надежную связь с малой станцией на ОА в течение времени ее жизни.

Дополнительные элементы миссии

Помимо базовых элементов, проект включает дополнительные элементы миссии:

- Долгоживущие станции (ДС) – НАСА. Малая станция LLISSE – 60 дней, или станция более высокого класса, SAEVe, которая может прожить на поверхности 120 дней, т.е. более одних солнечных суток (116 земных). Эти станции имеют в своем составе сейсмометры, что позволит произвести первые сейсмические наблюдения на поверхности Венеры.

Важно, что долгоживущие станции на поверхности разрабатываются НАСА специально для «Венеры-Д». Работа начата в 2016 году по инициативе и предложению ОНРГ. Уровень технической готовности (Technical Readiness Level, TRL) достигает к настоящему времени 3 – 5.

- Аэростатный зонд (АЗ) с переменной высотой плавания – НАСА. Для обоснованного выбора АЗ для «Венеры-Д» НАСА была финансирована работа группы специалистов по атмосферным платформам, которой был проведен анализ всех возможных зондов, испытанных в земной атмосфере и новых, которые могли бы быть предложены для Венеры. По результатам работы группы, на рассмотрение ОНРГ было предложено 7 вариантов атмосферных платформ. В итоге, после анализа ОНРГ, был выбран аэростатный зонд с переменной высотой плавания как наиболее подходящий с точки зрения науки, научных задач и реализуемости.

- Субспутник на эллиптической орбите или в точке Лагранжа L1 – Роскосмос.

Несмотря на сложность, миссия является абсолютно реализуемой. Дополнительные элементы НАСА не усложняют ПА, дополнительные долгоживущие станции отделяются за 3 недели до выхода на орбиту, Вероятно также отделение от комплекса до выхода на орбиту вокруг Венеры и атмосферного зонда (АЗ) в собственной оболочке и с

собственной системой спуска. Оценки ОНРГ и НПО им. Лавочкина показывают, что при запуске с космодрома Восточный с помощью ракеты Ангара-А5 ресурсы достаточны для запуска описанной выше миссии для любого окна старта в годы 2026, 2028, 2029, 2031.

2.2 Инфракрасная спектроскопия атмосферы Венеры

Одним из важных приборов для решения проблемы суперротации, строения облачного слоя, содержания газов, образующих облака, термических приливов и др. на борту «Венеры-Д» предполагается планетный фурье-спектрометр (ФС) PFS-VD. Подобный фурье-спектрометр, но с существенно худшими характеристиками был установлен на КА «Венера-15», 1983г. и показал большие возможности подобного эксперимента для Венеры. «Венера-Экспресс» со всем комплексом научной аппаратуры (к сожалению, с неработающим фурье-спектрометром PFS) не смогла перекрыть результатов ФС «Венеры 15», который проработал всего 2 месяца. Постановка задач, проработка концепции, изучение прототипов (ACS/TIRVIM, «ЭкзоМарс-2016») и анализ возможных ошибок также включены в тему «Венера-Д».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете использованы результаты исследований, проведенных в 2018 г. по теме ВЕНЕРА-Д – научный проект для комплексных фундаментальных исследований планеты Венера.

1. Динамика в области мезопаузы Венеры на высоте 90 – 110 км по движению «облаков» свечения молекулярного кислорода на ночной стороне Венеры по данным VIRTIS-M на КА «Венера-Экспресс» ЕКА

По движению «облаков» свечения O_2 построены поля скоростей горизонтального ветра. Показано, что режим SS-AS на этих высотах присутствует, но не симметричен: потоки с утренней и вечерней стороны встречаются в секторе $22.5 \pm 0.5h$ вместо полуночи, т.е. наблюдается смещение в направлении, обратном зональной суперротации, при этом «утренняя» скорость ветра превышает «вечернюю» на 20-40 м/с. Влияния RZS на динамику в «переходной» области не было отмечено.

В полях скоростей выявляются детали рельефа планеты: наблюдаются круговые движения, похожие на «огибание» ветром возвышенностей, масштаб до 2000 км. Наблюдается удивительное повторение крупных деталей рельефа со сдвигом до 2 тыс. км в направлении основного потока. После совмещения областей свечения с рельефом подстилающей поверхности получен коэффициент корреляции между высотой рельефа и интенсивностью свечения, равный 0.61 (Феба). Феномен интерпретируется как влияние стационарных орографических волн. Проявления рельефа поверхности на высоте ~ 100 км обнаружены впервые. Ранее было показано, что в переходной области горизонтальное распределение температуры объясняется термическими приливами, и вертикальные профили свечения O_2 1.27 мкм – гравитационными волнами.

2. Исследование влияния рельефа материковой возвышенности Земля Афродиты (Aphrodite Terra) и локального времени на циркуляцию на верхней границе облаков по последовательным УФ снимкам облачного покрова Венеры, полученных VMC на КА «Венера-Экспресс» ЕКА

На верхней границе облаков (70 ± 2 км) исследовались особенности динамики горизонтального потока. Выполнен подробный анализ замедления зонального ветра. Над материковой возвышенностью Земля Афродиты зональный поток замедляется на $13,4 \pm 4,4$ м/с. Это значение статистически значимо, поскольку стандартная ошибка среднего составляет 1-2 м/с. Рельеф подстилающей поверхности оказывает влияние также на меридиональную составляющую потока. Наиболее выраженное торможение зонального потока наблюдается в местный полдень над высочайшей областью Земли Афродиты. С течением местного времени область минимальных скоростей, деформируясь смещается на запад почти исчезая к вечеру. Амплитуда замедления скорости ветра уменьшается и сдвигается вниз по течению, когда мы смещаемся на юг от Земли Афродиты. Мы предполагаем, что обнаруженное замедление зонального потока является следствием взаимодействия гравитационных (горных) волн, создаваемых Землей Афродиты, с атмосферной циркуляцией. Возмущение как зональной, так и меридиональной составляющей горизонтального потока в экваториальной области около 13-14 часов местного времени может быть объяснено солнечным приливом. Влияние топографии и солнечного прилива на зональный поток над Землей Афродиты проявляется в малых долгоживущих станции существования протяжённой области торможения в интервале от 11 до 14 часов местного времени.

3. Строение и состав облаков Венеры

Обзорная работа, проведенная в рамках проекта, объединила результаты прошедших миссий, исследовавших облачный покров Венеры, как *in situ*, так и

дистанционно. Итоги этой работы важны для понимания научных задач будущих проектов, таких, как «Венера-Д» и для выбора научной аппаратуры для исследования нерешенных проблем. Одной из главных загадок облачного слоя по-прежнему остается «неизвестный УФ-поглотитель», химический состав которого поможет определить спектрометр на борту аэростатного зонда. При этом преимущество следует отдать аэростатному зонду, способному контролировать высоту полета. Спектроскопия в УФ- и ИК-диапазонах с орбитального аппарата в более высоком, чем ранее, разрешении, сможет дополнить химические и фотохимические модели атмосферы. Для понимания теплового баланса атмосферы необходим длительный анализ атмосферного альbedo в УФ-диапазоне с накоплением данных в больших пространственных и временных промежутках.

4. Работа по проекту «Венера-Д»

В результате работы ОНРГ по проекту «Венера-Д» проработан концепт миссии к Венере, беспрецедентной по научным задачам и составу аппаратов. «Сбалансированная» миссия по научным задачам и вкладу сторон состоит из базовых российских элементов – орбитального и посадочного. В состав посадочного аппарата включены 1-2 малых долгоживущих станции НАСА.

Дополнительные элементы миссии включают 2-3 долгоживущих станции (НАСА), возможно, содержащие сейсмометры, аэростатный зонд с переменной высотой плавания (НАСА), субспутник – Роскосмос. Многие измерения будут производиться впервые и позволят ответить на вопрос, почему две планеты-сестры так сильно различаются.

Оценки (ОНРГ и НПОЛ) показывают, что у космических агентств имеются достаточные ресурсы для осуществления «сбалансированной» миссии «Венера-Д» в окнах старта 2026, 2028, 2029, 2031 гг. с космодрома Восточный с помощью ракеты «Ангара-А5».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Список публикаций:

Всего научных публикаций в 2018 г: 31

Число публикаций работников в базе Web of Science: 4

Публикации, подготовленные в соавторстве с зарубежными учёными: 16

Статьи в зарубежных изданиях: 4

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах: 4

Статьи в сборниках материалов конференций: 5

Доклады, тезисы, циркуляры: 17

Статьи в научно-популярных изданиях: 0

Другие издания: 1

Статьи в зарубежных изданиях:

1. Glaze L.S., Wilson C.F., Zasova L.V., Nakamura M., Limaye S. Future of Venus Research and Exploration, Space Sci Rev (2018) 214:89, <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0528-z>. **Impact Factor 9.327**
2. Gorinov, D. A., Khatuntsev, I. V., Zasova, L. V., Turin, A. V., & Piccioni, G. (2018). Circulation of Venusian atmosphere at 90–110 km based on apparent motions of the O2 1.27 μm nightglow from VIRTIS-M (Venus Express) data. Geophysical Research Letters, 45. <https://doi.org/10.1002/2017GL076380>. **Impact Factor 4.339**
3. Titov, D.V., Ignatiev, N.I., McGouldrick, K., Wilquet, V., Wilson, C.F. (2018) Clouds and Hazes of Venus. Space Science Reviews, 214:126. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0552-z>. **Impact factor: 9.327**
4. Moshkin B.E., Grigoriev A.V., Shakun A.V., Patsaev D.V., Zharkov A.V., Vagin V.A. The TIRVIM Fourier Spectrometer for Studying The Martian Atmosphere. Instruments and Experimental Techniques, 2018. Vol.61. No. 1, pp 130-135. DOI:10.1134/S0020441217060070. **Impact factor: 0.613**

Статьи в отечественных научных рецензируемых журналах:

1. Засова Л.В., Горинов Д.А., Эйсмонт Н.А., Коваленко И.Д., Аббакумов А.С., Бобер С.А. «Венера-Д» – проект автоматической станции для исследования Венеры, Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2018, Том: 41, №: 3, стр. 13-17.
УДК 629.785:523.42
2. Эйсмонт Н.А., Засова Л.В., Симонов А.В., Коваленко И.Д., Горинов Д.А., Аббакумов А.С., Бобер С.А. Сценарий и траектория миссии «Венера-Д», Вестник НПО имени С.А. Лавочкина, 2018, Том: 42, №: 4 (в печати).
УДК 629.78.015:531.55:523.42
3. Мошкин Б.Е., Григорьев А.В., Шакун А.В., Пацаев Д.В., Жарков А.В., Вагин В.А. Фурье-спектрометр ТИРВИМ для исследования атмосферы Марса. Приборы и техника эксперимента. 2018, №1, стр. 116 – 122. DOI: 10.7868/S0032816217060088.
Импакт-фактор (РИНЦ): 0.673
4. Мошкин Б.Е., Шакун А.В., Игнатъев Н.И. Некоторые свойства аппаратной функции фурье-спектрометра. Оптический журнал (РНФ). Том 85, № 4 /Апрель 2018/ стр. 36-40. УДК 535.41, 535.42, 681.785.574. **Импакт-фактор (РИНЦ): 0.615**

Статьи в сборниках материалов конференций:

1. Горинов Д.А., Хатунцев И.В., Засова Л.В., Тюрин А.В. Циркуляция атмосферы Венеры на высоте 40–50 км по данным ИК-наблюдений прибора VIRTIS-M. Влияние поверхности. Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"; 12 - 16 ноября 2018 г. в Москве, doi:10.21046/2070-16DZZconf-2018a, с.349.
http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6861
2. Пацаева М.В., Хатунцев И.В., Засова Л.В., Ашекорн А., Титов Д.В., Берто Ж-Л. Влияние горного массива Aphrodite Terra и локального времени на циркуляцию на верхней границе облачного слоя по многолетним наблюдениям VMC с борта Venus Express. Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"; 12 - 16 ноября 2018 г. в Москве, doi:10.21046/2070-16DZZconf-2018a, с.357.
http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6794
3. Хатунцев И.В., Горинов Д.А., Пацаева М.В., Тюрин А.В., Засова Л.В. Влияние рельефа подстилающей поверхности на циркуляцию атмосферы Венеры на верхней границе облаков по данным УФ наблюдений с борта Akatsuki. Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"; 12 - 16 ноября 2018 г. в Москве, doi:10.21046/2070-16DZZconf-2018a, с.359.
http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=6823
4. Gorinov, D.A., Zasova L.V., Khatuntsev I.V., Turin A.V. Influence of Topography at the Upper Mesosphere of Venus from Oxygen Nightglow Wind Tracking. VENERA-D. Venus Modeling Workshop. October 5–7 2017: Proceedings. ИКИ РАН, 2018, с. 51-54.
http://venera-d.cosmos.ru/fileadmin/user_upload/documents/Workshop2017_Proceedings.pdf
5. Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Turin A.V., Fedorova A.A. Cloud Level Circulation According to UV and Near-IR VMC Imaging Onboard Venus Express. VENERA-D. Venus Modeling Workshop. October 5–7 2017: Proceedings. ИКИ РАН, 2018, с. 55.
http://venera-d.cosmos.ru/fileadmin/user_upload/documents/Workshop2017_Proceedings.pdf

Доклады, тезисы, циркуляры:

1. Cottini, V.; Aslam, S.; Gorius, N.; Hewagama, T.; Glaze, L.; Ignatiev, N.; Piccioni, G.; D'Aversa, E., CUVE — CubeSat UV Experiment: Unveil Venus' UV absorber with CubeSat UV Mapping Spectrometer. 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.1261.
2. Cottini, V.; Aslam, S.; Gorius, N.; Hewagama, T.; Ignatiev, N.; Piccioni, G.; D'Aversa, E. Cuve - Cubesat UV Experiment. EPSC Abstracts, Vol. 12, EPSC2018-1156-1, 2018. European Planetary Science Congress 2018.
3. Gorinov D.A., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., Turin A.V. Circulation of Venusian atmosphere at 90-110 km based on apparent motions of the O₂ 1.27 μm nightglow from VIRTIS-M Venus-Express data. The Ninth Moscow Solar System Symposium (9M-S3), October 8-12, 2018, Abs. # 9MS3-PS-29.
4. Gorinov D., Khatuntsev I., Zasova L., Turin A. Circulation of Venusian atmosphere at 90-110 km based on apparent motions of the O₂ 1.27 μm nightglow from VIRTIS-M (Venus Express) data. The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2018 (September 11-14, Niseko, Hokkaido, Japan), 04-5 venus2018-0024.
https://www.cps-jp.org/~akatsuki/venus2018/program/IVC2018_Abstracts.pdf
5. Ivanov M.A., Zasova L., Gregg T.K.P. and the Venera-D Joint Science Definition Team. Venera-D landing site constraints. The Ninth Moscow Solar System Symposium (9M-S3), October 8-12, 2018, Abs. # 9MS3-VN-09.
6. Jessup, K.-L.; Carlson, R. W.; Perez-Hoyos, S.; Lee, Y. J.; Mills, F. P.; Limaye, S.; Roman, A.; Ignatiev, N.; Zasova, L. Current Problems and Future Solutions for Identifying Venus' Unknown Absorber. 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.2401
7. Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Fedorova A.A., Turin A.V., Bertaux J.-L. Winds in the middle cloud deck from 965 and 1010 nm imaging by the VMC onboard Venus Express. The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2018 (September 11-14, Niseko, Hokkaido, Japan), P29 venus2018-0016
https://www.cps-jp.org/~akatsuki/venus2018/program/IVC2018_Abstracts.pdf
8. Limaye S., Zasova L., Bocanegra Bahamon T. Updating the Venus Atmospheric Structure for VIRA. 42nd COSPAR Scientific Assembly, July 14-22, 2018, Pasadena, California, USA, C4.3-1-18.
9. Patsaeva M., Khatuntsev I., Zasova L., Hauchecorne A., Titov D., Bertaux J.-L. Interaction of solar-related effects and stationary gravity wave above Aphrodite Terra according to VMC/Venus-Express wind fields. 42nd COSPAR Scientific Assembly, July 14-22, 2018, Pasadena, California, USA, Abstract id.: C3.1-7-18.
10. Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Zasova L.V., Hauchecorne A., Titov A., Bertaux J.-L. Influence of the local time and Aphrodite Terra topography on the cloud top circulation from VMC/Venus Express imaging. The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2018 (September 11-14, Niseko, Hokkaido, Japan), P36 venus2018-0008.
https://www.cps-jp.org/~akatsuki/venus2018/program/IVC2018_Abstracts.pdf
11. Senske, D.; Zasova, L.; Burdanov, A.; Economou, T.; Eismont, N.; Gerasimov, M.; Gorinov, D.; Hall, J.; Ignatiev, N.; Ivanov, M.; Lea Jessup, K.; Khatuntsev, I.; Korablev, O.; Kremic, T.; Limaye, S.; Lomakin, I.; Martynov, M.; Ocampo, A.; Teselkin, S.; Vaisberg, O.; Voronstov, V. Development of the Venera-D Mission Concept, from Science Objectives to Mission Architecture. 49th Lunar and Planetary Science Conference 19-23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas LPI Contribution No. 2083, id.1243

12. Zasova L. Venera-D Mission Concept for Study Atmosphere, Surface and Plasma Environment of Venus. 42nd COSPAR Scientific Assembly, July 14-22, 2018, Pasadena, California, USA. Abstract id.: PEX.1-26-18.
13. Zasova L., Gregg T., Burdanov A., Economou T., Eismont N., Gerasimov M., Gorinov D., Hall J., Ignatiev N., Ivanov M., Lea Jessup K., Khatuntsev I., Korablev O., Kremic T., Limaye S., Lomakin I., Martynov M., Ocampo A., Teselkin S., Vaisberg O., Voronstov V. Venera-D: from science objectives to mission architecture. The Ninth Moscow Solar System Symposium (9M-S3), October 8-12, 2018, Abs. # 9MS3-PS-28.
14. Zasova L., L. Glaze, A. Burdanov, T. Economou, N. Eismont, M. Gerasimov, D. Gorinov, J. Hall, N. Ignatiev, M. Ivanov, K. Lea Jessup, I. Khatuntsev, O. Korablev, T. Kremic, S. Limaye, I. Lomakin, M. Martynov, A. Ocampo, S. Teselkin, O. Vaisberg, V. Voronstov. Development of the Venera-D mission concept, from science objectives to mission architecture. The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2018 (September 11-14, Niseko, Hokkaido, Japan), 12-7 venus2018-0111
https://www.cps-jp.org/~akatsuki/venus2018/program/IVC2018_Abstracts.pdf
15. Zasova, L.; Khatuntsev, I.; Patsaeva, M.; Gorinov, D. Traces of surface topography in Venus mesosphere on Venera 15 and Venus Express data. The Ninth Moscow Solar System Symposium (9M-S3), October 8-12, 2018, Abs. # 9MS3-VN-04.
16. Zasova L., Khatuntsev I., Patsaeva M. Traces of surface topography in Venus atmosphere from thermal infrared spectrometry. The 74 th Fujihara Seminar / International Venus Conference 2018 (September 11-14, Niseko, Hokkaido, Japan), P35 venus2018-0132
https://www.cps-jp.org/~akatsuki/venus2018/program/IVC2018_Abstracts.pdf
17. Пацаева М.В., Хатунцев И.В., Берто Ж.-Л. Влияние рельефа поверхности и местного времени на циркуляцию на верхней границе облаков Венеры по данным многолетних наблюдений VMC с борта Venus Express. Школа-семинар «Атмосферы планет: от земной группы к экзопланетам». 26-28 марта 2018, Полярный геофизический институт, г.Апатиты.

Другие издания:

1. “Venera-D. Venus modeling workshop” Proceedings. (Венера-Д.Совещание по моделированию Венеры). 5–7 октября 2017: сборник материалов / ИКИ РАН; под ред. Л.М. Зеленого. М.: ИКИРАН, 2018.191 с. УДК 523.42. ISBN 978-5-00015-012-2 http://venera-d.cosmos.ru/fileadmin/user_upload/documents/Workshop2017_Proceedings.pdf

ГРАНТЫ

1. Грант Министерства Высшего образования и науки Российской Федерации 14.W03.31.0017, 2017-2019 гг., Руководитель: Берто Ж.-Л.
2. Грант Российского Научного Фонда (РНФ) № 16-12-10453, 2016-2018 гг., Руководитель: Кораблёв О.И.