

Venera-D: Expanding Our Horizon of Terrestrial Planet Climate and Geology Through the Comprehensive Exploration of Venus

Phase II Final Report

Расширение горизонта наших представлений о климате и геологии планет земного типа путём всестороннего изучения Венеры

1. Резюме. Обоснование проекта «Венера-Д»: понять Венеру как эволюционирующую систему

Введение. Планета Венера, сформированная во внутренней части Солнечной системы из того же протопланетного материала, что и Земля, должна была бы стать близнецом Земли, например, как и Земля, Венера в прошлом могла иметь большое количество жидкой воды и быть обитаемой. Однако в настоящее время климат Венеры поддерживается массивной атмосферой из углекислого газа (CO_2) при давлении у поверхности в 90 бар (~ в 90 раз больше, чем на Земле), и мощный парниковый эффект в углекислотной атмосфере приводит к температуре у поверхности 470°C , в сравнении со средней температурой Земли 15°C , при полном отсутствии воды на поверхности Венеры. Отсутствие собственного магнитного поля у Венеры подразумевает внутреннее строение, отличное от земного. Не имея собственного магнитного поля, Венера по-иному взаимодействует с солнечным ветром: он индуцирует магнитосферу и создает кометоподобный ионный хвост. Эффекты от такого взаимодействия еще не изучены до конца. Таким образом, в какой-то момент планетной истории эволюционные пути двух планет значительно разошлись. Земля является единственной известной планетой, имеющей активную биосферу и наша задача понять, почему в настоящее время Венера (от верхних слоев атмосферы до глубин недр) так сильно отличается от Земли и когда и почему эволюционные пути планет так сильно разошлись..

Понимание этих вопросов требует детальных и долговременных (от нескольких часов до нескольких лет) наблюдений процессов, которые формируют и модифицируют поверхность Венеры, в частности, изучение: (1) минералогического и элементного состава поверхности; (2) энергетического баланса, химических, динамических, микрофизических процессов, характера переноса излучения в атмосфере; (3) химических процессов взаимодействия поверхности и атмосферных газов в сверхкритическом состоянии. Для понимания условий в магнитосфере и экзосфере, и как процессы, протекающие в этих областях, влияют на эволюцию венерианской атмосферы, необходимо изучить влияние эффектов изменяющейся солнечной активности за геологический период времени.

Несмотря на отсутствие воды на поверхности Венеры, имеющиеся геоморфологические данные указывают на то, что поверхность, сформированная в результате недавнего вулканизма, имеет разломы и складки, что может свидетельствовать о наличии воды в прошлом (Müller et al., 2008). Если жизнь развилась (или существовала) в более ранний, влажный, период, она могла сохраниться к настоящему времени в сернокислотных облаках толщиной ~20 км, где локальные условия ближе к земным (Way et al., 2016; Limaue et al., 2018). Подобные гипотезы подталкивают нас к необходимости понять, в какой именно период существования Венера могла быть обитаемой. Кроме того, история воды на Венере (Barabash et al., 2007) делает изучение эволюции Венеры, включая возможное зарождение и потерю микроорганизмов, важным, доступным и обоснованным направлением исследования потенциальной обитаемости других землеподобных планет.

- Концепция проекта «Венера-Д» («Д» означает «Долгоживущая») разрабатывается для решения вышеуказанных фундаментальных вопросов. Объединенная научная рабочая группа (ОНРГ, The Venera-D Joint Science Definition Team (JSDT)) рекомендует концепт миссии Венера-Д, включающий «базовые» элементы проекта: орбитальный аппарат (ОА) и посадочный аппарат (ПА) типа «Вега» (проживет 2-3 часа на поверхности); в состав ПА включена долгоживущая станция LLISSE (Long-Lived In-Situ Solar System Explorer (Kremic et al., 2017)). Предполагается, что LLISSE проработает на поверхности Венеры около 60 суток. ОНРГ было показано, что включение «дополнительных» элементов миссии значительно расширило бы круг решаемых научных задач.
- Предлагаемые средства выведения, доставки и обеспечения работы имеют достаточно ресурсов для включения, кроме «базовых», нескольких «дополнительных» элементов – дополнительных долгоживущих на поверхности станций, атмосферной платформы для прямых измерений в атмосфере и субспутников для любой из рассматриваемых дат запуска. Данный отчет описывает научный выход для каждого из этих возможных элементов.

Концепция и архитектура проекта. Проект «Венера-Д» является следующим логическим шагом в серии успешных проектов «Венера» и «Вега» 1970-х и 1980-х годов (Marov et al., 1973, 1978; Avduevskii et al., 1977; Barsukov et al., 1982, 1986; Moroz et al., 1990, 1996; Sagdeev et al., 1986, 1992). Научные задачи миссии соответствуют ключевым вопросам атмосферной динамики, суперротации атмосферы, радиационного баланса; процессам, формировавшим и изменявшим атмосферу и поверхность Венеры, минералогический и элементный состав материалов поверхности; химическим процессам взаимодействия между поверхностью и атмосферой.

«Венера-Д» и другие будущие миссии к Венере. Индийское космическое агентство (ISRO) анонсировало орбитальную миссию к Венере, запуск которой намечен на 2023 год. Научная нагрузка этого проекта будет включать как индийские приборы (в том числе радар с искусственной апертурой SAR, имеющий разрешение ~10 м/пиксель (Karnmer, 2019)), так и приборы других стран, для изучения атмосферы, поверхности и рельефа Венеры. Новые результаты об атмосфере и поверхности, которые раньше запуска «Венеры-Д» сможет получить миссия ISRO, будут приняты во внимание при подготовке миссии Венера-Д. Индийский проект и другие будущие миссии обсуждаются в разделе 3 отчета.

Задачи проекта «Венера-Д». В 2015 году Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА), Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и госкорпорация «Роскосмос» создали Объединенную научную рабочую группу (ОНРГ), поставив перед ней следующие задачи:

- Определить приоритетные направления исследований, научные задачи, и необходимые измерения в соответствии с текущей концепцией проекта «Венера-Д»;
- Оценить архитектуру миссии «Венера-Д», включая возможные модули (подсистемы) с точки зрения перспектив сотрудничества и требований к научной

аппаратуре. Для научной нагрузки оценить уровень технической готовности и обозначить области, где требуется доработка;

- Определить компоненты миссии (элементы, системы, приборы), которые наилучшим образом подходят для сотрудничества. Сформировать общий график работы, необходимый для запуска «Венеры-Д» после 2025 года;
- Оценить предшествующие наблюдения и необходимые калибровки приборов, требуемые для прогресса миссии «Венера-Д» (например, тестирование прибора в камере, воссоздающей давление и температуру, которое он будет испытывать на поверхности Венеры);
- Оценить, как «Венера-Д» сможет углубить научное понимание Венеры и стать ступенью к последующим миссиям, целью которых будет доставка грунта с Венеры.

Для обсуждения этих задач ОНПГ привлекает мировое научное сообщество. В 2017 году были организованы два совещания по моделированию: (1) в Исследовательском центре им. Гленна (NASA Glenn Research Center, GRC) и (2) в ИКИ РАН. Сборник материалов совещания «Venera-D: Venus Modeling Workshop» опубликован в ИКИ в 2018 году и доступен по ссылке:

http://venera-d.cosmos.ru./fileadmin/user_upload/documents/Workshop2017_Proceedings.pdf.

В ходе работы ОНПГ сопоставила научные задачи проекта «Венера-Д» с научными задачами, определенными в программе NASA Planetary Decadal Survey (Space Studies Board (SSB, 2011) и дорожной картой Venus Exploration Analysis Group (VEXAG NASA) (Herrick et al., 2014). В рамках этого анализа ОНПГ определила области, в которых можно значительно расширить научные результаты при включении в проект дополнительных элементов и приборов для более полного анализа процессов формирования облаков, распределения «неизвестного УФ-поглотителя», радиационного баланса, состава поверхности и атмосферы вблизи поверхности, сейсмической активности, и взаимодействие солнечного ветра с атмосферой.

Ниже предлагается список возможных дополнительных элементов и приборов (по приоритету в порядке убывания). Более детальное описание каждого из них можно найти в разделах 3 и 8.

- Отдельные приборы: рентгеновский дифракционный (XRD) и рентгеновский флуоресцентный (XRF) - анализаторы для определения состава поверхности; раман-лидар для изучения микрофизических характеристик и состава аэрозолей – потенциальный вклад НАСА.
- Потенциальные дополнительные элементы миссии:
 - Две долгоживущих на поверхности сейсмических и погодных станции (Seismic and Atmospheric Exploration of Venus, SAEVe (Kremic et al., 2018)) – вклад НАСА (до 120 суток на поверхности);
 - Аэростатный зонд с возможностью вертикального маневрирования – вклад НАСА (время жизни несколько недель);
 - Субспутник, работающий на одной орбите с основным орбитальным аппаратом, два субспутника в точках Лагранжа L1 (между Венерой и Солнцем) или L2 (между Венерой и Землей) – вклад ГК «Роскосмос».

Технологическая составляющая. Экстремальные температура и давление на поверхности Венеры чрезвычайно усложняют работу посадочного аппарата. ОНРГ определила области технической разработки, требующие особого внимания. Ключевыми являются (1) система сбора и обработки образцов атмосферы и грунта, (2) контрольно-испытательные стенды для посадочного аппарата и его компонентов, имитирующие венерианские условия, и (3) разработка, испытание и контроль приборов, которые должны работать в венерианских условиях. Дополнительные элементы миссии, такие как атмосферная платформа и малые долгоживущие станции, являются многообещающими для получения научных результатов, но требуют длительной разработки для достижения необходимого уровня готовности.

Для успеха миссии к Венере необходимо провести серии лабораторных исследований, чтобы повысить качество интерпретации научных результатов. В число необходимых измерений входят: (1) профили спектральных линий при высоких давлениях и температурах; (2) оптические свойства нижней атмосферы Венеры от видимого до ИК-диапазона; (3) вариации состава малых атмосферных составляющих при увеличении температуры и давления (имитация спуска в атмосфере); (4) надежная и эффективная процедура обогащения малых составляющих и благородных газов; (5) влияние давления и температуры на приборы дистанционного зондирования; (6) сверхкритические свойства атмосфер, подобных венерианской; и (7) исследование поглощения для описания и определения атмосферных поглотителей (включая биологические) и изучение распределения энергии в различных слоях атмосферы.

Заключения и рекомендации ОНРГ. Рабочая группа определила приоритеты среди научных задач проекта. Рассматривалась базовая конфигурация миссии, состоящая из орбитального аппарата и посадочного аппарата, несущего одну долгоживущую станцию. Посадочный аппарат является главным элементом проекта для определения состава поверхности и взаимодействия поверхности с атмосферой (прямые измерения в атмосфере и на поверхности не производились после 1985 года, ВЕГА). Орбитальный аппарат сможет решать вопросы атмосферной динамики, природы суперротации, состава атмосферы, строения и состава облачного слоя, современной вулканической активности, и вариаций состава поверхности и атмосферы при помощи измерений на ночной стороне планеты в ближнем ИК-диапазоне, диссипации атмосферы. При рассмотрении возможных дополнений к миссии предпочтение было отдано прямым длительным измерениям на поверхности и внутри атмосферы (в течение месяцев и недель соответственно), а также мобильности внутри атмосферы.

Чтобы сформулировать стратегию развития проекта «Венера-Д», ОНРГ обозначила ключевые области, нуждающиеся в финансировании. При условии запуска после 2025 года следующие действия необходимы для успеха всей миссии:

- создание контрольно-испытательных стендов для испытаний приборов и элементов миссии в условиях, имитирующих поверхность Венеры;
- испытание приборов посадочного аппарата в условиях, имитирующих поверхность Венеры (470 °C и 90 бар) и приборов орбитального аппарата в условиях на орбите вокруг Венеры;
- лабораторные эксперименты для определения химических свойств венерианской атмосферы при высоких температурах и давлениях;
- продолжение разработки всех дополнительных элементов миссии.

Дальнейшая работа. ОНРГ завершила формулировку научных задач, их приоритетов и указание ключевых направлений технологической разработки (фаза 2). Группа также рассмотрела возможные дополнения к «базовым» элементам миссии, позволяющие получить более целостную научную картину Венеры. В следующей фазе разработки (фаза 3) будут более детально обсуждаться научные задачи приборов из числа базовых и дополнительных элементов миссии, а также будут определены технологические требования к космическому аппарату. В данном контексте будут подвергнуты рассмотрению следующие вопросы.

Задачи базовой миссии:

Определение концепции комплексной миссии, в том числе: Определение концепции операций для комплекса LLISSE + ПА, включая график научных наблюдений, стратегию сбора, обработки и анализа образцов, поток данных и линию связи для передачи данных.

- (1) Определение программы работы и взаимодействия LLISSE и посадочного аппарата, включая циклограмму научных измерений;
Определение стратегии сбора доставки внутрь ПА и анализа образцов грунта.
- (2) Обсуждение способности приборов LLISSE, посадочного и орбитального аппарата работать в предполагаемых условиях – для определения возможностей решения поставленных научных результатов.
- (3) Определение массы, потребляемой мощности, и объема научной аппаратуры «базовых» элементов миссии.
- (4) Продолжение разработки интерфейсов малых станций, их научной аппаратуры и концепции размещения LLISSE на посадочном аппарате.
- (5) Оценка возможности обмена данными между:
 - (a) орбитальным аппаратом и наземными станциями в X- и Ka-диапазонах;
 - (b) посадочными орбитальным
 - (c) LLISSE и орбитальным

Базовые и дополнительные элементы:

Определение концепции комплексной миссии, включающей базовые и дополнительные элементы (в порядке приоритета), в том числе:

- (1) Определение и приоритизация дополняющих друг друга научных задач для приборов базовых и дополнительных элементов.
- (2) Разработка концепции размещения и отделения атмосферной платформы, определение технологических требований к научной аппаратуре и разработка циклограммы работы.
- (3) Разработка концепции размещения и отделения малых станций SAEVe и определение технологических требований к ним.
- (4) Разработка концепции размещения и отделения субспутника, определение его орбитальных параметров и технологических требований к его научной аппаратуре.
- (5) Оценка возможности обмена данными между:
 - (a) аэростатным зондом и:
 - (i) орбитальным аппаратом
 - (ii) дополнительными станциями LLISSE (и/или SAEVe)

- (iii) субспутником в точке Лагранжа L1
- (iv) субспутником в точке Лагранжа L2
- (b) орбитальным аппаратом и субспутниками в точках L1/L2.
- (c) субспутниками в точках L1/L2 и наземными станциями
- (d) дополнительными станциями LLISSE (и/или SAEVe) и орбитальным аппаратом
- (e) орбитальным аппаратом и наземными станциями в X- и Ка-диапазонах.

Для решения этих задач ОНПГ должна быть расширена, включив в себя инженеров – экспертов в области космической связи, механических и тепловых инженеров, системных инженеров и т.д.

Для вовлечения в обсуждение широкого научного сообщества в октябре 2019 года в ИКИ РАН запланировано совещание по выбору возможных мест посадки «Венеры-Д», а также по обсуждению вопросов астробиологии в связи с проблемой возможной обитаемости облачного слоя венерианской атмосферы. Венера также интересует исследователей экзопланет, поскольку большое количество открытых «землеподобных» экзопланет оказываются похожими на Венеру. Лабораторные эксперименты по сравнению спектральных, физических и химических свойств земных микроорганизмов со свойствами частиц венерианских облаков необходимы для понимания возможностей их выживания и эволюции в атмосфере Венеры. Основываясь на выводах рабочей группы результатах лабораторных экспериментов необходимо сформировать базис для выбора научной аппаратуры для решения задач проекта. «Венера-Д» станет важнейшим шагом в понимании причин колоссального различия Земли и ближайшей к ней планеты.

Список литературы

- Avduevskii, V.S., et al., 1977, Measurement of wind velocity on the surface of Venus during the operation of stations Venera 9 and Venera 10. *Cosmic Res.*, vol. 14, no. 5, pp. 622–625.
- Barabash, S.; Fedorov, A.; Lundin, R.; and Sauvaud, J.A., 2007, Martian atmospheric erosion rates. *Science*, vol. 315, pp. 501–503.
- Barsukov, V.L., et al., 1982, Geochemical studies of Venus surface by Venera 13 and Venera 14 spacecrafts. *Geokhimiya* (in Russian), vol. 7, pp. 899–919.
- Barsukov, V.L., et al., 1986, The geology and geomorphology of the Venus surface as revealed by radar images obtained by Veneras 15 and 16. *J. Geophys. Res.*, vol. 91, pp. 378–398.
- Basilevsky, A.T. and Head, J.W., 2000, Geologic units on Venus: Evidence for their global correlation. *Planet. Space Sci.*, vol. 48, pp. 75–111.
- Kremic, T.; Hunter, G.; and Rock, J., 2017, Long-lived in-situ solar system explorer (LLISSE), *15th Meeting of the Venus Exploration and Analysis Group (VEXAG)*, Laurel, MD, https://www.lpi.usra.edu/vexag/meetings/archive/vexag_15/presentations/8-Kremic-LLISSE.pdf.
- Kremic, T.; Ghail, R.; Gilmore, M.; Hunter, G.; Kiefer, W.; Limaye, S.; Pauken, M.; Tolbert, C.; and Wilson, C., 2017, Seismic and Atmospheric Exploration of Venus (SAEVe) final report. Funded by the Planetary Science Deep Space SmallSat Studies (PSDS3) program.
- Kramer, H., 2019, NISAR (NASA–ISRO Synthetic Aperture Radar) Mission, eoPortal Directory, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/n/nisar>, downloaded 17February 2019.
- Limaye, S.S.; Mogul, R.; Smith, D.J.; Ansari, A.H.; Slowik, G.P.; and Vaishampayan, P., 2018a, Venus' Spectral Signatures and the Potential for Life in the Clouds. *Astrobiology*, vol. 18, no. 9, pp. 1181–1198, <http://doi.org/10.1089/ast.2017.1783>.
- Marov, M.Y.A.; Avduevsky, V.S.; Kerzhanovich, V.V.; Rozhdestvensky, M.K.; Borodin, N.F.; and Ryabov, O.L., 1973, Venera 8: Measurements of the temperature, pressure and wind velocity on the illuminated side of Venus. *J. Atmos. Sci.*, vol. 30, pp. 1210–1214.

- Moroz, V.I., 1990, Atmospheric structure of Venus according to optical measurements by VENERA-11, VENERA-13 and VENERA-14. *Solar System Research*, vol. 23, no. 4, p. 206.
- Moroz, V.I.; Zasova, L.V.; and Linkin, V.M., 1996, Venera-15, 16 and VEGA mission results as sources for improvements of the Venus reference atmosphere. *Adv. Space Res.*, vol. 17, no. 11, pp. 171–180.
- Müller, N.; Helbert, J.; Hashimoto, G.L.; Tsang, C.C.C.; Erard, S.; Piccioni, G.; and Drossart, P., 2008, Venus surface thermal emission at 1 μm in VIRTIS imaging observations: Evidence for variation of crust and mantle differentiation conditions. *J. Geophys. Res.*, vol. 113.
- Sagdeev, R.Z., et al., 1992, Differential VLBI measurements of the Venus atmosphere dynamics by balloons: VEGA project. *Astron. Astrophys.*, vol. 254, pp. 387–392.
- SSB, 2011, Vision and voyages for planetary science in the decade 2013–2022. Space Studies Board, National Research Council, National Academies Press, Washington, DC.
- Way, M.J., et al., 2016, Was Venus the first habitable world of our solar system? *Geophys. Res. Lett.*, vol. 43, no. 16, pp. 8376–8383.