

## Цикл работ «Исследование двуокиси серы и озона на ночной стороне Венеры в диапазоне 85-105 км»

### Статьи цикла:

Evdokimova, D., Belyaev, D., Montmessin, F., Bertaux, J. L., & Korablev, O. (2020). Improved calibrations of the stellar occultation data accumulated by the SPICAV UV onboard Venus Express. *Planetary and Space Science*, 184, 104868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104868>

Evdokimova, D., Belyaev, D., Montmessin, F., Korablev, O., Bertaux, J.-L., Verdier, L., Lefèvre, F., & Marcq, E. (2021). The spatial and temporal distribution of nighttime ozone and sulfur dioxide in the Venus mesosphere as deduced from SPICAV UV stellar occultations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006625. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JE006625>

### 1. Авторы

Статья №1: Evdokimova Daria, Belyaev Denis, Montmessin Franck, Bertaux Jean-Loup, Korablev Oleg.

Статья №2: Evdokimova Daria, Belyaev Denis, Montmessin Franck, Korablev Oleg, Bertaux Jean-Loup, Verdier Loïc, Lefèvre Franck, Marcq Emmanuel.

### 2. Название

Статья №1: Improved calibrations of the stellar occultation data accumulated by the SPICAV UV onboard Venus Express

Статья №2: The spatial and temporal distribution of nighttime ozone and sulfur dioxide in the Venus mesosphere as deduced from SPICAV UV stellar occultations

### 3. Ссылки на публикацию

Статья №1: Evdokimova, D., Belyaev, D., Montmessin, F., Bertaux, J. L., & Korablev, O. (2020). Improved calibrations of the stellar occultation data accumulated by the SPICAV UV onboard Venus Express. *Planetary and Space Science*, 184, 104868. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104868>

Статья №2: Evdokimova, D., Belyaev, D., Montmessin, F., Korablev, O., Bertaux, J.-L., Verdier, L., Lefèvre, F., & Marcq, E. (2021). The spatial and temporal distribution of nighttime ozone and sulfur dioxide in the Venus mesosphere as deduced from SPICAV UV stellar occultations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2020JE006625. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JE006625>

### 4. Общая формулировка научной проблемы и ее актуальность

Данный цикл работ посвящен исследованию вертикальных распределений двуокиси серы (SO<sub>2</sub>) и озона (O<sub>3</sub>) в ночной мезосфере Венеры, а именно в диапазоне от 85 до 105 км.

Диапазон изучаемых высот соответствует мезосфере – области, где происходит изменение режима глобальной циркуляции атмосферы от супер-ротации (<70 км) к переносу воздушных масс из подсолнечной в противосолнечную точку (SSAS). Основанные на современных данных модели показывают, что общее представление об атмосферном составе и динамике еще не до конца получено. До миссии «Венера-Экспресс» (2006-2014) не проводились наблюдения, позволяющие изучить вертикальную структуру ночной мезосферы и её малых газовых составляющих, где фотохимические и температурные условия отличаются от дневных. Ультрафиолетовый (УФ) канал спектрометра СПИКАВ (118–320 нм) позволил впервые наблюдать вертикальную структуру ночной атмосферы в режиме звёздных просвечиваний.

Двуокись серы является ключевым компонентом в цепочке химических процессов, приводящих к образованию толстого слоя облаков из капель концентрированной серной кислоты (47-70 км). Мониторинг содержания SO<sub>2</sub> на уровне верхней границы облаков (~70 км) на дневной стороне Венеры продолжался более 40 лет на Венере с помощью наземных телескопов и орбитальных аппаратов. Наблюдаемые вариации оказались значительными, что, вероятно, может быть

индикатором вулканической активности планеты. Однако, значительны также изменения содержания  $\text{SO}_2$  и в коротких временных масштабах на высотах 65-110 км, что было показано орбитальными и наземными наблюдениями в период работы космического аппарата «Венера-Экспресс».

Озон был впервые зарегистрирован в ночной мезосфере Венеры в 29 сеансах наблюдений звездных просвечиваний спектрометром СПИКАВ-УФ на высотах 90-100 км в 2006-2010 годах. Таким образом, наблюдались только эпизодические всплески содержания  $\text{O}_3$ . Синтез молекулы из атомов кислорода и её распад в каталитических реакциях с атомами хлором в основном определяется атмосферной циркуляцией из подсолнечной в противосолнечную точку. На дневной стороне озон был обнаружен на высоте  $\sim 70$  км в полярных регионах, что также свидетельствует о взаимосвязи  $\text{O}_3$  с атмосферной динамикой.

### **5. Конкретная решаемая в работе задача и ее значение**

В данной работе восстанавливаются содержания малых газовых составляющих,  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_3$ , в диапазоне высот 85-105 км. Для этого, во-первых, были выполнены уточнения калибровок спектров звездных просвечиваний ночной атмосферы Венеры, и, во-вторых, исследованы два метода извлечения засветки из экспериментальных данных. Первая работа цикла устанавливает наиболее эффективный алгоритм для подготовки измеренных спектров пропускания атмосферы для восстановления вертикальных распределений концентраций газов  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_3$ . Результирующий алгоритм был применен для всего набора данных, полученных в 2006-2014 гг. В результате, удалось изучить более 400 сеансов наблюдений, что является наиболее полным исследованием массива данных, полученных СПИКАВ-УФ.

По спектрам атмосферного пропускания с улучшенными калибровками, затем, были получены вертикальные профили содержания как  $\text{SO}_2$  для 373 сеансов наблюдений, так и  $\text{O}_3$  для 132 сеансов наблюдений. Результаты представлены во второй работе цикла. Были исследованы пространственные и временные изменения двуокиси серы и озона. Полученные данные являются уникальным исследованием ночной мезосферы Венеры в диапазоне 85-105 км.

### **6. Используемый подход, его новизна и оригинальность**

В режиме звездного просвечивания спектрометр измеряет свет выбранной звезды сквозь атмосферу, и его луч зрения направлен по касательной относительно поверхности планеты. Так, при движении космического аппарата по орбите вокруг Венеры, свет звезды измеряется на различных высотах. Отношение спектра звёздного излучения, частично поглощенного атмосферными компонентами, к «чистому», неискаженному, спектру звезды дает спектр атмосферного поглощения. Логарифм атмосферного поглощения пропорционален линейной концентрации газа на луче зрения прибора, что позволяет восстановить вертикальные профили газов, полосы поглощения которых находятся в диапазоне СПИКАВ-УФ:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_3$ . Однако, СПИКАВ-УФ, кроме спектра звезд, также регистрировал сигнал от различных атмосферных свечений в диапазоне 118-320 нм.

При детектировании небольших концентраций необходимо снизить предел детектирования газа. Эффективность проводимых калибровок была впервые исследована на основании всего массива данных СПИКАВ-УФ. Было показано, что точность калибровки по длине волны возрастает, если использовать спектр наблюдаемой звезды, как эталонный, вместо отождествления положения полос газового поглощения. Соответственно, были восстановлены более точно значения концентрации основного компонента атмосферы, углекислого газа. Обычно, концентрации малых газовых составляющих рассматриваются в отношении к концентрациям  $\text{CO}_2$  и, следовательно, уменьшение ошибки определения количества  $\text{CO}_2$  увеличивает точность определения относительного содержания  $\text{SO}_2$  и  $\text{O}_3$ .

Также, были изучены методы извлечения атмосферной засветки. Причем наибольшая эффективность была достигнута при использовании изображающих свойств прибора. Сравнение

эффективности существующих алгоритмов было проведено впервые. Также, впервые данный цикл представляет одновременный анализ газового поглощения двуокиси серы и озона в спектрах СПИКАВ-УФ, полученных в режиме звездных просвечиваний.

#### **7. Полученные результаты и их значимость**

- 1) Озон в ночной атмосфере Венеры впервые наблюдался в течение 8 лет. Эксперимент позволил регистрировать только значения концентраций озона при его эпизодических всплесках. Измеренные значения убывают с  $10^8$  до  $10^7$  см<sup>-3</sup> с увеличением высоты с 85 до 110 км.
- 2) Относительное содержание озона было оценено с учетом пределов обнаружения и статистики положительных обнаружений. Таким образом, полученная оценка составляет от 1 до 30 ppbv (частей на миллиард) на высотах 85-95 км, и от 6 до 120 ppbv для 95-105 км, и относительное содержание увеличивается с высотой.
- 3) Вариации во времени были подробно изучены на широте  $30^\circ\text{N}\pm 10^\circ$ , где было достигнуто наилучшее покрытие данными. Хотя случаи регистрации поглощения озона носят спорадический характер, ниже 93 км можно отметить уменьшения относительного содержания озона к полуночи от утреннего и вечернего терминаторов. Этот минимум сглаживается выше в мезосфере.
- 4) Относительное содержание SO<sub>2</sub> остается около  $135\pm 21$  ppbv в диапазоне 85-100 км. По сравнению с предыдущими исследованиями и после улучшения калибровок был обнаружен меньший вертикальный градиент объемной плотности SO<sub>2</sub>, что согласуется с современными моделями ночной мезосферы.
- 5) Кратковременные вариации диоксида серы значительны. Была изучена зависимость SO<sub>2</sub> от местного времени, и выделена возможная асимметрия относительно полуночи: относительное содержание SO<sub>2</sub> может уменьшаться от вечернего терминатора к 02:00 утра в диапазоне высот 93–97 км.
- 6) Результаты данного исследования поведения двуокиси серы и озона на ночной стороне улучшат существующие модели атмосферы и позволят выявить различия между атмосферами Венеры и Земли.