

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИКИ РАН
А.А. Петрукович
09 _____ 2020 г.

чл. корр. РАН



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки

Института космических исследований Российской академии наук

Диссертация «Свойства и распределение аэрозоля надоблачной дымки Венеры по результатам солнечного просвечивания» выполнена в отделе 53 «Физики планет и малых тел Солнечной системы» Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Лугинин Михаил Сергеевич работал в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2015 г. М.С. Лугинин окончил очную аспирантуру Московского физико-технического института (МФТИ) по специальности «Планетные исследования».

Справки о сдаче кандидатских экзаменов выданы в 2018 г. в МФТИ и в 2018 и 2020 гг. в ИКИ РАН.

Научный руководитель — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИКИ РАН Фёдорова Анна Александровна.

По результатам рассмотрения диссертации «Свойства и распределение аэрозоля надоблачной дымки Венеры по результатам солнечного просвечивания» принято следующее заключение:

Актуальность темы и направление исследования

Диссертационная работа Лугинина Михаила Сергеевича посвящена исследованию свойств аэрозолей надоблачной дымки Венеры методом солнечного просвечивания. Облака Венеры состоят из водного раствора серной кислоты с добавлением небольшого количества примесей, состав которых до сих пор не известен. Аэрозоли Венеры играют одну из ключевых

ролей в климате планеты, что и определяет важность их изучения. Они напрямую влияют на тепловой баланс Венеры и участвуют в химических циклах сернистого газа и воды, которые являются ключевыми элементами в химических процессах, протекающих в атмосфере и на поверхности планеты.

Верхняя дымка Венеры является одной из наименее изученных областей, содержащих аэрозоли, ввиду своей малой оптической толщины. Метод солнечного просвечивания, благодаря геометрии наблюдения, позволяет восстанавливать оптические и микрофизические свойства аэрозолей верхней дымки, в частности, высотные профили распределения аэрозолей по размерам.

В диссертационной работе анализируются данные прибора «СПИКАВ-ИК» с космического аппарата «Венера-Экспресс», на основе которых проводится восстановление свойств аэрозоля верхней дымки Венеры и его распределение. За 8 лет работы прибора экспериментов был собран большой массив научных данных, анализ которых позволяет выявить широтные, временные и годовые вариации свойств аэрозоля. Для достижения поставленной цели решалось несколько задач.

В первой части работы были проанализированы данные со всех 798 экспериментов по солнечному просвечиванию, выполненных в период с мая 2006 г. по ноябрь 2014 г. Был произведён отбор 222 сеансов солнечного просвечивания, характеризующихся относительно стабильным солнечным сигналом. Для всех отобранных сеансов было произведено восстановление высотных профилей пропускания, оптической толщины и объёмного коэффициента ослабления аэрозолей. Объёмный коэффициент ослабления является основной величиной, характеризующей взаимодействие аэрозоля с излучением. Было показано, что величина высоты дымки больше вблизи экватора и на более коротких длинах волн. Были получены средние высотные профили коэффициента ослабления в широтных областях 0° – 60° и 60° – 90° на утреннем и вечернем терминаторах. Продемонстрировано, что величина коэффициента ослабления меньше на высоких широтах по сравнению с низкими широтами.

Во второй части работы было произведено восстановление высотного распределения частиц по размеру и концентрации аэрозольных частиц надоблачной дымки Венеры. Для этого использовалась информация, содержащаяся в спектральной зависимости аэрозольного коэффициента ослабления, полученной в первой части работы. В надоблачной дымке Венеры были детектированы две моды аэрозоля, были посчитаны средние значения эффективного радиуса, проанализированы высотные, широтные, временные и годовые вариации величин радиуса и концентрации аэрозоля. Средние значения эффективного радиуса равны 0.12 ± 0.03 мкм и 0.84 ± 0.16 мкм для мод 1 и 2 соответственно. Усреднённые профили концентрации для обеих мод

плавно уменьшаются с высотой, со значения 500 см^{-3} на 75 км до $\approx 50 \text{ см}^{-3}$ на 90 км для моды 1 и с $\approx 1 \text{ см}^{-3}$ на 75 км до $\approx 0.1 \text{ см}^{-3}$ на 90 км для моды 2.

В третьей части диссертационной работы было произведено восстановление величины шкалы высоты аэрозоля, которая является характеристикой скорости убывания концентрации аэрозоля с высотой. Для этого были использованы 222 высотных профиля коэффициента ослабления аэрозоля и 43 высотных профиля счётной концентрации моды 2 аэрозоля. Большинство значений шкалы высоты лежит в диапазоне 1.5–5.5 км. Шкала высоты аэрозоля увеличивается при увеличении широты. На основе восстановленных значений шкалы высоты аэрозолей была сделана оценка высотного профиля коэффициента турбулентной диффузии в мезосфере Венеры. Коэффициент турбулентной диффузии, рассчитанный из значения шкалы высоты 3.6 км, равен $2 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$ на высоте 84 км, что в несколько раз превышает полученные ранее значения. Предложен механизм, объясняющий причину увеличения шкалы высоты аэрозоля в широтной области $80^\circ \text{с.ш.} - 90^\circ \text{с.ш.}$, заключающийся в наличии в этой области вертикального ветра. Проведена оценка вертикальной скорости ветра в области высоких широт.

Последняя часть диссертационной работы посвящена детектированию стратифицированных слоёв аэрозолей в надоблачной дымке Венеры и определению их микрофизических свойств. Аэрозольные слои были обнаружены в 93 сеансах солнечного просвечивания в широтной области $58^\circ \text{с.ш.} - 90^\circ \text{с.ш.}$, что составляет 63% всех сеансов в этом широтном диапазоне. Аэрозольные слои детектировались в диапазоне высот 80–88 км на утреннем терминаторе и 84–90 км на вечернем. Суточные изменения высоты аэрозольных слоёв были объяснены суточными вариациями температурных профилей мезосферы Венеры. Распределения эффективного радиуса и счётной концентрации для всех детектированных аэрозольных слоёв демонстрируют один широкий максимум на утреннем терминаторе ($0.65 \pm 0.25 \text{ мкм}$ и $0.6 \pm 0.4 \text{ см}^{-3}$) и два максимума на вечернем терминаторе ($0.4 \pm 0.1 \text{ мкм}$ и $0.85 \pm 0.15 \text{ мкм}$; $0.3 \pm 0.2 \text{ см}^{-3}$ и $4.5 \pm 2.5 \text{ см}^{-3}$). Были рассмотрены потенциально возможные механизмы образования аэрозольных слоёв. Сделан вывод, что единственным согласующимся с результатами диссертации и предыдущими наблюдениями других авторов механизмом образования аэрозольных слоёв является конденсация водяного пара на существующих частицах водного раствора серной кислоты.

Научная новизна полученных результатов

Впервые был обработан весь массив научных данных прибора «СПИКАВ–ИК», полученный за всё время работы аппарата «Венера–Экспресс» в экспериментах по солнечному просвечиванию. Было восстановлено высотное распределение аэрозоля надоблачной дымки аэрозоля Венеры на высотах 74–88 км в период с 2006 по 2014 гг., были получены и проанализированы широтные, временные и годовые вариации размеров частиц для случаев одномодового и двухмодового распределения аэрозолей. Обработанный и проанализированный массив данных охватывает беспрецедентно большой период наблюдения верхней дымки Венеры — более 8 лет.

Впервые был проведён систематический анализ оптических и микрофизических свойств стратифицированных слоёв аэрозолей надоблачной дымки Венеры. Впервые был предложен механизм образования аэрозольных слоёв, согласующийся с результатами диссертации и предыдущими наблюдениями других авторов.

Научная и практическая ценность исследования

Проведённые исследования дают новую информацию о свойствах и распределении аэрозолей в слабо изученной области атмосферы Венеры, какой является верхняя дымка.

Восстановленные высотные профили коэффициента ослабления, высотные распределения по размерам, высотные профили счётной концентрации, а также значения шкалы высоты аэрозоля могут быть использованы при моделировании атмосферы Венеры, при решении уравнения переноса излучения в атмосфере Венеры, а также как входные данные в моделях общей циркуляции атмосферы.

Степень достоверности результатов проведённого исследования

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов основана на:

1. их публикации в 4 статьях в высокорейтинговом международном рецензируемом научном журнале *Icarus*, входящем в список ВАК;
2. их представлении на научных семинарах, российских и международных конференциях;
3. сравнении с результатами, полученными другими методами и другими авторами.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

1. A. Fedorova, E. Marcq, M. Luginin, O. Korablev, J.-L. Bertaux, and F. Montmessin, “Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus’ mesosphere from SPICAV/VEx observations,” *Icarus*, vol. 275, pp. 143–162, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.008>
2. M. Luginin, A. Fedorova, D. Belyaev, F. Montmessin, V. Wilquet, O. Korablev, J.-L. Bertaux, and A. C. Vandaele, “Aerosol properties in the upper haze of Venus from SPICAV IR data,” *Icarus*, vol. 277, pp. 154–170, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.008>
3. Belyaev, D. A., Evdokimova, D. G., Montmessin, F., Bertaux, J.-L., Korablev, O. I., Fedorova, A. A., Marcq, E., Soret, L., Luginin, M. S. Night side distribution of SO₂ content in Venus’ upper mesosphere. *Icarus*, vol. 294, pp. 58–71, 2017. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.05.002>
4. M. Luginin, A. Fedorova, D. Belyaev, F. Montmessin, O. Korablev, J.-L. Bertaux, “Scale heights and detached haze layers at high latitudes of the Venusian mesosphere from SPICAV IR data”, *Icarus*, 2018. <http://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.03.018>

Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации

Все работы из списка публикаций по теме диссертации выполнены в соавторстве. Основные результаты диссертации и выносимые на защиту положения основаны на работах [Luginin et al., 2016; Luginin et al., 2018]. В этих работах автору принадлежит ключевая роль, а именно: автором осуществлялись поиск, отбор и обработка данных экспериментов по солнечному затмению, выполненных прибором «СПИКАВ–ИК» на борту космического аппарата «Венера Экспресс», интерпретация полученных результатов, их оформление и представление.

В работе [Fedorova et al., 2016] использовались восстановленные автором величины шкалы высоты аэрозоля, а в работе [Belyaev et al., 2018] — восстановленные автором величины эффективного радиуса и счётной концентрации аэрозоля. Выводы, полученные в работах [Fedorova et al., 2016; Belyaev et al., 2018], в диссертационной работе не используются и на защиту не выносятся.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности 01.03.02
— Астрофизика и звёздная астрономия**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия: «Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям».

Вывод: Кандидатская диссертация Лугинина Михаила Сергеевича «Свойства и распределение аэрозоля надоблачной дымки Венеры по результатам солнечного просвечивания» соответствует «Положению о порядке присуждения учёных степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия.

Заключение принято на заседании НТС отдела 53 «Физики планет и малых тел Солнечной системы» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 12 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» — 12 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел., протокол от 23 апреля 2020 г.

Председатель НТС отдела 53 ИКИ РАН,
заведующий отделом 53 ИКИ РАН,
д.ф.-м.н., чл. корр. РАН

О.И. Кораблёв

Секретарь НТС отдела 53 ИКИ РАН,
к.ф.-м.н.

А.А. Фёдорова