

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Лугинина Михаила Сергеевича «Свойства и распределение аэрозоля надоблачной дымки Венеры по результатам солнечного просвечивания», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия.

Диссертационная работа Лугинина М.С. посвящена восстановлению свойств и распределения аэрозоля в мезосфере Венеры.

Цели диссертационной работы состояли в восстановлении высотных профилей аэрозольного коэффициента ослабления, распределения частиц по размеру и счётной концентрации аэрозоля, шкалы высоты аэрозоля, а также в исследовании свойств аэрозольных слоев.

Актуальность диссертационной работы обусловлена той ключевой ролью, которую играет аэрозоль в процессах переноса излучения и химических циклах в атмосфере Венеры.

Диссертационная работа представлена на 101 странице машинописного текста и содержит 45 рисунков и 8 таблиц. Список литературы состоит из 156 наименований, отдельно приводится список публикаций диссертанта из 4 работ в рецензируемом научном издании и 12 докладов на конференциях. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, шести глав, содержащих материал, выносимый на защиту, заключения, содержащего основные результаты и выводы, и списка цитируемых источников.

Во введении достаточно подробно излагаются цели и задачи диссертационной работы и обосновывается их актуальность.

В первой главе приведён обзор наблюдений атмосферы Венеры. Отмечено, что вывод о наличии в атмосфере Венеры аэрозоля впервые был сделан на основе поляриметрических исследований. Было показано, что аэрозольные частицы имеют сферическую форму, и получены оценки их характерного радиуса. В дальнейшем была выдвинута гипотеза о том, что аэрозоль представляет собой капли водного раствора серной кислоты, основанная на его спектральных свойствах и на сохранении сферической формы частиц при температурах выше температуры замерзания раствора серной кислоты. Исследования также показали, что распределение аэрозоля по размерам носит двухмодовый характер: первая мода состоит из субмикронных частиц, а вторая – из микронных частиц, при этом обе моды обладают одинаковым показателем преломления. Сернокислотный состав аэрозолей хорошо согласуется с данными Фурье-спектрометра на орбитальном аппарате «Венера-15». Данные ИК спектрометра на космическом аппарате «Галилео» показали высокую изменчивость концентрации и состава аэрозолей в нижних облачных слоях. Исследования при помощи приборов «СПИКАВ/СУАР», «ВИРТИС» и «Ви-Эм-Си» и других на борту орбитального аппарата «Венера-Экспресс» показали наличие примесей с более высоким показателем преломления. Анализ данных прибора «СПИКАВ/СУАР» привел к выводу о двухмодовом распределении в надоблачной дымке. Важную роль сыграли исследования атмосферы Венеры при помощи нефелометров, установленных на спускаемых аппаратах. Однако диапазон рабочих высот в этих экспериментах не охватывал надоблачную дымку. Нерешенной остается проблема идентификации вещества, ответственного за поглощение на длинах волн менее 500 нм. Применительно к данной работе основной вывод Главы заключается в том, что надоблачная дымка, расположенная на высотах 70–90 км, состоит из микронных частиц.

Вторая глава посвящена разработке методики восстановления высотного профиля коэффициента ослабления надоблачной дымки по данным солнечного просвечивания (СП), или солнечно-затменного зондирования, полученных при помощи прибора «СПИКАВ-ИК». Эксперименты по солнечному просвечиванию атмосферы Земли начались еще в 1960-е годы и продолжают до нашего времени. Они применяются для восстановления профилей концентраций малых газовых составляющих (МГС), аэрозольного коэффициен-

та экстинкции, температуры и давления. С 1988 года метод СП начал применяться для исследования атмосферы Марса, а с 2006 года – Венеры. Солнечно-затменный эксперимент при помощи аппарата «Венера-Экспресс» проводился в 2006–2014 гг. Комплекс приборов «СПИКАВ/СУАР» позволил определить высотные профили плотности и температуры, концентрации МГС и микрофизические свойства аэрозоля.

Принцип СП заключается в измерении интенсивности солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, как функции длины волны и прицельной высоты линии визирования. Апертура прибора должна быть направлена как можно ближе к видимому центру Солнца. Измерения на прицельных высотах более 100 км дают величину интенсивности, практически не искаженную влиянием атмосферы. Пользуясь этой величиной в качестве нормировочной, определяют функцию пропускания атмосферы. Данный метод обладает следующими достоинствами: 1) стабильность излучения Солнца за время зондирования, 2) простота формулировки обратной задачи за счет пренебрежения эффектами многократного рассеяния, 3) достаточная чувствительность к концентрации аэрозоля вследствие большого оптического пути в лимбовой геометрии, 4) отсутствие необходимости в калибровке прибора, 5) высокое вертикальное разрешение. Но можно указать и недостатки метода: 1) возможность зондирования только на терминаторах во время восхода или захода Солнца, 2) низкое горизонтальное разрешение вследствие лимбовой геометрии.

Функция пропускания складывается из нескольких компонент: 1) рефракционное ослабление, 2) поглощение и излучение газами, 3) молекулярное, или рэлеевское рассеяние, 4) аэрозольное рассеяние и поглощение. Таким образом, для исследования аэрозоля (4) необходимо исключить вклады (1–3). Для исключения влияния поглощения и излучения газами (2) был выбран диапазон длин волн, не содержащий полос поглощения.

Приближенно считая атмосферу сферически-слоистой, можно записать явное выражение для угла рефракции в виде интегрального оператора, действующего на вертикальный профиль показателя преломления. Считая профиль индекса рефракции экспоненциально убывающим с высотой, можно записать явную приближенную формулу для профиля угла рефракции. Для восстановления профиля коэффициента ослабления применяется метод «очистки луковицы». В рамках этого метода атмосфера заменяется на систему однородных сферических слоев. Это позволяет аппроксимировать интегральное уравнение, связывающее профиль оптической толщины с профилем коэффициента ослабления, системой линейных алгебраических уравнений. Восстановленный профиль является суммой объемных коэффициентов аэрозольного поглощения и молекулярного рассеяния. Последний вычисляется на основе модельного профиля плотности углекислого газа, что позволяет вычислить искомый коэффициент аэрозольного поглощения и оценить ошибку восстановления.

Спектрометр «СПИКАВ–ИК» состоит из акустооптического перестраиваемого фильтра и оптической системы, позволяющей измерять интенсивности двух ортогонально поляризованных лучей. Для целей диссертационной работы использовался диапазон 650–1550 нм. Поскольку в приборе используется сканирование по спектру, измерения на различных длинах волн проводились на разных высотах линии визирования. При решении обратной задачи эти данных интерполировались на единую сетку высот. Всего было проведено 798 экспериментов по солнечному просвечиванию. Важной проблемой оказалась неточность наведения прибора на Солнце, приводившая к флуктуациям наблюдаемого солнечного излучения. Всего было отобрано 222 сеанса измерений, в которых эти флуктуации не превышали 3%.

В работе даны оценки погрешности определения оптической толщины и коэффициента аэрозольного ослабления. Результаты статистической обработки наблюдений показывают, что высота дымки, определяемая, как высота, на которой оптическая толщина равна единице, растет с приближением к экватору с уменьшением длины волны. Эти результаты согласуются с предыдущими работами.

В третьей главе рассмотрено восстановление распределений аэрозоля по размерам частиц по полученным ранее высотным профилям коэффициента аэрозольного ослабления. Для этой цели необходима модель дифракции электромагнитных волн на ансамбле аэрозольных частиц. Капли раствора серной кислоты в надоблачной дымке при температурах ниже температуры их замерзания, могут находиться в кристаллическом, аморфном или жидком переохлажденном состоянии. Известно, что во всех этих случаях теория Ми оказывается хорошим приближением. Зависимостью комплексного показателя преломления каплей от температуры и концентрации раствора можно пренебречь. Его мнимая часть при этом практически равна нулю. Распределения частиц по размерам хорошо характеризуются эффективным радиусом частиц и эффективной вариацией. В работе используются одномодовые и двухмодовые логарифмически-нормальные распределения. Алгоритм восстановления распределения является одним из вариантов метода максимального правдоподобия и заключается в подборе функции распределения, обеспечивающей наилучшее согласие с восстановленными коэффициентами ослабления с учетом оценок их ошибок. Для этого использована комбинация матричной оптимизации Левенберга–Марквардта и информационного критерия Байеса, обеспечивающего оптимальный выбор количества параметров модели, что подавляет эффект «переобучения». Двухмодовое распределение выбирается, если оно обеспечивает лучшую меру качества модели с учетом степени подгонки. Поскольку метод оказался нечувствительным к эффективной вариации, её значения для одно- и двухмодового распределения были выбраны на основе предшествующих работ.

В результате были получены 222 профиля параметров распределений аэрозольных частиц. В ряде случаев были выявлены отчетливо выраженные слои. Был проведен статистический анализ распределений по диапазонам высот. В целом для одномодового случая характерны частицы с эффективным радиусом около 0,5 мкм, тогда в двухмодовом случае присутствуют субмикронные (около 0,1 мкм) и микронные (0,7–1 мкм) частицы. Как можно заключить из таблицы 3.3, разброс этих величин по различным наблюдениям достаточно велик. Изменчивость параметров распределений может быть связана с глобальными динамическими процессами в атмосфере Венеры. Согласно моделям переноса, частицы с наибольшим радиусом должны наблюдаться в районе экватора, что качественно согласуется с результатами данной работы. Микрофизические модели дают различные объяснения двухмодовым распределениям. Оценка их характерного времени жизни составляет 5 дней. Для эффективного обнаружения двухмодовых распределений коэффициент отношения мод должен лежать в пределах 100–1000, что подтверждается результатами данной работы.

Исследование изменчивости размера частиц указывает на то, что характерное время изменения популяции мелких и крупных частиц в надоблачной дымке составляет несколько месяцев. С другой стороны, данные прибора «ВИРТИС» говорят о том, что характерное время изменения структуры полярного вихря составляет 5–10 дней. Следовательно, изменение популяции аэрозоля связано с другими процессами.

Состав аэрозолей надоблачной дымки и физико-химические процессы ее формирования изучены не до конца. Измерения показателя преломления позволяют предполагать наличие иных, нежели растворы серной кислоты компонент, таких как хлорид, являющихся одним из кандидатов на роль неизвестного ультрафиолетового поглотителя. Однако данные прибора «СПИКАВ–ИК» не позволяют делать заключений о природе аэрозоля надоблачной дымки Венеры.

В четвертой главе рассмотрено восстановление шкалы высоты аэрозоля. Для этого использован метод линейной регрессии для аппроксимации логарифма концентрации линейной функцией высоты. Для двухмодовых распределений шкалы высот определяются отдельно для каждой из мод. Аналогично определяется шкала высот и по коэффициенту ослабления, однако в этом случае она оказывается зависящей от длины волны.

Шкалы высоты, восстановленные по коэффициенту ослабления лежат в диапазоне 3–5 км. Шкалы высоты, восстановленные по профилям концентрации, нанесены на график в координатах широта – местное время. Максимальные шкалы высот, около 5 км, наблюдаются над полярной областью. Минимальные шкалы высот, 2–3 км, наблюдаются в средних широтах на утреннем терминаторе. Полученные в данной работе величины согласуются с предшествующими работами.

В пятой главе рассмотрена задача определения коэффициента турбулентной диффузии. Для этого используется уравнение, связывающее скорость переноса аэрозоля с разностью логарифмических производных по высоте от концентраций атмосферных газов и аэрозоля. Коэффициент пропорциональности здесь является коэффициентом турбулентной диффузии. Для экспоненциальных моделей атмосферы и аэрозоля логарифмическая производная равна обратной шкале высоты. Таким образом, коэффициент турбулентной диффузии можно выразить через скорость переноса и шкалы высот атмосферы и аэрозоля. Скорость принимается равной скорости осаждения частиц, иными словами, турбулентная диффузия компенсирует процесс осаждения. Шкала высот аэрозоля лежит в пределах 2–6 км. Шкала высот атмосферы обладает гораздо меньшей изменчивостью и составляет 4.5–5 км. Поскольку упомянутое уравнение для коэффициента диффузии имеет смысл лишь при шкале высот аэрозоля меньшей, чем шкала высот атмосферы, необходим учет дополнительных процессов переноса, описываемой вертикальной скоростью ветра. Ветер может иметь как положительную, так и отрицательную скорости. Предполагается, что нулевая скорость ветра соответствует средней шкале высот аэрозоля. Скорость осаждения зависит от массы и радиуса частицы, длины свободного пробега молекул и вязкости среды. Если также предположить, что коэффициент турбулентной диффузии одинаков для всех измерений, то оказывается возможным оценить как коэффициент турбулентной диффузии, так и скорость ветра. Эти результаты получены в предположении отсутствия источников и стоков аэрозольных частиц. Поскольку в аэрозольных слоях может происходить коагуляция частиц, при восстановлении шкалы высот и коэффициента турбулентной диффузии измерения, в которых имелись признаки наличия слоев, отбрасывались. Тем не менее, в работе показано, что вклад процессов коагуляции пренебрежимо мал. В результате получена оценка коэффициента турбулентной диффузии для микронных частиц, составляющая  $2 \cdot 10^6$  см<sup>2</sup>/с на высоте 84 км. При пересчете на субмикронные частицы эти результаты согласуются с результатами предшествующих работ. Как отмечает диссертант, данный подход к определению коэффициента турбулентной диффузии обладает рядом недостатков: 1) зависимость от радиуса частицы в силу использования скорости осаждения, 2) неоднозначность выбора средней величины шкалы высот, соответствующей нулевому ветру. Тем не менее, полученные оценки ветра (от –3 до 1 см/с) оказываются близкими к оценкам на основе моделирования динамики атмосферы Венеры.

В шестой главе исследуются слои аэрозоля. Такие слои определяются по изменению знака производной высотных профилей пропускания, оптической толщины, коэффициента ослабления и эффективного радиуса. В работе формулируются критерии определения границ слоев. Аэрозольные слои были обнаружены в 63% сеансов солнечного просвечивания в диапазоне широт 58°с.ш.-90°с.ш. Слои с той же широтой, долготой и местным временем часто наблюдаются в сеансах, проводимых с интервалом в 1–3 земных дня. Был проведен анализ различных механизмов образования слоев и показано, что наиболее вероятным является конденсация водяного пара на существующих частицах раствора серной кислоты.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Представленная диссертационная работа оформлена в соответствии с требованиями, написана грамотно и ясно, подтверждает высокий уровень научной квалификации диссертанта, его глубокие знания актуальных задач физики и способность получать значимые научные результаты.

Достоверность представленных результатов обеспечивается тем, что в работе использованы известные физические модели, проверенные математические методы и проведена верификация новых методов на основе сравнения данных численного моделирования с реальными наблюдениями.

Новизна диссертационной работы заключается в том, что впервые был обработан весь массив измерений прибора «СПИКАВ–ИК», впервые 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 вариации размеров частиц. Впервые был проведён систематический анализ оптических и микрофизических свойств стратифицированных слоёв аэрозоля надоблачной дымки Венеры. Впервые был проведён систематический анализ оптических и микрофизических свойств аэрозольных слоёв надоблачной дымки Венеры и предложен механизм их образования, согласующийся с предыдущими наблюдениями других авторов.

Научная и практическая значимость работы состоит в улучшении понимания свойств и распределении аэрозоля в слабо изученной верхней дымке атмосферы Венеры. Полученные данные могут быть использованы при моделировании переноса излучения в атмосфере Венеры и ее динамики.

При оценке диссертационной работы следует отметить некоторые недостатки:

В главе 2 местами применяется неудачная терминология: «высота прицельной точки», лучше говорить о «высоте перигея луча». «Отклонение распространения излучения от прямолинейной траектории в результате рефракции» не следует выделять в отдельный пункт, достаточно сказать об атмосферной рефракции.

«После расчёта полного угла преломления проводилась коррекция прицельной высоты». Речь идет, очевидно, о пересчете прицельной высоты в высоту перигея луча. Соотношение между прицельной высотой и высотой перигея носит другой характер, не включающий угол рефракции: прицельная высота равна произведению высоты перигея на показатель преломления среды на этой высоте. Это можно видеть, например, из формулы (2.3).

«При обработке данных солнечного просвечивания прибора «СПИКАВ–ИК» мы пренебрегаем влиянием ослабления излучения в результате рефракции». Это утверждение никак не обосновано. Что касается изменения длины луча из-за его искривления, ошибка с учетом требований к точности в атмосфере Венеры будет невелика. Более существенной будет ошибка из-за неучета рефракционного ослабления. По моей оценке, оно составит примерно 10%, и эта величина даст систематическую погрешность около 0.1 в оптической толщине, которая будет переходить в систематическую положительную ошибку в восстанавливаемом аэрозольном коэффициенте ослабления.

Диссертант применяет метод «очистки луковицы», хотя можно использовать и известное решение в виде интегрального оператора типа Абеля, что при том же шаге дискретизации позволило бы добиться более высокой точности решения обратной задачи.

В формуле (3.11), очевидно, опечатка, т.к. член, соответствующий второй моде, должен иметь индекс 2, а не 1.

В шестой главе не указан еще один недостаток метода определения коэффициента турбулентной диффузии: предположение о его постоянстве. Любые турбулентные процессы характеризуются высокой степенью изменчивости.

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертация Лугинина М.С. представляет собой законченное исследование, научная значимость и оригинальность которого не вызывают сомнения. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. Автор демонстрирует высокую квалификацию на этапе компьютерной обработки экспериментальных данных. Сделанные в диссертации выводы являются обоснованными и имеют высокую практическую значимость.

Автореферат работы Лугинина М.С. соответствует содержанию, достаточно полно отражает структуру диссертации и даёт возможность сделать заключение о ее высоком

научном уровне. Диссертационная работа в целом представляет собой законченный научный труд, основные положения диссертации в достаточной мере нашли отражение в 4 научных работах, опубликованных в авторитетном зарубежном научном издании, включенном в перечень ВАК. Работа прошла апробацию на ведущих российских и международных конференциях. Таким образом, диссертация соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемых к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Из вышеизложенного следует, что представленная к защите диссертационная работа Лугинина М.С. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым на соискание учёной степени кандидата наук, а сам Лугинин М.С. заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия.

Я, Горбунов Михаил Евгеньевич, выражаю своё согласие на обработку моих персональных, связанных с защитой диссертации.

Официальный оппонент,  
заведующий лабораторией турбулентности  
и распространения волн  
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской Академии Наук  
доктор физико-математических наук



Горбунов Михаил Евгеньевич

119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3  
Телефон: +7 (495) 951-95-74  
E-mail: [gorbunov@ifaran.ru](mailto:gorbunov@ifaran.ru)

Подпись Горбунова М.Е. заверяю.

Ученый секретарь  
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской Академии Наук  
кандидат географических наук



  
Красноярская Людмила Дмитриевна

16.03.2021