

Тема ПЛАНЕТА. Исследование атмосфер и поверхностей планет

Гос.рег. № 0120.0 602993

Науч.рук. академик РАН Зелёный Л.М.

Зам. рук. темы д.ф.-м.н. Кораблёв О.И., д.ф.-м.н. Митрофанов И.Г., д.ф.-м.н. Захаров А.В.

1. МАРС

1.1 Многолетние наблюдения дневного свечения $O_2(a^1\Delta_g)$ в атмосфере Марса по данным СПИКАМ

На основе данных надирных наблюдений SPICAM-IR свечения молекулярного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ в полосе 1.27 мкм за 6 марсианских лет с 2004 по 2014 г. проведено исследование по поиску его межгодовых вариаций. При этом использованы данные общей циркуляции атмосферы Марса для устранения ложных вариаций, связанных с разным местным временем проведения наблюдений в разные марсианские годы. Выявлены участки максимальных межгодовых вариаций. Например, в Южном полушарии в сезон $L_s = 280-320^\circ$ относительное отклонение свечения O_2 от среднего составляет 80%. Сравнение с данными по распределению водяного пара подтверждает теорию об антикорреляции свечения кислорода и концентрации воды в атмосфере Марса (Рис.1). Используя одновременные наблюдения содержания озона в полосе Хартли УФ каналом СПИКАМ (Lefevre et al., 2014) и результаты модели общей циркуляции, там где модельный и теоретический озон отличаются менее, чем на 10%, был найден коэффициент столкновительной дезактивации возбужденного состояния $O_2(a^1\Delta_g)$ углекислым газом, равный $(0.75 \pm 0.5) \times 10^{-20}$ см/молек/сек.

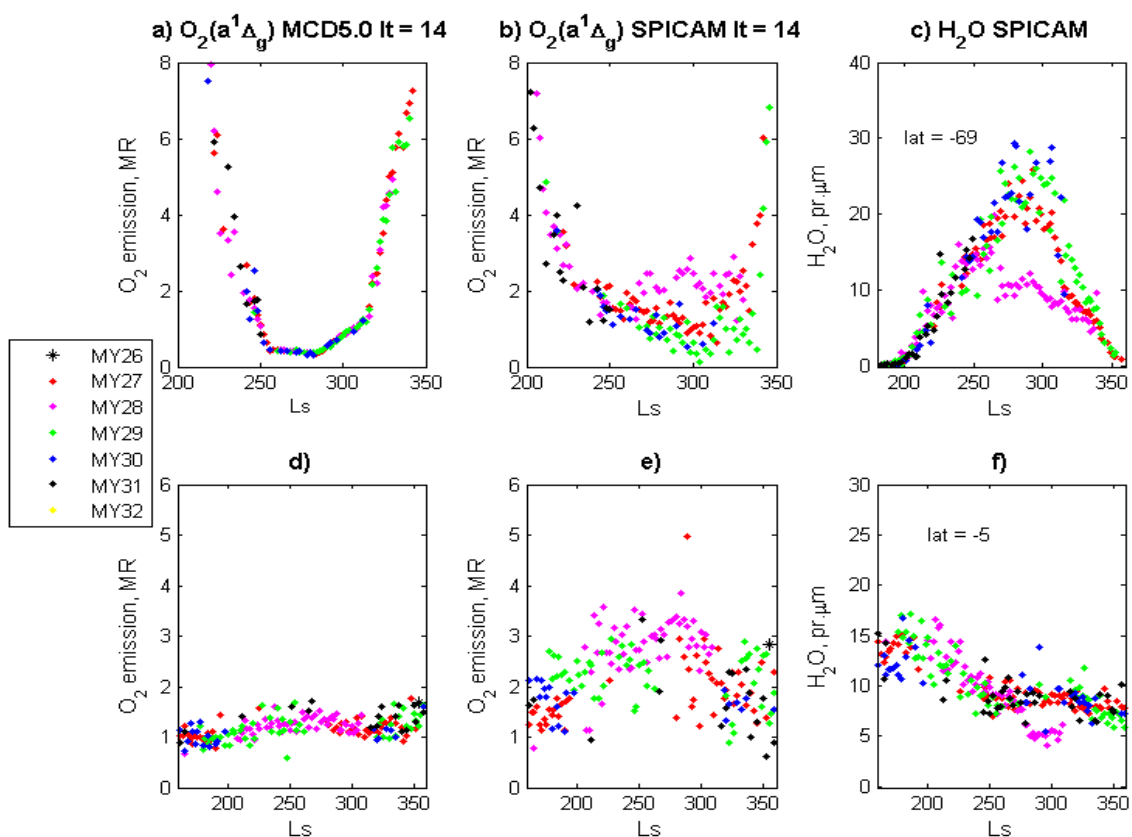


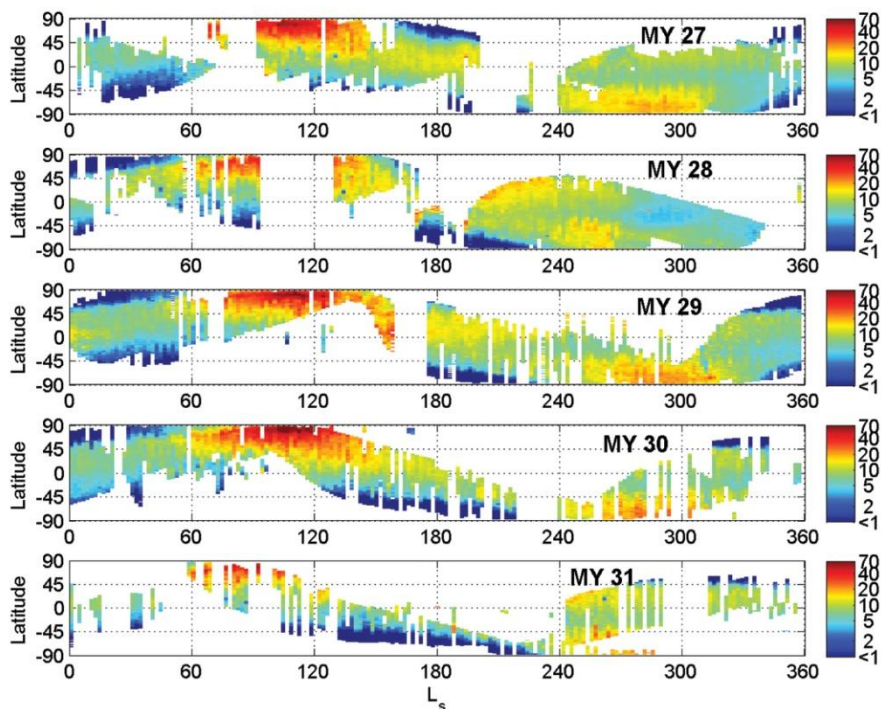
Рис.1 Модельное свечение кислорода для местного времени 14-00 (a,d) и наблюдаемое свечение кислорода, приведенное к местному времени 14-00 (b,e) для разных Марсианских лет. (c,f) – соответствующее распределение водяного пара. Верхний рисунок приведен для широты 69S, $L_s = 200-350$, нижний для широты 5S, $L_s = 150-350$.

1.2 Исследование вертикального распределения пыли и водяного пара в атмосфере Марса по наблюдениям под разными фазовыми углами на «Марс-Экспресс»

Ведется работа по обработке EPF (emission phase function) наблюдений прибора SPICAM. Данные измерения позволяют исследовать как свойства атмосферного аэрозоля и малых составляющих, так и их вертикальное распределение. Для анализа используются полосы поглощения углекислого газа 1.43 мкм и водяного пара 1.38 мкм. Глубина первой определяется свойствами и распределением аэрозоля в атмосфере, и по наблюдениям под многими фазовыми углами эти параметры могут быть фитированны. Данная работа проведена для наблюдений 27-го марсианского года. Полоса поглощения водяного пара определяется помимо аэрозоля собственно содержанием и вертикальным распределением воды. На низких высотах это распределение плохо изучено и обычно считается постоянным с высотой до уровня насыщения. Ряд работ, однако, определяет водяной пар сконцентрированным в нижних слоях атмосферы, но предварительный анализ данных SPICAM EPF не подтверждает эту теорию.

1.3 Пять марсианских лет непрерывного наблюдения водяного пара в атмосфере Марса

Начиная с 2004 года спектрометр СПИКАМ ИК проводит непрерывные наблюдения водяного пара в атмосфере Марса по полосе 1.38-мкм. В работе представлено интегральное содержание водяного пара в период времени с 2004 по 2013 (марсианские годы 27-31) на сетке $2^\circ L_s \times 2^\circ$ широты, а также средняя карта содержания водяного пара, усредненная за все годы наблюдения Марс-Экспресс. Восстановленные значения концентрации H_2O показывают номинальный годовой цикл около 60-70 осаж.мкм для северного лета и ~20 осаж. мкм для южного лета. Среднегодовое содержание воды оценивается от 10 до 20 осаж.мкм в согласии с другими экспериментами. Из года в год сезонный цикл показал высокую стабильность. Наблюдаемое уменьшение количества водяного пара во время глобальной пылевой бури MY 28 нельзя полностью объяснить маскирующим влиянием пыли на наблюдения, что указывает на действительное уменьшение количества воды около или над поверхностью. Суточных вариаций в интегральном содержании воды в атмосфере найдено не было, хотя полоса 1.38-мкм чувствительна к количеству воды в нижней шкале высот атмосферы.



2. Венера

2.1 Измерения континуального поглощения CO₂ и содержания H₂O в окнах 1.10- и 1.18-мкм на Венере над горами Максвелла

Продолжена обработка данных по измерению континуума CO₂ в окнах 1.18 и 1.10 мкм по прохождению над горами Максвелла в 2011-2013 годах. Континуум важен при измерении и моделировании поглощения углекислого газа при высоких давлениях. Лабораторные измерения континуума в диапазоне 1.18 мкм были получены только в 2013 году, но диапазон давлений был не достаточно широким. В нашей работе получены значения континуума от 0.29 до $0.67 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$ и от 0.31 to $0.79 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$, для окон 1.10 и 1.18 мкм, соответственно, в зависимости от предполагаемых входных параметров модели. Значения для окна 1.18 мкм попадают между результатами Bézard et al., (2009, 2011) по данным VIRTIS-M и лабораторными измерениями Snels et al. (2014). Найдены ограничения на континуум для окна 1.28 мкм (не должен превышать $2.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$). Используя окно прозрачности 1.18 мкм, определено относительное содержание H₂O на высотах 10-15 км изменяется от $25.7^{+1.4}_{-1.2} \text{ ppm}$ до $29.4^{+1.6}_{-1.4} \text{ ppm}$, предполагая излучательную способность поверхности 0.95 и 0.6, и соответствующее значение континуума CO₂. Поиск вертикального градиента содержания водяного пара на высотах 10-20 км по данным SPICAV результата не дал из-за низкого отношения сигнал-шум прибора и неопределенности в излучательной способности поверхности. Опубликована статья.

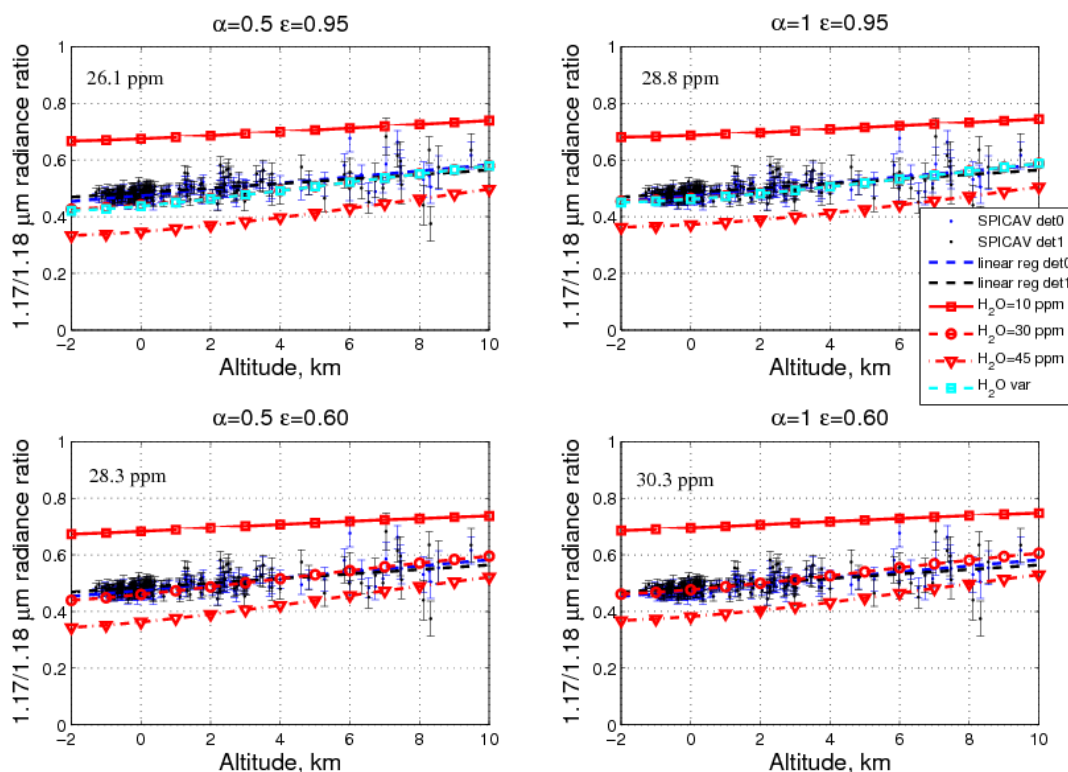


Рис. Чувствительность отношения излучения $1.17 \mu\text{m}/1.18 \mu\text{m}$ относительно содержанию H₂O для двух значений α (0.5 и $1.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$) и излучательной способности поверхности 0.6 и 0.95 . Черные и синие точки – наблюдения для двух детекторов. Пунктиры – линейная регрессия данных для двух детекторов. Красные линии – модели для 10 , 30 and 45 ppm , сиреневая – модель с градиентов относительного содержания H₂O (Ignatiev et al., 1997). На рисунках указано отн. содержание H₂O, соответствующие наилучшему χ^2 , усредненное для двух детекторов.

2.2 Измерения высоты облаков и содержания водяного пара в мезосфере Венеры по данным СПИКАВ

АОПФ спектрометр SPICAV VIS-IR работает в диапазоне 0.65-1.7 мкм на борту миссии Venus Express с 2006г. Он проводит измерения водяного пара в мезосфере Венеры по полосе 1,38 мкм и высоты верхней границы облаков по полосам CO₂ 1,4-1,6 мкм.

Высота верхней границы облаков была восстановлена для всех данных с апреля 2006 г. по май 2014 г. (4350 серии наблюдений с 30 до 2950 орбиту) с учетом многократного рассеяния в облачной атмосфере и новых калибровок спектрометра. Уровень $\tau=1$ на длине волны 1,48 мкм варьируется от 69 до 73 км в низких широтах и от 64 до 68 км в высоких широтах вблизи полюсов, предполагая шкалу высот аэрозоля равной 4 км. Долговременных вариаций не обнаружено. Относительно содержание H₂O варьируется от 3 до 13 ppm. Разброс значений выше, чем результаты, полученные по данным VIRTIS-N/Venus Express на высотах 65-70 км по полосе 2.56 мкм. Это объясняется тем, что полоса 1.38 мкм чувствительна к высотам 55-70 км, где происходят большие потери воды в процессе формирования облачного слоя и должен быть резкий вертикальный градиент в профиле водяного пара. За период с 2007 по 2014 год долговременных вариаций H₂O, а также зависимости от местного времени обнаружено не было.

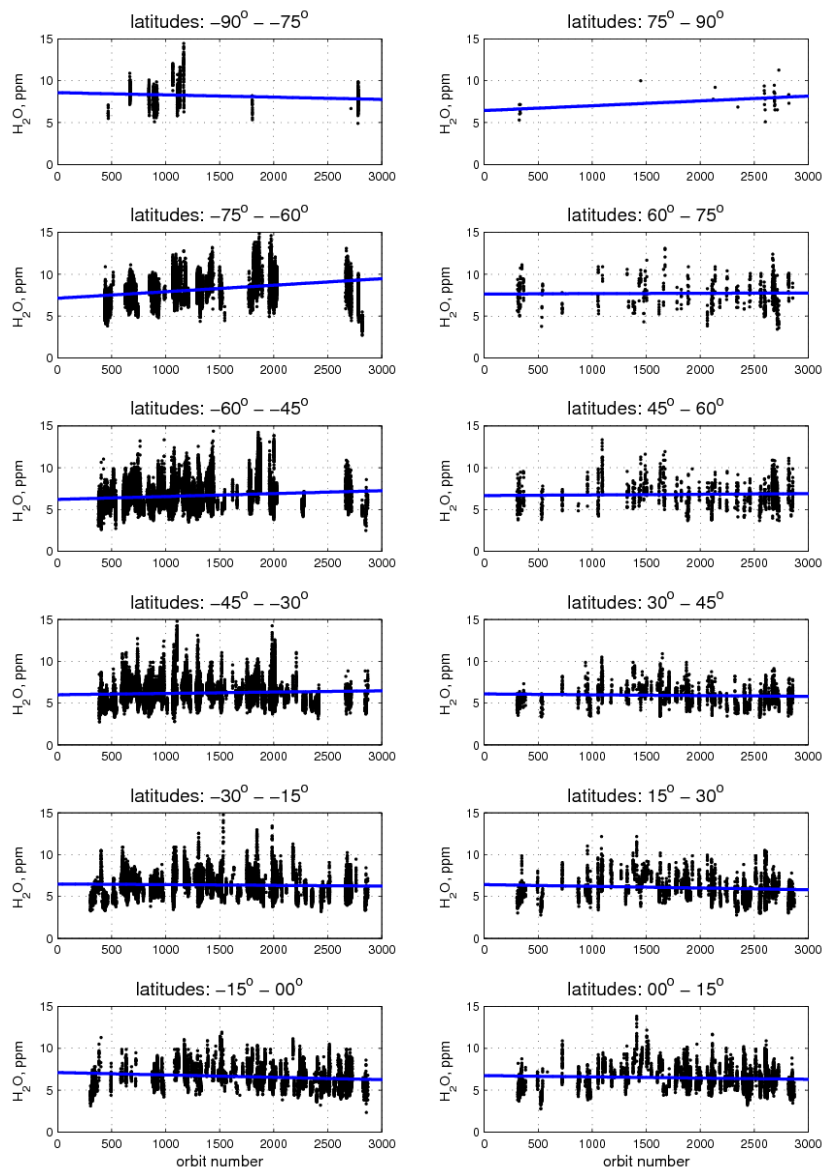


Рис. Долговременные вариации водяного пара в мезосфере Венеры по данным СПИКАВ
2.3 Исследование аэрозолей надоблачной дымки Венеры методом солнечных затмений

По данным солнечных просвечиваний СПИКАВ (аппарат «Венера Экспресс») получено относительное пропускание аэрозоля над облаками Венеры на вечернем и утреннем терминаторе в диапазоне от 650 до 1550 нм для 318 орбит за период с 2006 по 2014 год.

Для этих орбит методом "очистки луковицы" восстановлены профили спектральных зависимостей аэрозольных экстинкций. С помощью теории Ми для сферических частиц путем решения обратном задачи алгоритмом Левенберга-Марквардта восстановлены размеры частиц на высотах от 70 до 90 км. Согласно нашим данным бимодальное распределение характерно для высот от 75 до 85 км, в то время как одномодальное распределение преобладает на высотах ниже 75 км и выше 85 км. В случае бимодального распределения эффективные радиусы оцениваются в диапазоне от 0.05 мкм до 0.4 мкм (мода 1) и от 0.5 мкм до 1.5 мкм (мода 2). В случае одномодального распределения эффективный радиус изменяется в диапазоне от 0.1 мкм до 1 мкм. С увеличением высоты наблюдается уменьшение размера частиц. Наблюдаются суточные вариации частиц крупного размера (см.рис.).

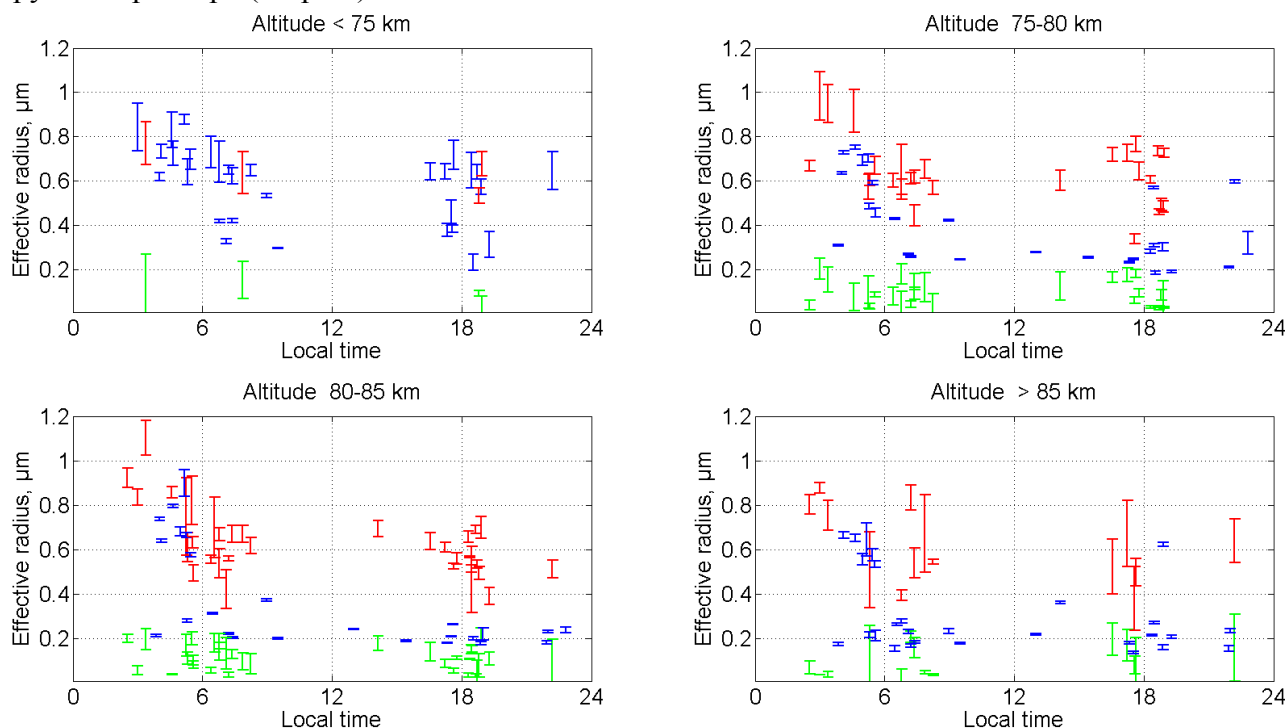


Рис. Зависимость эффективного радиуса от местного времени. Зеленые точки - мода 1 бимодального распределения, красные точки - мода 2 бимодального распределения, синие точки - одномодальное распределение.

2.4 Поляриметрические измерения облачного слоя Венеры по данным СПИКАВ ИК

В работе представлены уникальные результаты поляриметрических измерений ИК каналом спектрометра СПИКАВ на борту КА ЕКА Venus Express (VEx) и первое восстановление параметров облаков. Данные были собраны с 2006 по 2010 год, и покрывают в основном северное полушарие планеты, измерения проводятся в спектральном диапазоне 0.65-1.7 мкм. Они содержат информацию о широтных и долготных вариациях свойств облаков и верхней дымки Венеры, а также о временных вариациях. Полученная степень поляризации находится в согласии с предыдущими наблюдениями с наземных телескопов и КА Пионер-Венера. Используя численное моделирование для интерпретации надирных наблюдений, были получены средние значения эффективного радиуса и вариаций распределения облачных частиц по размерам, соответственно, $r_{\text{eff}}=1$ мкм и $v_{\text{eff}}=0.07$ и реальная часть коэффициента рефракции $n_r=1.42$ на длине волны 1.101 мкм. Получены также верхний предел оптической толщины дымки в высоких широтах со значениями $\tau = 0.17$ на длине волны 1.101 мкм. Работа выполнена французскими и российскими исследователями. Российские исследователи обеспечили калибровки поляризационных измерений и принимали активное участие в обсуждении научных результатов.

2.5 Исследование распределения малых составляющих мезосферы Венеры

В 2014 году были проведены исследования содержания двуокиси серы на ночной стороне Венеры в области высот мезопаузы-криосферы (85-110 км). Исследование проводится на основе орбитальных измерений УФ спектрометра SPICAV аппарата «Венера-Экспресс» в режиме звездного просвечивания.

Вертикальное распределение содержания SO₂ на ночной стороне

По результатам звездного просвечивания прибора SPICAV UV впервые получено вертикальное распределение содержания SO₂ на ночной стороне мезосферы Венеры. В среднем, относительное содержание на высотах 85-100 км варьируется в пределах 100-500 ppbv (частиц на миллиард в единице объема) [К1, К3] (Рис. 1).

Температурное распределение на ночной стороне

По результатам звездного просвечивания прибора SPICAV UV получена температур на ночной стороне мезосферы Венеры (высоты 90-130 км, местное время 18:00-06:00). Обнаружено, что в утреннее время суток на Венере температура криосферы на 10-20 К выше вечернего [К4, С1] (Рис. 2).

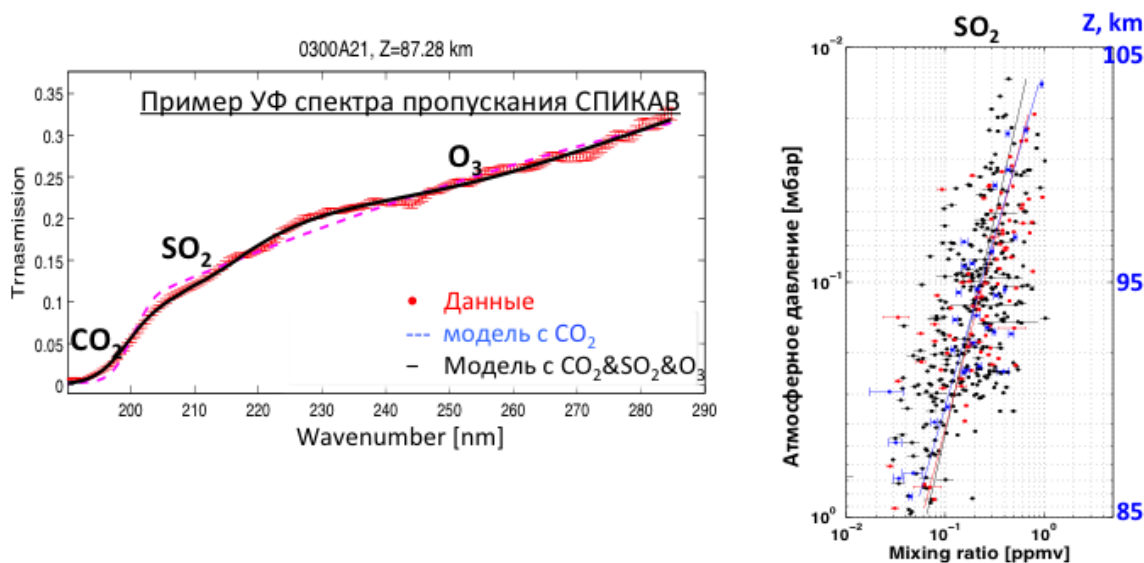


Рис. 1. Детектирование SO₂ на ночной стороне Венеры. Вертикальное распределение относительного содержания газа.

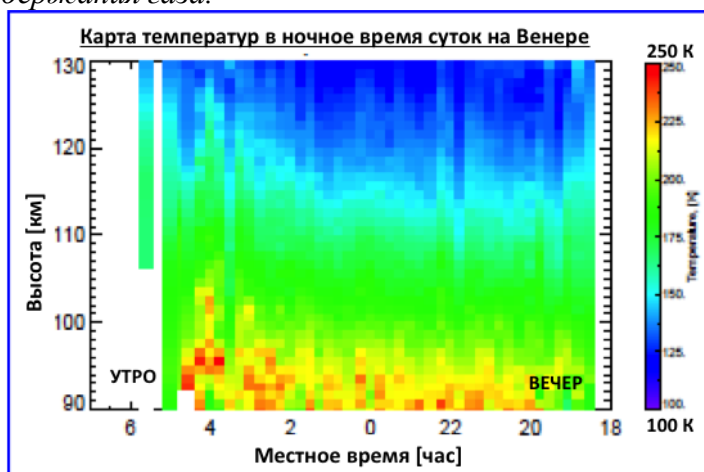


Рис. 2. Карта температур в ночное время суток на Венере.

2.6 Исследование надоблачной дымки по данным лимбовых наблюдений на ночной стороне Венеры в эксперименте VIRTIS на КА Venus Express

Разработан метод восстановления плотности аэрозольных частиц в интервале высот 80-90 км по измерениям в окнах прозрачности 1.1, 1.18, 1.74 и 2.3 мкм (обратная задача для уравнения переноса в лимбовой геометрии). Полученная величина коэффициента полного ослабления на высоте 85 км находится в интервале (3σ) от 10⁻⁴ до 10⁻² км⁻¹ при средней величине ≈10⁻³ км⁻¹. Эквивалентная средняя плотность аэрозольных частиц моды 2 на

высоте 85 км составляет $\approx 0.1 \text{ см}^{-3}$, а субмикронных частиц $\approx 10 \text{ см}^{-3}$, что согласуется с результатами измерений методом солнечных затмений в эксперименте SPICAV/SOIR. Плотность дымки подвержена сильным вариациям (\pm) на порядок величины, при этом плотность дымки снижается в высоких широтах, а также максимальна на утренней стороне, что объясняется фотохимическим образованием сернокислотной дымки в дневное время.

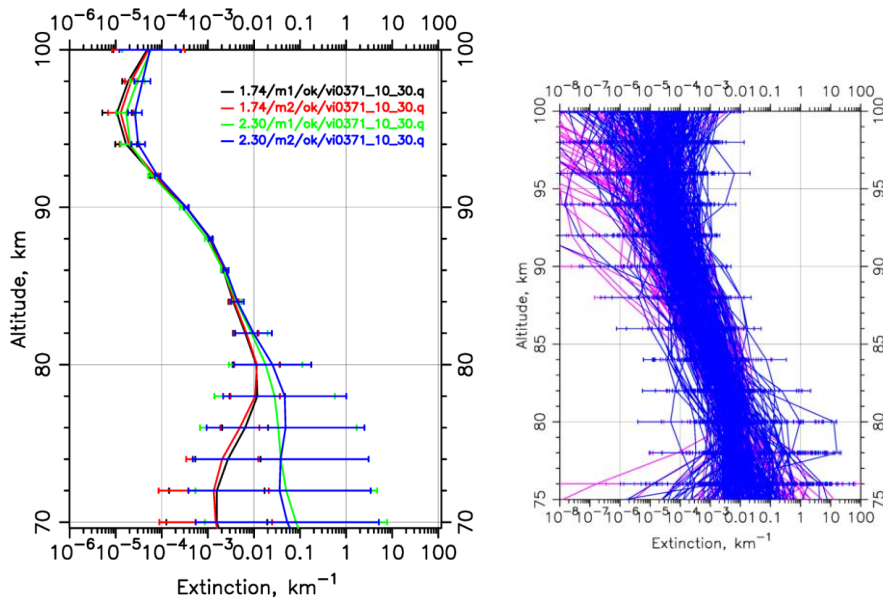
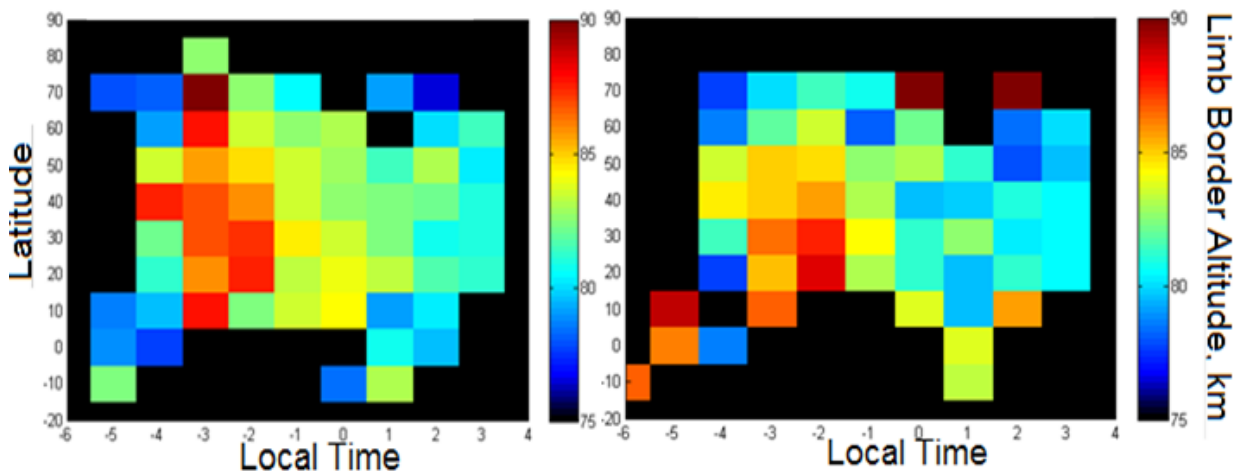


Рис. Слева: профили экстинкции надоблачной дымки, восстановленные в предположении микронных или субмикронных частиц по вертикальным профилям интенсивности рассеянного излучения на длине волны 1.74 и 2.3 мкм на широте 30° на орбите 371. Справа: все восстановленные профили экстинкции на длине волны 1.74 и 2.3 мкм.

2.7 Анализ вертикальных профилей дымки в зависимости от местного времени

Впервые проведена полная обработка статистики лимбовых наблюдений прибора VIRTIS-M / VEx. Построены вертикальные профили для каждого наблюдения в ячейках широт по 5 градусов, в спектральных окнах 1,18, 1,74 и 2,3 мкм. Для каждого профиля вычислена граница лимба. В результате этого было выяснено:

- Средняя граница лимба (высота уровня $\tau = 1$) на 1,7 и 2,3 мкм расположена на высоте 83 ± 6 км (на 1.18 ~ 84 км);
- На высоких широтах средняя высота границы лимба выше на 4 км
- Вечерний лимб выше утреннего на 2 км. Более высокое положение дымки на вечерней стороне связано с тем, что облачные частицы являются результатом серной фотохимии на дневной стороне.



На изображении: карта высот границы лимба атмосферы Венеры в координатах «локальное время-широта». Слева: в спектральном окне 1,74 мкм, справа: 2,35 мкм.

2.8 Гравитационные волны в верхней атмосфере Венеры, моделирование на основе данных Эксперимента ВИРТИС на Венере Экспресс

Обнаружены гравитационные волны в переходной области 95-105 км, где происходит смена режима циркуляции атмосферы: зональная суперротация в мезосфере и поток от подсолнечной точки к антисолнечной в термосфере. Было показано, что наблюдавшиеся двойные пики в вертикальных профилях ночного свечения O₂ 1.27 мкм на высоте 95- 105 км являются следствием действия гравитационных волн. Для моделирования использовалась теория, применявшаяся для изучения флуктуаций плотности в земной атмосфере, вызванных распространением ГВ. В результате получены параметры гравитационных волн, которые могли бы объяснить наблюдаемые вертикальные профили свечения O₂, состоящих из двух пиков: вертикальная длина волны и амплитуда составляют соответственно 7 – 16 км и 3-14%

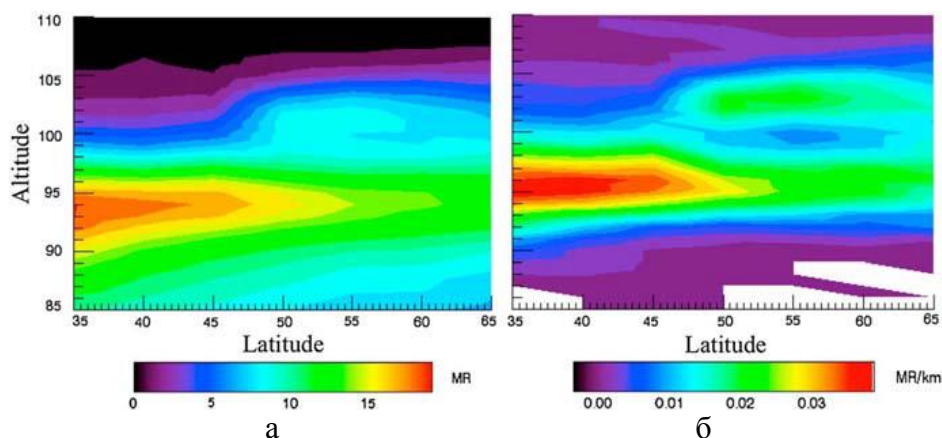


Рис. а) Наблюдаемое распределение интенсивности свечения O₂ на лимбе (орб.383), б) восстановленное вертикальное распределение, на высоких широтах два максимума в вертикальном распределении являются результатом действия гравитационных волн.

2.9 Свечение O₂ 1.27 мкм на ночной стороне Венеры. Метод восстановления абсолютной интенсивности свечения по надирным измерениям ВИРТИС-М

Распределение свечения O₂ 1.27 мкм на ночной стороне характеризует циркуляцию в переходной области, где изменяется основная мода циркуляции от зональной суперротации в мезосфере до потока от подсолнечной точки к антисолнечной в термосфере. Полученные в результате применения разработанного метода глобальные карты свечения O₂ по 718 орбитам показывают максимальное значение интенсивности около 6MR, тогда как средняя величина 0.35±0.3 MR. Наблюдается не симметрия свечения: среднее значение интенсивности на утренней стороне составляет 0.26 MR, на вечерней 0.43 MR. Детали поля свечения: обширный максимум вокруг антисолнечной точки, но с минимумом в антисолнечной точке; максимум свечения на вечерней стороне (22-23 часа), минимумы вблизи терминаторов со значительно более выраженным на утреннем терминаторе. Все это говорит о том, что характер циркуляции в области мезопаузы Венеры более сложный, чем SS-AS, как было получено в работах Piccioni et al., 2009, Gerard et al. 2009. Большую роль должны играть волны, термические приливы, гравитационные волны.

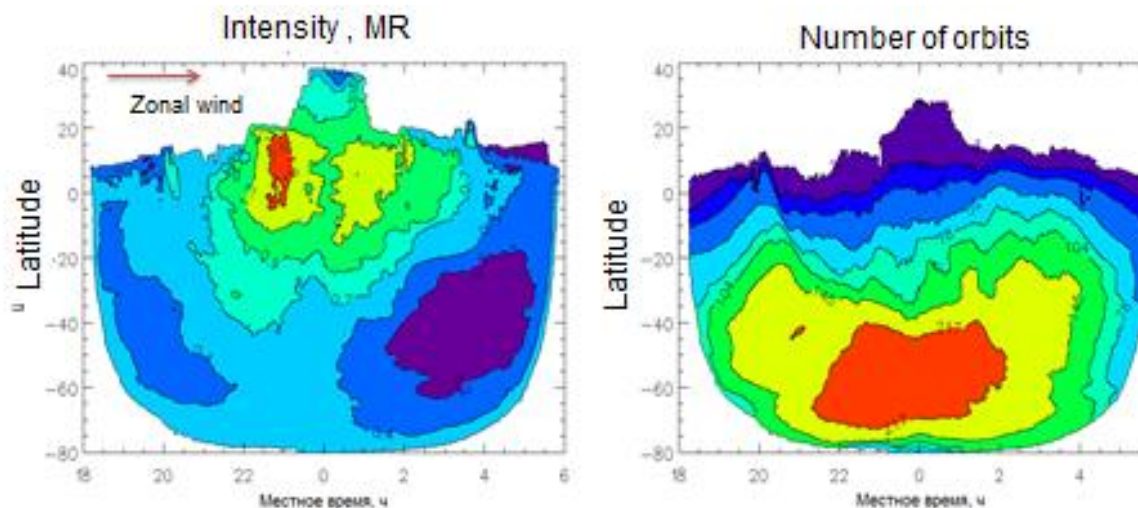


Рис. а) Глобальная карта свечения O2 по 718 орбитам, б) число орбит, использованных для усреднения в каждой точке.

2.10 Осцилляции зональной компоненты скорости ветра на уровне верхней кромки облаков Венеры по данным VMC (Venus Express)

Проведён анализ динамики зональной компоненты скорости ветра и альбедо в зависимости от долготы для 5° - 15° южной широты по результатам, полученным при обработке УФ-изображений за весь период наблюдений (с 2006-05 по 2013-09). Обнаружена корреляция обеих кривых с кривой орографии поверхности Венеры, усреднённой по тому же широтному интервалу, которая даёт объяснение обнаруженной ранее долговременной медленной составляющей зональной скорости в этой области широт. Максимум корреляции кривых зональной скорости и орографии со значением 0.8 получен при сдвиге 30° в направлении перемещения воздушных масс

Проведена переоценка скоростей смещения деталей облачного покрова, полученных автоматическим методом для средних широт. Для 257 орбит, взятых в период с 2006 по 2013 и имеющих наилучшее покрытие данными, построены векторные поля, отражающие перемещение воздушных масс. Проведено сравнение изображений VMC с векторными полями, которое показало взаимосвязь между облачными особенностями в средних широтах и параметрами циркуляции. Выявлено изменение угла отклонения потока от зонального направления в сторону Южного полюса в зависимости от наклона и местоположения облачного «стрейка» на изображении (Рис.). Для каждой орбиты была исследована область размером $2^{\text{h}} \times 15^{\circ}$, имеющая максимальный средний угол отклонения. В зависимости от орбиты, угол меняется от $-18.5^{\circ} \pm 1.9^{\circ}$ до $-0.4^{\circ} \pm 1.7^{\circ}$.

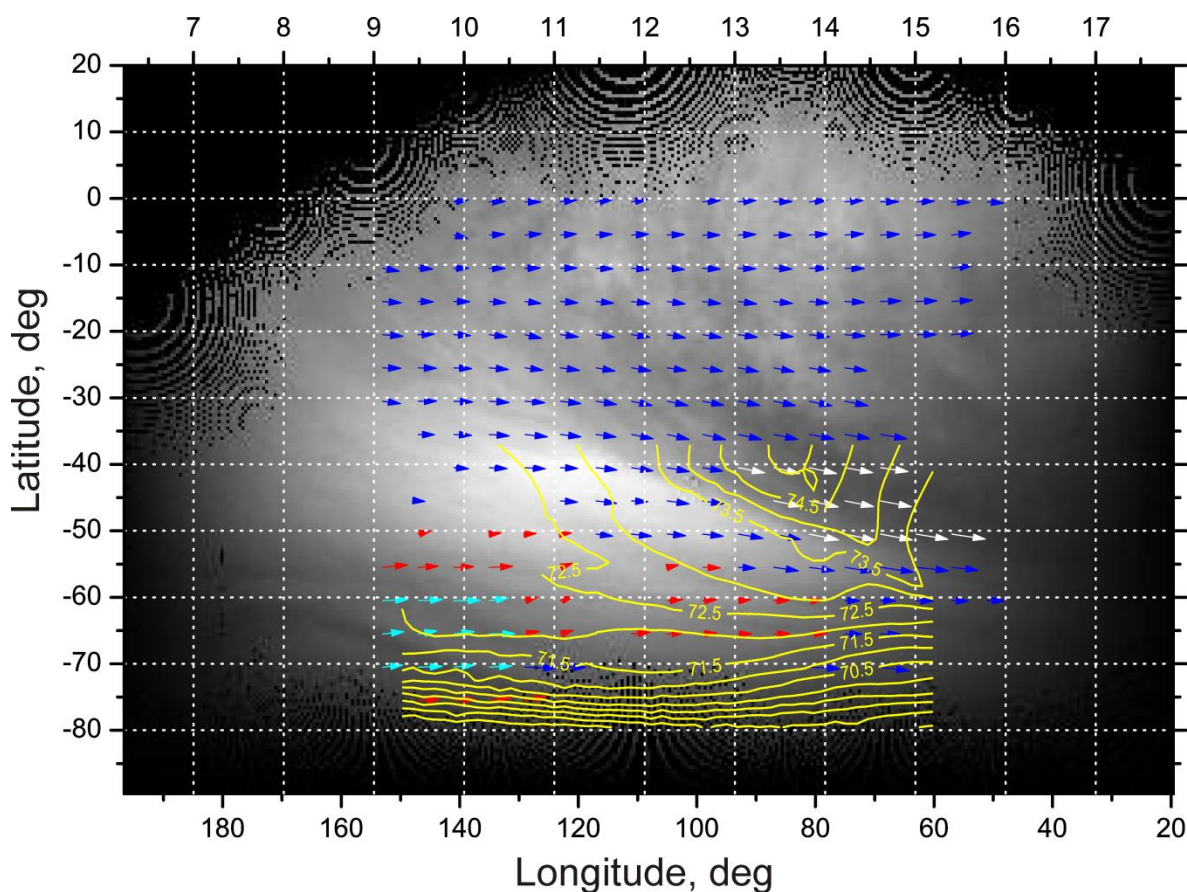
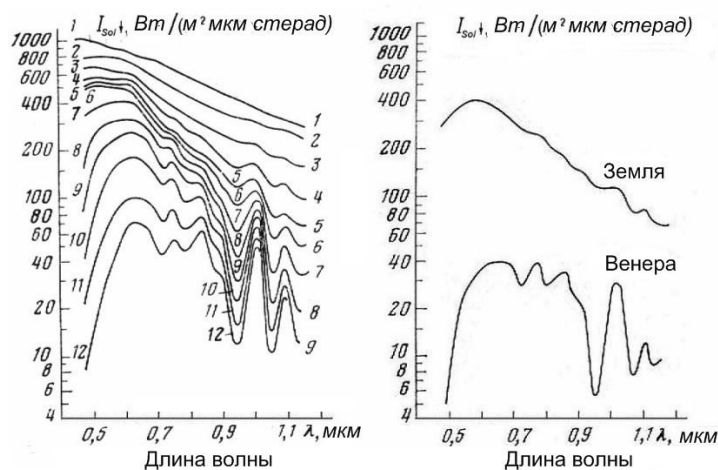


Рис. Поле скоростей наложенное на УФ изображение VMC (кадр 0050, орбита №0471). Нанесены контурные линии равных высот, полученные по альтиметрии, полученной с помощью спектрометра VIRTIS-M.

2.11 Требования биосферы к спектральным и энергетическим свойствам радиации центральной звезды (случай радиации у поверхности Венеры)

Спектральный состав излучения, достигающего поверхности планеты Венера, резко отличается от спектра солнечного излучения на Земле. Рассеянная освещенность, как 0.5-7 клк на Венере, была бы нормальна для земного фотосинтеза, даже в глубине густых лесов.

Сравнение спектральных кривых радиации для Земли и Венеры показывает, что требования фотосинтеза земного типа к радиации на Венере удовлетворяются в красном и ближнем ИК диапазонах, но радиация 410-450 нм поглощается атмосферой. Гипотетический фотосинтез Венеры располагает только ограниченным с обеих сторон спектральным интервалом 520-910 нм (1.36-2.38 eV) с дополнительной ИК-полосой 980-1025 нм (1.21-1.27 eV). Главными объектами,



обнаруженными в 2013 г., стали «стебли растений», которые представляют собой вертикально расположенные тонкие узловатые стволы толщиной 0.3-2 см, высотой 0.2-1 м.

Рис.1. Слева: спектры падающей и рассеянной радиации на Венере в зависимости от высоты над поверхностью: 1 – над облаками, 2 – на высоте 62 км, 3 – 55, 4 – 52, 5 – 49, 6 – 40, 7 – 25, 8 – 16.5, 9 – 10, 10 – 4.5, 11- 1 и 12 – 0 км. Спектры измерены спектрометром

ВЕНЕРЫ-14 [L2]. Справа: спектры падающей солнечной радиации на Земле (при чистом небе) и на Венере.

Интерес к фотосинтезу предполагаемой аутоτροφной флоры планеты, как источнику существования ее фауны, пояснений не требует. Света для фотосинтеза земного типа там достаточно. Разумеется, фотосинтез при высоких температурах и в безокислительной среде должен опираться на совершенно другие, неизвестные биофизические механизмы.

2.12 Изучение связей физических характеристик планет земного типа с их возможной обитаемостью и свойствами биосферы (случай Венеры)

В отличие от «стандартных» земных физических условий, многие экзопланеты могут иметь условия, близкие к венерианским. В рамках проекта продолжалось исследование странных объектов, предположительно, живых, обнаруженных на заново обработанных панорамах аппаратов ВЕНЕРА (1975-82 гг.) Возможные результаты поиска может иллюстрировать новый объект «амисада», обнаруженный в 2013-14 гг.

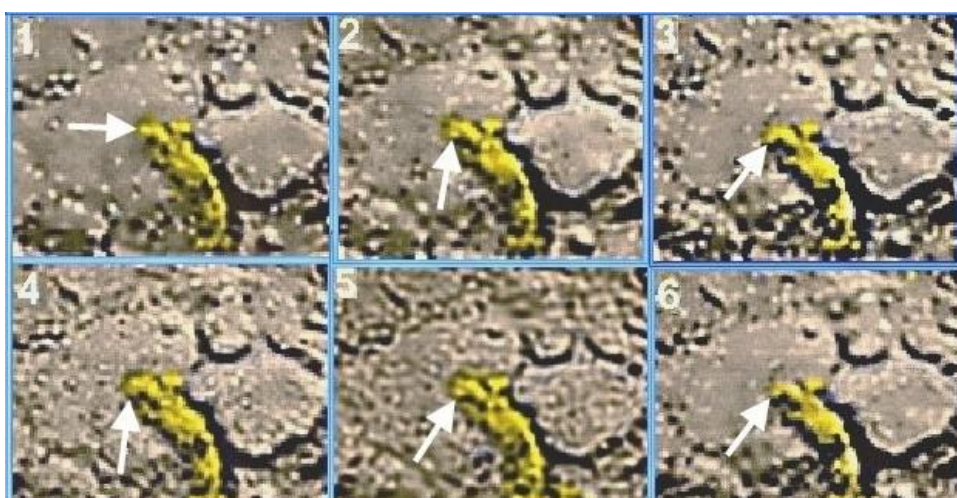


Рис. 6 позиции амисады, взбирающейся на камень.

Высокая плотность гипотетической обитаемости поверхности Венеры, на которую указывают найденные объекты, позволяет предполагать, что поверхность планеты больше похожа на дно земных морских мелководий, чем на земную поверхность. Земная флора начинала свою эволюцию в бескислородной углекислотной атмосфере, по составу вполне соответствующей современной атмосфере Венеры. Если отвлечься от огромной разницы в физических условиях и неизвестных особенностей высокотемпературного фотосинтеза, флора Венеры должна быть не менее богатой, чем земная.

ЗРАННЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТНЫХ ТЕЛ

3.1 Изучен эффект кластерного улетучивания петрогенных элементов из высокотемпературных расплавов полевошпатового ряда

Эксперименты по высокотемпературному импульсному нагреву вещества, моделирующему ударно-испарительный процесс, показывают, что в этих условиях испарение идет преимущественно по кластерному типу. Такое испарение характеризуется выходом из расплава в парообразное состояние атомно-молекулярных группировок (кластеров), что обеспечивает одинаковую летучесть как легколетучих, так и труднолетучих элементов. Экспериментально установлена ведущая роль нефелинового ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), волластонитового (CaSiO_3) и силлиманитового (Al_2SiO_5) кластеров при высокотемпературном испарении альбита, санидина, Са- и Na-лабрадоритов, битовнита.

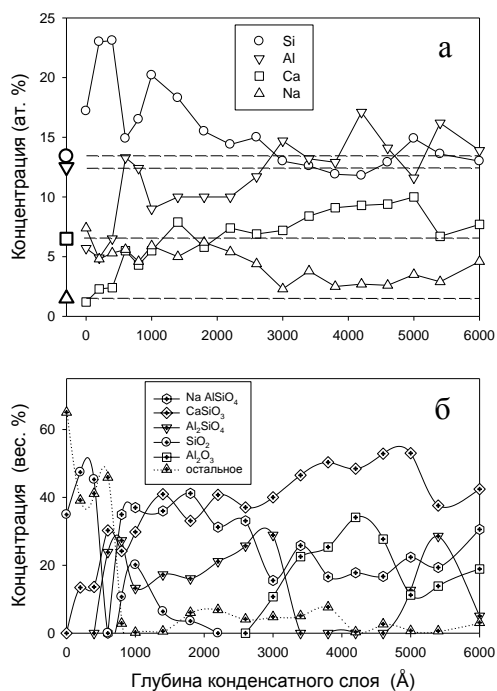


Рис. 1. Структура пленки конденсата, полученного при испарении битовнита. а) Профили элементов в слоях конденсата. Большие значки на оси ординат и пунктирные линии показывают концентрации соответствующих элементов в исходном образце битовнита. б) Профили выявленных молекулярных группировок в слоях конденсата. Точечная кривая показывает комплементарную неразрешенную долю конденсата.

3.2 Построена модель дегазации Земли в предположении двухрезервуарного мантийного источника.

Модель дегазации мантии Земли в предположении, что мантия является единым достаточно хорошо перемешиваемым резервуаром конфликтует с некоторыми геохимическими данными, прежде всего с изотопными составами гелия и неона в породах и флюидах мантийного происхождения, и свидетельствуют о нахождении в мантии Земли древнего, менее дегазированного (богатого солнечными газами), не участвующего в мантийной конвекции резервуара. Такая модель дает исключительно малое значение параметра сохранности летучих ($^{130}\text{Xe}_{\text{сейчас}}/^{130}\text{Xe}_{\text{исходный}} \approx 10^{-11}$), что накладывает достаточно жесткие условия на дегазационные механизмы. Необходимый темп дегазации мог быть обеспечен только конвекцией расплавов на ранних этапах эволюции Земли.

3.3 Экспериментально была показана возможность синтеза сложных органических соединений в условиях Титана при высокоскоростных ударных процессах, происходящих при падении каменных метеоритов.

Атмосфера Титана, содержащая 98% по объёму азота и ~2 % метана, может сама по себе служить богатым источником углерода для образования органических соединений при высокоскоростном ударе о ее поверхность метеоритов. Эксперименты, моделирующие ударно-испарительный процесс в таких условиях, показывают, что полученное конденсированное вещество содержало большое количество свободных алифатических углеводородов (до C₁₉ включительно), свободных алкилароматических углеводородов (с длиной боковых цепей до C₁₃ включительно) или аналогичных структур в составе высокомолекулярного вещества, большое количество связанного азота. Групповой состав органического вещества в полученных конденсированных продуктах приведён на рис. 2. Продукты пиролиза полученной органики напоминают продукты пиролиза толинов – высокомолекулярных продуктов фотохимического синтеза, происходящего в атмосфере Титана.

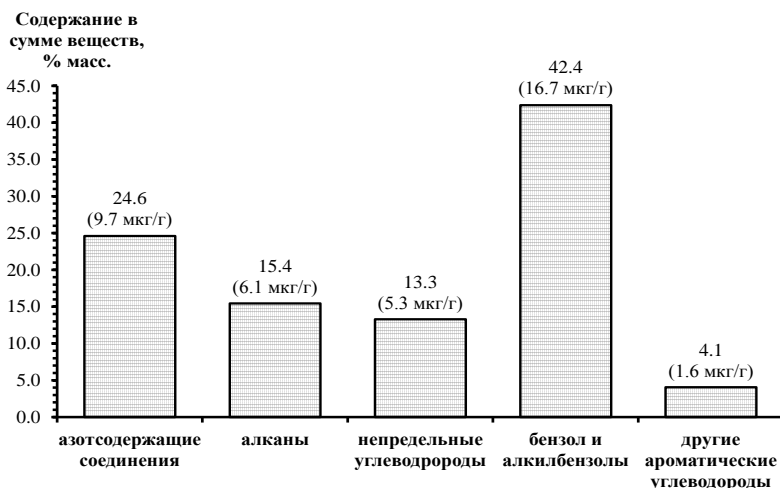


Рис. 2. Групповой состав органических продуктов, выделенных во время пиролиза при 460°C из конденсата, полученного в азот-метановой атмосфере (9б:4). В скобках указан выход в мкг/г конденсата.

3.4 Исследован качественный состав и количественное соотношение летучих органических соединений в углистых хондритах Мёрчисон (СМ2) и Каинсаз (СО3) и продуктах их модельного ударно-испарительного преобразования в инертной и восстановительной атмосферах.

Сравнительное исследование органического вещества в исходных углистых хондритах и продуктах их модельного ударно-испарительного преобразования в инертной и восстановительной атмосферах показало, что при высокоскоростных ударных процессах происходит глубокая трансформация органики (рис. 3). Конденсаты, полученные в условиях нейтральной атмосферы, содержали большие *относительные* количества азот- и серосодержащих соединений, алифатических углеводородов и большие количества CO_2 и SO_2 , чем исходные метеориты. Летучие продукты конденсатов, полученных в условиях восстановительной атмосферы, содержали большие *относительные* количества ароматических и алкилароматических углеводородов, чем исходные метеориты. При этом серосодержащие органические вещества практически отсутствовали, но обнаруживалось значительное количество H_2S .

При переходе от класса углистых хондритов СМ2 к классу СО3 количества выделяющихся органических соединений существенно снижаются.

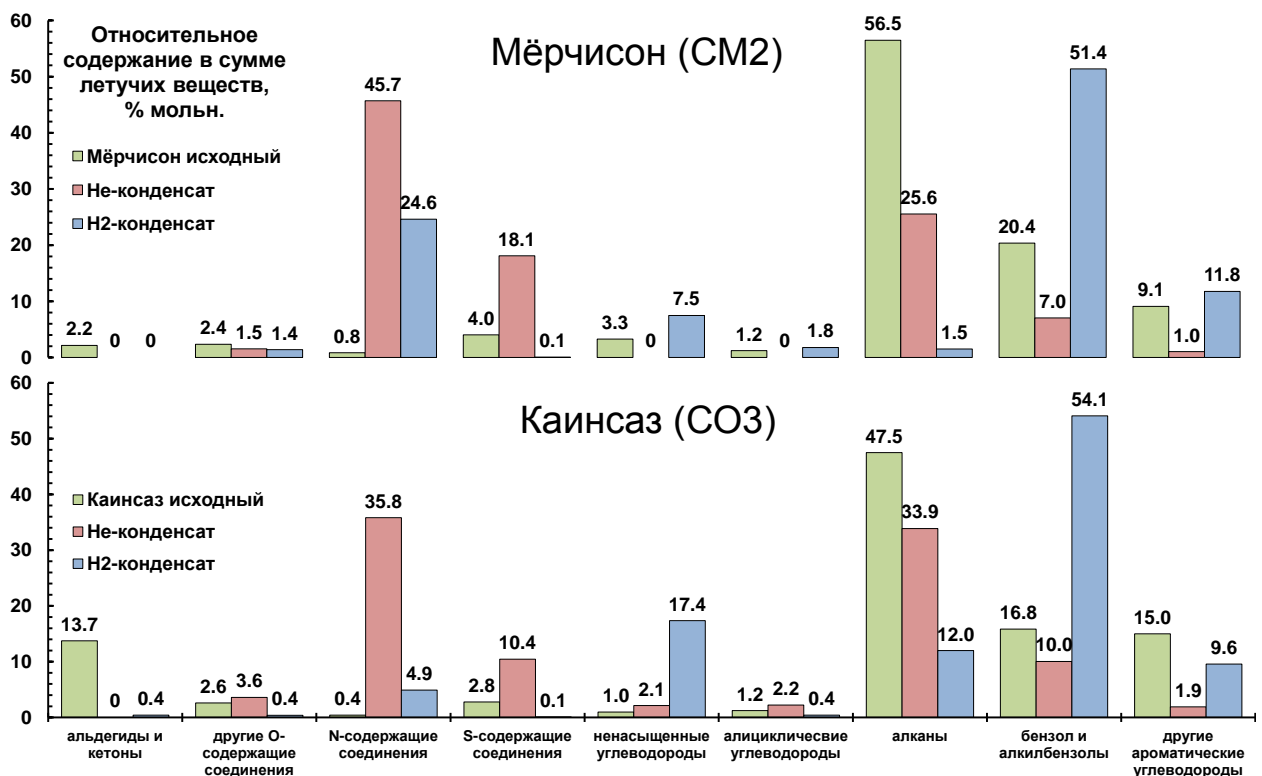


Рис. 3. Групповой состав органических соединений, выделенных при пиролизе углистых хондритов Мёрчисон и Каинсаз и продуктов модельного испарения данных хондритов в инертной (гелиевой) и восстановительной (водородной) атмосфере. Сумма всех идентифицированных органических веществ в каждом объекте принята за 100%.

3.5 Исследование физики ударных процессов

Проведена обработка данных лабораторных экспериментов по исследованию физики ударных процессов. В этих опытах, проводимых на метательной установке ЦНИИМАШ, алмазные ударники, ускоренные до 7 км/с воздействовали на мишень из нитрата аммония. Анализ продуктов синтеза показал, что в плазменном факеле удара происходят абиогенные процессы обеспечивающие :

Синтез протеиновых аминокислот, в частности Глицина, Аланина и Серина.

Нарушение зеркальной симметрии Аланина с избытком L-энантиомеров над D, достигающий величины, 2,2. со «знаком» асимметрии, совпадающей с биоорганической.

Синтез протеиновых полипептидов с массой до 1300 а.е.м, которые могут быть рассмотрены как предвестники ферментов.

Подготовлена статья, которая направлена в Journal of Geophysical Letters.

4 ЛУНА

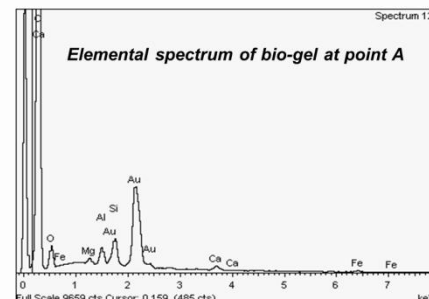
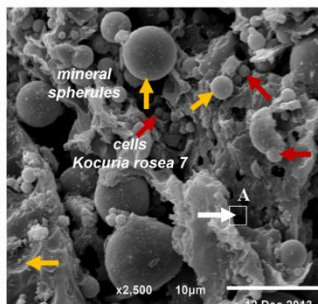
4.1 Исследовано влияние Лунной экзосферы на микроорганизмы

Проводились исследования изменения активности микроорганизмов после нахождения в среде, близкой к условиям на поверхности Луны.

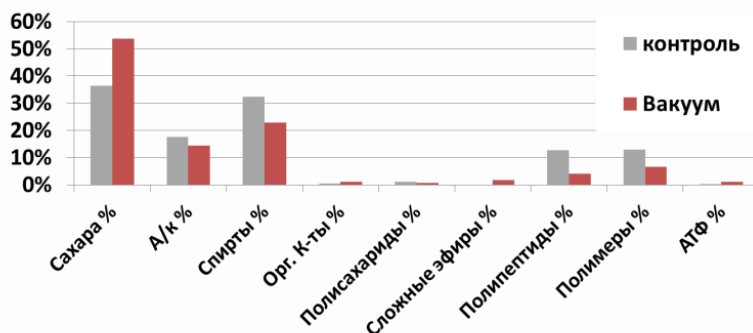
Замечены увеличения активности в поведении микроорганизмов в азотосодержащей питательной среде после нахождения их в вакууме (1,4 Па) в течении 75 дней.

**Formation of organic-mineral complex microbial
the interaction of analog lunar dust L2 and bacterial cells**

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight% Sigma	Weight%	Atomic%
C K	90.58	0.3361	90.12	0.35	92.84
O K	3.60	0.1403	8.58	0.35	6.64
Mg K	0.25	0.7188	0.12	0.02	0.06
Al K	0.79	0.8024	0.33	0.02	0.15
Si K	1.27	0.8576	0.49	0.02	0.22
Ca K	0.46	0.8062	0.19	0.02	0.06
Fe K	0.35	0.7081	0.17	0.04	0.04
Totals			100.00		



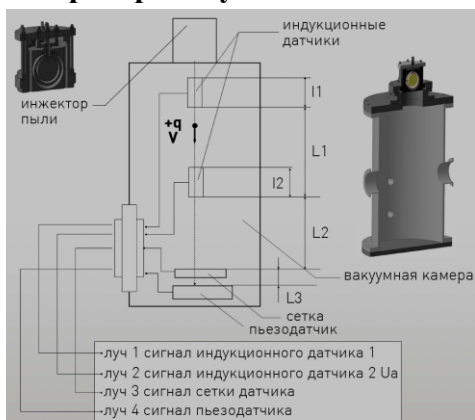
Physiological activity Kocuria rosea 7 after exposure to vacuum



4.2 Проведен анализ плазменно-пылевых эффектов у поверхности Луны

Представления о фотоэмиссионных свойствах реголита над освещенной поверхностью Луны в существующих на сегодняшний день исследованиях отличаются по параметрам, что ставит вопросы о физических характеристиках плазменно-пылевого приповерхностного слоя. Поток солнечного ветра оказывает заметное влияние на распределение плотности плазменных частиц и электрические поля в зависимости от высоты над лунной поверхностью. В результате анализа получены концентрации, температуры, функции распределения фотоэлектронов, а также условия зарядки и устойчивой левитации пылевых частиц реголита. Сформулировано предложение по проведению прямых экспериментов на поверхности Луны в предстоящих лунных миссиях для определения квантового выхода электронов, при взаимодействии фотонов с лунной породой (в рамках существующей неопределенности).

4.3 Разработана экспериментальная установка для воссоздания экзосферы Луны в лабораторных условиях



Проведена разработка экспериментальной установки, позволяющей имитировать падение метеороидов в приповерхностной экзосфере Луны. Работа установки подтверждена при взаимодействии с лабораторными макетами пылеударного прибора ПмЛ, предназначенного для изучения пылевой экзосферы Луны.

5 ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

5.1 Физические процессы на экзопланетах земного типа и планетанах и поиск среди обнаруженных объектов экзопланет, удовлетворяющих критериям гипотетической обитаемости

В поисках возможных планетанов в рамках настоящей работы проводились астрономические наблюдения в Крымской астрофизической обсерватории. Избранным методом исследований была поляриметрия, как возможный метод детектирования «хвостов» у низкоорбитальных экзопланет. Продолжалось поляриметрическое исследование звезды 51 Peg и звезды HD18803, обладающей очень малой поляризацией. Ни для одного из параметров Стокса периодичности, как в отдельных полосах, так и при усреднении, не обнаружено, как и периодических компонентов, имеющих уровень значимости более 95%. В работе предложен новый удобный метод оценки физических свойств на планетанах, основанный на использовании диаграммы <Энтропия-Энтальпия>. В поисках новых планетанов существование экзопланеты GL 581g в литературе было поставлено под сомнение, хотя авторы открытия с критикой не соглашались. Таким образом, основным кандидатом в планетаны остается GJ 1214b. Свойства излучения, достигающего поверхности планетанов (океанических планет), при заданных звездной постоянной излучения и орбитальных данных экзопланеты, критически зависят от ее альbedo и состава. Глубину океана океанических планет, вместе с другими характеристиками, определяет, главным образом эндогенный тепловой поток. При критических данных для воды (647 К, 22 МПа) экзопланета GJ 1214b может быть планетаном при сферическом альbedo > 0.6 . Для альbedo < 0.5 освещенность у поверхности GJ 1214b в оптическом диапазоне вообще была бы близка к нулю.

6 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1 Исследования формирования спутниковых систем на стадии разреженных сгущений

В 2014 г были продолжены исследования формирования спутниковых систем на стадии разреженных сгущений. В частности, в рамках этой модели были объяснены данные наблюдений спутников транснептуновых объектов. Гипотеза о том, что спутниковые системы малых тел образовывались в том случае, когда происходили столкновения сгущений, при которых вновь образовавшееся сгущение приобретало достаточно большой момент количества движения, применялась к формированию системы Земля-Луна. Полученные оценки показали, что для того, чтобы получить момент количества движения такой же, как у системы Земля-Луна, достаточно столкновения двух одинаковых сгущений размером со сферу Хилла и общей массой в 0.1 массы Земли. Такой же момент мог быть приобретен при аккумуляции сгущением размером со сферу Хилла более мелких объектов при конечной массе сгущения равной 0.15 массы Земли. Такой момент достаточен для образования из сгущения зародышей Земли и Луны. Исследовался сравнительный рост зародышей Земли и Луны.

6.2 Алгоритм для изучения явлений в планетных атмосферах на неровной границе

Метод основан на представлении произвольной границы ступенчатой поверхностью и использовании традиционного метода Годунова в областях однородной горизонтальной поверхности и специальным способом расчетов потоковых величин в областях примыкающих к вертикальным особенностям рельефа дна. Расчет соответствующих потоков ведется на основе квазидвухслойной модели мелкой воды, являющейся уточнением классической однослойной модели по отношению к исходной системе уравнений Эйлера. Предложенный численный метод позволяет вести расчет гидродинамических течений тяжелой невязкой жидкости со свободной поверхностью над произвольным профилем дна. Метод обеспечивает единообразие построения решения как в областях со сложной геометрией подстилающей поверхности, так и в областях ровного дна, экономичность при работе с большими расчетными областями по пространству, учет диссипации поступательной кинетической энергии у ступеньки и возможность добавления разнообразных стоков, массовых источников, трения.

6.3 Конечно-разностная модель, позволяющая описать силу Кориолиса в численных методах годуновского типа для мезомасштабных течений вращающейся мелкой воды

На основе предложенного представления разработан конечно-объемный алгоритм, как для ровной границы, так и для границы произвольного вида. Метод основан на представлении произвольной подстилающей поверхности и силы Кориолиса комплексной нестационарной ступенчатой границей. Обсуждены границы применимости данного представления с точки зрения конечно-объемных численных методов. Конечно-разностная аппроксимация эффективной комплексной нестационарной поверхности осуществлена на основе квазидвухслойной модели мелкой воды. Предложенное представление адекватно описывает особенности нелинейных процессов, вызванные силой Кориолиса в численных методах годуновского типа, поскольку корректно отражает нелинейную структуру течений вблизи особенностей, возникающих после дискретизации эффективной границы. Выявлено основное преимущество предлагаемого метода, позволяющее точнее описывать трансверсальную составляющую вектора скорости и тем самым минимизировать погрешность вычислений, индуцированных существенной двумерностью постановок задач для вращающейся жидкости. Работоспособность мезомасштабной модели подтверждена проведенным численным экспериментом по моделированию классической задачи геострофической адаптации планетной атмосфер, известной как задача Россби, и расчетом вращающейся планетной атмосферы над подстилающей поверхностью параболического профиля.

6.3 Проблема постоянства средней энтропии при диссипативных процессах переработки энергии и вещества

Термодинамическое равновесие отсутствует на планетах земной группы, они характеризуются квазистационарным состоянием, обеспечивающим стабильный температурный баланс. Какие механизмы поддерживают фотосинтез, жизнь на планете и вызывают мощные диссипативные процессы? Обычный ответ - это солнечная энергия. Но точно такое же количество энергии, как получено от Солнца, Земля излучает в космос в ИК-излучении. Постоянство усредненной энтропии объясняется тем, что этим компенсируется разница между энтропией поглощенной солнечной радиации и энтропией инфракрасного излучения Земли (что следует из общей формулы Больцмана). Их разница и является негэнтропией. Считая Солнце и Землю черными телами ($F_{\tau} = \sigma T^4$ для Земли, σ - постоянная Стефана-Больцмана), получаем поток энтропии: $(S) = (4/3) \sigma T^3 = (4/3) F_{\tau}/T_{\tau}$, и для случая $\Phi_0 = \Phi_{\tau}$ разница ΔS между энтропией солнечной радиации и энтропией излучения Земли составляет: $\Delta S = (4/3) F_0 (1/T_0 - 1/T_{\tau})$. Планетарные механизмы, фотосинтез и само существование биосферы обеспечиваются притоком отрицательной энтропии (негэнтропии), который возникает из-за различия между солнечной энтропией и энтропией теплового излучения Земли. Приток негэнтропии на Земле распределяется следующим образом: 70% притока негэнтропии приходится на поддержку теплового состояния планеты, а доля фотосинтеза составляет лишь 0,06%, то есть $7 \cdot 10^{-4} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$.

6.4 Новая численная реализация метода дискретных ординат для решения задач переноса излучения в рассеивающих средах

Совместно с Полярным геофизическим институтом РАН разработан и протестирован численный метод решения задачи переноса излучения в оптически плотных поглощающих, излучающих и рассеивающих средах. Тестирование метода в сравнении с находящимся в открытом доступе кодом «DISORT» показало, что при сохранении точности в пределах 1% его производительность в 2-4 раза выше.

6.5 Численная негидростатическая модель общей циркуляции атмосферы Венеры

В 2014 г. детально исследовано влияние рельефа и теплового режима полярных областей на общую циркуляцию атмосферы Венеры и переход от режима суперротации к подсолнечно-противосолнечной циркуляции. Впервые построена модель общей циркуляции атмосферы Венеры с разрешением по сетке менее 1° по горизонтали и 250 м по высоте.