

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 Подтверждение бимодального распределения аэрозоля на Марсе по данным СПИКАМ, широтные вариации и микрофизическое моделирование

Пылевой цикл является одним из наиболее важных в климатической системе Марса. Марсианская пыль, состоящая в основном из минеральных частиц, поднимается с поверхности ветрами, а также локальными вихрями. Будучи радиационно активной, пыль вместе с водяными облаками участвует в нагреве и охлаждении различных атмосферных слоев, поглощая, рассеивая и переизлучая в тепловом ИК диапазоне солнечное излучение. Кроме того, частицы пыли служат ядрами конденсации при образовании облаков водяного и CO_2 льда. С тех пор как в атмосфере Марса были открыты конденсационные облака, стало понятно, что микрофизические модели формирования облаков требуют кроме микронной фракции, популяцию субмикронных частиц в высоких слоях атмосферы. Некоторые наблюдения подтверждали, что бимодальное распределение более подходит для интерпретации данных. Основываясь на лимбовых наблюдениях яркости атмосферы, полученных аппаратами «Викинг» и микрофизическом моделировании, Montmessin et al. (2002) получили бимодальное распределение на $L_s=176^\circ / 15^\circ\text{S}$, с двумя максимумами размеров на $r_{\text{eff}}=1.8 \mu\text{m}$ для большой моды и $<0.2 \mu\text{m}$ для малой моды, с отношением популяций ~ 25 . Markiewicz et al. (1999) указал на возможность бимодального распределения, анализируя данные по яркости неба эксперимента IMP на посадочном аппарате Mars-Pathfinder в фильтрах видимого и ближнего ИК диапазона на $L_s \sim 156^\circ$.

Одновременное восстановление экстинкций аэрозоля на разных высотах в диапазоне от 200 до 300 нм и 1-1.7 мкм по данным УФ и ИК каналов спектрометра СПИКАМ позволило впервые напрямую детектировать бимодальное распределение частиц марсианской пыли с характерными размерами 0.04-0.07 мкм и 0.7-0.8 мкм. Для анализа данных был выбран период лета в северном полушарии, где недавно было открыто перенасыщение водяного пара (до значений $S=p/p_{\text{sat}} \sim 3-5$) в средней атмосфере (Maltagliati et al., 2011). Было проанализировано 9 затмений в северном полушарии и 11 затмений в южном. Численные плотности частиц малой моды составляют от 10^3 см^{-3} около 10 км и 10 см^{-3} около 40 км. Причем в северном полушарии численные плотности частиц больше, чем в южном, а размеры - наоборот меньше. По концентрациям и характерным размерам частицы соответствуют частицам Айткена в земной атмосфере. К сожалению, спектрометр не может определить природу частиц, поэтому в качестве кандидатов были рассмотрены как пылевые, так и ледяные частицы. Подобные концентрации малых частиц в присутствии большой фракции должны быть неустойчивы к коагуляции, расчеты времени коагуляции для полученного бимодального распределения составляют от 1 до 100 дней, что требует источника этих частиц. Оценки потока массы микрометеоритов показали, что они не могут быть источником для малой моды. Таким образом, если это не конденсационная фаза, то частицы, поднятые с поверхности. Благодаря большому времени седиментации на высотах наблюдения от 100 до 1000 дней (для частиц размером 0.1 и 0.01 мкм, соответственно) на высоте 20 км и от 10 до 100 дней на высотах 40 км, такие частицы должны активно участвовать в глобальном переносе воздушной массы

ячейкой Хедли из северного в южное полушарие в наблюдаемый период летнего солнцестояния в северном полушарии.

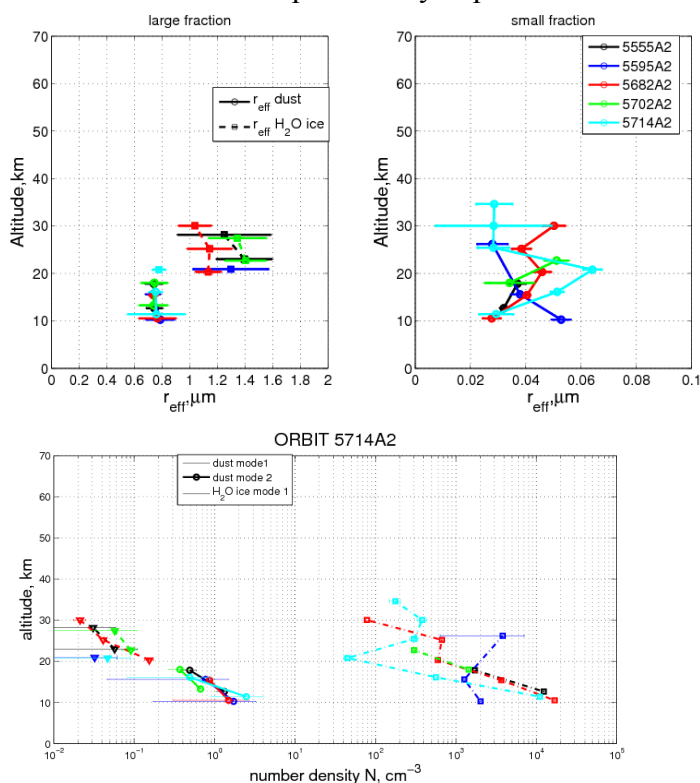


Рисунок 1. Вертикальные распределения размеров частиц для большой и малой моды и профилей численной плотности для 5 орбит в северном полушарии для широт $>60N$.

Руководитель: к. ф.-м.н. Федорова А.А., fedorova@iki.rssi.ru

Федорова А.А., Монтмессан Ф., Родин А., Кorableв О.И., Мааттенен А., Мальтаглиати Л, Берто Ж.Л. Сезонные вариации вертикального распределения аэрозоля и детектирование бимодального распределения в атмосфере Марса по данным солнечных затмений на КА Марс-Экспресс, Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» МСАРД-2013, 24-27 июня, г. Санкт Петербург, Россия, тезисы.

Fedorova, F. Montmessin, A. Rodin, O. Korablev, A. Maattanen, L. Maltagliati, and J.L Bertaux. Observations of a bimodal size distribution for the aerosol particles on Mars by SPICAM/MEX, European Planetary Science Congress 2013, EPSC Abstracts, Vol. 8, EPSC2013-508, 2013.

A.A. Fedorova, F. Montmessin, A.V. Rodin, O.I. Korablev, A.Määttänen, L.Maltagliati, J-L. Bertaux, Evidence for a bimodal size distribution for the suspended aerosol particles on Mars, submitted to Icarus, 2013

1.2 Определение рассеянного света в космических атмосферных спектрометрах на основе АОПФ

Спектрометры на основе акусто-оптического перестраиваемого фильтра довольно часто критикуются за спектральную протечку удаленных боковых лепестков их функции спектральной чувствительности или за присутствие рассеянного света. СПИКАМ-ИК – акусто-оптический спектрометр, работающий в спектральном диапазоне 1000-1700 нм с разрешающей силой 1800-2200 на КА Марс-Экспресс. Одной из основных задач спектрометра является измерение водяного пара в атмосфере Марса. Восстановление H_2O по данным СПИКАМ в целом показало меньшие значения по сравнению с другими приборами на том же космическом аппарате. Возможным объяснением был предложен рассеянный свет внутри прибора. Были проанализированы результаты лабораторных измерений водяного пара при давлениях типичных для марсианских условий с запасным летным образцом прибора СПИКАМ ИК. Уровень рассеянного света оказался ниже

$1.3 \cdot 10^{-4}$, а точность измерения водяного пара ~ 0.2 рг. $\mu\text{м}$, в основном она определяется неопределенностью измерений и точностью синтетического моделирования. Мы продемонстрировали, что акусто-оптический спектрометр хорошо измеряет содержание воды и может использоваться как атмосферный спектрометр.

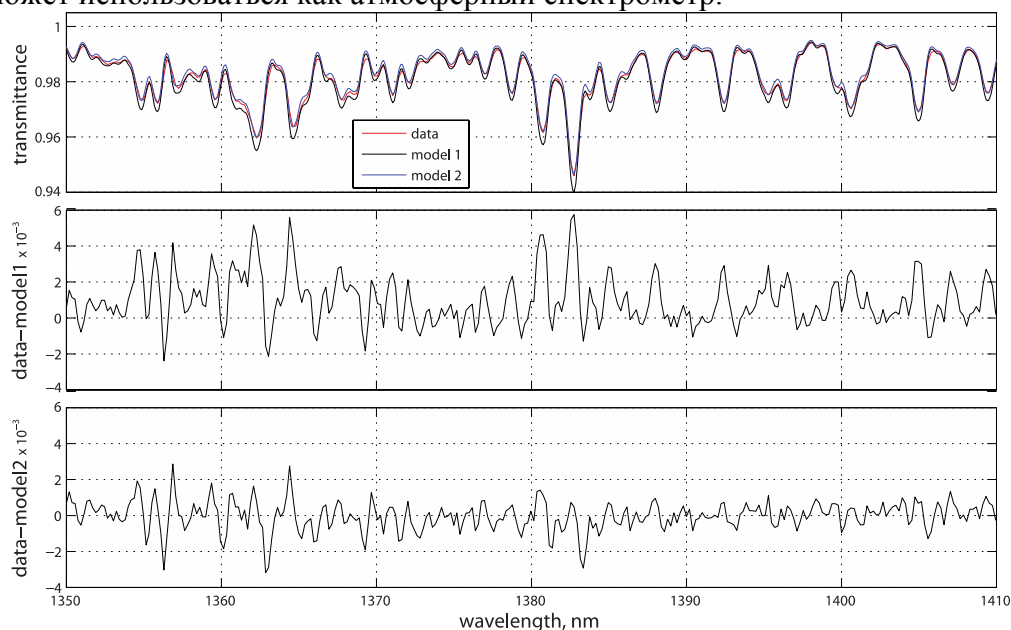


Рис. Верхняя панель: сравнение спектра водяного пара при давлении 13.27 мбар, записанный СПИКАМ ИК (красная кривая), с двумя синтетическими спектрами: один (черная кривая) - без рассеянного света, другой (синяя кривая) - лучший модельный спектр для уровня «серого» рассеянного света $1.3 \cdot 10^{-4}$. Различия между измеренным и модельными спектрами представлены на среднем и нижнем графиках.

Руководитель: д. ф.-м.н. Кораблев О.И., korab@iki.rssi.ru

Korablev, Oleg; Fedorova, Anna; Villard, Eric; Joly, Lilian; Kiselev, Alexander; Belyaev, Denis; Bertaux, Jean-Loup, Characterization of the stray light in a space borne atmospheric AOTF spectrometer, Optics Express, vol. 21, issue 15, p. 18354, 2013.

2 ВЕНЕРА

2.1 Исследование распределения малых составляющих мезосферы Венеры

Венера обладает самой плотной атмосферой среди планет земной группы. Эта планета полностью покрыта слоем облаков из капель концентрированной серной кислоты (высоты 50-70 км над поверхностью). Атмосфера над облаками – область мезосферы (70-120 км) – содержит серо- и хлоро-содержащие газовые составляющие (SO , SO_2 , HCl , HF , H_2O), которые, несмотря на их малую концентрацию (0,1-1 частиц на миллион), играют важную роль в фотохимических процессах, взаимодействуя, в частности, с основным газом CO_2 и парами H_2SO_4 .

В 2013 году были выявлены широтные и годовые вариации содержания SO_2 на уровне ~ 70 км в период с 2006 по 2012 гг.; измерено изотопное соотношение дейтерия к водороду в парах H_2O , HCl и HF над облаками Венеры; Проведены новые летные калибровки спектрометра SOIR на борту КА «Венера-Экспресс». Кроме того, по результатам новых калибровок были получены вертикальные профили содержания HCl над облаками и Венеры.

2.1.1 Распределение содержания SO_2 по широте

По результатам измерений в надир прибора SPICAV были получены широтные вариации содержания SO_2 на уровне верхней границы облаков (~ 70 км) (Рис. 1). Обнаружено, что содержание газа уменьшается от экватора к полюсу на этом уровне высот, что коррелирует с аналогичной зависимостью высоты облаков ([C1], [K2], [K3]).

2.1.2 Распределение содержания SO_2 по времени с 2006 по 2012 гг.

Также были выявлены годовые вариации содержания двуокиси серы на уровне ~ 70 км в период с 2006 по 2012 гг. (SPICAV в надир) (Рис. 2). Полученный тренд оказался схож с результатами советских и американских миссий 1980-1990 годов, что косвенно может подтверждать наличие многолетних циклов на Венере с периодом 10-25 лет ([C1], [K2], [K3]). К тому же, единичные всплески содержания SO_2 могут быть связаны с последствиями извержения вулканов с поверхности Венеры, как это происходит в атмосфере Земли. Хотя прямых доказательств наличия вулканической активности на Венере не существует.

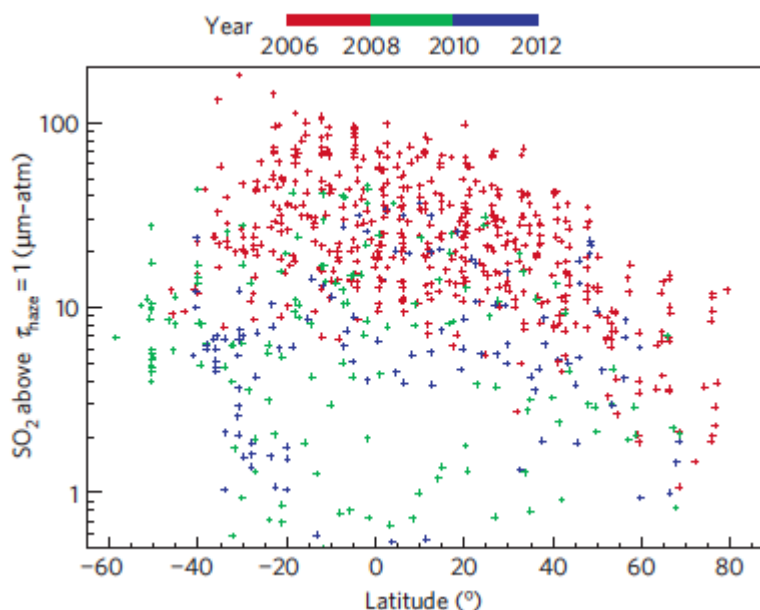


Рис. 1. Широтное распределение содержания SO_2 по уровню верхней границы облаков ($1 \text{ мкм-атм} = \sim 10 \text{ ppb}$).

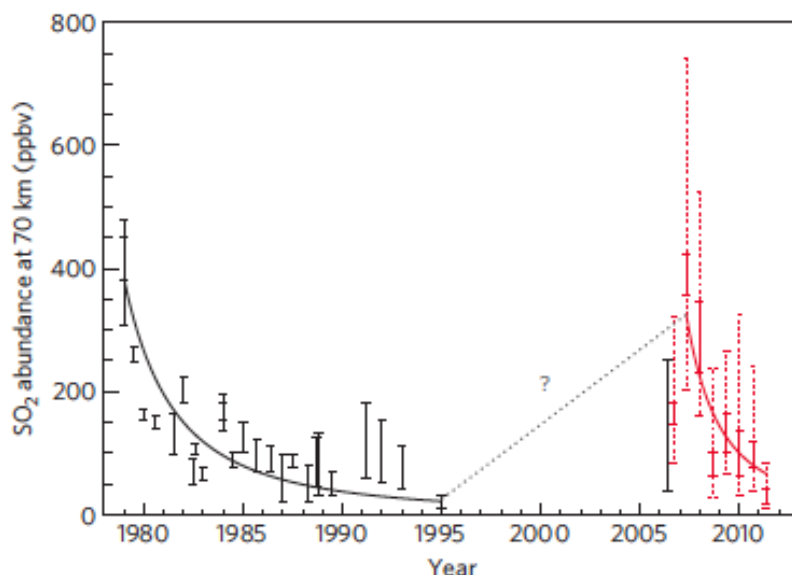


Рис. 2. Годовые вариации содержания SO_2 на уровне 70 км за все время исследования этого газа на Венере (2006-2012 гг. – результаты КА «Венера Экспресс»).

2.1.3 Изотопное соотношение дейтерия к водороду в парах H_2O , HCl и HF

По данным ИК спектрографа высокого разрешения CSHELL на наземном телескопе IRTF/NASA было измерено изотопное соотношение дейтерия к водороду в парах H_2O , HCl и HF над облаками Венеры (высоты ~ 74 км) [C2]. Значения для HCl и HF получены впервые в истории исследования Венеры (Таблица 1); особенно важен результат для HCl , поскольку по современным фотохимическим моделям основной резервуар водорода в

мезосфере Венеры содержится именно в этом газе (а не в H₂O). По отношению D/H в разных слоях атмосферы можно судить о процессах диссипации водорода из атмосферы и, как следствие, об эволюции воды на Венере.

Species	Altitude (km)	D/H	Reference
H ₂ O	26–45	120 ± 40	De Bergh et al. (1991)
	54	100 ± 15 ^a	Donahue et al. (1982)
	54	157 ± 30 ^a	Donahue et al. (1997)
	72	157 ± 15	Bjoraker et al. (1992)
	74	95 ± 15	This work
	70–95	240 ± 25	Fedorova et al. (2008)
H ₂	130	140 ± 40	Hartle and Taylor (1983)
HCl	74	190 ± 50	This work
HF	74	420 ± 200	This work

Таблица 1. Список всех измерений изотопного соотношения D/H в атмосфере Венеры (относительно земного стандарта SMOW). Ссылка “this work” – результаты нашей работы [C2].

2.1.4 Летные калибровки спектрометра SOIR

В 2013 году, благодаря специальным измерениям с борта КА «Венера Экспресс», мы дополнили прежние калибровки прибора SOIR новыми данными [C3]. В частности, определена функция блеска эшелле решетки в зависимости от дифракционного порядка, уточнена аппаратная функция спектрометра, учтено влияние атмосферной рефракции для высоты прицельной точки. Кроме того, на официальном сервере проекта «Венера Экспресс» создан архив данных, содержащий все параметры калибровок и результирующие калиброванные спектры прибора SOIR (<ftp://psa.esac.esa.int/pub/mirror/VENUS-EXPRESS/>).

2.1.5 Вертикальное распределение содержания HCl

Благодаря новым калибровкам прибора SOIR были получены вертикальные профили содержания HCl в мезосфере Венеры (Рис. 3). Профили хорошо согласуются с результатами существующих моделей по этому газу, с недавно опубликованными микроволновыми наблюдениями (Sandor et al., 2012) и с измерениями спектрографа CSHELL (~0.4 ppb на высоте 74 км [C2]). Исследования в этом направлении будут продолжены в следующем году [K1].

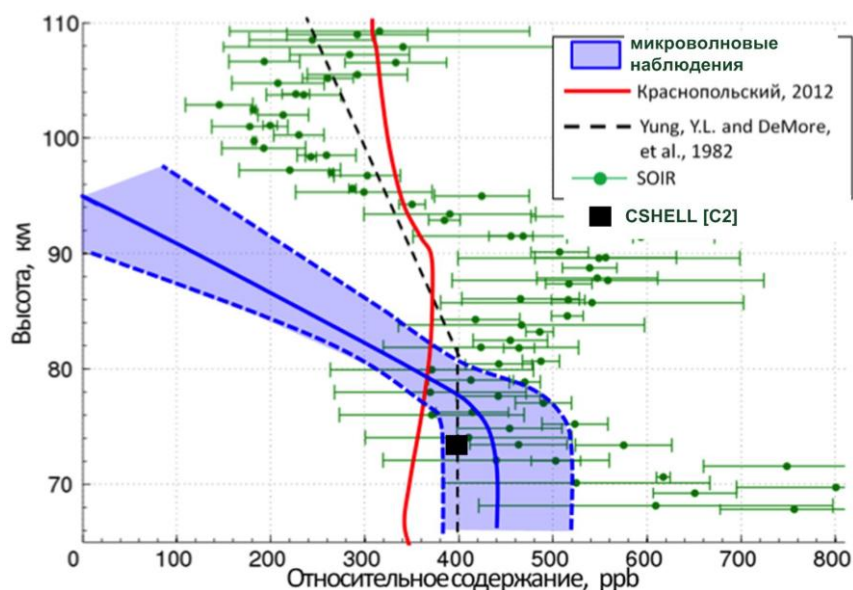


Рис. 3. Вертикальные профили относительного содержания HCl по данным просвечивания SOIR в сравнении с результатами наземных наблюдений (микроволновые и CSHELL) и моделей.

Руководитель: к. ф.-м. н. Беляев Д.А., dbelyaev@iki.rssi.ru

Marcq E., Montmessin F., J.-L. Bertaux, Belyaev D. Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus's dynamic atmosphere. // Nature Geoscience 6, 1, 25-28, (2013).

Krasnopolsky V.A., Belyaev D.A., Gordon I.E., Li G., Rothman L.S., 2013. Observations of D/H ratios in H₂O, HCl, and HF on Venus and new DCl and DF line strengths. Icarus 224, 57-65, (2013).

Vandaele, A.-C., ..., Belyaev, D. Improved calibration of SOIR/Venus Express spectra. Optics Express, vol. 21, No. 18, 21148-21161, (2013).

Евдокимова Д., Беляев Д., Федорова А., 2013. Вариации содержания HCl над облаками и Венеры: новые данные. // XI Всероссийская Открытая Конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", стр. 287. 11-15 ноября 2013, Москва, ИКИ РАН.

Беляев Д.А., Краснопольский В.А., ... , 2013. «Вариации содержания окисей серы над облаками Венеры». Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2013). 24-27 Июня 2013, Россия, Петергоф, СПбГУ.

Belyaev D. et al., 2013. Analysis of sulfur oxides content above Venus clouds. IV Moscow Solar System Symposium. Held in 14-18 October 2013, Moscow, IKI. 4MS³-PS-40.

2.2 Исследование континуума CO₂ по данным прибора СПИКАВ при прохождении над горами Максвелла

Одну из трудностей при моделировании ночных окон прозрачности Венеры представляет дополнительный континуум поглощения CO₂ (основного газа атмосферы) из-за CO₂ полос индуцированных близкими столкновениями и/или крайне далекими крыльями, сильных разрешенных полос CO₂. Определение континуума поглощения CO₂ в ближнем ИК диапазоне, а также поиск возможного градиента малых составляющих около поверхности требует измерения спектров при надирных наблюдениях над различными высотами поверхности. Самое большое изменение высот на Венере возможно над горами Максвелла в высоких северных широтах. В 2011, 2012 годах, а также в октябре 2013 года КА «Венера-Экспресс» выполнил три прохождения над этими горами. В результате прибором СПИКАВ ИК на борту КА были записаны спектры в окнах прозрачности 1.10-, 1.18- и 1.28-мкм для 20 орбит (8, 6 и 6 орбит, соответственно, для каждого года) с общим перепадом высот от -2 до 9 км. Первый сезон 2011 года оказался сложным для обработки из-за низкого угла Солнца и вклада дневного света в ночной спектр. Наиболее удачными оказались орбиты 2012 и 2013 годов. Кроме того, наблюдения с индивидуальной орбиты оказались довольно шумными, чтобы получить точный результат. Статистика наблюдений по 18 орбитам ~300 спектров, позволила получить значения континуума для двух окон 1.10-мкм: $0.79 \pm 0.35 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$, 1.18-мкм: $0.69 \pm 0.26 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$. Первые лабораторные измерения континуума CO₂ в этом диапазоне спектра были представлены впервые в 2013 г. в докладе Snels et al. (2013) и предварительно согласуются с данными СПИКАВ.

Увеличение относительного содержания водяного пара к поверхности (от 80 ppm у поверхности до 30 ppm на 5 км) было впервые получено в работе Ignatiev et al. (1997) по данным спускаемых аппаратов «Венера 13 и 14». Провести подобные измерения дистанционными методами с орбиты планеты или наземными телескопами крайне сложно. Несмотря на это, Chamberlain et al. (2013) получили небольшое уменьшение H₂O от 35 ppm на 5 км до 30 ppm около поверхности, используя наземные астрономические наблюдения высокого спектрального разрешения, что указывает на противоположный градиент по сравнению с результатами «Венеры 13 и 14». Мы также сделали попытку определить градиент водяного пара по данным СПИКАВ ИК на разных высотах

поверхности. К сожалению, низкое отношение сигнал-шум не позволило определить с приемлемой точностью наличие градиента водяного пара в нижней атмосфере Венеры.

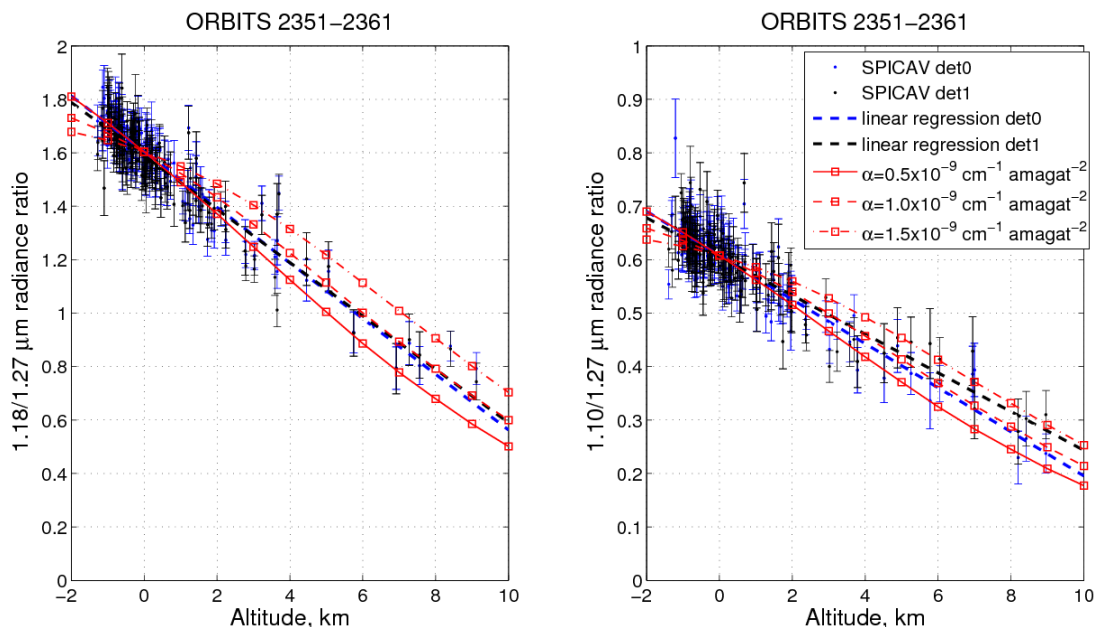


Рис. Сравнение отношения интенсивности излучения для двух окон прозрачности для орбит 2351-2361 с модельными отношениями для постоянных коэффициентов поглощения $\alpha = 0.5, 1.0$ и $1.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \text{ amagat}^{-2}$. Черная и синяя прерывистые линии – линейная аппроксимация данных.

Руководитель: Федорова А.А., fedorova@iki.rssi.ru

Fedorova Anna; Bézard Bruno, Bertaux Jean-Loup; Korablev Oleg, Observations of the near-IR nightside windows of Venus during Maxwell Montes transits by SPICAV IR onboard Venus Express, International Venus Workshop 2013, June 10-14, Catania, Italy, Abstract No.97.

A. Fedorova, B. Bézard, J.-L. Bertaux, O. Korablev, C. Wilson. Observations of the near-IR nightside windows of Venus during Maxwell Montes transits by SPICAV IR onboard Venus Express, THE 4TH MOSCOW SOLAR SYSTEM SYMPOSIUM, 14-18 OCTOBER 2013, SPACE RESEARCH INSTITUTE, MOSCOW, 4ms3-Ps-41, cmp206

A. Fedorova, B. Bézard, J.-L. Bertaux, O. Korablev, C. Wilson, Observations of the near-IR nightside windows of Venus during Maxwell Montes transits by SPICAV IR onboard Venus Express, Planetary and Space Science, in preparation

2.3 Свечение O_2 1.27 мкм на ночной стороне Венеры и циркуляция на высоте 100 км, VIRTIS-M VEX

Глобальная карта распределения интенсивности свечения для южного полушария по надирным измерениям, показывает уменьшение интенсивности к терминаторам и полюсу и обширный максимум вокруг антисолнечной точки (с уменьшением интенсивности в самой антисолнечной точке) свидетельствуют о важности моды SS-AS (Zasova et.al. 2013). Карты распределения свечения по лимбовым наблюдениям показывают, что в экваториальной области северного полушария обнаружено влияние зональной суперротации: максимум свечения смещен в сторону утреннего терминатора. Уменьшение интенсивности ночного свечения к полюсам на глобальных картах может опять же говорить о SS-AS переносе. Однако детальная картина распределения свечения O_2 нельзя объяснить в рамках известных мод циркуляции атмосферы Венеры: зональной ретроградной суперротации и солнечной-антисолнечной циркуляции. С другой стороны известно, что на высотах свечения O_2 интенсивны термические приливы (суточная и полусуточная амплитуды в низких широтах на высоте 90-95 км достигают 8-10К и уменьшаются до 1 К к высоким широтам (Zasova et al. 2007) . Кроме того обнаружено влияние гравитационных волн на высотах свечения O_2 в характере вертикального

профиля свечения. Все перечисленные факторы могут быть ответственными за сложное распределение свечения O₂ на ночной стороне Венеры.

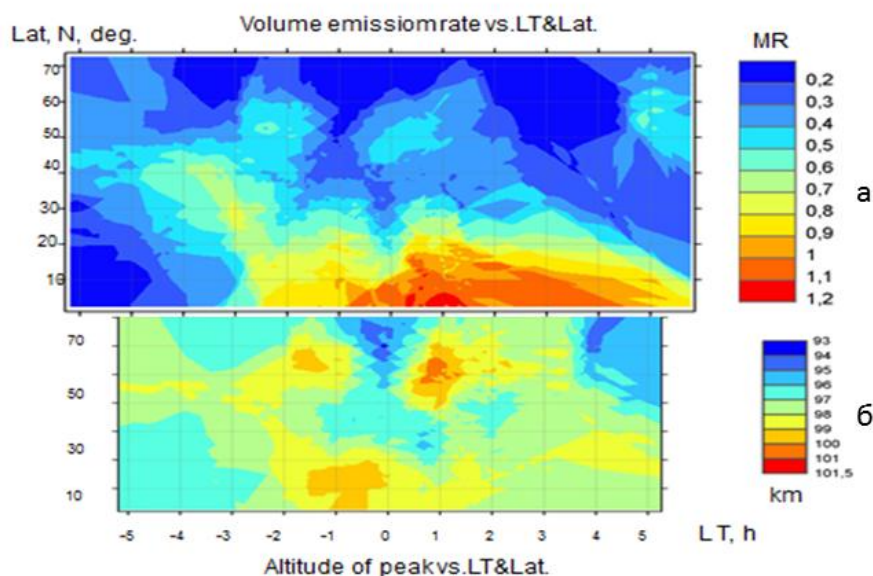


Рис. (а) Интенсивность свечения O₂ в северном полушарии Венеры в зависимости от местного времени. Максимум свечения в экваториальной области северного полушария смещен в сторону утреннего полушария, что может говорить о заметной роли зональной суперротации. (б) Высота максимума эмиссии в зависимости от местного времени.

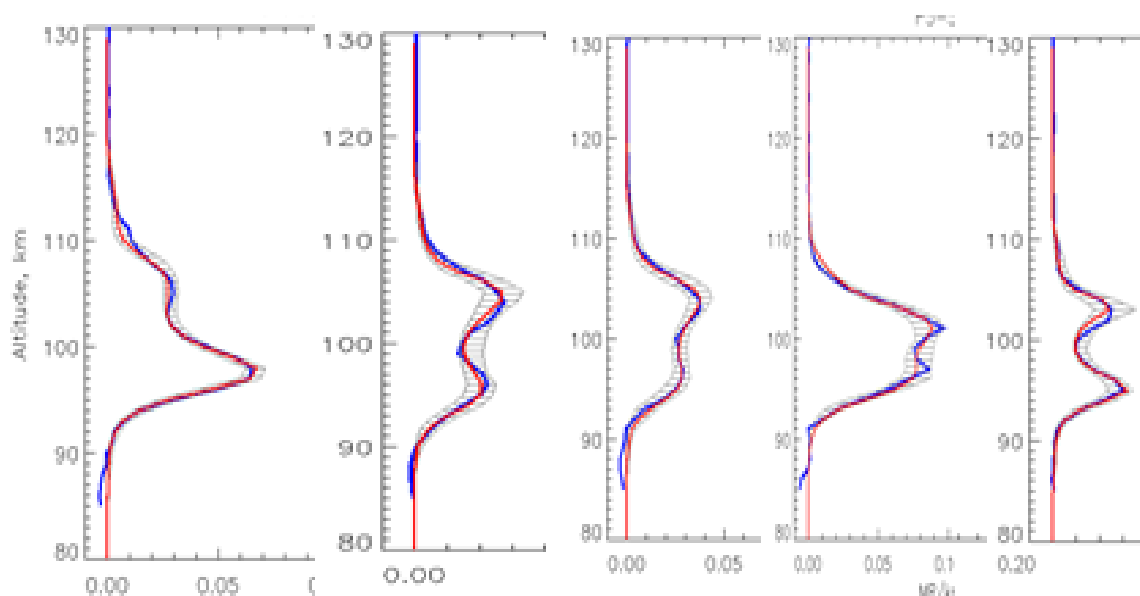
Руководитель: д. ф.-м. н. Засова Л.В., Zasova@iki.rssi.ru

L. V.Zasova, The O₂ nightglow from VIRTIS-M VEX measurements, International Venus Workshop, June 10-14, 2013, Catania, Italia.

2.4 Моделирование вертикальных профилей ночного свечения O₂(a1Δg) VIRTIS/VEX , возмущенных гравитационными волнами

Представлены результаты моделирования вертикальных профилей ночного свечения O₂ 1.27 мкм., полученных по измерению эксперимента ВИРТИС-М на Венере Экспресс. Показано, что как и в атмосфере Земли, за форму вертикального профиля ответственны гравитационные волны. Вертикальная длина волны и амплитуда составляют соответственно 7-16 km и 3-14 % соответственно. Гравитационные волны обнаружены от экваториальных широт до полярного района.

: Гравитационные волны играют значительную роль в атмосферной циркуляции, они переносят энергию, момент и влияют на крупномасштабные движения, вызывают изменение поля температуры и плотности и влияют на интенсивность свечения. В вертикальных профилях ночного свечения молекулярного кислорода, полученных экспериментом ВИРТИС на Венере Экспресс, часто наблюдаются двойные пики. Характер профилей аналогичен профилям ночного свечения O₂, наблюдаемым в земной атмосфере вблизи уровня мезопаузы. Для моделирования влияния гравитационных волн на характер вертикального профиля ночного свечения кислорода в атмосфере Венеры была применена теория, разработанная авторами Swenson and Gardner, 1998, использовалась для моделирования гравитационных волн в атмосфере Земли и Melo et al., 2008 и Altieri et al., 2012 в атмосфере Марса. Характеристики гравитационных волн, используя их влияние на вертикальные профили свечения O₂ изучались в зависимости от местного времени и широты в атмосфере Венеры.



Объемная плотность излучения, MR/km

Примеры моделирования гравитационных волн с помощью метода Swenson and Gardner, 1998. Объемная интенсивность излучения (MR/km) в зависимости от высоты. Черная линия – наблюдаемый профиль, красная – результат моделирования с помощью метода авторами Swenson and Gardner, 1998. Отклонение измеренного и модельного профиля в пределах нескольких процентов. Такая хорошая воспроизводимость наблюдений с помощью говорит о том, что действительно в большинстве наблюдаемых случаев двойной пик представляет собой гравитационную волну.

Руководитель: д. ф.-м. н. Засова Л.В., Zasova@iki.rssi.ru, Шакун А.В.

F. Altieri (1), A. Migliorini (1), L. Zasova (2,3), A. Shakun (2,3), G. Piccioni (1) and G. Bellucci (1) "Modeling VIRTIS/VEX O₂(a1Δg) nightglow profiles affected by the propagation of gravity waves in the Venus upper mesosphere". Journal Geophys. Res. 2013. Submitted. 2013JE004585

2.5 Термическое зондирование атмосфер Венеры и Марса

Дистанционное зондирование в тепловой области спектра является эффективным методом исследования термического строения атмосферы Марса от поверхности до 50-60 км высоты и мезосферы Венеры (55-100 км). Для термического зондирования используется фундаментальная полоса 15 мкм CO₂. Уровень формирования излучения в полосе определяется поглотителями, а форма полосы - температурным профилем. Углекислый газ является основным компонентом атмосфер Марса и Венеры, его содержание известно, что существенно упрощает задачу. В атмосферах Марса и Венеры присутствует аэрозоль, который вносит существенный вклад в поглощение в крыльях полосы. Температурный и аэрозольный профили восстанавливаются самосогласованным образом из одного и того же спектра и, в свою очередь, используются для определения содержания малых составляющих из того же самого спектра. На Венере-15 (1984г) был установлен Фурье-спектрометр на область 6-45 мкм, который позволил впервые получить амплитуды четырех гармоник термического прилива в зависимости от высоты и широты, вертикальный профиль верхнего облачного слоя и положение верхней границы в зависимости от широты, содержание и вертикальное распределение SO₂ и H₂O и др.

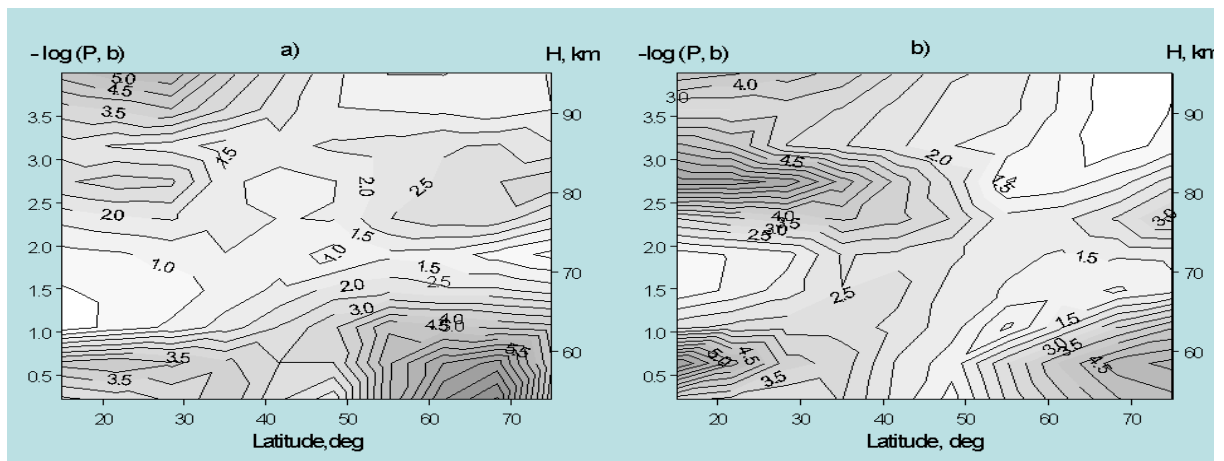


Рис. Амплитуды термического прилива, суточная T1(слева) и полусуточная T2(справа) волна.

На высотах ниже 70 км обе амплитуды имеют существенные значения, до 10-12К при $\phi < 40^\circ$ и $\phi > 50^\circ$ с минимумом между $40-50^\circ$. T1 имеет также максимум при $\phi < 40^\circ$ на высоте > 90 км. Амплитуда T2 достигает максимума до 10 К на высоте около 80 км при $\phi < 40^\circ$. При $\phi > 50^\circ$ и $H > 80$ км обе амплитуды T1 и T2 падают с высотой до 1К.

На борту Марс Экспресс работает Планетный Фурье Спектрометр (с 2003 года). Длинноволновый канал (6-30 мкм) содержит полосу 15 мкм, которая используется для термического зондирования. Самосогласованное восстановление температурного профиля и аэрозольной оптической толщи из каждого спектра позволяет получать информацию вдоль каждой орбиты измерений, получая сезонные, суточные вариации, широтные а также для экстремальных условий (полярная область ао время полярной ночи, вулканы, долина Маринеров и др.). В состав аппаратуры EхоMars 2016 (орбитер) включен фурье спектрометр, одной из научных задач которого является термическое зондирование атмосферы Марса. Другой вид зондирования в тепловой области – это изучение с поверхности пограничного слоя и атмосферы до высоты несколько километров. При этом вблизи поверхности достигается вертикальное разрешение до двух –трех десятков метров. На роверах Spirit и Opportunity были установлены Фурье спектрометры MiniTES со спектральным разрешением 10-20 см⁻¹. В состав аппаратуры EхоMars 2018 (на платформе) включен фурье спектрометр со спектральным разрешением 0.05 см⁻¹. Для термического зондирования приповерхностного слоя и нижней атмосферы предполагается использовать разрешение 2 см⁻¹. Работа частично поддержана грантом РФФИ 12-02-01280 и грантом 11.G34.31.0074 Министерство образования и науки

Руководитель: д. ф.-м. н. Засова Л.В., Zasova@iki.rssi.ru

Засова Л.В., Игнатъев Н.И., Мошкин Б.Е. Термическое зондирование атмосфер Марса и Венеры с космических аппаратов. "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА". ИКИРАН, 11-15 ноября 2013 г

L. V. Zasova, Thermal structure of the Venus mesosphere from remote sensing in the infrared spectral range (VIRA II improvement), International Venus Workshop, June 10-14, 2013, Catania, Italia.

Zasova et al. Remote sensing of planetary atmospheres in the thermal IR: Mars and Venus (Invited Paper). SPIE, 26-27.08.2013. San Diego, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXI. • Proceedings of SPIE Vol. 8867 (8867-8).

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

Наблюдения 60-70 гг. (наземные и с КА Pioneer Venus) показали существование в атмосфере Венеры надоблачной дымки, состоящей из субмикронных частиц и характеризующейся высокой изменчивостью. Данные Venus Express, полученные в основном в затменных наблюдениях в эксперименте SPICAV-SOIR, в общем,

подтвердили значительную изменчивость и указали на бимодальность распределения частиц надоблачной дымки по размерам. Однако затменные наблюдения дают лишь отдельные вертикальные профили экстинкции на терминаторе и не позволяют получить двумерную картину. Наблюдения при помощи картирующего спектрометра VIRTIS, в принципе, позволяют получить такую картину. Излучение, наблюдаемое на ночной стороне Венеры в окнах прозрачности между сильными полосами поглощения углекислого газа, рассеивается облаками Венеры и, таким образом, обнаруживается на лимбе планеты при углах рассеяния $\sim 90^\circ$ (Рис. 1). Резкое падение интенсивности рассеянного излучения имеет место, как правило, на высотах в интервале 80–86 км. Таким образом, оказывается возможным восстановление плотности аэрозольных частиц верхней части облачного слоя и надоблачной дымки по лимбовым наблюдениям. Впервые решение такой задачи рассмотрено в работе de Kok et al. (2011, Scattering particles in nightside limb observations of Venus' upper atmosphere by Venus Express VIRTIS. *Icarus*, 211, 51-57) по наблюдениям в интервале 4,3-5 мкм излучения от верхней границы облаков, рассеянной надоблачной дымкой, однако объем обработанных данных был невелик (лишь 8 вертикальных профилей с 4х орбит в двух широтных интервалах). Нами разработан метод восстановления плотности аэрозольных частиц в интервале высот 80-90 км по измерениям в окнах прозрачности 1,18, 1,74 и 2,3 мкм. Несмотря на большую сложность моделирования излучения на этих длинах волн по сравнению с интервалом 4–5 мкм, отмеченную в работе de Kok et al. (2011), численный эксперимент показывает, что плотность аэрозольных частиц в интервале высот 80–90 км (т.е. в области верхней границы облаков на лимбовых изображениях), может быть восстановлена при некотором априорном предположении о распределении частиц по размерам. Однако на нижележащих уровнях (т.е. ниже 80 км) получаемые плотности могут быть весьма далеки от реальных, т.к. фактически служат для компенсации ошибки модели нижней атмосферы и нижнего яруса облаков. Для группы наблюдений, относящихся к концу 2007 г., получены профили плотности аэрозольных частиц при априорном предположении о распределении по размерам, соответствующем субмикронным частицам (“мода 1”) и микронным частицам (“мода 2”). Пример такого восстановления приведен на Рис. 2. Восстановленные коэффициенты полного ослабления в интервале высот 80-90 км слабо чувствительны к априорному предположению о размерах частиц. Коэффициент полного ослабления на длине волны 1,75 мкм на высоте 85 км в низких широтах составляет $1-3 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$, а эквивалентная плотность аэрозольных частиц моды 2 — $0,1-0,3 \text{ см}^{-3}$, что согласуется с результатами de Kok et al. (2011), но несколько превышает данные для низких широт эксперимента SPICAV-SOIR (Wilquet et al., 2009, 2012).

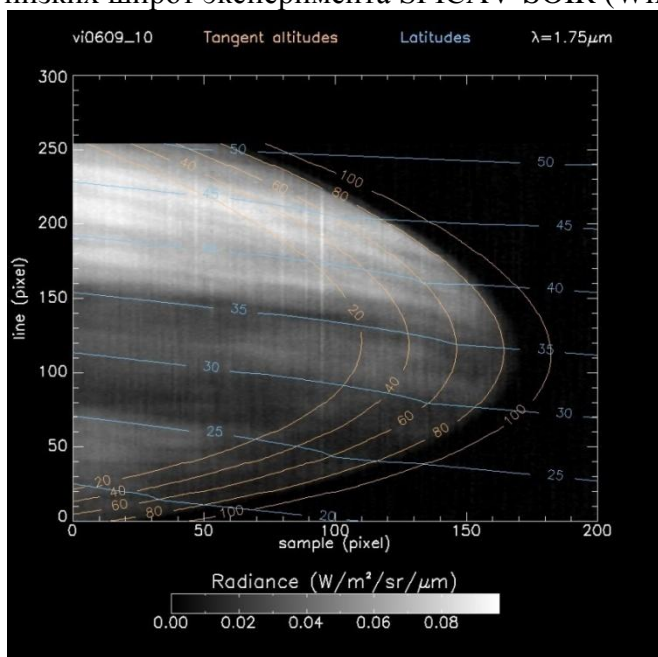


Рисунок 1. Пример изображения ночной стороны Венеры на длине волны $\lambda=1.75$ мкм. Видимый лимб соответствует высоте над поверхностью около 80 км.

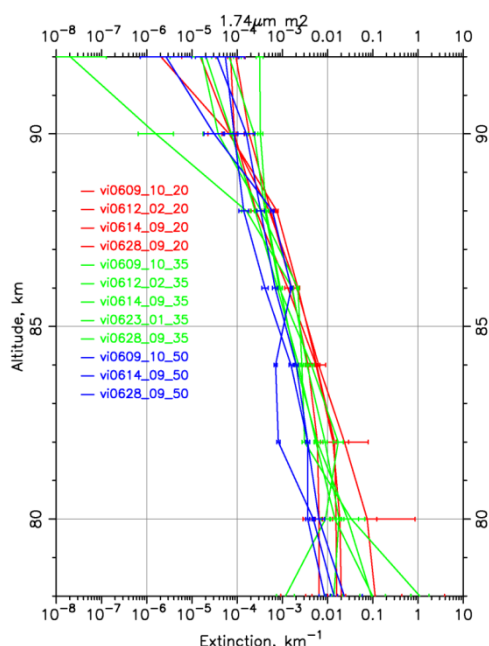


Рисунок 2. Восстановленные профили коэффициента полного ослабления надоблачной дымки на широтах 20, 35 и 50° для нескольких орбит.

Руководитель: к. ф.-м. н. Игнатьев Н.И., niignatiev@googlemail.com, д. ф.-м. н. Засова Л.В., Zasova@iki.rssi.ru

L. Zasova, N. Ignatiev, D. Gorinov, M. Scherbina, G. Piccioni, and P. Drossart. Haze above the clouds on the night side of Venus from VIRTIS-M VEX observations. EGU General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-12469, 2013.

N. I. Ignatiev, Cloud top variations from Venus Express measurements (Invited), International Venus Workshop, June 10-14, 2013, Catania, Italia.

N. Ignatiev, Venus Clouds: Input to VIRA II model from Venus Express and Venera 15 measurements (Invited), International Venus Workshop, June 10-14, 2013, Catania, Italia.

L. Zasova, N. Ignatiev, D. Gorinov, G. Piccioni, and P. Drossart. Study of aerosol above the upper boundary of the clouds on the night side of Venus from VIRTIS-M VEX observations, European Planetary Science Congress 2013, EPSC Abstracts Vol. 8, EPSC2013-1032, 2013.

N. Ignatiev, L. Zasova, D. Gorinov, G. Piccioni, P. Drossart, Upper haze on the night side of Venus from VIRTIS-M / Venus Express observations, The Fourth Moscow Solar System Symposium, Москва, ИКИ РАН, 14-18 октября 2013 г., 4MS3-VN-04.

2.7 Мониторинг содержания водяного пара вблизи верхней границы облаков по данным эксперимента VIRTIS на КА Venus Express в 2006-2011 гг

Уточнение калибровки эксперимента VIRTIS на КА Venus Express позволило проанализировать полный объем измерений, выполненных при помощи канала высокого разрешения (-H) спектрометра VIRTIS в 2006-2011 гг. Полный анализ (Cottini, Ignatiev et al., 2013) подтвердил выводы, сделанные ранее на основе выборки 2007-2008 гг. (Cottini, Ignatiev et al., 2012, Icarus 217, 561), и показал долговременную стабильность средних значений высоты верхней границы облаков и содержания водяного пара. Средняя высота верхней границы облаков, соответствующая единичной оптической глубине на длине волны 2,5 мкм, в низких широтах в среднем равна 69 ± 1 км, и понижается к полюсу до 62–64 км. Среднее содержание водяного пара равно 3 ± 1 ppm в низких широтах, повышается в

средних широтах и достигает максимума 5–6 ppm на широте 70–80° в обоих полушариях и несколько понижается в полярных областях. Это распределение водяного пара объясняется, по всей вероятности, особенностями динамики атмосферы Венеры – переносом водяного пара в ячейке Хэдли и полярном вихре. Средняя высота верхней границы облаков и содержание H₂O вблизи этого уровня симметричны относительно экватора и не проявляют зависимости от местного времени. В течение всего срока наблюдений они так же оставались стабильны, не проявляя заметных долговременных трендов (в отличие от, например, содержания SO₂ и видимой скорости перемещения облаков).

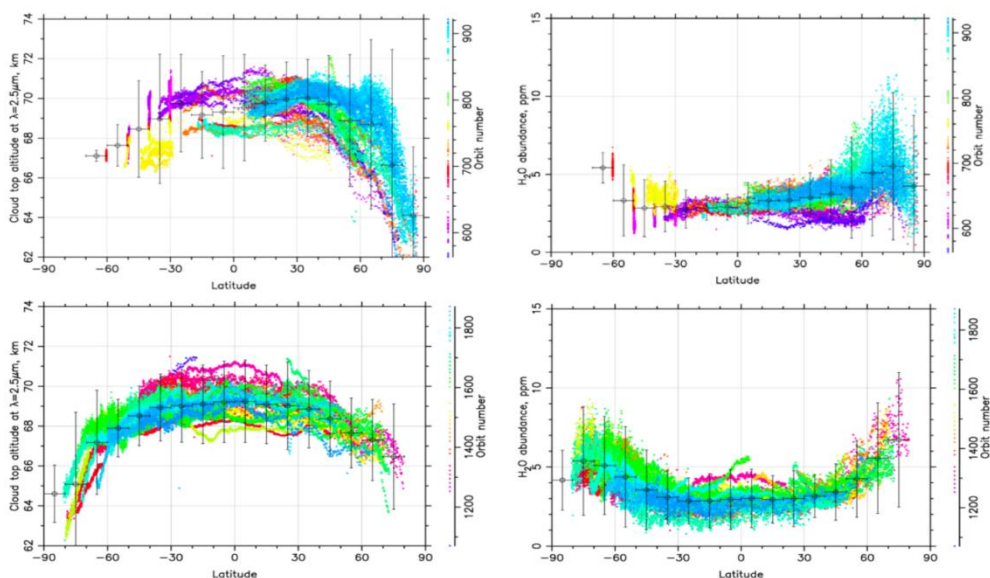


Рис. 1. Высота верхней границы облаков (слева) и содержание водяного пара (справа) вблизи этого уровня для периодов наблюдений 2006-2008 и 2009-2011 гг.

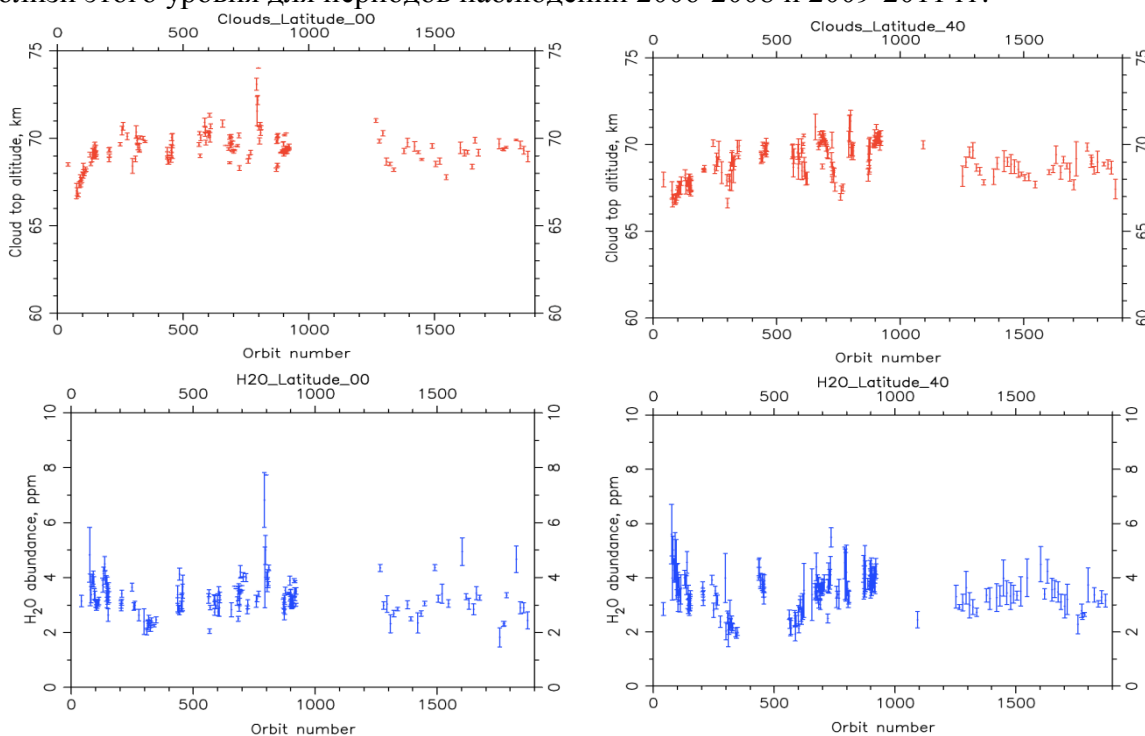


Рис. 2. Средняя высота верхней границы облаков (вверху) и содержание водяного пара (внизу) вблизи этого уровня в низких (слева) и средних (справа) широтах за период 2006-2011 гг.

Руководитель: к. ф.-м. н. Игнатъев Н.И., niignatiev@googlemail.com

V. Cottini, N. Ignatiev, G. Piccioni, P. Drossart, W. Markiewicz. *Water vapour near the cloud tops of Venus from VIRTIS / Venus Express data, International Venus Workshop, June 10-14, 2013, Catania, Italia.*

2.8 Динамика атмосферы Венеры по измерениям скорости движения облаков, наблюдаемых в УФ

Более 7 лет непрерывных наблюдений облачного покрова Венеры с борта аппарата Venus Express предоставили возможность изучения динамики атмосферы Венеры. Камера VMC (Venus Monitoring Camera), установленная на борту орбитального аппарата, позволила получить самый протяженный по времени ряд УФ-изображений Венеры. Эти изображения дают возможность исследовать циркуляцию на уровне верхней кромки облаков путем оценки смещения облачных деталей. Высокоэллиптическая полярная орбита аппарата Venus Express обеспечила оптимальные условия для наблюдений южного полушария с различным пространственным разрешением. Проанализирована совокупность данных VMC, состоящая из 2750 орбит, охватывающая около 10 венерианских лет. 137 орбит было проанализировано вручную и 670 орбит – с помощью автоматизированного корреляционного метода. Общее число доступных для анализа векторов смещения составляет ~ 50000 для ручного метода и ~ 450000 – для автоматизированного. Это позволило определить среднюю циркуляцию, ее долгосрочный и суточный тренды, вариации от орбиты к орбите и периодичность. Кроме того, получены первые предварительные результаты измерений смещения деталей облачного покрова по ИК изображениям. На низких широтах среднее значение зональной компоненты скорости ветра на верхней границе облаков (67 ± 2 км) составляет 90 м/с с максимумом ~ 100 м/с на $40\text{-}50^\circ$ ю. ш. От 50° ю.ш. к полюсу зональная компонента скорости ветра уменьшается с ростом широты. Период вращения атмосферы на верхней границе облаков имеет максимальное значение около 5 дней на экваторе, уменьшается до ~ 3 дней на средних широтах и остается почти постоянным от 50° ю. ш. к полюсу. Среднее значение меридиональной компоненты скорости ветра в направлении полюса медленно растет от нулевого значения на экваторе до примерно 10 м/с на 50° ю. ш., а затем уменьшается до нуля на полюсе. Ошибка отдельного измерения смещения составляет 7.5-30 м/с. Из изображений в ближнем ИК-диапазоне на низких широтах были получены скорости ветра 70-80 м/с (Рис. 1).

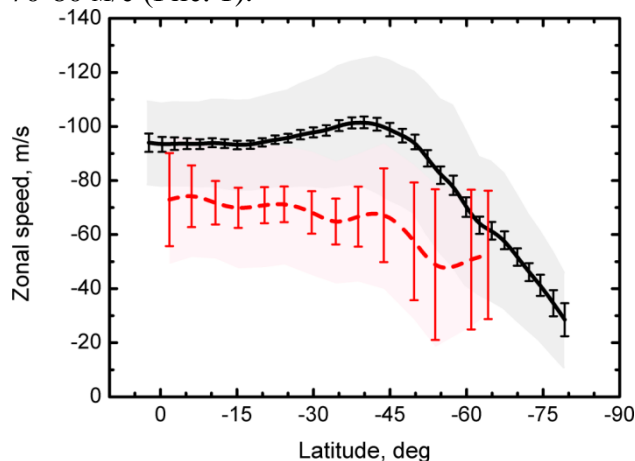


Рис. 1 Средние профили зонального ветра, полученные по УФ-изображениям (сплошная линия) и изображениям в ближнем ИК-диапазоне (пунктир). Ошибки соответствуют доверительному интервалу 99.9999% ($5\sigma_x$). Стандартные отклонения σ показаны серой (УФ) и розовой (ближний ИК-диапазон) затененными областями.

Наблюдения VMC демонстрируют долгосрочный тренд зональной компоненты скорости ветра на низких широтах с увеличением от 85 м/с в начале периода наблюдений до 110 м/с к середине 2012 г. Кроме того, УФ-наблюдения демонстрируют краткосрочные вариации

от среднего потока. Разность скоростей между двумя последовательными орбитами в области среднеширотного джета может достигать 30 м/с, что, скорее всего, говорит о неустойчивости среднего потока между областями с выраженным джетом и квазитвердотельным вращением на средних широтах. С помощью Фурье-анализа была выявлена периодичность в зональной циркуляции на средних широтах. В экваториальной области, вплоть до 35° ю.ш., зональная компонента скорости ветра изменяется с периодом в 4.1-5 дней (в среднем, 4.83 дней), что близко к периоду суперротации на экваторе. Амплитуда волны составляет $\pm 4-17$ м/с и уменьшается к высоким широтам (Рис. 2), что является отличительным признаком волны Кельвина.

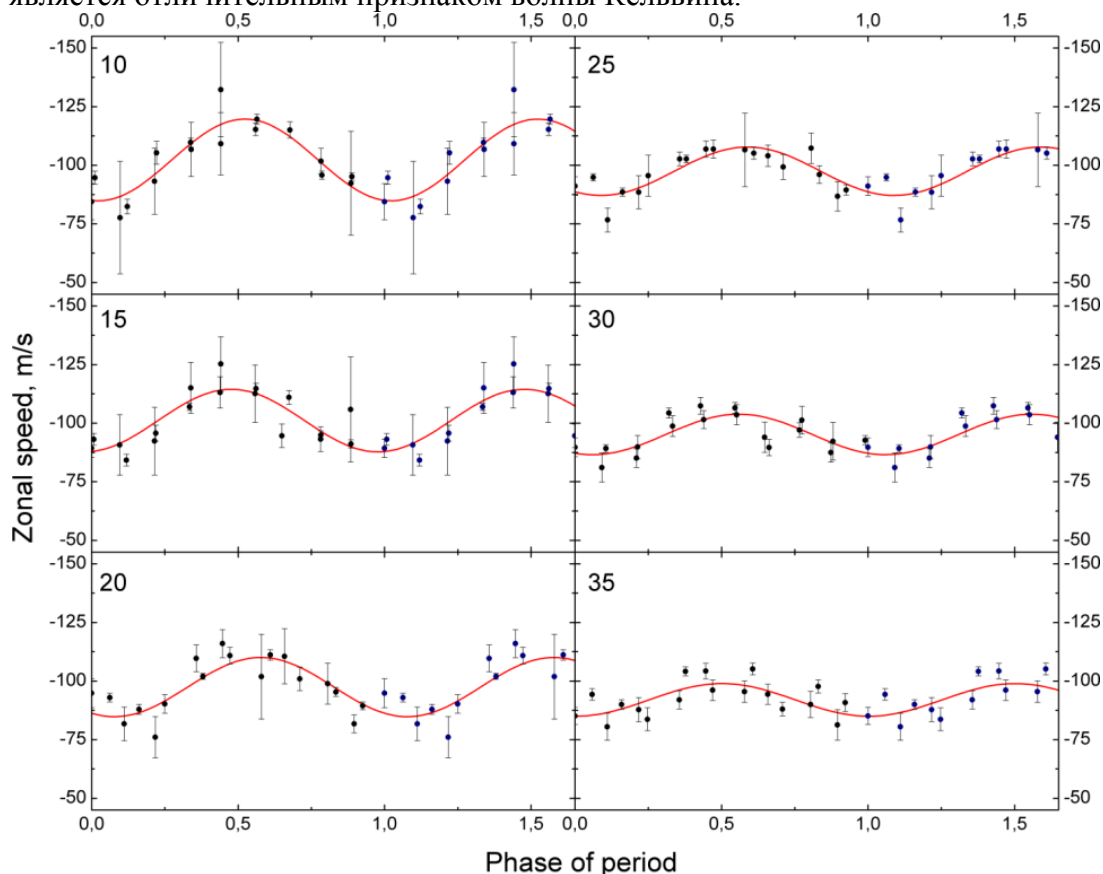


Рис. 2 Фазовые диаграммы для средней зональной скорости в 6 широтных зонах (центр полосы указан в верхнем левом углу графиков) для орбит 1329-1347. Кружками обозначены значения скорости. Сплошная линия соответствует аппроксимации экспериментальных данных полиномом (8). Синими кружками обозначена копия исходных данных, продолженная в фазовый интервал 1-1.6. Ошибки показывают стандартные отклонения взвешенного среднего на уровне 95% ($1.96\sigma_{\bar{x}}$).

Наблюдения VMC показали четкий суточный цикл средней циркуляции. Зональная компонента скорости ветра имеет минимум около полудня (11-14 ч), а максимум достигается утром (8-9 ч) и вечером (16-17 ч). Меридиональная компонента имеет пик сразу после полудня (13-15 ч) на $\sim 50^\circ$ ю.ш. (Рис. 3). Минимальное значение меридиональная компонента скорости ветра имеет на низких широтах в утренние часы (8-11 ч). Горизонтальная дивергенция среднего потока, связанная с суточным циклом, свидетельствует о восходящих движениях утром на низких широтах и нисходящем потоке после полудня в холодной кольцевой области.

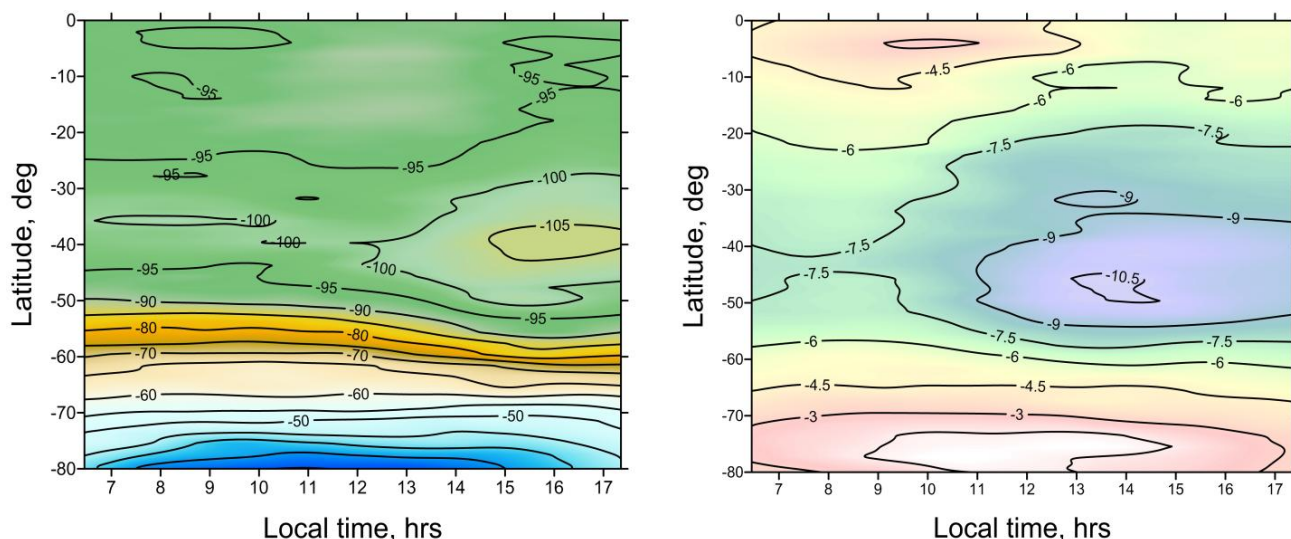


Рис. 3 Суточные вариации средней зональной (слева) и средней меридиональной (справа) компоненты скорости ветра

Руководитель: к. ф.-м. н. Хатунцев И.В., nip@irn.iki.rssi.ru

Khatuntsev, I.V., Patsaeva, M.V., Titov, D.V., Ignatiev, N.I., Turin, A.V., Limaye, S.S., Markiewicz, W.J., Almeida, M., Roatsch, Th., Moissl, R., Cloud level winds from the Venus Express Monitoring Camera imaging; Icarus, 226, pp.140-158, 2013.

Patsaeva M.V., Khatuntsev I.V., Ignatiev N.I. Investigation of air mass transfer in Venus mesosphere by digital method using UV images from VMC aboard Venus Express, EGU General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-5484, 2013.;

Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Ignatiev N.I. Titov D.V., Markiewicz W.; Variations of zonal wind speed at Venus cloud tops from Venus Monitoring Camera UV images, EGU General Assembly 2013, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-11880, 2013.

Хатунцев И.В., Пацаева М.В., Игнатъев Н.И., Тюрин А.В.; Динамика атмосферы на уровне верхнего яруса облаков Венеры по данным многолетних наблюдений камерой VMC с борта Venus Express; Одиннадцатая Всероссийская Открытая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, Москва, ИКИ РАН, 11 - 15 ноября 2013.

2.9 Термическая структура верхней мезосферы Венеры по данным прибора VIRTIS-M

Исследовались поля яркостных температур, рассчитанных в различных участках спектра в полосе 4.3 мкм CO₂, соответствующих разным уровням высоты в атмосфере, в зависимости от местного времени и широты по данным эксперимента ВИРТИС на Венере Экспресс. В центре полосы 4.3 мкм CO₂ излучение формируется в верхней мезосфере, вблизи мезопаузы, на уровнях, близких к максимуму ночного свечения молекулярного кислорода. Распределение свечения на ночной стороне определяется характером циркуляции и наблюдаемое распределение крайне неоднородно. Тренд к уменьшению интенсивности свечения к полюсам и к терминаторам свидетельствует о существенной роли SS-AS циркуляции, однако в рамках только этой моды нельзя объяснить наблюдения. Ранее изучалось корреляция интенсивности излучения с горизонтальной скоростью ветра: найденное уменьшение интенсивности свечения к терминаторам коррелирует с ростом горизонтальной скорости ветра к терминаторам. Целью настоящей работы является изучение распределения температуры атмосферы вблизи уровня формирования свечения молекулярного кислорода

Для этой цели изучалось распределение яркостной температуры в центре полосы CO₂ 4.3 мкм. Излучение в центре полосы приходит с высоты ~95 км.

Спектры части орбит содержат как полосу кислорода 1,27 мкм, так и тепловую 4,3 мкм. Это возможно лишь при малых временах экспозиции (< 3 секунд). Как следствие малой

экспозиции, ухудшается отношение сигнал/шум на изображении планеты в данном спектральном канале. Имеется возможность различать основные характерные детали (например, горячие области), но решение такой задачи, как достоверное вычисление коэффициента корреляции с интенсивностью O_2 , становится практически невозможной. Поэтому для определения корреляции температуры и интенсивности свечения кислорода было сделано усреднение по всем орбитам измерений.

Для выполнения данной задачи были взяты все орбиты в базе данных прибора VIRTIS. По определенным причинам были отброшены следующие изображения:

- не покрывавшие ночную сторону Венеры;
- изображения с длительным временем экспозиции ($> 3,3$ сек.), в которых не прописывалась полоса 4.3 мкм (либо прописывалась частично, но невозможно было определить центр полосы);
- изображения, содержавшие явные ошибки (зашкаливающие значения по интенсивности, нулевые значения, и т.п.).

Таким образом, в результате этой обработки, к усреднению было принято 1270 изображений. С помощью созданной программы в среде программирования IDL каждое изображение проецировалось на сетку (локальное время, широта) с шагом $0,1$ часа ($1,5$ градуса долготы) по локальному времени и 1 градус по широте, затем складывалось с остальными и усреднялось. Как видно из карты покрытия, подавляющая часть данных приходится на южное полушарие, что связано с режимом работы орбитального аппарата. После процедуры, описанной выше, были построены глобальные карты яркостных температур в диапазоне $-90^\circ - -20^\circ$ широты и $18 - 6$ часов местного времени ($-6 - +6$) для нескольких высот в атмосфере. На рис. 1 дана соответствующая карта для высоты 95 км.

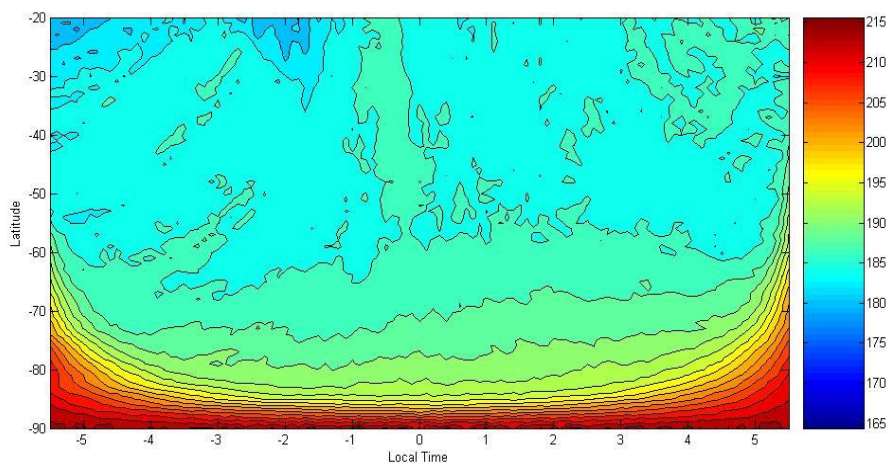


Рисунок 1. Карта яркостных температур на высоте 95 км, построенная с помощью усреднения по 1270 изображениям.

Не считая градиентного повышения температуры к полюсу, данная карта весьма однородна, за исключением слабого максимума вблизи полуночи и на утренней стороне на низких широтах и минимума на вечерней стороне на низких широтах.

После обнаружения изменения со временем скорости движения облаков, наблюдаемых в УФ (Khatuntsev et al., 2013), была поставлена задача изучения временных вариаций глобальных распределений ночного свечения молекулярного кислорода и температуры атмосферы. Для изучения временных вариаций температуры были сделаны попытки получить карты распределения с усреднением по меньшему количеству орбит..

Температурные карты, полученные с усреднением по примерно вдвое меньшему количеству изображений (около 600), приведены на рис. 2. На верхнем рисунке (первая половина наблюдений) наблюдаются минимумы температуры вблизи терминаторов на широтах $< 50^\circ$, так что более обширный минимум температуры наблюдается на утренней

стороне, тогда как во втором случае минимум на утренней стороне отсутствует, а протяженный минимум наблюдается на вечерней стороне, так что на низких широтах температура вблизи утреннего терминатора превышает более, чем на 10К, соответствующую температуру на вечернем.

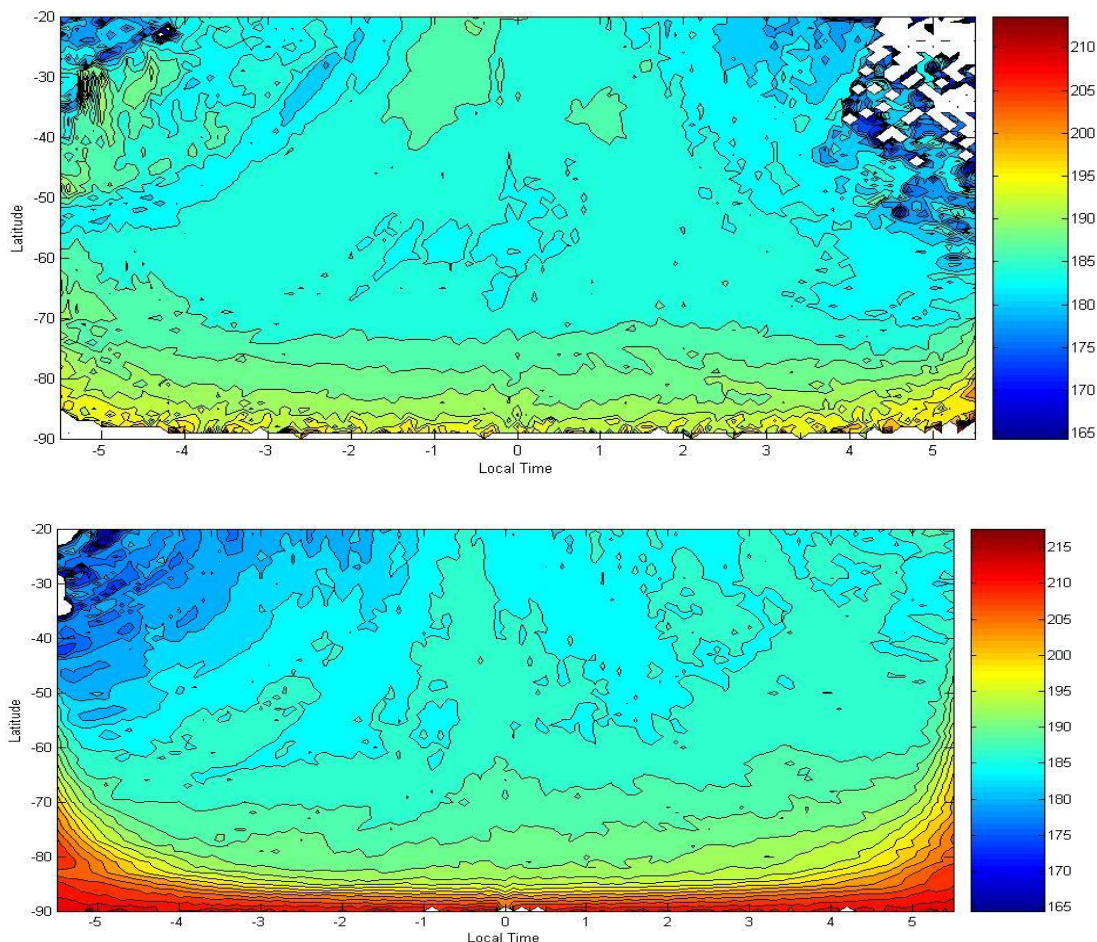


Рисунок 2. Изменение карты яркостных температур с течением времени. Первая половина измерений (вверху) и вторая половина (внизу).

Как и на глобальной карте кислорода, видна характерная картина двух максимумов, симметрично расположенных относительно полуночи. На обоих терминаторах температура имеет минимумы, причем утренний терминатор оказался холоднее вечернего, также подтверждая корреляцию.

Карта, построенная по второй половине наблюдений, показывает один максимум в районе 0 часов локального времени, а также более холодный вечерний терминатор.

Карта распределения температуры по второй половине наблюдений соответствует картине, полученной по данным ФС на Венере-15 (Zasova et al., 2007), когда температура на вечернем терминаторе была получена до 10 К ниже, чем на утреннем на высоте 95 км. В случае измерений Венеры -15 эти температурные вариации были интерпретированы в рамках термического прилива. Таким образом, наблюдаемые особенности поля температуры на низких широтах на высоте 95 км по данным VIRTIS-M, связаны с термическим приливом, а временные вариации – с изменением фазы термического прилива

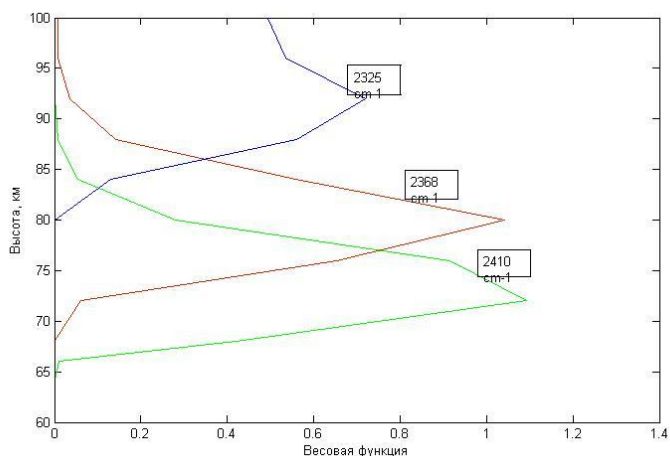


Рисунок 3. Весовые функции для волновых чисел 2325 см^{-1} ($4,3 \text{ мкм}$), а также для 2368 см^{-1} ($4,22 \text{ мкм}$) и 2410 см^{-1} ($4,15 \text{ мкм}$), находящихся в крыльях полосы $4,3 \text{ мкм}$ и имеющих максимумы на высотах 80 и 72 км соответственно.

Временные вариации температуры обнаружены на высоте $90-95 \text{ км}$. Решая аналогичную задачу не для центра полосы $4,3 \text{ мкм}$, а для крыльев, можно получить температуру более низких слоев атмосферы, учитывая соответствующую весовую функцию (рис 3). В результате оказалось, что максимумы температуры претерпевают изменения с течением времени примерно до высоты 80 км (рис 4), где они заметны, но уже достаточно слабо выражены. На рис. 5 представлена температура на высоте 72 км , где основная структура не подвержена изменениям и находится в весьма стабильном состоянии.

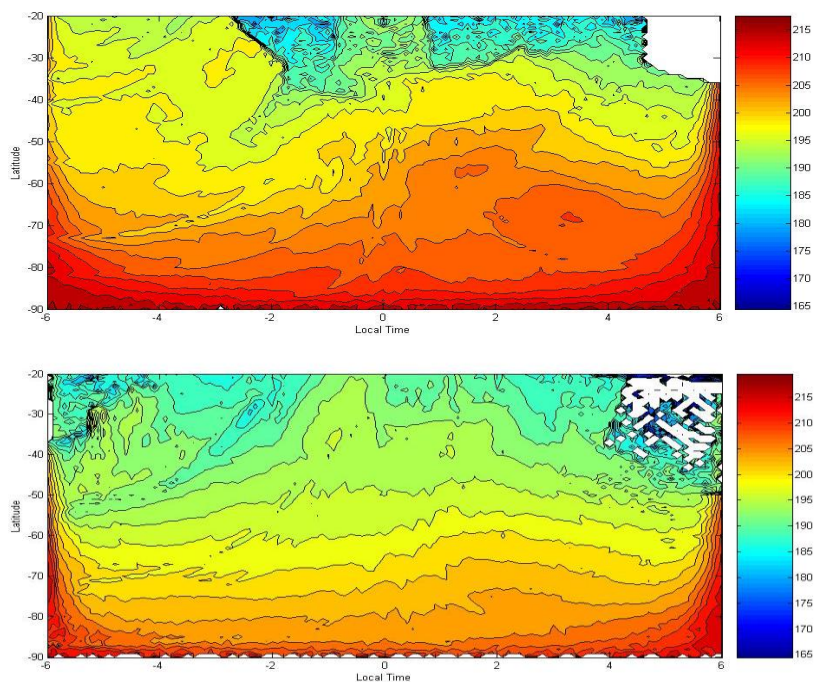


Рисунок 4. Температура на высоте 80 км в первой (вверху) и второй (внизу) половине наблюдений. Заметна небольшая вариация температурного поля. Так, например, выраженный максимум у полуночи переходит в двойной, симметричный относительно нее.

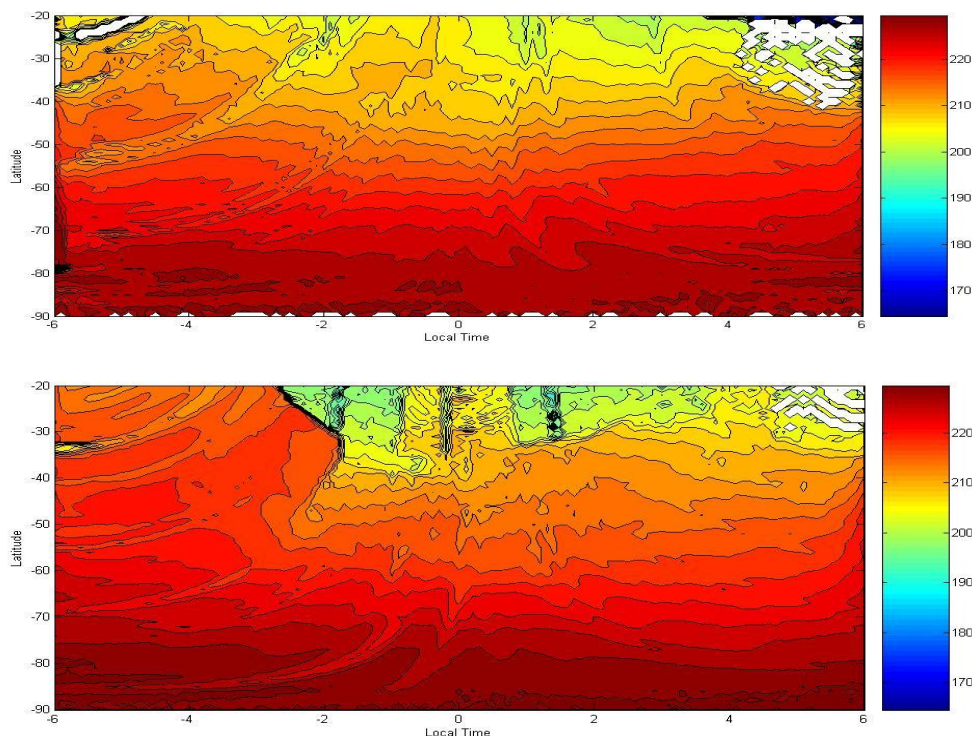


Рисунок 5. Температура на высоте 72 км в первой (вверху) и второй (внизу) половине наблюдений. В этой области период наблюдения практически не оказывает влияния на наблюдаемую картину.

Детальное изучение вариации яркостной температуры

Для более наглядного представления обнаруженных нами температурных вариаций на высоте 90-95 км были построены графики температуры для каждой точки в координатах локальное время-широта. Пример такого графика показан на рисунке 6. Заметно, что изменение температуры со временем может носить периодический характер, с периодом ~ 20 земных месяцев. К сожалению, времени работы инфракрасного канала прибора VIRTIS-M не хватило для продолжения наблюдения, которое позволило бы проверить гипотезу о периодичности этой вариации.

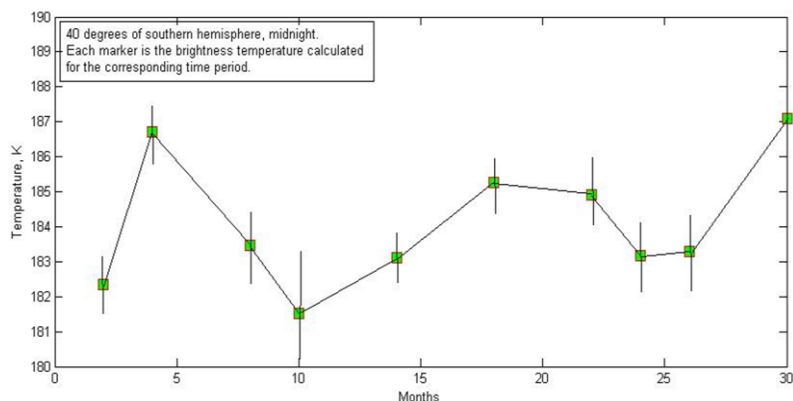


Рисунок 6. Вариация яркостной температуры с течением времени наблюдения на 40 градусов ю.ш. в полночь по местному времени. Каждая точка на графике соответствует усредненной температуре по данным за каждые два месяца наблюдений.

Ответ.исполнитель: Горинов Д.А.

Горинов Д.А., Засова Л.В. Исследование термической структуры верхних слоев атмосферы Венерыю X Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования»

Москва, ИКИ РАН, 3-5 апреля 2013

D. Gorinov, L. Zasova, N. Ignatiev Venus' atmosphere thermal structure above clouds.

VIRTIS/Venus Express Team Meeting #20 Paris, 7-8 May 2013

Горинов Д.А., Засова Л.В. Исследование термической структуры верхней мезосферы Венеры по данным прибора VIRTIS-M. Одиннадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" Москва, ИКИ РАН, 11-15 ноября 2013

Горинов Д.А., Засова Л.В. Исследование термической структуры верхней мезосферы Венеры по данным прибора VIRTIS-M. 56-я Научная конференция МФТИ. Москва, 25-30 ноября 2013

2.10 Продолжено рассмотрение возможности жизни в условиях умеренно высоких температур на Венере

Изучались гипотетические формы флоры и фауны Венеры. На основе панорам, полученных с аппаратов ВЕНЕРА (1975-82) обнаружены новые необычные объекты.

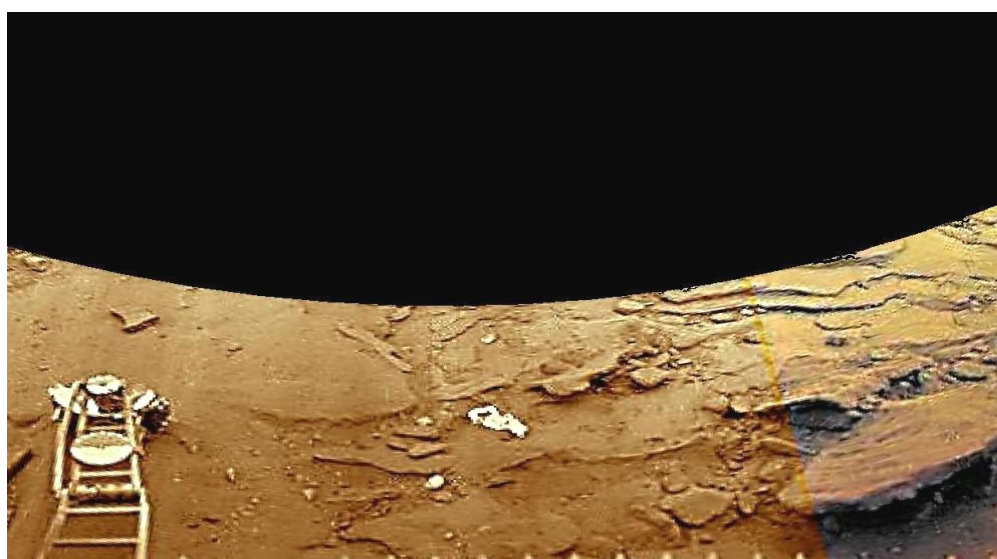
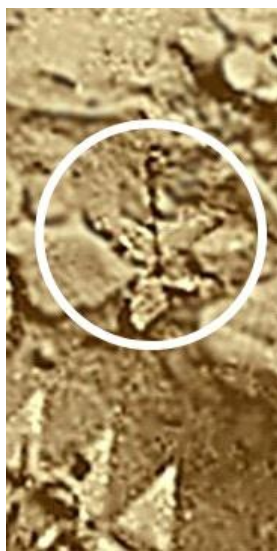


Рис.3. Вид поверхности Венеры в месте посадки аппарата ВЕНЕРА-14 (в современной обработке.)

Первая группа публикаций, касающихся гипотетических признаков жизни на планете Венера относилась к данным аппаратов ВЕНЕРА-9 и -13. Результаты миссий советской серии ВЕНЕРА остаются единственными существующими данными наблюдений поверхности Венеры, выполнявшихся в 1975 и 1982 годах. Эксперименты отличались крайней технической сложностью. За прошедшие годы они не были повторены ни российскими, ни другими космическими агентствами. Физические свойства поверхности в месте посадки аппарата ВЕНЕРА-14 (рис.1) представлены в работе (Ксанфомалити Л.В.



ДАН. 2013. Т. 453. № 4).

В начальной стадии исследований использовались, главным образом, панорамы ВЕНЕРЫ-9 и -13, где были обнаружены относительно крупные объекты. Благодаря накопленному опыту обработки изображений, панорамы ВЕНЕРЫ-14 позволили обратиться к их более тонким деталям.

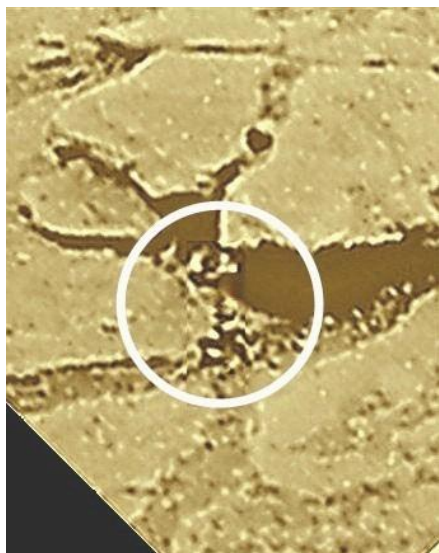
Важен вопрос об источниках энергии для гипотетических живых объектов Венеры. Интерес к предполагаемой аутоτροφной флоре планеты, как источнику существования ее фауны, отмечался уже в статьях 2012 г. Естественно предположить, что подобно земной, фауна

Венеры является гетеротрофной, а источником ее существования является гипотетическая автотрофная флора. Хотя прямые лучи Солнца, как правило, не достигают поверхности планеты, но света для фотосинтеза земного типа там достаточно. Разумеется, фотосинтез при высоких температурах и в безокислительной среде должен опираться на совершенно другие, неизвестные биофизические механизмы.

Новыми объектами, найденными в 2013 г. стали "Стебли". Они представляют собой вертикально расположенные тонкие узловатые стволы толщиной 0.3-2 см, высотой 0.2-1 м. На цветных панорамах они выглядят черными.

Рис.4. Первый найденный объект типа «Стебель» представляет собой тонкий вертикально расположенный узловатый ствол высотой около 42 см с утолщением («бутоном») на верхушке.

У первого обнаруженного объекта (рис.4) "стебель" сверху заканчивается крупным утолщением, "бутоном", который обладает светлым центром. (Ниже показаны другие объекты, где "бутон" наблюдается в развитии). У этого близко расположенного к камере стебля в точке его основания, на поверхности, заметна группа образований, напоминающая четырехлистник. Каждый из его элементов имеет размер около 5-10 см и, возможно, обладает радиальной структурой. Все другие найденные "стебли" также вертикальны, за исключением одного, наиболее крупного, склоненного к поверхности. В окрестностях ВЕНЕРЫ-14 их число на панорамах составляет не менее восьми.

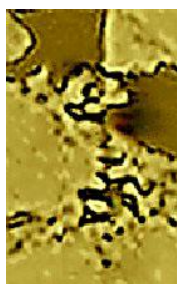


С целью повышения четкости деталей была проведена дополнительная обработка панорам ВЕНЕРЫ-13 и -14. В ряде случаев была необходима коррекция геометрических искажений панорам. Благодаря коррекции изображений стебли становятся почти вертикальными и параллельными и этим выделяются на фоне трещин в камнях. Во всех случаях основания стеблей находятся в трещинах или в углублениях между камнями. Все найденные стебли одиночные.

Рис.5. Стебель на панораме ВЕНЕРЫ-13, «четырёхлистник» у его основания и раскрывшийся «бутон» с триадой, венчающий верхушку стебля.

Невысокий узловатый стебель, найденный в месте посадки ВЕНЕРЫ-13, выделен на рис.5. Объект виден сверху, его высота, найденная по положению на фотоплане, всего

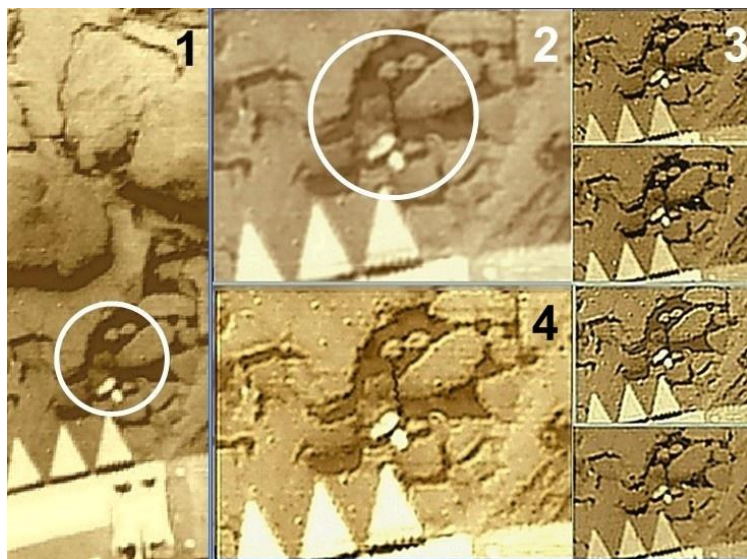
около 20-30 см. У его основания, в трещине между камнями, видна группа из 4-х образований, вроде «четырёхлистника», показанного на рис.4, по-видимому, также связанная со стеблем. Стебель на рис.5 ниже, он расположен дальше, и сам стебель различается с трудом, хотя имеется 8 четких дублей изображения, которые допускают групповую обработку. Верхушка стебля по сравнению с рис.4 имеет более сложную структуру, на всех исходных контрастных изображениях – в виде триады. Было сделано предположение, что объект в кружке 2 сложнее и что здесь виден раскрывшийся цветок.



Обработка изображений при понижении их контрастности подтвердила предположение и позволила увидеть весь «цветок» с белым пятнышком (пестиком?) в центре и окружающими его лепестками (рис.6).

Рис.6. Тот же участок изображения при пониженной контрастности. представлен тот же участок с подробным изображением самого «цветка», его центральной светлой части и лепестков. Диаметр цветка 5-8 см.

Маленький светлый четырехлистник был обнаружен в центре всех панорам ВЕНЕРЫ-14, в углублении у самого посадочного буфера (рис.7, 4). В отличие от рис.4, его «листья» белые, лишь немного темнее окрашенных белой краской частей самого аппарата. екта с рис.1 очевидно. Стебель на



исходных панорамах был выделен с помощью гамма-коррекции и в таком виде показан на колонке из 4-х последовательных исходных снимков (рис.3, 5). Высота стебля, также наблюдаемого сверху, около 30 см. На его верхушке также виден «цветок». В обработанном виде стебель показан на рис.3, 6. Размеры «цветка» также около 3-4 см. Справа от него виден другой такой же объект, стебель которого, по-видимому, находится за камнем.

Рис.7. Стебель (4) с «четырёхлистником» и цветком расположен непосредственно у посадочного буфера ВЕНЕРЫ-14, его повторные изображения показаны на 4-х последовательных панорамах (колонка 3). Вид стебля на обработанном изображении (4). Справа от «цветка» виден еще один такой же объект, стебель которого, по-видимому, расположен за камнем.

Если верхушки стеблей – это действительно бутоны и цветы, следует задуматься над их ролью. Цветы земных растений предназначены для их опыления и размножения. Опыление осуществляют как насекомые, так и ветер. Ветроопыляемые растения в цветах, в принципе, не нуждаются, как, например, в случае тополиного «пуха». Цветы привлекают насекомых. Указывает ли верхушка стеблей на рис.2 и 3, хотя бы косвенно, на характер этого процесса? Терраморфность гипотетических объектов флоры и фауны Венеры отмечалась неоднократно [9-11], например, терраморфность объекта «гриб». Цветы с их лепестками на рис.1 и 3 представляют собой новые объекты удивительной повторяемости форм живых объектов на разных планетах, при разных физических условиях. Пока неясно, где скрыты закономерности природы, определяющие повторение терраморфизма в столь заметно различающихся средах.

Руководитель: д.ф.-м.н. Ксанфомалити Л.В., ksanf@iki.rssi.ru

3 РАННЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТНЫХ ТЕЛ

3.1 Исследована модель дегазации мантии Земли (состоящей из одного резервуара) основанная на данных ^{244}Pu - ^{238}U - ^{129}I – Хе изотопной системы.

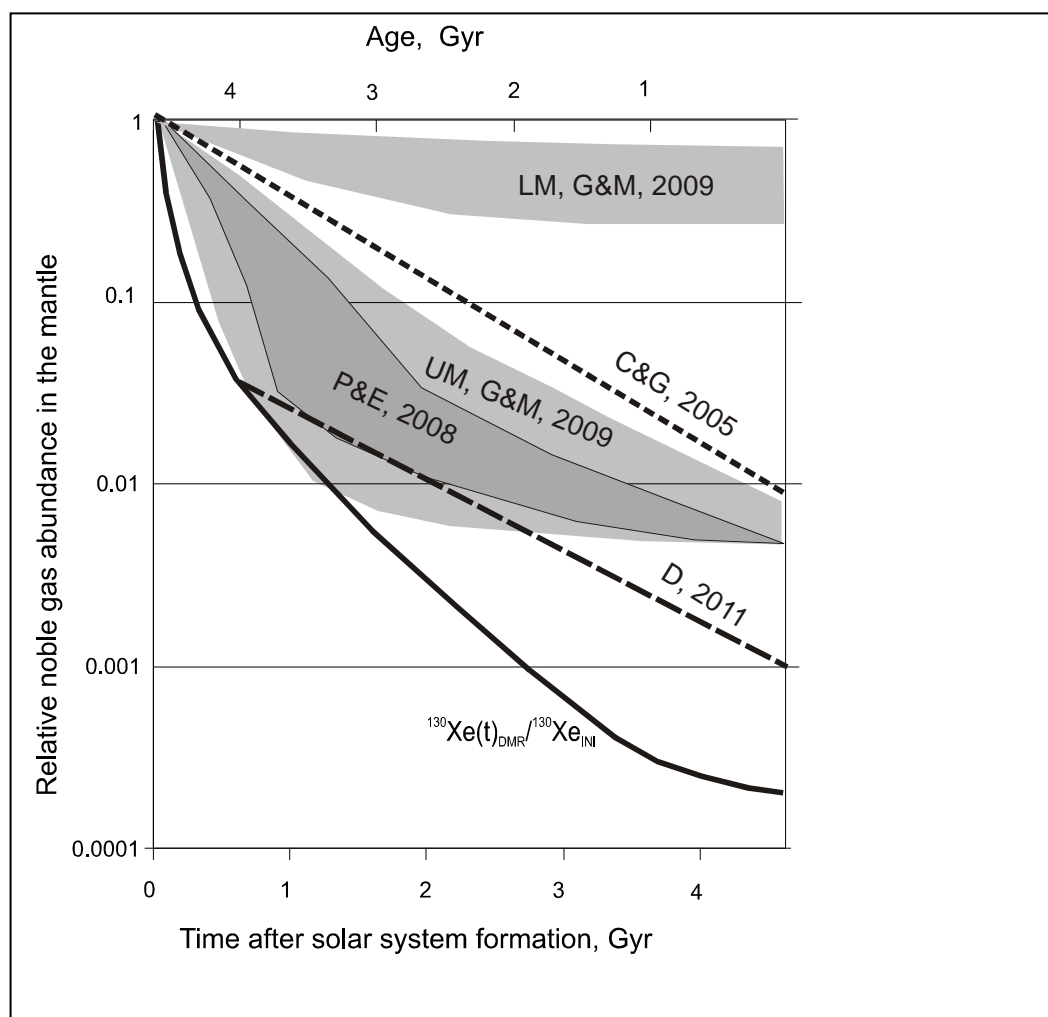
Показано, что (1) в главном резервуаре планеты, мантии, сохранилось менее 0.001 доли изначально содержавшегося количества стабильного изотопа ^{130}Xe (параметр дегазации менее 0.001); (2) темп дегазации в течение первых сотен миллионов лет эволюции Земли превышал современный темп дегазации примерно в 100 раз; (3) неотъемлемым следствием модели является длительное время диссипации Хе из атмосферы Земли, варьирующее в зависимости от значений используемых параметров от 500 до 1500 млн лет.

Надежные ограничения на масштаб и динамику процесса дегазации Земли могут быть получены только при использовании ^{244}Pu - ^{238}U - Хе изотопной системы, которая объединяет два нелетучих литофильных несовместимых родительских изотопа, отличающихся разными периодами полураспада: ^{244}Pu (80.0 млн. лет) и ^{238}U (4468 млн.

лет). Также полезно учитывать данные $^{129}\text{I} - ^{129}\text{Xe}(\text{I})$ системы (период полураспада 15 млн. лет), хотя йод является весьма летучим элементом и его концентрации в силикатных резервуарах Земли известны не столь надежно.

Начальные содержания родительских изотопов ^{244}Pu и ^{238}U надежно установлены исследованиями метеоритов и древнейших цирконов земного происхождения; менее надежные оценки имеются и для ^{129}I . Если предположить, что материал, содержащий родительские изотопы, являлся «закрытой системой», т.е. не терял и не захватывал родительские и дочерние изотопы, то современные отношения дочерних изотопов Xe в таком материале составляли бы $[^{136}\text{Xe}(\text{Pu}) / ^{136}\text{Xe}(\text{U})] = 28$ и $[^{129}\text{Xe}(\text{I}) / ^{136}\text{Xe}(\text{Pu})] = 110$, намного превышающие значения наблюдаемые в породах и газах современной мантии Земли, 3 и ≤ 60 (Perin and Porcelli, 2006). Современные количества $^{129}\text{Xe}(\text{I})$ в мантии (около $0,01 \times 10^{12}$ мол) и в атмосфере ($0,278 \times 10^{12}$ мол) намного меньше количества $^{129}\text{Xe}(\text{I})$ возникшего при распаде ^{129}I (35×10^{12} мол) в веществе Земли.

Эти соотношения, свидетельствующие о масштабе и темпе дегазации Земли, использовались для моделирования процесса дегазации (Tolstikhin et al., 2014). Исследовались различные сценарии дегазации и зависимости решений модели от используемых параметров. Впервые получены фундаментальные количественные оценки дегазации (приведены в первом параграфе). Показано, что модель мантии, состоящей из двух частично-изолированных резервуаров, лучше согласуется с имеющимися наблюдениями (Tolstikhin et al., 2006). Следует подчеркнуть, что из решений двух - резервуарной модели следует еще меньший параметр дегазации для главного мантийного резервуара (включающего более 90 % массы современной силикатной Земли).



Эволюция благородных газов в мантии (нерадиогенные изотопы).

Нижняя сплошная черная кривая соответствует решению модели одномантийного резервуара.

Для сравнения дегазационные тренды ^3He показаны для модели одномантийного резервуара из: Porcelli and Elliott (2008, P&E2008 in this plot); Class and Goldstein (2009, C&G2005); Davies (2011, D2011). Gonnermann and Mukhopadhyay (2009, G&M2009) рассматривали разные дегазационные скорости для нижнего LM и верхнего UM мантийных резервуаров. Для всех этих моделей намного более низкая степень дегазации вытекала при U-Th-He моделировании (также как и K-Ar) из-за того, что эти систематики не включали короткоживущие родительские изотопы, обеспечивающие раннюю интенсивную дегазацию.

Руководитель: Толстихин И.

I. Tolstikhin, B. Marty, D. Porcelli, A. Hofmann.

Evolution of volatile species in the earth mantle: a view from xenology

Принята к публикации и находится на сайте журнала Geochemica et Cosmochemica Acta (<http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.08.034>)

3.2 Изучен кластерный режим улетучивания петрогенных элементов из высокотемпературных расплавов ряда полевых шпатов

Экспериментально установлена ведущая роль нефелинового (NaAlSiO_4), волластонитового (CaSiO_3) и силлиманитового (Al_2SiO_5) кластеров при высокотемпературном испарении ряда полевых шпатов, характерным для высокоскоростных ударных процессов.

Высокоскоростные ударные процессы играли фундаментальную роль в преобразовании силикатного вещества в Солнечной системе, как на допланетном этапе ее развития, так и на ранних этапах аккумуляции планет. Формирование химического состава летучих веществ в парогазовом облаке во многом зависит от состава конденсированных силикатных частиц, участвующих в гетерогенных химических процессах. Изменение состава ударного расплава происходит в результате селективного испарения, основные закономерности которого оцениваются по индивидуальной летучести входящих в расплав веществ. Наши эксперименты, моделирующие высокотемпературное ударное нагревание вещества, 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 входящих в группировку элементарных веществ, индивидуальные свойства которых могут сильно различаться между собой. Так на рис. 1.1 показана устойчивая связь между легколетучими K и Na и труднолетучим Al, связанными в «нефелиновом» кластере, а также связь между умереннолетучим Si и труднолетучим Al, связанными в «нефелиновом» и «силлиманитовом» кластерах.

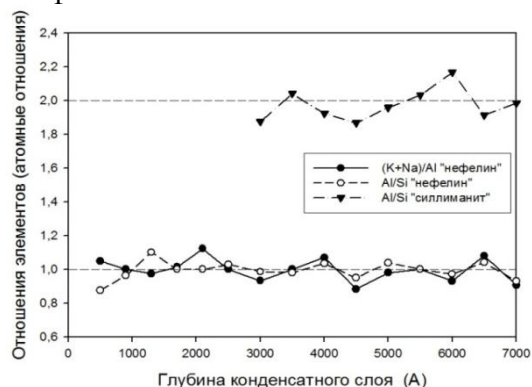


Рис. 1.1. Соотношение элементов в молекулярных группировках нефелина и силлиманита в конденсатной пленке из эксперимента с образцом альбита. Пунктиром показаны соответствующие стехиометрические соотношения.

Отв. Исполнитель: к.ф.-м.н. Герасимов М.В., mgerasim@mx.iki.rssi.ru

Yakovlev O.I., Dikov Yu.P., Gerasimov M.V., Buleev M.I. (2013) Cluster vaporization of feldspars in the conditions of impulse heating, Experiment in Geosciences, vol. 19, No 1, pp. 22-23.

М.В. Герасимов, О.И. Яковлев, Ю.П. Диков. Новые экспериментальные данные кластерного испарения полевых шпатов, Петрология, в печати.

3.3 Исследован химический состав и количественное содержание летучих соединений – продуктов модельного ударного испарения перидотита в условиях атмосферы Титана

Экспериментально установлено образование сложных органических соединений при лазерном испарении перидотита в газовой смеси азот-метан, моделирующей атмосферу Титана.

При исследовании твёрдых конденсатов, полученных при лазерном моделировании ударных процессов в условиях атмосферы Титана – спутника Сатурна - методом пиролитической газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией (ПГХ/МС) обнаружено множество летучих органических соединений. Среди идентифицированных веществ присутствуют: алифатические (предельные и непредельные) с числом атомов углерода до 18-ти включительно, алициклические (насыщенных и ненасыщенных) с трёх-, пяти- и шестичленными циклами и ароматические углеводороды (бензол, толуол, нафталин, индан, аценафтилен и большое количество алкилбензолов с длиной боковых цепей до C₁₃ включительно), азотсодержащие соединения (предельные и непредельные алифатические и ароматические нитрилы, азотистые гетероциклы). Концентрация индивидуальных веществ в анализируемых образцах находится на уровне от долей до нескольких единиц ppm по массе.

В качестве мишени для лазерного импульса использовали перидотит – горную породу, воспроизводящую состав каменных метеоритов по макрокомпонентам. Газовая атмосфера состояла из 96% по объёму азота и 4 % метана.

Руководитель: Зайцев М. А.

Зайцев М.А., М.В. Герасимов, Э.Н. Сафонова, М.А. Иванова, К.А. Лоренц, А.В. Корочанцев (2013). Синтез и преобразование органического вещества при высокоскоростных ударных процессах // Экспериментальная геохимия, т. 1, № 1. URL: http://exp-geochem.ru/JPdf/01_Planetology/01_Rus/10_01_Rus.pdf

М.А. Зайцев, М.В. Герасимов, Э.Н. Сафонова, А.С. Васильева. К вопросу о синтезе органических веществ при высокоскоростных ударных процессах в условиях атмосферы Титана. Астрономический вестник, в печати.

Зайцев М.А., Э.Н. Сафонова, М.В. Герасимов, М.А. Иванова, К.А. Лоренц, А.В. Корочанцев. Синтез и преобразование органического вещества при высокоскоростных ударных процессах». Доклад на «Всероссийском ежегодном семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии» (ВЕСЭМПГ-2013). ГЕОХИ РАН, Москва, 16-17 апреля 2013 г. Опубликовано в сборнике трудов конференции.

3.4 Исследован качественный и количественный химический состав летучих соединений в углистых хондритах Мёрчисон (СМ2) и Каинсаз (СО3) и продуктах их ударно-испарительного преобразования в инертной атмосфере

При сравнительном исследовании органического вещества в углистых хондритах различных классов и продуктах их ударно-испарительного преобразования в инертной атмосфере в модельных экспериментах с импульсным лазером показано, что при высокоскоростных ударных процессах происходит глубокая трансформация органики в метеоритах с преимущественным синтезом гетероатомных (азот – и серосодержащих) соединений.

Методом пиролитической газовой хроматографии с криофокусировкой в сочетании с масс-спектрометрией (ПГХ/МС) на содержание летучих органических соединений были исследованы тонкодисперсные образцы углистых хондритов классов CM2 (Мёрчисон) и CO3 (Каинсаз). При этом было идентифицировано несколько сотен органических соединений различных классов: алифатических и алициклических (предельных и непредельных) и ароматических углеводородов (бензола, толуола, ксилолов, нафталинов, их гомологов и т.д.), серосодержащих гетероциклических соединений ряда тиофена, спиртов, альдегидов, кетонов и т.д. При переходе от класса CM2 углистых хондритов к классу CO3 количества выделяющихся органических соединений существенно снижаются.

С помощью ПГХ/МС были исследованы твёрдые конденсаты – продукты лазерного испарения рассматриваемых углистых хондритов в нейтральной (гелиевой) атмосфере. При сравнении состава органики исходных хондритов с составом органики конденсатов наблюдалось существенное снижение содержания органических веществ с одновременным изменением характера обнаруженных соединений. Отмечено, что в составе органики, присутствующей в конденсатах, преобладают азотсодержащие соединения: алифатические и ароматические нитрилы и серосодержащие соединения: тиофен и алкилтиофены с длиной боковых цепей до C₇ включительно.

На рисунке 2 показан групповой состав органических соединений в углистых хондритах Мёрчисон (CM2) и Каинсаз (CO3) и продуктах их лазерного испарения в инертной (гелиевой) атмосфере:

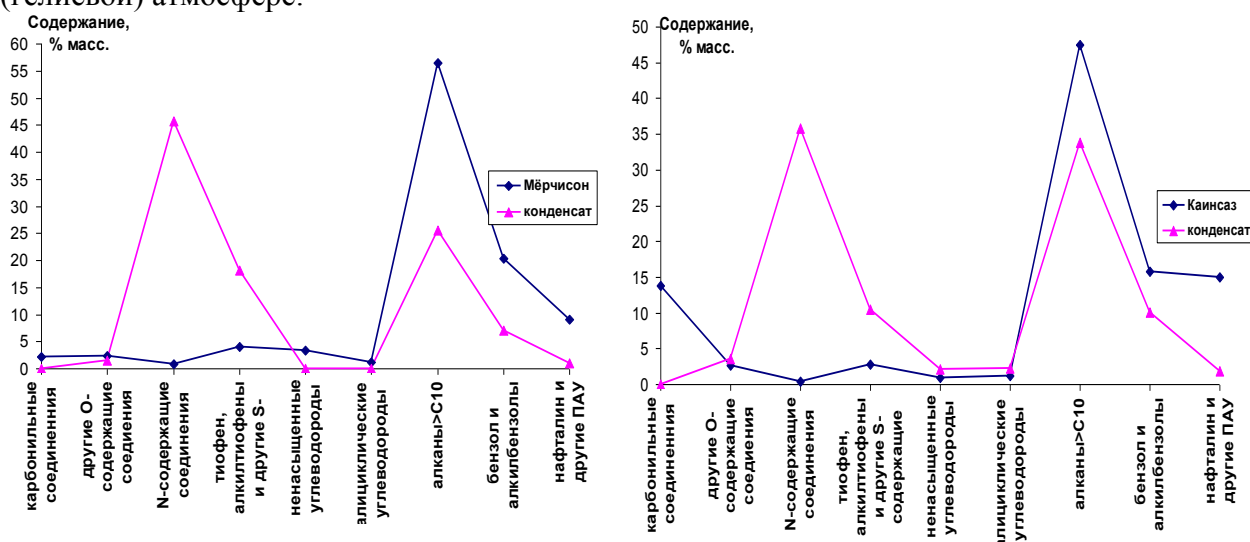


Рис. 2. Групповой состав летучих органических соединений, содержащихся в углистых хондритах Мёрчисон и Каинсаз и продуктах лазерного испарения данных хондритов в инертной атмосфере.

Руководитель: Зайцев М. А.

Zaitsev M.A., Gerasimov M.V., Safonova E.N., Ivanova M.A., Lorenz C.A., Dikov Yu.P., Korochantsev A.V. (2013). Comparative Investigation of Organic Components in the Murchison (CM2) and Kainsaz (CO3) Carbonaceous Chondrites. In: Lunar and Planetary Science 44, Abstract#1905, Lunar and Planet. Inst., Houston, Texas

Зайцев М.А. «Органическое вещество углистых хондритов и его преобразование в высокоскоростных ударных процессах» Доклад на X Ежегодной конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования». ИКИ РАН, Москва, 3-5 апреля 2013 г.

3.5 Предложен подход к предсказанию качественного состава экзогенных органических соединений на поверхности Ганимеда

Экспериментально установлен качественный состав органического вещества углистых хондритов и продуктов их ударно-испарительного преобразования. Полученные результаты позволяют определить принадлежность некоторых органических соединений, которые могут быть обнаружены на поверхности Ганимеда к экзогенным источникам (падению метеоритного и кометного вещества).

Для правильной интерпретации результатов готовящегося космического эксперимента по изучению состава летучих органических соединений на поверхности галилеевого спутника Юпитера – Ганимеда необходимо учитывать присутствие в анализируемом объекте органического вещества, привнесённого с кометами и метеоритами в неизменённом виде и в виде продуктов ударно-испарительного преобразования данной органики.

Количественный состав экзогенной органики определить очень трудно, т.к. он зависит от частоты кометно-метеоритной бомбардировки, условий и эффективности органического синтеза в водяной мантии, скорости обновления ледяного покрова на поверхности и других факторов (рис. 2). Тем не менее, качественный состав экзогенной органики может быть охарактеризован путём исследования органического вещества метеоритов различных классов и продуктов их ударно-испарительного преобразования (см. рис. 1 данного отчета).

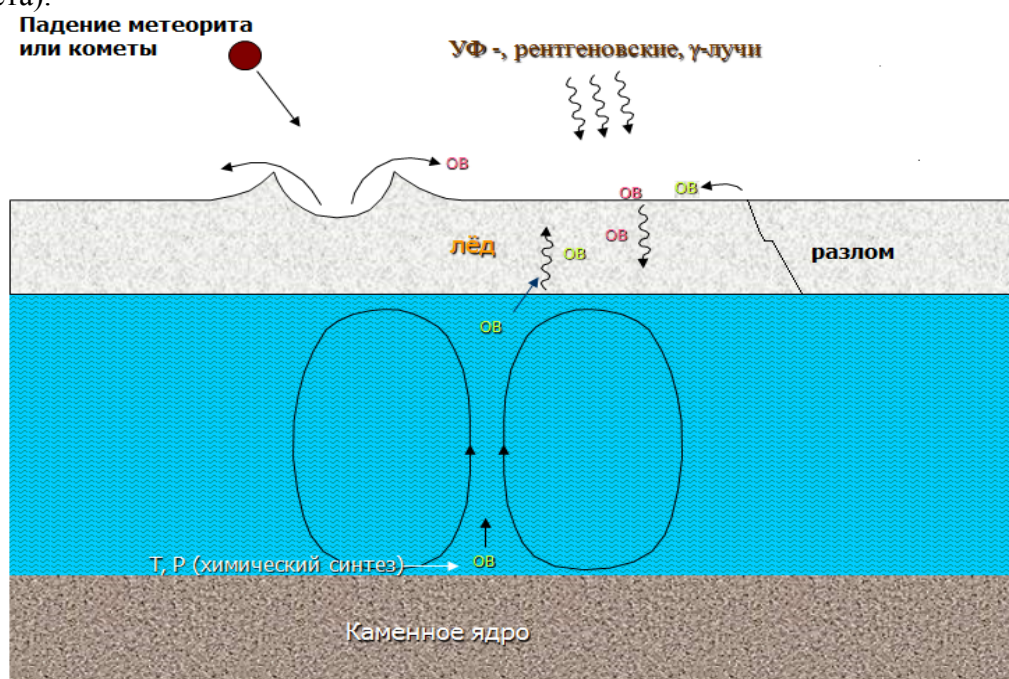


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая динамику эндогенного (ОВ) и экзогенного (ОВ) органического вещества на Ганимеде

Таким образом, было показано, что при высокоскоростных ударных процессах происходит глубокая трансформация органики в углистых хондритах с преимущественным синтезом гетероатомных (азот – и серосодержащих) соединений. Полученные результаты позволяют определить принадлежность некоторых органических соединений, которые могут быть обнаружены на поверхности Ганимеда к экзогенным источникам (падению метеоритного и кометного вещества).

Отв. исп. - к.ф.-м.н. Герасимов М.В., mgerasim@mx.iki.rssi.ru

M. A. Zaitsev, M. V. Gerasimov, E. N. Safonova, M. A. Ivanova, C. A. Lorenz, A. V. Korochantsev, Yu. P. Dikov (2013) Characterization of Exogenic Organic Matter on the Ganymede Surface. International Colloquium and Workshop "Ganymede Lander: scientific

goals and experiments", Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia 4-8 March 2013, GLCW_4_03.

4 ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

4.1 Анализ и разработка методов непосредственного наблюдения экзопланет

4.1.1 НИР «Звездный Патруль». Проработка научных задач отечественного эксперимента поиска экзопланет земного типа в части проработки научных задач и предварительного проектного облика космического телескопа «Звездный патруль». Проработка приборного состава и научно-техническое обоснование основных характеристик научной аппаратуры орбитальной обсерватории «Звездный патруль»
Информация по этому разделу представлена в разделе ПРОЕКТЫ В СТАДИИ НИР: НИР «Звездный Патруль».

Руководитель : д. т. н. Тавров А. В., tavrov@iki.rssi.ru

4.1.2 Международная космическая станция. Интегрированный российский сегмент. Космические средства. Эскизный проект. Комплекс научной аппаратуры «Планетный мониторинг»

1. В соответствии с «Долгосрочной программой научно-прикладных исследований и экспериментов на РС МКС» Федеральное государственное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) является постановщиком космического эксперимента (КЭ) «Мониторинг переменных явлений с борта международной космической станции (Планетный Мониторинг - ПМ)», направленного на систематические наблюдения атмосферы и поверхности планет и малых тел Солнечной системы, а также на апробацию мониторинга экзопланет.

2. Фундаментальное развитие планетологии включает сегодня новое направление – изучение экзопланет. Это динамично развивающаяся область исследований в астрономии. В настоящий момент не одна инфракрасная обсерватория как наземная, так и орбитальная не представляет своей программы без значительной части посвященной исследованию планет у других звезд. Новая задача планетологии – исследование экзопланет – с привлечением методик, применяемых для мониторинга планет Солнечной системы, является уникальной возможностью КЭ и запланирована в части отработки методики наблюдения экзопланет. Изучение внесолнечных планет (экзопланет), возможно в полном научном объеме на телескопе космического базирования.

Руководитель темы: д. т. н. Тавров А. В., tavrov@iki.rssi.ru

4.1.3 Ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом для исследования внесолнечных планет

Чтобы уменьшить влияние фона звезды из-за ее конечного диаметра, схема АИК была доработана до ахроматического интерференционного коронографа вращательного сдвига. Схема коронографа с переменным вращательным сдвигом позволяет получить контраст до 9 порядков в системе «звезда-планета». По отношению к разработанным ранее схемам коронографов выигрыш составляет до четырех порядков.

Ответ. Исполнитель: Фролов П. Н., warpedhorn@gmail.com

П. Н. Фролов, И. И. Ахметов, Б. Б. Шкурский, И. В. Гвоздовский, А. В. Киселев, О. И. Кораблев, А. В. Тавров. Ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом для исследования внесолнечных планет // 2013. Астрономический Вестник. т. 47, № 6. с 518-527.

P. N. Frolov, I. I. Akhmetov, B. B. Shkurskii, I. V. Gvozдовskii, A. V. Kiselev, O. I. Korablev, A. V. Tavrov. Achromatic Interfero-Coronagraph with Variable Rotation Shearing for Studying Extrasolar Planets // 2013. Solar System Research. V. 47. P. 477-486.

4.1.4 Методика прецизионной коррекции волнового фронта для наблюдения экзопланет с помощью звездного коронографа

Звездные коронографы предназначены, в частности, для наблюдения экзопланет. На входе коронографа требуется качество волнового фронта $\sim \lambda/10000$ по фазе и 0,1% по амплитуде (среднеквадратичное отклонение – СКО).

Такое высокое качество волнового фронта превосходит точностные характеристики коммерчески-доступной адаптивной оптики. Предложен метод, основанный на несбалансированном по амплитуде интерферометре (НИ), позволяющий использовать для прецизионной коррекции волнового фронта непрецизионные адаптивные (управляемые деформируемые) зеркала.

Когерентное сложение этих волн может иметь качество волнового фронта, значительно превосходящее точность используемых деформируемых зеркал.

Проведено численное моделирование коррекции волнового фронта посредством разрабатываемого метода. В частности показано, что предложенный метод делает возможным изображение экзопланет при помощи деформируемых зеркал с малой точностью управления ячейкой зеркала (актуатора) $\sim \lambda/500$, однако формирует прецизионный волновой фронт с качеством $\sim \lambda/8000$ (СКО). Также показано, что метод имеет высокую ахроматичность.

Ответ. Исполнитель: Шкурский Б. Б., shkurskiybb@mail.ru

П. Н. Фролов, И. И. Ахметов, Б. Б. Шкурский, И. В. Гвоздовский, А. В. Киселев, О. И. Кorablev, А. В. Тавров. Ахроматический интерференционный коронограф с переменным вращательным сдвигом для исследования внесолнечных планет // 2013. Астрономический Вестник. т. 47, № 6. с 518-527.

P. N. Frolov, I. I. Akhmetov, B. B. Shkurskii, I. V. Gvozдовskii, A. V. Kiselev, O. I. Korablev, A. V. Tavrov. Achromatic Interfero-Coronagraph with Variable Rotation Shearing for Studying Extrasolar Planets // 2013. Solar System Research. V. 47. P. 477-486.

И. И. Ахметов, П. Н. Фролов, Б. С. Ринкевичюс, А. В. Киселев, А. В. Тавров. Ахроматический 3D-интерферометр для контроля и анализа качества волнового фронта // 2013. Измерительная техника. № 8. с. 28-30.

X Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования". 12–13 апреля 2013 г. ИКИ РАН Москва

Выездной семинар лаборатории ИСПАВР "Полярные процессы в атмосферах планет". 15-18 апреля 2013 г. ПГИ РАН Анапиты

Двенадцатая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков». Москва, 25 — 28 июня 2013 г.

4.2 Исследование свойств некоторых экзопланет

4.2.1 Исследование свойств системы KOI-351 как планетана

Свойства планет системы KOI-351, открытой в 2013 г. в рамках миссии Kepler, необычны. Системы других экзопланет по многим параметрам с нею несопоставимы. Система KOI-351 рассматривалась также как объект поиска планетанов.

В издании АН США PNAS готовится к публикации работа G.W.Marcy с сотрудниками <Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars>, в которой приводятся некоторые итоги миссии Kepler. Выполнены поиски транзитов у 42 000 солнцеподобных звезд. Указывается, что 5.7% таких объектов должны иметь экзопланеты, подобные Земле. Всего обнаружено 630 объектов с транзитами, из них 10 отнесены к типу Земли (с массой до 4 масс Земли). К необычным экзопланетным системам относится KOI-351.

KOI-351. В октябре 2013 г. с публикацией работ о новых обнаруженных транзитах экзопланет (arXiv:1310.5607; arXiv:1310.5630; arXiv:1310.5654), общее число подтвержденных экзопланет превысило 1000 (<http://exoplanet.eu>). После потери аппарата Kepler поиск и исследование экзопланет малой массы сместились к другим проектам, вместе с тем, научные итоги миссии Kepler продолжают обрабатываться. Среди 2740

кандидатов-экзопланет 351 имеют размеры, сравнимые с земными (объекты у звезд Kepler-17, Kepler-40 b (KOI-428 b), Kepler-41 b (KOI-196.01, KOI-2124.01 и др.) Значительное число публикуемых работ посвящено объекту KOI-351. (KOI – сокращение “Kepler Objects of Interest”).

Объекты системы KOI-351 (другое обозначение Kepler-90) рассматриваются в настоящем отчете. В систему KOI-351 входят 8 кандидатов-экзопланет. Как известно, в отличие от Солнечной, массивные экзопланеты в системах других звезд часто располагаются на низких орбитах, отсюда термин «горячий юпитер». Но планетная система KOI-351 имеет определенное сходство именно с Солнечной системой в отношении расположения маломассивных планет и гигантов. Однако система весьма компактная; орбиты семи планет, о которых сообщалось ранее, лежат в «зоне обитаемости», в пределах 1 а.е. Орбита нового объекта k, представленного в работе J. R. Schmitt et al (Planet Hunters VI: The First Kepler Seven Planet Candidate System and 13 Other Planet Candidates from the Kepler Archival Data, The Astronomical Journal, arXiv:1310.5912), расположена примерно на уровне внутренней части пояса астероидов Солнечной системы, период 904 сут. Большие полуоси орбит маломассивных компонентов b-c составляют 0.074, 0.089 (и 0.32 а.е. у компонента c), причем компоненты a и b, согласно данным транзитов, лишь немного (на 31 и 19%) превышают размеры Земли. Радиусы R_E компонентов d, e и f почти втрое больше Земли, а g и h – типичные гиганты. Орбитальные периоды, начиная с компонента e, также типичны для Солнечной системы (Табл.1), но компонент b, с семи-суточным периодом – это экзотическая «горячая земля» на орбите с большой полуосью 11 млн км (компонент c -13 млн км.) Наклонение всех орбит к лучу визирования не менее 89.4° (орбиты в плоскости визирования). Объект KOI-351 далекий, 765 пк. Родительская звезда несколько больше (1.2 R_{\odot}) и массивнее (1.13 M_{\odot}) Солнца, но с близкой яркостной температурой (5930 K), что дает расчетную величину звездной постоянной $E_s = 1.53$ кВт/м², на 11.6% больше солнечной. В отличие от имеющейся средней статистики, развитая система KOI-351 сопутствует пониженной металличности звезды (-0.17). На основе опубликованных данных рассчитаны следующие сведения о температурах компаньонов (K):

Табл. 1. Свойства системы KOI-351 (Kepler 90)

Компаньон	Б. полуось (ае)	Период (сут)	Радиус R_E	T_b болометрич
b	0.074	7.01	1.31	963
c	0.089	8.72	1.19	878
d	0.32	59.74	2.89	463
e	0.42	91.94	2.67	494
f	0.48	124.914	2.89	378
g	0.71	210.61	8.13	311
h	1.01	331.60	11.32	260

Происхождение и ранняя эволюция системы KOI-351 вызывает много вопросов. Как известно, основные теории образования звездно-планетных систем включают накопление материала и образование частиц разных размеров за «линией льдов» и миграции (различных типов) протопланетных тел в центральную часть системы. Кроме того, к твердо установленным фактам относится низкоорбитальное положение значительного числа «горячих юпитеров». Такое строение, обратное по отношению к структуре Солнечной системы, типично для экзопланетных систем. Можно напомнить, что определенные стадии образования самой Солнечной системы все еще не объяснены теоретически. Тем более, сверх-компактная система KOI-351, с маломассивными компонентами b-c является серьезным вызовом теории. Достаточно напомнить, что согласно «критерию неустойчивости Q»,

$$Q = \omega V_s / \pi S \gamma,$$

значение Q в области орбитальных расстояний < 2 а.е. (Марс, Земля и т.д.) может значительно отличаться от единицы, например, за счет низкой поверхностной плотности S протопланетного диска. (Здесь V_s – скорость звука, ω – угловая скорость, γ – гравитационная постоянная.) Объяснение образования газовых гигантов на орбитальных расстояниях около 1 а.е. встречается с еще большими теоретическими трудностями.

Физические свойства компонентов от с до g, с природой планетанов несовместимы. В последней колонке таблицы 1 приводятся болометрические температуры T_b для каждого компонента, найденные из уравнения

$$T_b^4 = E_s P / 4R_E^2 \sigma,$$

где σ – постоянная Больцмана, $P = 1 - A_b$ – поглощаемая часть звездной радиации. Болометрическое альbedo, согласно предложенной оценке для экзопланет типа «суперземля» принято $A_b = 0.3$ (*«The Habitable Exoplanets Catalog»*) (PHL/University of Puerto Rico at Arecibo).

Из приведенных оценок следует, что болометрические температуры обеих экзопланет (b и c) системы KOI-351 существенно превосходят критические даты для водной среды. Компоненты g и h не имеют подобных ограничений, но это типичные «юпитеры» с земными болометрическими температурами.

4.2.2 Исследование свойств объекта 55 Cnc e

Свойства объекта **55 Cnc e** рассматривались, исходя из сведений о его массе, диаметре, свойств родительской звезды и орбитальных данных экзопланеты. Исходя из имеющихся экспериментальных данных, свойства **55 Cnc e** со свойствами планетанов практически несовместимы (рис.1).

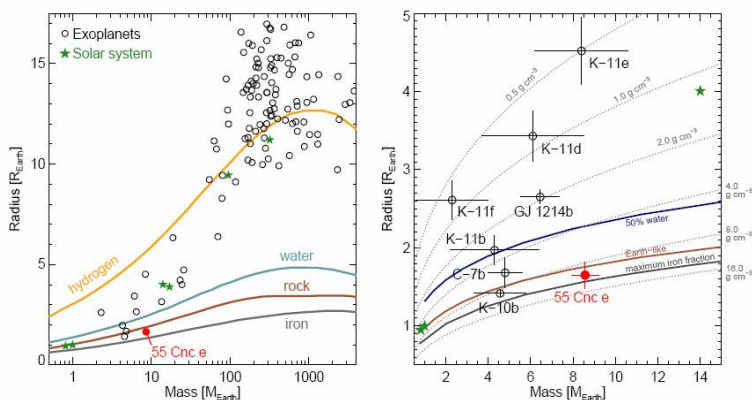
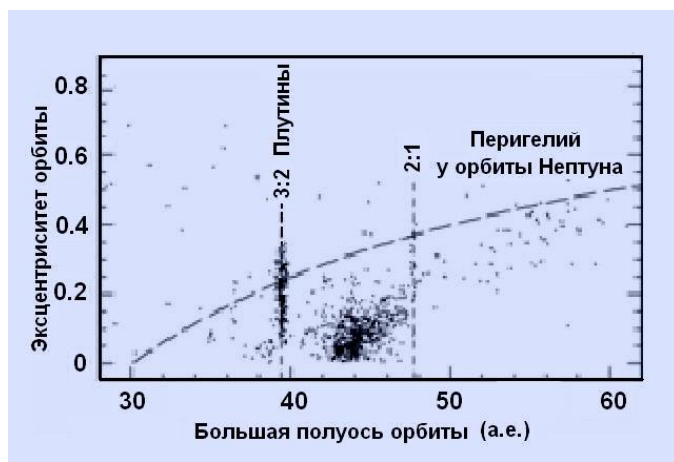


Рис.1. Как следует из орбитальных и других характеристик, объект **55 Cnc e** может быть исключен из рассмотрения списка возможных планетанов.

4.2.3 Исследование свойств ТНО Нуа как объекта типа Плутона<плутино>

Основой базой исследований должно было стать ранее объявленное продолжение публикаций, посвященных ТНО **Нуа**. Новые публикации не появились. Имеются критические заметки о неточно оцененных параметрах **Нуа**. Таким образом, ТНО **Нуа** не может быть предельным случаем маломассивных экзопланет.



ТНО **Нуа**. Интерес к экзо-плутино, как к предельно маломассивным экзопланетам, имеет гипотетический характер, так как объекты такого рода не могут быть обнаружены современными физическими методами. Имевшиеся в конце 2012 г. публикации об очень высокой массе ТНО **Нуа** оказались, по-видимому, ошибочными. ТНО-объекты и их

эволюция, как они известны ныне, особого интереса для настоящего исследования не представляют. Статистика плутино показана на рис.2. Все плутино имеют орбитальный резонанс с орбитой Нептуна в соотношении 2:3. Объектов повышенной массы среди известных тел в их числе нет.

Рис.2. Орбиты объектов плутино имеют выраженный резонанс 3:2 с орбитой Нептуна и имеют большую полуось около 39.6 а.е. Возможны также объекты с резонансом 2:1.

Руководитель: д.ф.-м.н. Ксанфомалити Л.В., ksanf@iki.rssi.ru

5 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Исследования механизмов рассеяния света, приводящих к возникновению эффектов оппозиции в яркости и поляризации у тел Солнечной системы

1. Продолжены исследования механизмов рассеяния света, приводящих к возникновению эффектов оппозиции в яркости и поляризации у тел Солнечной системы. Предложен метод, позволяющий учитывать как когерентное обратное рассеяние в среде, так и взаимодействие частиц в ближнем поле в слабопоглощающих средах. Рассчитанные таким образом модели показали хорошее согласие с результатами лабораторных измерений.

Предложенный в работах Е.В.Петровой подход рассматривает реголит как полубесконечную среду, состоящую из кластеров частиц, благодаря чему взаимодействие частиц в ближнем поле также принимается во внимание. С помощью данного метода обнаружено, что для всех исследованных типов кластеров, начиная с некоторого минимального числа составляющих частиц, характеристики когерентной компоненты становятся практически независимыми от числа частиц в кластере. Кроме того, модель среды из компактных кластеров позволила воспроизвести ветвь отрицательной поляризации с двумя минимумами, один из которых, ближе к нулевому углу фазы, обусловлен когерентным обратным рассеянием в среде, а второй представляет собой остаток от отрицательной ветви поляризации, типичной для такого одиночного кластера. Подобная ветвь отрицательной поляризации наблюдается у ярких объектов, например, спутника Юпитера Европа или колец Сатурна. Достоверный выбор моделей можно сделать только с привлечением данных измерений на более высоких фазовых углах в области влияния диффузного рассеяния.

2. Продолжен анализ данных камеры VMC аппарата *Venus-Express* и начат анализ результатов измерений интенсивности и степени линейной поляризации в зависимости от угла фазы, выполненных спектрометром SPICAV в ближнем ИК-диапазоне. Фазовые функции яркости облаков Венеры позволили оценить размеры частиц и их показатель преломления в верхнем облачном слое для разных широт и местного времени.

Начиная с апреля 2006 года, VMC камера передала тысячи изображений верхнего облачного слоя Венеры в четырех спектральных каналах (от УФ до ближнего ИК), среди которых особый интерес представляют измерения яркости на малых углах фазы, где можно наблюдать явление глории, типичное для среды, состоящей из сферических частиц. Угловые положения максимума и минимума яркости в глории в разных длинах волн дают однозначную оценку размеров капель, которая в данном случае хорошо согласуется с размером так называемой моды 2 (радиус около 1.0-1.2 мкм). В ряде случаев особенности измеренного фазового профиля требуют предположения о действительной части показателя преломления, повышенной (на несколько процентов) по сравнению со значением, типичным в данных условиях для 75% серной кислоты (1.44). Анализ показал, что повышение показателя преломления вследствие возможного понижения температуры недостаточно эффективно. Мы считаем, что более вероятной причиной повышения показателя преломления может служить присутствие небольшой примеси с высоким показателем преломления в каплях серной кислоты. Такой примесью могут быть те же вещества, которые в настоящее время рассматриваются в качестве кандидатов на роль неизвестного "ультрафиолетового поглотителя", - хлорид железа или сера.

Фазовые функции интенсивности, измеренные SPICAV в одной из орбит, дают примерно такие же оценки размеров облачных частиц, что профили VMC для того же района и времени измерений. Однако профили поляризации показывают лучшее согласие с моделями облаков, состоящих из несколько более мелких частиц (например, 1.0 мкм из профиля поляризации против 1.2 мкм из

профиля яркости в той же длине волны). Анализ этих эффектов требует подробного моделирования, однако уже сейчас понятно, что присутствие субмикронных частиц в моделях позволяет достигнуть лучшего согласия с измерениями.

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Петрова Е.В., epetrova@iki.rssi.ru

V.P. Tishkovets, E.V. Petrova. *Light scattering by densely packed systems of particles: near-field effects*. In: *Light Scattering Reviews 7*, A. A. Kokhanovsky (Ed.). ISBN: 978-3-642-21906-1 (Print) 978-3-642-21907-8 (Online), Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 3-36.

Victor P. Tishkovets and Elena V. Petrova. *Coherent backscattering by discrete random media composed of clusters of spherical particles*. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 127, 192-206.

W.J. Markiewicz, E. Petrova, O. Shalygina, M. Almeida, D.V. Titov, S.S. Limaye, N. Ignatiev, T. Rotsch, and K.D. Matz. *Glory on Venus cloud tops and the unknown UV absorber*.

Представлено к публикации в *Icarus*, ноябрь 2013

V.P. Tishkovets and E.V. Petrova. *Coherent backscattering by discrete random media composed of clusters*. *Abstracts of the XIV Conference on Electromagnetic & Light Scattering (17-21 June 2013, Lille, France)*, p. 38 <http://www-loa.univ-lille1.fr/ELS-XIV/>

E.V. Petrova, O.S. Shalygina, W.J. Markiewicz. *The properties of particles in the upper cloud layer of Venus from the observations of glory by the Venus Express mission*. *Abstracts of the XIV Conference on Electromagnetic & Light Scattering (17-21 June 2013, Lille, France)*, p. 53 <http://www-loa.univ-lille1.fr/ELS-XIV/>

E. Petrova, O. Shalygina, W.J. Markiewicz, and M. Almeida. *VMC/VEX photometry at small phase angles: Glory and the properties of particles in the upper cloud layer of Venus*. *European Geosciences Union, General Assembly 2013 (07-12 April, 2013, Vienna, Austria)*, abstract EGU2013-7839. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-7839.pdf>

E.V. Petrova, O.S. Shalygina, W.J. Markiewicz. *Physical properties of particles in the upper clouds of Venus from the IR and UV images taken by VMC/VEx at small phase angles*. *International Venus Workshop (10-14 June 2013, Catania, Sicily, Italy)*, abstract Nr. 24 <http://www.iaps.inaf.it/Venus2013/Abstract.php?AbstrNr=O-024>

E. V. Petrova, A. A. Fedorova, O. I. Korablev, J.-L. Bertaux. *Sizes of particles in the upper clouds of Venus from the SPICAV/VEx polarimetry*. *The Fourth Moscow Solar System Symposium (14-18 October 2013, IKI RAS, Moscow)*, abstract No. 4MS3-PS-45 <http://ms2013.cosmos.ru/>

5.2 Исследования формирования планетезималей из разреженных препланетезималей

В 2013 г продолжены исследования формирования планетезималей из разреженных препланетезималей. В частности, показано, что моменты количества движения препланетезималей, необходимые для формирования двойных малых тел Солнечной системы (особенно в занептунной области), могли быть получены при взаимных столкновениях разреженных препланетезималей.

Руководитель: Ипатов С. И., siipatov@hotmail.com

Ipatov, S.I., *Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals*, *Proc. IAU Symp. No. 293 "Formation, detection, and characterization of extrasolar habitable planets"*, ed. by N. Haghighipour.

Ipatov, S.I., *Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals*. *Abstracts of 44th Lunar and Planetary Science Conference (March 18-22, 2013, The Woodlands, Texas)*, # 1488, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2013/pdf/1488.pdf>. Poster.

Ipatov, S.I., *Angular momenta of collided rarefied preplanetesimals*. *Abstracts of European Planetary Science Congress 2013 (08 – 13 September 2013, London, UK)*, <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2013/EPSC2013-290-3.pdf>. Poster at Session PD3/EX4.

Presentation: http://presentations.copernicus.org/EPSC2013-290_presentation.pdf

Ipatov, S.I., The role of collisions of rarefied preplanetesimals in formation of satellites of small bodies, Abstracts of International conference "Near-Earth astronomy 2013" (Krasnodar, Russia, 7-11 October 2013). P. 87-88. (тезисы опубликованы на английском и русском языках). Стендовый доклад.

С. И. Ипатов. Роль столкновений разреженных препланетезималей в формировании спутников малых тел. Тезисы Международной конференции «Околоземная астрономия-2013» (7-11 октября 2013 г., Краснодар).

Ipatov, S., The angular momentum of colliding rarefied preplanetesimals allows the formation of binaries, Abstracts of "The Fourth Moscow Solar System Symposium 4M-S3" (Space Research Institute, Moscow, Russia, October 14-18, 2013), 4MS3-PS-39, CD-ROM. Poster.

Ipatov, S.I., Formation and migration of planetesimals. Abstracts of the 1st COSPAR Symposium "Planetary systems of our Sun and other stars, and the future of space astronomy" (Bangkok, Thailand, 11-15 November 2013). P. 118. An oral presentation at the session 5.

5.3 Турбулентность и нелинейные волны в планетных атмосферах

1. Создана и реализована новая трехмерная физическая модель переноса атмосферных примесей на Марсе течением ветра в областях с неровными и/или изменяющимися во времени границами. Основная идея предлагаемого метода состоит в использовании невязких уравнений для моделирования переноса твердых частиц вблизи сложной поверхности. Для движений свободной атмосферы число Рейнольдса, характеризующее соотношение силы инерции к силе вязкости в гидродинамических уравнениях, очень велико и нелинейные инерционные члены существенно превосходят по величине слагаемое, содержащее коэффициент молекулярной вязкости. Совершенно другая ситуация возникает для течений вблизи поверхности, где вязкие механизмы играют принципиальную роль. Система невязких уравнений атмосферы, основанная на модели Р.И. Нигматулина эффективных термодинамических характеристик для замороженной дисперсной фазы. Это обеспечивает возможность описания нагруженной и чистой атмосферы одинаковыми уравнениями, отличающимися лишь термодинамическими свойствами. Эффективное уравнение состояния такой среды зависит от характеристического размера и концентрации сферических частиц и, в пределе отсутствия твердой фазы, переходит в обычные уравнения идеальной жидкости. Фактически, задача анализа переноса частиц в атмосфере сводится к решению уравнений идеального газа с переменным в пространстве и времени уравнением состояния. Практически это означает применимость этой системы уравнений для моделирования границы облака твердых частиц и чистой атмосферы. Используемая система уравнений идеального газа с переменным уравнением состояния содержит непосредственную зависимость поля гидродинамической скорости от концентрации твердой фазы, что практически означает возможность выхода за пределы применимости приближения пассивной примеси там, где это имеет место быть.

Для расчетов использовался метод Годунова для численного решения уравнений двухфазной атмосферы. Суть метода Годунова заключается в использовании точных обобщенных решений задачи распада произвольного разрыва при дискретизации законов сохранения массы, импульса и энергии в каждой ячейке области моделирования на каждом временном шаге. Эти решения включают локальные тангенциальные разрывы, которые не проявляются на масштабах внешнего течения, но, тем не менее, обеспечивают диссипацию кинетической энергии, как это необходимо для течений в пограничном слое. Структура используемой разностной схемы обеспечивает диффузию областей с высокой энтропией по всем пространственным координатам, воспроизводя качественно эффекты молекулярной вязкости. При этом влияние схемной вязкости проявляется наиболее весомо, когда пограничный слой нагружен твердыми частицами в областях значительного изменения рельефа поверхности. Именно в таких случаях влияние молекулярной вязкости также усиливается в реальной природе. Величина схемной вязкости зависит от градиентов подсеточных течений, имеет конечный предел при уменьшении пространства и может

регулироваться выбором размера сетки. Ясно, что для турбулентных течений схемная вязкость превосходит соответствующую для ламинарных течений, что отражает известное соотношение между турбулентной и ламинарной вязкостью.

К.В. Карельский, А.С. Петросян, И.В. Смирнов, односкоростная трёхмерная модель переноса атмосферных примесей течением ветра в областях Марса со сложной границей, готовится к печати.

2. Получена система уравнений крупномасштабной динамики атмосферы Марса в приближении мелкой воды в поле силы тяжести над неоднородной границей при наличии вращения. В полученных уравнениях учитывается зависимость давления от плотности (статическая сжимаемость), звуковые волны отсутствуют.

$$\begin{cases} \frac{\partial l}{\partial t} + u \frac{\partial(lu)}{\partial x} + v \frac{\partial(lv)}{\partial y} = - \frac{\partial z_b}{\partial t} \rho|_{z_b} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{a^2}{l} \frac{\partial l}{\partial x} = -g \frac{\partial z_b}{\partial x} + fv - \frac{1}{l} \frac{\partial z_b}{\partial t} \rho|_{z_b} (u|_{z_b} - u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{a^2}{l} \frac{\partial l}{\partial y} = -g \frac{\partial z_b}{\partial y} - fu - \frac{1}{l} \frac{\partial z_b}{\partial t} \rho|_{z_b} (v|_{z_b} - v) \end{cases}$$

где $\frac{\partial z_b}{\partial t}$ - нестационарность подстилающей поверхности,

fv, fu - влияние силы Кориолиса.

$l(x, y, t) = \bar{\rho}(x, y, t) \cdot (h - z_b)$ - параметр вместо высоты слоя в классических уравнениях.

$l \geq 0$, переходит в классическую высоту при условии несжимаемости.

$$a^2 \equiv \frac{l}{\rho_h} \left(l \frac{g}{p_a} + 1 \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Полученные уравнения существенно отличаются от аналогичных для несжимаемых течений найденным выражением для скорости распространения слабых возмущений. В классической теории мелкой воды физическими переменными являются высота свободной поверхности и усредненное по глубине поле горизонтальной скорости. В этой теории уравнение для высоты свободной поверхности играет роль закона сохранения массы, а сама высота свободной поверхности в силу постоянства плотности жидкости во всем объеме является массой столба жидкости. В нашем же случае сжимаемого газа в приближении мелкой воды массой столба газа является произведение высоты свободной поверхности на среднюю по глубине плотность. Как следствие в полученных в работе уравнениях появляется новая переменная, определяющая закон сохранения массы и однозначно связанная с высотой свободной поверхности. Новая система нелинейных уравнений, полученная в настоящей работе, существенно отличается от уравнений, изученных ранее. Уравнения записаны в приближении эффективной границы. Наличие источников слагаемого в правой части полученных уравнений приводит к тому, что переменные Римана не сохраняют свои значения вдоль характеристик в отличие от случая ровной подстилающей поверхности, и поэтому классические простые волны не реализуются. Как показано в работе, несмотря на гиперболичность полученной системы уравнений, нелинейная динамика гидродинамических течений существенно отличается от течений, рассмотренных в работе **Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Приближение сжимаемой мелкой воды применяется так же для моделирования физики планетарных колец, для изучения песчаных бурь на Марсе.

Показано, что классические простые волны не являются решениями системы. Установлено, что обобщенные простые волны существуют только в случае линейного профиля подстилающей поверхности. Для случая границы в виде наклонной плоскости получены все непрерывные и разрывные решения в явном виде, найдено аналитическое решение задачи распада произвольного разрыва. Решение состоит из четырех волновых конфигураций. Для каждой конфигурации найдены необходимые и достаточные условия для реализации.

К.В.Карельский, А.С.Петросян, А.В.Черняк, Нелинейная теория течений сжимаемого газа в поле силы тяжести в приближении мелкой воды над неоднородной границей. // Журнал экспериментальной и теоретической физики, т.143, вып.4, стр.779-798, 2013

Руководитель: д.ф.-м.н. Петросян А.С. , apetrosy@iki.rssi.ru

5.4 Моделирование общей циркуляции атмосферы Венеры на основе полной системы уравнений газовой динамики

При помощи негидростатической модели общей циркуляции атмосферы Венеры впервые в одной модели получены два режима циркуляции венерианской атмосферы: зональная суперротация ниже 75-80 км и подсолнечно-противосолнечная циркуляция выше мезопаузы (90-95 км). Динамическое ядро модели, разработанное в Полярном геофизическом институте КНЦ РАН (г.Апатиты Мурманской обл.), реализует численное решение уравнений движения сжимаемого вязкого газа неизменяемого состава. Явная схема интегрирования основана на полулагранжевом методе конечных объемов, полностью консервативна и монотонна. Численное решение не проявляет линейной схемной вязкости. При расчетах использовалась равномерная сетка с 480 узлами по высоте, 256 по долготе и 128 по широте. Вертикальный масштаб модели составляет 120 км. В модели учтена турбулентная вязкость, которая параметризована на основе локального числа Ричардсона. Радиационный блок в модели отсутствует; вместо этого тепловой режим атмосферы задан в релаксационном приближении. Температурный профиль, к которому релаксирует модель, его зависимость от широты, высоты и зенитного угла Солнца, а также время релаксации, зависящее от этих же параметров, позволяют параметризовать радиационный баланс атмосферы и подобрать такой режим нагрева/выхолаживания, который соответствует картине циркуляции, наилучшим образом соответствующей наблюдениям. Модель реализована в виде кода для персонального компьютера, использующего технологию CUDA гибридных вычислений, что позволяет добиться более чем 100-кратного увеличения производительности.

Результаты моделирования показали, что доминирующим фактором в поддержании зональной суперротации является солнечный термический прилив. Заданное в релаксационном приближении дополнительное выхолаживание полярных областей на уровне облачного слоя и дополнительный нагрев выше облачного слоя позволяет подавить суперротацию выше 90 км и обеспечивает возможность формирования подсолнечно-противосолнечной циркуляции в мезосфере планеты.

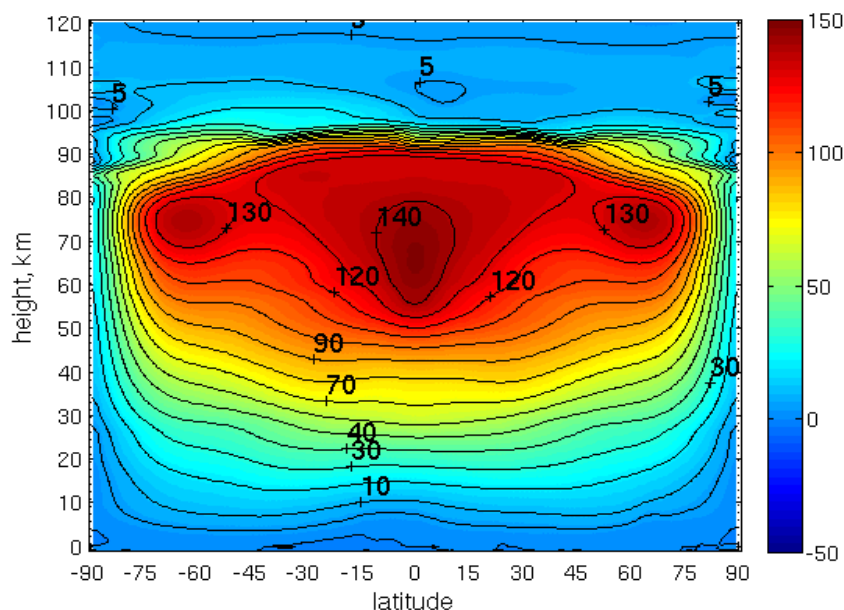


Рис. 1. Усредненное по долготе сечение зональной скорости ветра в атмосфере Венеры в координатах “высота – широта” по результатам моделирования. Среднеширотные максимумы скорости образуются в результате меридионального переноса момента, экваториальный максимум – в результате термического прилива.

В переходной зоне на уровне 90-95 км формируется сложная картина, включающая как элементы суперротации, так и подсолнечно-противосолнечной циркуляции с сильными волновыми возмущениями, которая качественно согласуется с результатами наблюдений свечения синглетного кислорода на ночной стороне Венеры.

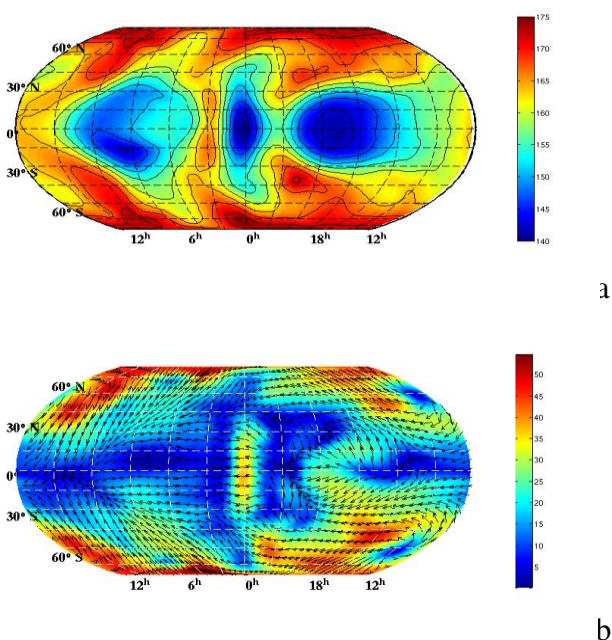


Рис. 2 (а) Распределение температур в атмосфере Венеры и (б) горизонтальные компоненты скорости ветра на высоте 95 км по результатам моделирования.

Руководитель: д. ф.-м.н. А.В.Родин, alexander.rodin@phystech.edu,

*Мингалев И.В., Родин А.В., Орлов К.Г. Численное моделирование общей циркуляции атмосферы Венеры. Влияние рельефа поверхности и режима нагрева излучением. *Астрономический вестник* 2014, в печати.*

Исследования малых тел Солнечной системы

Отв. д.ф.-м.н. Захаров А.В.

Разработка методов и средств регистрации космической пыли

Отв. исп. д.ф.-м.н. Захаров А.В. отд.9, Дольников Г.Г., отд.53

Работа проводилась по следующим направлениям:

- разработка методов для регистрации пыли на поверхности Луны и планет,
- разработка лабораторного образца прибора для регистрации пылевой компоненты экзосферы Марса,
- подготовка предложений для прибора, направленного на исследования пылевой составляющей у поверхности Марса
- создание физической модели пылевой составляющей экзосферы Луны, моделирование экзосферы Луны,
- регистрация пыли в приповерхностной области Луны с помощью бортовых ТВ камер.

В 2013 году продолжались работы по развитию методов и средств регистрации космической пыли:

Разработаны и созданы лабораторные установки для испытаний и калибровки пьезокерамических датчиков регистрации пылевых частиц.

Проведены испытания лабораторного образца ударного датчика на лабораторных установках.

Результаты этих испытаний представлены на Четвертом симпозиуме по исследованию Солнечной системы (Октябрь 2013 г., ИКИ РАН)

Подготовлены несколько статей по моделированию пылевой обстановки в экзосфере Луны (эта работа выполнялась совместно с ОИВТ РАН и ИДГ РАН).

Подготовлено предложение по пылевому комплексу для посадочной платформы проекта ЭкзоМарс 2018 г. Пылевой комплекс включает (1) ударный датчик, (2) оптический датчик МикроМед, (3) датчик электрического потенциала, и (4) датчик электромагнитных шумов.

Разработка предложений для подготовки экспедиции к астероиду

Отв. исп. д.ф.-м.н. Захаров А.В. (совместно с ИНАСАН и НПО им. С.А. Лавочкина)

Продолжались работы, начатые в 2011 году, по разработке предложений в обеспечение миссий к кометам, астероидам Главного пояса и астероидам, сближающимся с Землей, а также экспедиций по доставке образцов вещества этих небесных тел на Землю в части разработки методических принципов выполнения комплексной долгосрочной программы определения и прогнозирования текущих координат астероида Апофис по радиомаяку. Рассматривались также варианты реализации аппаратурно-технической и проектно-конструкторской реализации миссии посещения малого астероида, в том числе мероприятий, проводимых вблизи астероида и на его поверхности.

Данная работа была основана на анализе опыта, полученный в ходе выполнения программы Фобос-Грунт и его неудачного пуска в 2011 г. Сделан вывод о том, что структурная схема КА «Апофис», основанного на КА «Фобос-Грунт», соответствует поставленным задачам и в целом остается без изменений. Отмечено, что в то же время необходимо пересмотреть бывший подход к формированию облика бортового комплекса управления (БКУ) в целом. Целью такого пересмотра должно быть принятие всех возможных мер, позволяющих повысить надежность функционирования БКУ как в аппаратной части, так и в программно-структурном плане.

Рассмотрены вопросы обеспечения высокоточных траекторных измерений орбиты астероида Апофис с помощью радиомаяка-транспондера, размещенного на орбите спутника Апофиса. Особо разработаны принципиальные вопросы использования средств

ЗРСДБ (VLBI), их аппаратного бортового обеспечения и кооперации с Европейским Объединенным Институтом РСДБ (JIVE, Нидерланды).

Исследованы методические основы существенного повышения точности определения текущих координат астероида Апофис. Показано, что достижение этой цели возможно при условии проведения целенаправленного комплекса работ, включающих использование радиомаяка-транспондера, доставленного в район астероида, организацию траекторных измерений по технологии VLBI и проведение методических разработок высокоточной адаптивной модели движения малого небесного тела. Указанные работы должны проводиться как долгосрочная комплексная программа достижения указанной цели, рассчитанная на срок 5-10 лет.

Данная работа выполнялась совместно с ИНАСАН и НПО им. С.А. Лавочкина.

Разработка предложений для подготовки новой экспедиции к спутникам Марса

Отв. исп. д.ф.-м.н. Захаров А.В. (НПО им. С.А. Лавочкина)

Начаты работы по подготовке предложений для нового проекта, направленного на исследования спутников Марса. Это предложение основано на научных задачах и результатах разработки проекта «Фобос-Грунт», неудачный запуск которого состоялся в 2011 году.

Предложение для нового проекта включает дистанционные исследования Деймоса и Фобоса с орбит КА близкой к каждому из спутникам Марса, а также доставка образцов грунта с Фобоса.

Учитывая заинтересованность Европейского космического агентства в исследованиях спутников Марса, начаты обсуждения подготовки и реализации совместного проекта к Деймосу и Фобосу.

*Захаров А.В. «Электризация и движение пыли вблизи поверхности астероида»
Астрономический вестник. Поступила в редакцию 14.02.2013 г.*