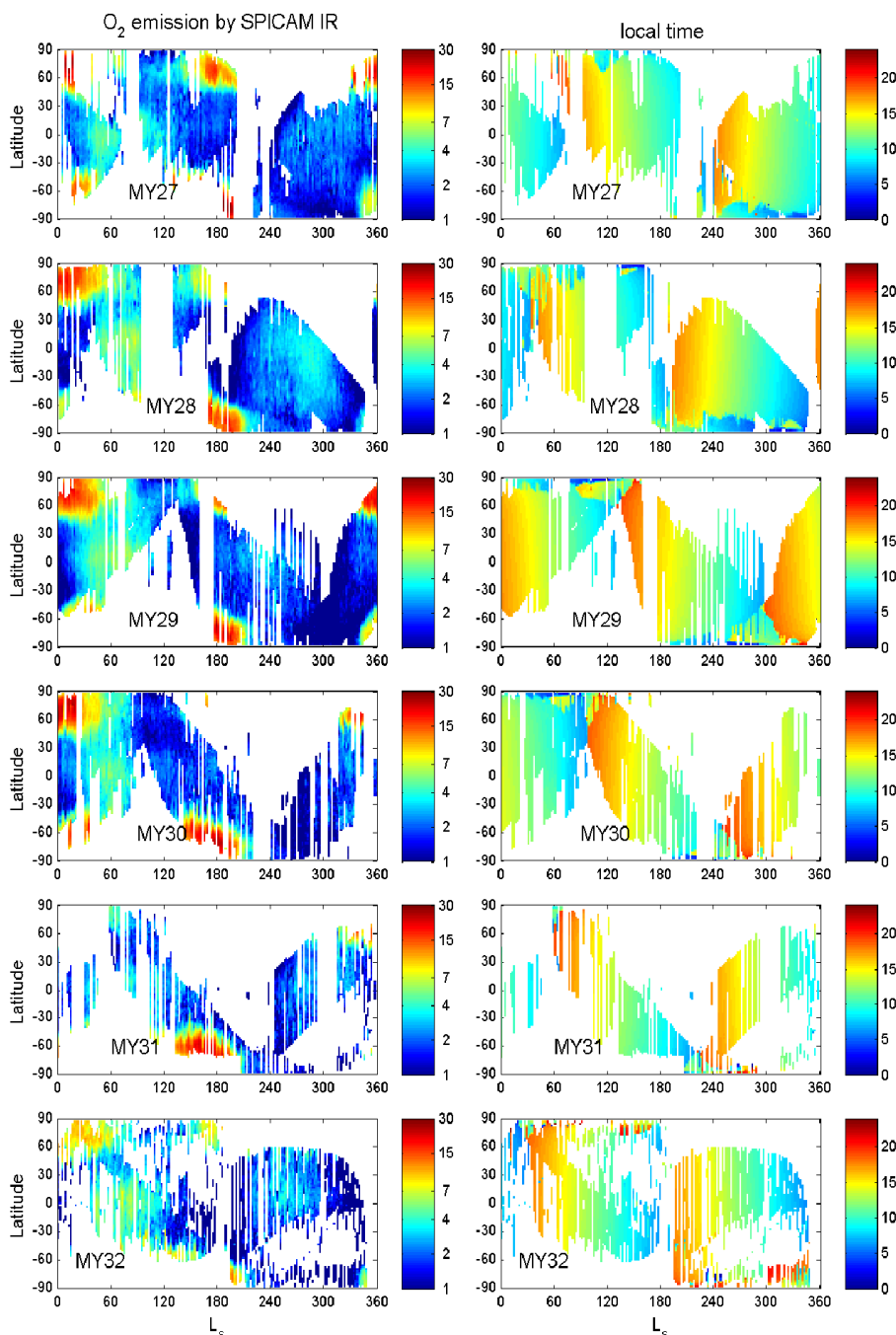


## 1. МАРС

### 1.1 Шесть марсианских лет наблюдений дневного свечения $O_2(a^1\Delta_g)$ в атмосфере Марса по данным СПИКАМ

Дневное свечение  $O_2(a^1\Delta_g)$  в полосе 1,27 мкм на Марсе является результатом фотодиссоциации озона УФ излучением. Спектрометр СПИКАМ ИК на борту орбитального аппарата Mars Express наблюдает свечение кислорода в атмосфере Марса, начиная с 2004 г.. Коллективом были обработаны и проанализированы данные за 6 марсианских лет с конца марсианского года (MY) 26 (начало 2004г.) по конец MY32 (середина 2015 г.).



*Рис. Слева: Сезонное распределение свечения  $O_2(a^1\Delta_g)$  (MR) с MУ27 до MУ32 (2004-2015).*

*Справа: изменения местного времени (в часах) для наблюдений Марс-Экспресс.*

Своего максимального значения  $\sim 31$  MR свечение достигает в начале северной и южной весны в обоих полушариях. Около экватора в период афелия интенсивность свечения не превышает 5-8 MR за все годы наблюдений. Минимальных значений не более 1-2 MR свечение достигает в южном полушарии летом. Сравнение данных наблюдений с данными модели общей циркуляции GCM и одновременными измерениями количества озона спектрометром СПИКАМ УФ позволило получить скорость дезактивации возбужденных молекул кислорода при столкновении с  $CO_2$ ,  $k = 0,73 \times 10^{-20}$  см/молек/сек. Исследование межгодовых вариаций озона по наблюдениям «Марс-Экспресс» затруднено дрейфом местного времени от орбиты к орбите и из года в год для одного и того же сезона. Был разработан алгоритм коррекции измерений свечения за местное время на базе модели общей циркуляции Марса. В результате сезонный цикл  $O_2(a^1\Delta_g)$  оказался достаточно стабильным со средними межгодовыми вариациями около 21%, что хорошо согласуется с данными наземных наблюдений (Krasnopolsky, 2013). Наибольшую изменчивость показали средние широты северной и южной весной, что совпадает с сублимацией полярных шапок в обоих полушариях. Южные широты также показывают высокую изменчивость от года к году в летний период ( $L_s = 270-330^\circ$ ), что явно относится к пылевой активности в этот период. Сравнение с одновременными наблюдениями водяного пара показывает, что дневное свечение зависит от вариаций  $H_2O$ , и их антикорреляция подтверждается.

## **2. ВЕНЕРА**

### **2.1 Свойства аэрозолей надоблачной дымки Венеры**

#### **2.1.1 Свойства аэрозолей надоблачной дымки Венеры по данным СПИКАВ ИК на КА Венера-Экспресс**

СПИКАВ ИК – один из каналов эксперимента SPICAV/SOIR на борту космического аппарата Venus Express, работающий в диапазоне 0.65-1.7 мкм. В работе представлены результаты, полученные по 196 солнечным затмениям, выполненным с мая 2006 года по ноябрь 2014 года. Вертикальные профили аэрозольной экстинкции были получены на 10 длинах волн ближнего ИК диапазона на высотах от 70 до 95 км с вертикальным разрешением от 1 до 25 км в зависимости от расстояния КА до лимба Венеры. Высота дымки выше вблизи экватора, чем около полюса. Шкала высот верхней дымки составляет 3-4 км. Отдельные слои аэрозоля были обнаружены на высотах от 70 до 90 км. Предполагая, что частицы верхней дымки состоят из серной кислоты, были получены размеры частиц на разных высотах. Для некоторых орбит получено бимодальное распределение с усредненным радиусом для моды 1  $0,13 \pm 0,03$  мкм и для моды 2  $0,84 \pm 0,18$  мкм. Радиусы частиц имеют тенденцию группироваться по сериям наблюдений затмений и изменяются на шкале времени в несколько месяцев. В случае одномодального распределения получены радиусы  $r_{eff} = 0.58 \pm 0.21$  мкм на высотах 70-80 км и  $r_{eff} = 0.40 \pm 0.21$  мкм выше 80 км, при этом значения радиусов в 1,5-2 раза меньше в высоких широтах, чем в низких, и на 20-30% меньше утром, чем вечером. В случае бимодального распределения численная плотность частиц плавно уменьшается для обеих мод, от  $\sim 500$  см<sup>-3</sup> в 75 км до  $\sim 50$  см<sup>-3</sup> на 90 км для моды 1, и от  $\sim 1$  см<sup>-3</sup> в 75 км до  $\sim 0,1$  см<sup>-3</sup> на 90 км для моды 2.

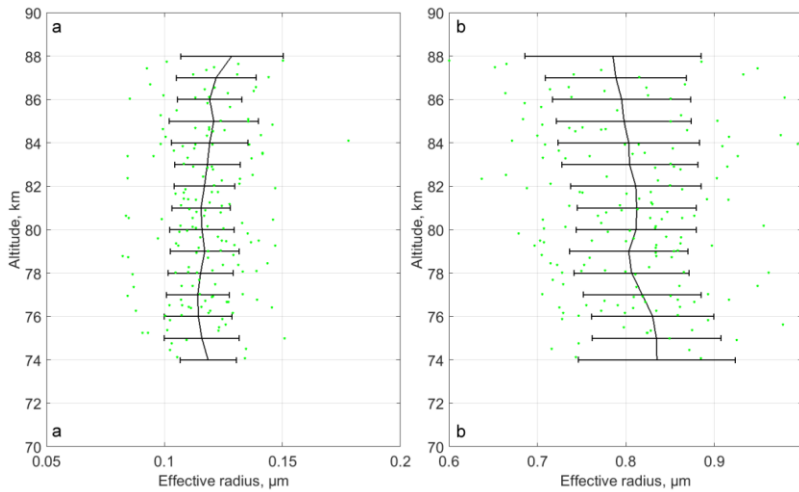


Рис. Средние профили эффективного радиуса для частиц моды 1 (a) и моды 2 (b) для всех орбит и высот, на которых получено бимодальное распределение по размерам.

**2.1.2 Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры по данным лимбовых наблюдений на ночной стороне планеты в эксперименте VIRTIS на КА Venus Express**

Излучение, наблюдаемое на ночной стороне Венеры в окнах прозрачности между сильными полосами поглощения углекислого газа, рассеивается облаками Венеры, и таким образом, оказывается возможным восстановление плотности аэрозольных частиц верхней части облачного слоя и надоблачной дымки по лимбовым наблюдениям. Разработан метод восстановления плотности аэрозольных частиц в интервале высот 80-90 км по измерениям в окнах прозрачности 1.1, 1.18, 1.74 и 2.3 мкм. Для всех имеющихся лимбовых сеансов измерений, выполненных картирующим спектрометром VIRTIS на КА Venus Express (89 сеансов с 44 орбит), усредненных с шагом 5 градусов по широте, восстановлены профили логарифма экстинкции. Величина коэффициента полного ослабления на высоте 85 км находится в  $3\sigma$ -интервале от  $10^{-4}$  до  $10^{-2}$  км $^{-1}$  при средней величине  $\approx 10^{-3}$  км $^{-1}$ . Эквивалентная средняя плотность аэрозольных частиц моды 2 на высоте 85 км составляет  $\approx 0.1$  см $^{-3}$ , а субмикронных частиц  $\approx 10$  см $^{-3}$ , что согласуется с результатами измерений методом солнечных затмений в эксперименте SPICAV/SOIR. Плотность дымки подвержена вариациям ( $\pm$ ) на порядок величины, при этом она снижается в высоких широтах и меньше на утренней стороне, чем на ночной, что объясняется фотохимическим образованием сернокислотной дымки в дневное время. Максимум плотности дымки на 20-22 часах местного времени на широтах 20-50°, что, однако, может быть связано с ограниченным покрытием ночной стороны планеты лимбовыми наблюдениями Venus Express.

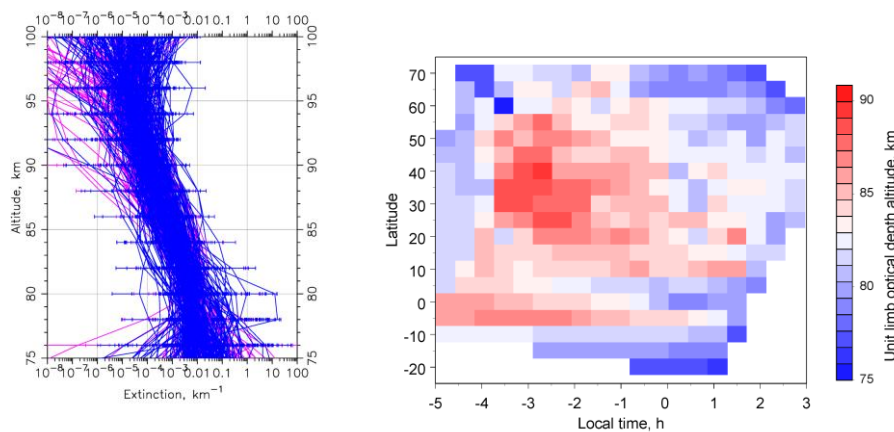


Рис. Вертикальные профили экстинкции надоблачной дымки (слева) и высота лимба, т.е. уровня единичной оптической толщины вдоль луча зрения (справа), как функция местного времени и широты.

## **2.2 Исследование рассеяния света аэрозольной средой в верхнем облачном слое Венеры (на основе данных камеры VMC миссии Venus Express)**

Цикл из четырех работ (2014-2015 гг.) продолжает исследования оптических свойств частиц в атмосферах Марса и Венеры. За восемь лет работы аппарата Venus Express камера VMC (Venus Monitoring Camera) передала около 350 тысяч изображений верхнего облачного слоя Венеры в четырех спектральных каналах (от УФ до ближнего ИК), среди которых особый интерес представляют измерения на малых углах фазы, где можно наблюдать явление глории, типичное для среды, состоящей из сферических частиц. Сам факт наблюдения глории на Венере подтверждает, что основным компонентом облаков в верхнем слое являются сферические частицы (капли) с узким распределением по размерам. Линейные размеры глории позволяют оценить масштабы однородности верхнего облачного слоя (в смысле размеров частиц, вносящих основной вклад в рассеяние) - до 1200 км. Угловые положения максимума и минимума яркости в глории в разных длинах волн дают однозначную оценку размеров капель, которая хорошо согласуется так называемой модой 2 (радиус около 1.0-1.2 мкм). Наблюдаются временные и пространственные вариации размеров частиц от 1.2-1.4 мкм у экватора до 0.9 мкм на средних и высоких широтах. Показано, что яркая УФ-полоса, часто наблюдаемая около 50°S, обусловлена увеличением числа капель серной кислоты радиусом 0.8-0.9 мкм в верхних облаках и дымке. В ряде случаев, особенно на низких широтах, форма измеренного фазового профиля требует предположения о действительной части показателя преломления, повышенной (на несколько процентов) по сравнению со значением, типичным в данных условиях для 75% серной кислоты, из которой, как известно из предыдущих исследований, состоят частицы моды 2. Анализ показал, что повышение показателя преломления из-за возможного понижения температуры недостаточно эффективно. Более вероятно, что оно вызвано присутствием небольшой примеси с высоким показателем преломления в каплях серной кислоты (1-3% по объему). Такой примесью могут быть те же вещества, которые рассматриваются в качестве кандидатов на роль неизвестного "УФ поглотителя" - хлорид железа или сера. Возможно, такие сложные частицы образуются в процессе конденсации на всегда присутствующих в облаках мелких субмикронных частицах моды 1, часть из которых может состоять из УФ поглощающего вещества. Более того, показано, что вариации состава субмикронной моды играют ключевую роль в образовании УФ контрастов по крайней мере на низких широтах около местного полудня, а размеры частиц моды 2 в УФ-ярких и темных районах облаков, видимых на данном VMC изображении при одной и той же геометрии, одинаковы.

## **2.3 Содержание водяного пара в средней атмосфере Венеры по данным СПИКАВ**

В 2015 г. завершена обработка данных надирных дневных наблюдений, полученных АОПФ спектрометром СПИКАВ на борту КА Венера-Экспресс в диапазоне 1.3-1.5 мкм. Измерения охватывает диапазон времени от апреля 2006 г. до ноября 2014 г. Относительное содержание водяного пара получено по полосе 1.38 мкм, причем высота формирования линий воды охватывает широкий диапазон от 55 до 70 км со средней высотой 63 км. На низких широтах (20°S-20°N) содержание H<sub>2</sub>O равно 6,2±1,2 ppm. Между 30° и 50° широты в обоих полушариях, наблюдается локальный минимум со значением 5,3±1 ppm. В высоких широтах обоих полушарий, содержание воды колеблется от 4 до 12 ppm со средним значением 7,3 ± 1,5 ppm. Максимум воды на низких широтах подтверждает возможную конвекцию и перенос пара из нижних слоев атмосферы. Вертикальный градиент водяного пара внутри облаков объясняет увеличение содержания воды вблизи полюсов, что коррелирует с уменьшением верхней границы облачного слоя. В то же время в средних широтах минимум водяного пара не коррелирует с высотой верхней границы облаков. Долготно-широтное распределение водяного пара также не показало точной корреляции с верхней границей облаков (*рис*). В экваториальной области наблюдается долготная асимметрия в распределении H<sub>2</sub>O с максимумом 7-7,5 ppm в диапазоне долгот от -120° до 30°. Минимум водяного пара наблюдается в диапазоне

долгот от 30° до 160° со значениями не более 6 ppm. Зависимости водяного пара от местного времени на разных широтах найдено не было. За более чем 8 лет наблюдений КА «Венера-Экспресс» не было также обнаружено и долговременных вариаций водяного пара в облачном слое.

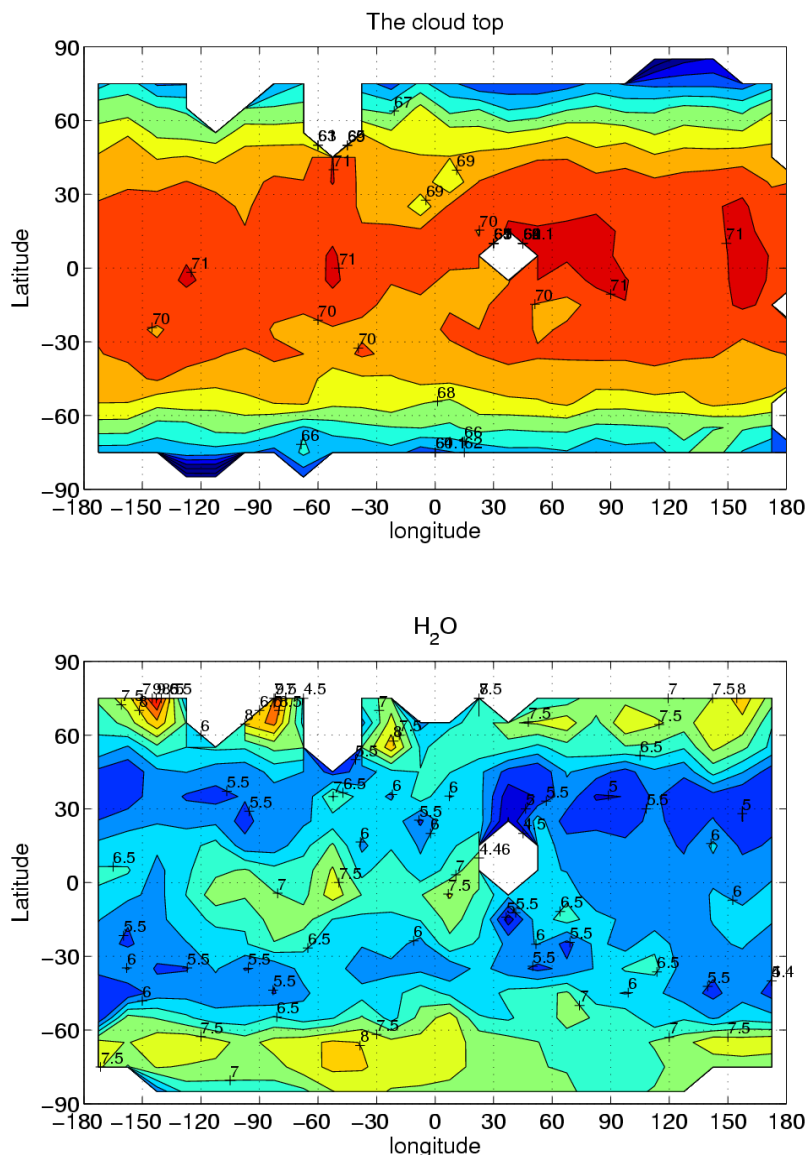


Рис. Вверху: пространственное распределение высота облачного слоя по полосе 1.48 мкм в км. Внизу: пространственное распределение относительного содержания H<sub>2</sub>O в ppm по полосе 1.38 мкм.

#### 2.4 Исследование распределения малых составляющих мезосферы Венеры

В 2015 году были проведены исследования содержания двуокиси серы (SO<sub>2</sub>) на ночной стороне Венеры в области высот мезопаузы-криосферы (85-110 км). Исследование проводилось на основе орбитальных измерений УФ спектрометра SPICAV аппарата «Венера-Экспресс» в режиме звездного просвечивания и солнечного просвечиваний. Набрана полная статистика наблюдений за все время эксперимента – с 2006 по 2014 годы. Получены годовые и широтные вариации содержания SO<sub>2</sub> в области мезопаузы (90-100 км), а также вариации по времени суток на Венере (Рис. 1).

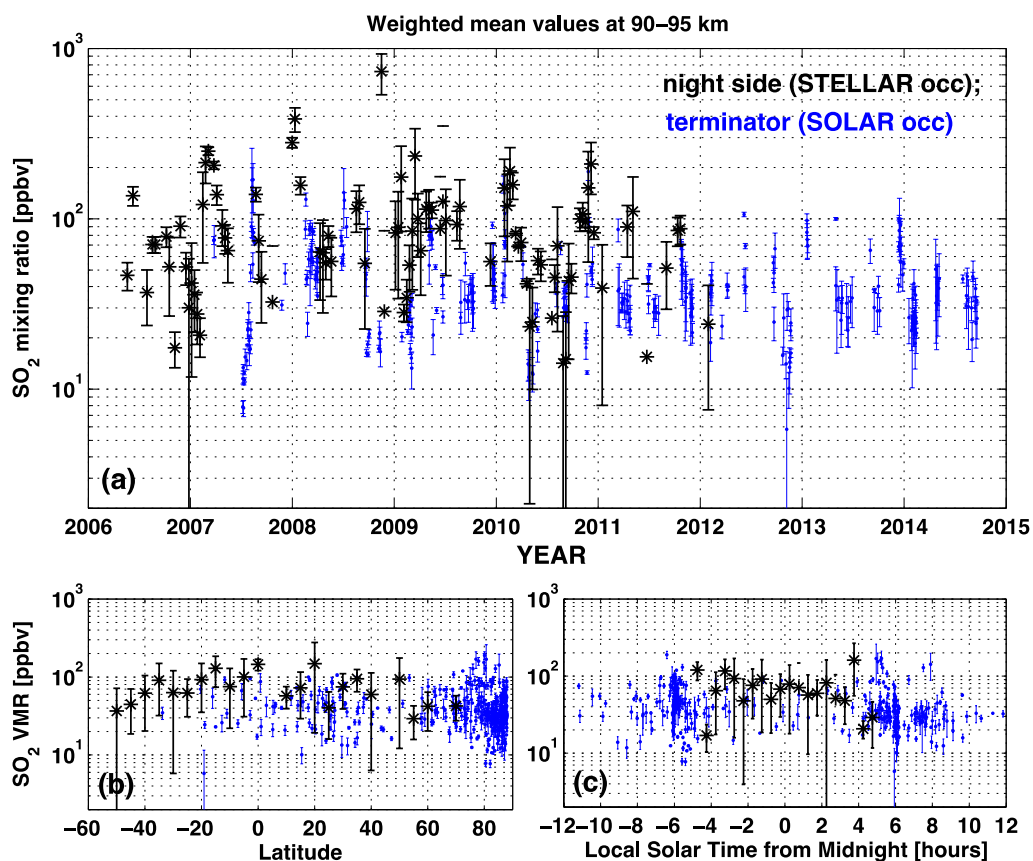


Рис. 1. Временные (a,c) и широтные (b) вариации содержания SO<sub>2</sub> на уровне 90-95 км в мезосфере: синий – область терминатора (солнечные просвечивания), черный – ночная сторона (звездные просвечивания).

### 2.5 «Изображение» деталей рельефа поверхности на разных уровнях в мезосфере от 55 до 95 км.

Венера-15 (1983г.) работала на полярной орбите, и измерения на дневной и ночной стороне в северном полушарии происходили с разницей по времени 1 час, разнесенные на 12 часов по местному времени и 180 град по долготе. Спектр в области 6-40 мкм позволяет зондировать атмосферу от верхней границы среднего облачного слоя 55 км до 95 км.

Сравнение изолиний различных параметров на разных уровнях в атмосфере с рельефом Венеры (по картам КА Магеллан) показало, что изолинии, таких параметров как положение границ верхнего (67 км) и среднего (55 км) облачного слоя, изотермы на высотах от 55 до 95 км повторяют наиболее выраженные детали рельефа (Иштар до 11 км высоты, Бетта Регио, 5км, низменность Аталанта, 0км) со сдвигом по долготе около 30 градусов, т.е смещенные по отношению к рельефу на высотах от 55 до 95 на одну и ту же величину около 3000 км, в направлении суперротации. Скорость ветра в среднеширотном ветровом джете в поле термического ветра на высоте 60-65 км коррелирует с рельефом, так что минимум скорости наблюдается над Иштар, а максимум над Аталанта с разницей до 30м/с, также со смещением по долготе около 30° (рис2.1)

Корреляция с рельефом и сдвиг приблизительно на 30 град по долготе в сторону суперротации ( на запад) наблюдается также в поле зонального ветра, полученного по УФ-изображениям камеры VMC, и изолиний высоты верхней границы облаков по данным спектрометра VIRTIS-M на Венере Экспресс.

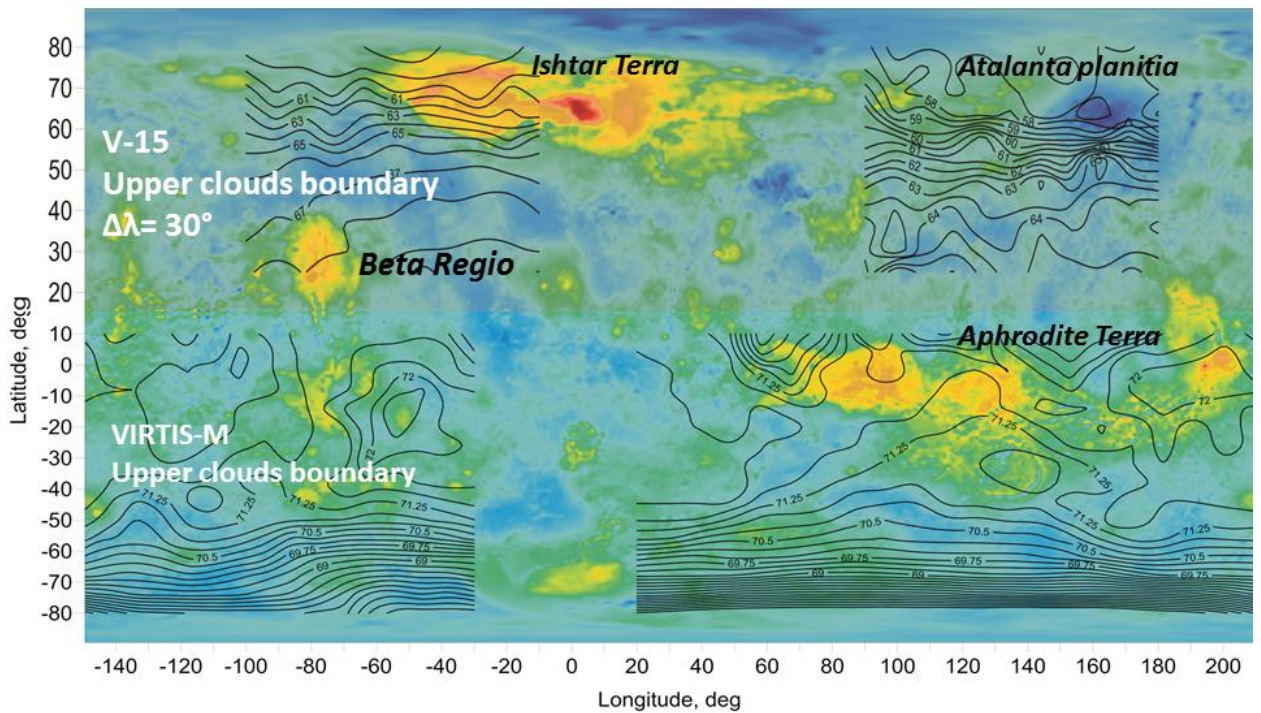


Рис.2.1.Изображение деталей рельефа поверхности и изолинии высоты верхней границы облаков.

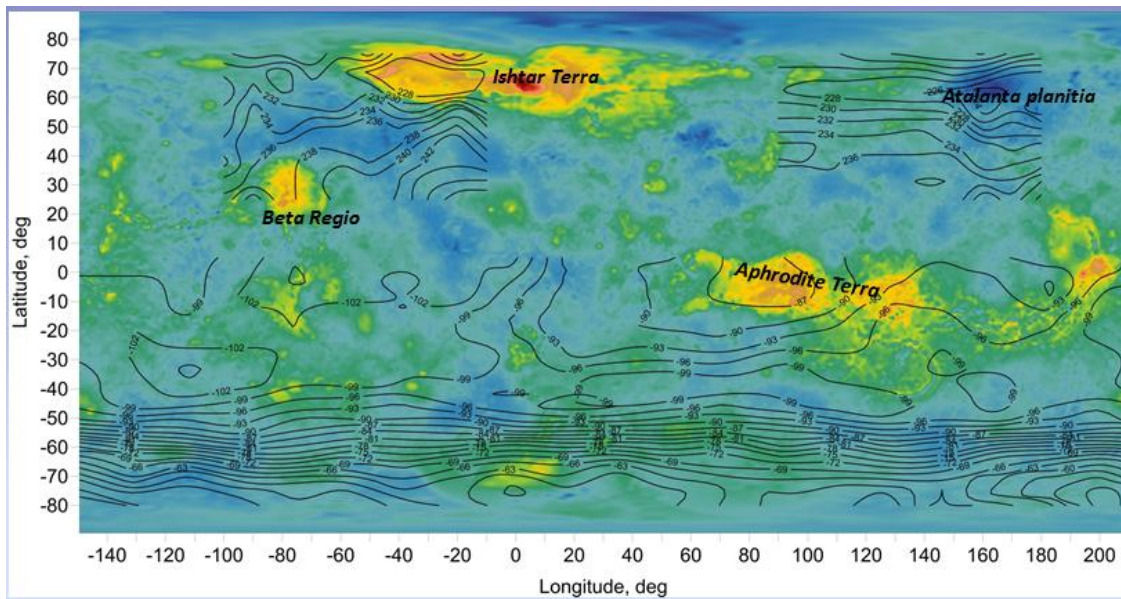


Рис. 2.2. Температура на уровне верхней границы облаков – изотермы в северном полушарии (Венера-15) и изолинии скоростей зонального ветра, измеренного по УФ-изображениям камеры VMC на Венере Экспресс в южном полушарии, наложены на карту Венеры (Магеллан). Корреляция изолиний и температуры, и ветра с рельефом превышает 90 и 80%, соответственно. Более низкие температуры наблюдаются над более высокими областями (Иштар). Также как и в случае Венеры 15 над горами наблюдаются более низкие скорости ветра (20 м/с).

Рассматриваемые данные получены в разное время разными инструментами и КА (30 лет между Venera-15 and VEX). «Изображение» поверхности наблюдается:

- в изолиниях высоты верхней границы верхнего и среднего облачного слоев (Венера-15)

- в изотермах на высотах от 55 до 95 км (Венера-15)
- на высоте верхней границы облаков в полях ветра, УФ-альбедо, в изолиниях высоты верхней границы облаков (Венера Экспресс).

Достаточно четкие «изображения» деталей рельефа в диапазоне высот 55-95 км (Венера-15) можно связать с гравитационными волнами, генерируемыми ветром при встрече с деталями рельефа, эта гипотеза может объяснить практически независимый от высоты уровня в атмосфере сдвиг по отношению к рельефу и наложить ограничение на распространение гравитационных волн в нижней атмосфере Венеры. Результат получен впервые. Существующие в настоящее время модели общей циркуляции атмосферы Венеры не объясняют наблюдаемых эффектов.

## 2.6 Влияние подстилающей поверхности Венеры на динамику верхнего облачного слоя облаков по данным многолетних наблюдений в УФ с борта VMC (Venus Express)»

В результате глубокого анализа данных по динамике верхнего облачного слоя Венеры, полученных в период с мая 2006 по сентябрь 2014 широкоугольной камерой VMC, была обнаружена корреляция зональной компоненты скорости горизонтального потока с рельефом подстилающей поверхности.

Ультрафиолетовые изображения (365 нм) верхнего облачного покрова Венеры, полученные широкоугольной камерой VMC с борта Venus Express, позволили собрать обширный материал по динамике атмосферы на высоте  $67 \pm 2$  км. Данные по скорости горизонтального потока были получены по оценке смещения идентифицированных деталей облачного покрова. Данные охватывают широкий диапазон местного времени (от 9 до 17 часов) и покрывают практически полностью южное полушарие планеты (от  $0^\circ$  до  $80^\circ$  ю.ш.).

Сравнение долготных профилей высоты рельефа подстилающей поверхности с зональной компонентой скорости потока позволяет сделать вывод о корреляции высоты рельефа с величиной скорости потока: зональная скорость существенно ниже над возвышенностями по сравнению со скоростью над низинными участками поверхности. В частности, для долготного профиля, полученного в широтном диапазоне от  $5^\circ$  до  $15^\circ$  к югу от экватора зональная скорость демонстрирует заметное изменение с географической долготой. В диапазоне  $200-330^\circ$  средняя скорость составляет около  $-100.9$  м/с, в то время как в диапазоне  $60-100^\circ$  скорость достигает значений  $-83.4$  м/с, т.е. амплитуда колебаний составляет  $17.5$  м/с (Рис.1).

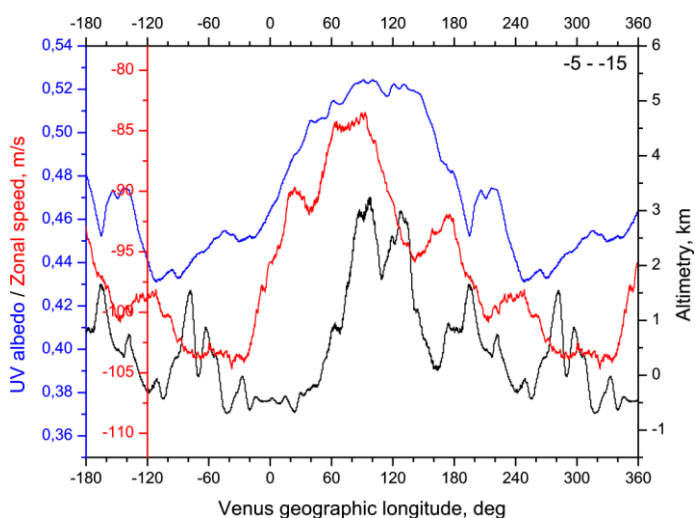


Рис.1. Долготный профиль альтиметрии (черный), зональной компоненты скорости зонального потока (красный) и УФ альбедо (синий), полученные усреднением в полосе от  $5^\circ$  ю.ш. до  $15^\circ$  ю.ш.



Карта средней скорости зонального потока, построенная на основе значений, отфильтрованных по местному времени в интервале 12-13 часов, а также соответствующая карта УФ альbedo представлена на Рис. 2. Хорошо заметна корреляция скорости с областью Земля Афродиты. Смещение поля скорости относительно поверхности составляет примерно  $30^\circ$  ( $\sim 3,200$  км) в сторону суперротации атмосферы. УФ альbedo (365 нм) также демонстрирует корреляцию с высотой подстилающего рельефа. Над Землей Афродиты УФ альbedo на 20% выше, чем над низинными областями. Альбедная карта хорошо согласуется с распределением  $H_2O$  вблизи экватора: более низкое ультрафиолетовое альbedo соответствует повышенному содержанию  $H_2O$ . Взаимосвязь динамических параметров, а также УФ альbedo и содержания  $H_2O$ , с высотой поверхности обнаружена впервые. В качестве возможного объяснения предлагается механизм гравитационных волн, возникающих вблизи поверхности при столкновении горизонтального потока с горным массивом.

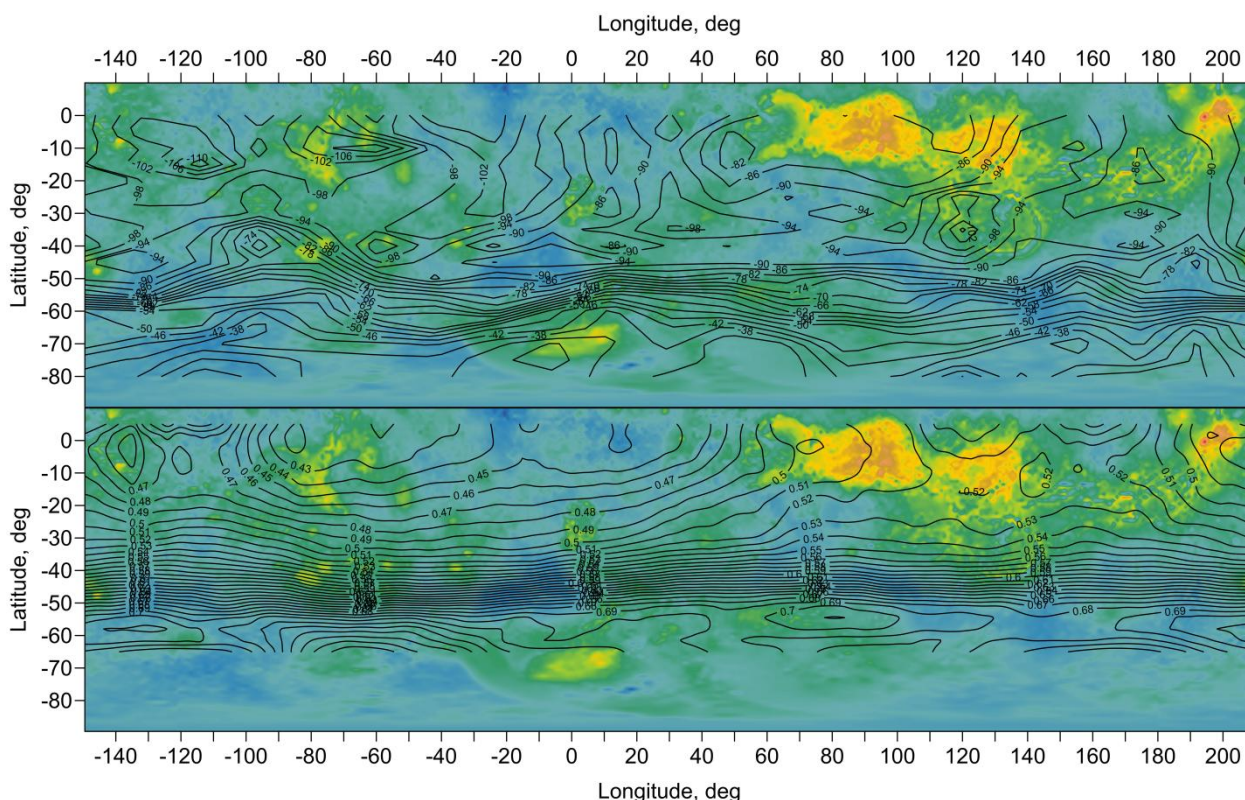


Рис. 2. Среднее поле скоростей зонального ветра (вверху) и соответствующее среднее распределение УФ альbedo (внизу), наложенные на альтиметрическую карту поверхности Венеры, полученную по данным Magellan. Средние поля скорости и альbedo смещены на  $30^\circ$  к востоку для компенсации сдвига от суперротации.

## 2.7 Изучение свечения $O_2$ и температуры верхней мезосферы по измерениям VIRTIS

-Проведена попытка верификации алгоритма расчёта теплового баланса в верхних слоях атмосферы Венеры с помощью метода Монте-Карло.

-Проведён детальный анализ ночного свечения кислорода 1.27 мкм по измерениям прибора VIRTIS. В частности, изучена корреляция свечения и высоты рельефа планеты. Проведён анализ изменения характера свечения вдоль времени наблюдения.

-Исследованы временные вариации температур мезосферы на различных высотах; корреляция с интенсивностью свечения кислорода и высотой рельефа.

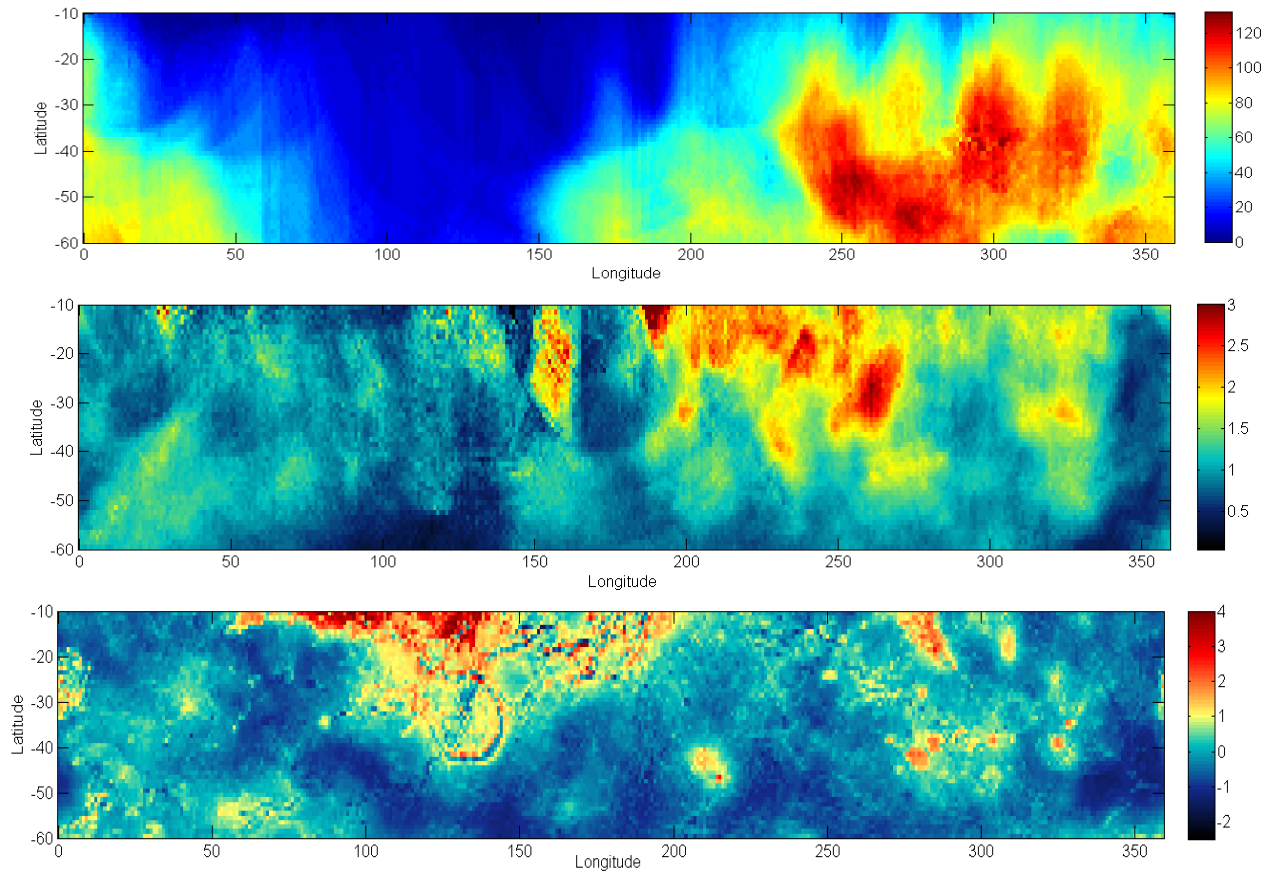


Рис.1. Распределение свечения кислорода на ночной стороне Венеры в координатах широта-долгота (данные VIRTIS-M). Вверху - количество измерений в южном полушарии, в середине - распределение интенсивности свечения кислорода в МРл, внизу - топография Венеры в соответствующем координатном диапазоне.

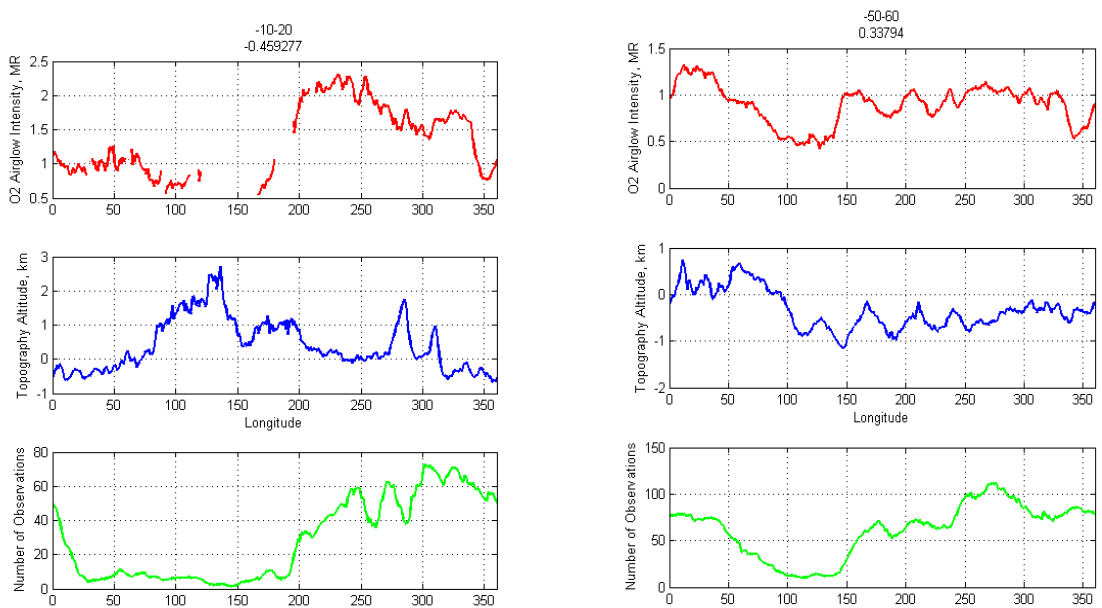


Рис.2. Связь интенсивности свечения кислорода и топографии поверхности. Слева - область экваториальных широт (10-20 град. ю.ш.), справа - средних (50-60 град. ю.ш.).

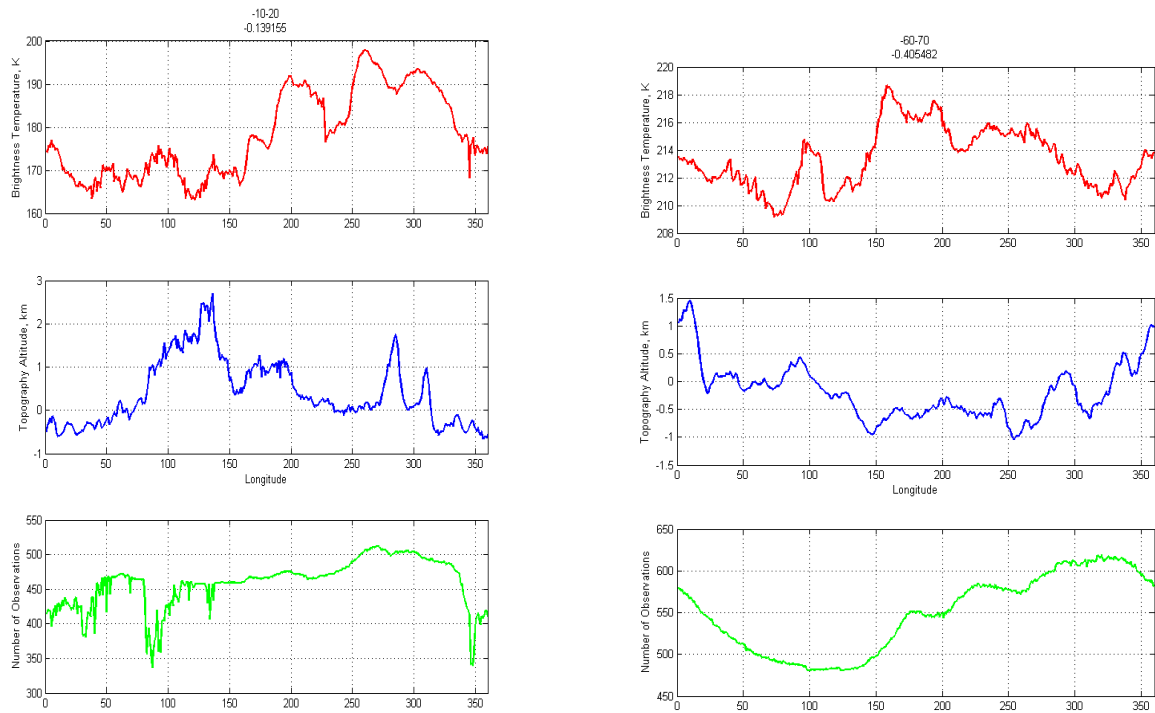


Рис.3. Связь интенсивности яркостной температуры на ночной стороне на высоте 95 км и топографии поверхности. Слева - область экваториальных широт (10-20 град. ю.ш.), справа - низких (60-70 град. ю.ш.).

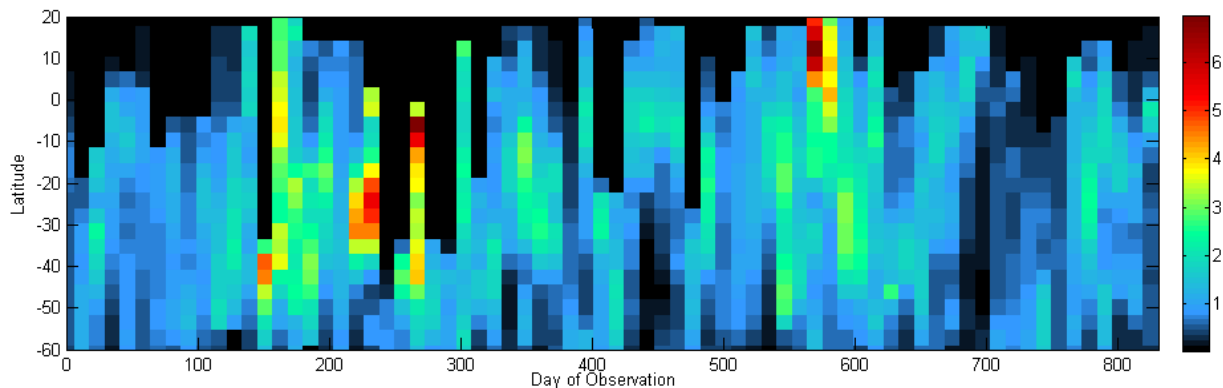


Рис.4. Временные вариации свечения кислорода (ночная сторона, южное полушарие) на протяжении 840 дней наблюдения.

## 2.8 Радиационный код SCATRD\_OFOS

Описание.

Радиационный код SCATRD разрабатывается д. ф.-м. н. Васильевым А.В. (СПбГУ). В основе расчёта - метод статистического моделирования (Монте-Карло), позволяющий учесть многократное рассеяние излучения в сферической атмосфере. На базе этого кода создана подпрограмма (на языке программирования Fortran) SCATRD\_OFOS для анализа орбитальных спектрометрических измерений.

Результаты.

Осуществлялась текущая работа по улучшению SCATRD\_OFOS. Были исправлены незначительные ошибки (не влияющие на результаты проведённых вычислений); оптимизированы выполнения долгих циклов. Уже в следующем году планируется учёт собственного теплового излучения атмосферы и теплового излучения поверхности в расчётах.

К сожалению, исследование надоблачной дымки по данным лимбовых наблюдений Венеры в эксперименте VIRTIS на КА Venus Express оказалось невозможным путём

прямого применения кода SCATRD. Код, как показали расчёты, не срабатывает для атмосфер и областей спектра с оптическими толщинами значительно превышающими 1 (а это так, даже если рассматривать лишь надоблачную атмосферу). Начата работа над специальной модификацией кода SCATRD для указанной задачи (оптически толстая атмосфера с нижней границей – границей облачного слоя), которую планируется завершить в следующем году.

## **2.9 Изучение связей физических характеристик планет земного типа с их возможной обитаемостью и свойствами их биосферы**

### **2.9.1 Интерпретация геологических объектов на обработанных заново панорамах Венеры-14**

При изучении обработанных заново панорам поверхности Венеры 1982 г. обнаружены необычные геологические образования, выходы на поверхность вязко-пластической среды и 1.5 –км кратер (находившийся на краю панорамы и незамеченный до новой обработки). Новая обработка архивных материалов телевизионного эксперимента, проведенного с помощью аппарата ВЕНЕРА\_14 в марте 1982 г. на поверхности планеты Венера, значительно улучшило четкость изображения. Обнаружен необычный геологический объект, расположенный сравнительно близко к камере, что позволило изучить его детали. Объект имеет форму невысокого длинного вала, образованного сравнительно тонким, почти вертикально расположенным зазубренным пластом. Вал проходит по контуру 1.5–2 метрового овального образования, выделяющегося на слоистой поверхности. Расположение вала позволяет предположить, что его материал выдавливается из-под слоистых плит, окружающих овальное образование. Часть вала, напоминая падающую волну, склонилась и частично ложится на поверхность, образуя напластования. Объект, по-видимому, образован породами, остающимися в момент появления на поверхности в полуразмягченном (пластичном) состоянии при температуре поверхности Венеры (около 740 К). Предполагается, что исходя из физико-химических условий и сведений о составе поверхности Венеры, можно сделать предположения о природе наблюдаемой пластичной среды и даже моделировать последнюю в лаборатории.

Телевизионные камеры аппаратов Венера предназначались для составления общих представлений о ближнем плане поверхности планеты. Но их возможности оказались достаточными и для получения изображения более удаленных объектов. В результате новой обработки архивных материалов, удалось получить детальное изображение близко расположенного 1.5-километрового кратера. Особенности его структуры указывают, по-видимому, на его вулканическую природу. Все полученные ранее подробные изображения подобных образований составлялись только по данным орбитальной радиолокации и соответствуют размерам в десятки километров.

### **2.9.2 Планеты на низких орбитах у звезд поздних классов**

Можно ли за счет уменьшения большой полуоси орбиты  $a$  получить такие же, как на Земле, условия на планетах звезд поздних классов? Такое предположение высказывал К.Саган еще в 1975. Если равновесная температура  $T$  планеты такая же, как у Земли (планета имеет большую полуось орбиты  $a$ , сферическое альбеда  $A_b$  и находится в системе звезды, создающей болометрическую освещенность  $E_1$ ), то условием равенства последней с солнечной болометрической постоянной ( $E_0$ ) будет:

$$a = [2.512 \exp (M_b - M_0)]^{1/2},$$

где  $M_b$  и  $M_0$  - абсолютные болометрические светимости звезды и Солнца. При равных альбеда Земли и такой планеты, её равновесная температура будет равна земной (ниже  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана):

$$T = [(1 - A_b) E_1 / (4a^2\sigma)]^{1/4}.$$

Почти во всех случаях спектральных классов от K4 до M3, большая полуось  $a$  оказывается меньше, чем у орбиты Меркурия (0.39 а.е.). При столь малых  $a$  возникает сильное приливное рассеяние энергии; такая планета неизбежно потеряет свой

вращательный момент и окажется в резонансной "ловушке" с синхронизацией вращения и обращения. Но это планеты другого класса, чем Земля.

### **2.9.3 Продолжено исследование гипотетических форм жизни на Венере**

Вместе с тем, изучение связей физических характеристик планет земного типа с их возможной обитаемостью и свойствами их биосферы приводит к возможной интерпретации объектов обработанных заново панорам Венеры-13 и Венеры-14 как форм гипотетической жизни на Венере. 5 статей продолжают исследование гипотетических форм жизни на Венере («Космические исследования», «Доклады АН», Acta Astronautica, Journal of Astrobiology и Global Journal of Science Frontier Research.) Статьи посвящены новым объектам фауны («Доклады АН») и гипотетической флоры Венеры.

## **3. РАННЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПЛАНЕТНЫХ ТЕЛ**

### **3.1 Проведены модельные эксперименты по высокотемпературному испарению одного из основных минералов метеоритов - оливина, с целью изучения особенностей ударно-испарительной модификации его состава**

Экспериментально установлено, что в условиях высокотемпературного испарения, характерного для высокоскоростных ударных процессов, улетучивание вещества из оливина происходит при ведущей роли энстатитового ( $MgSiO_3$ ) кластера.

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. Ударные процессы рассматриваются как один из механизмов образования хондр метеоритов. Формирование химического состава летучих веществ в парогазовом облаке во многом зависит от состава конденсированных силикатных частиц, участвующих в гетерогенных химических процессах. Изменение химического состава ударного расплава происходит в результате селективного испарения, основные закономерности которого оцениваются по индивидуальной летучести входящих в расплав веществ.

Наши эксперименты, моделирующие высокотемпературное испарение при ударном нагреве 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. С другой стороны, образуются предпосылки для формирования объектов с составами, стехиометричность которых задается составом кластеров.

### **3.2 Разработана модель дегазации Земли в предположении двух-резервуарного мантийного источника**

Анализ темпа дегазации модели двух-резервуарной мантии, основанной на  $^{244}Pu - ^{238}U - ^{129}I - Xe(Pu, U, I)$  изотопной системе, показал, что максимальные значения параметра дегазации достигают ПД =  $2 \times 10^{-4}$ . Впервые найдена зависимость между параметром дегазации и минимальным временем диссипации Xe из атмосферы Земли, которое меняется от  $10^8$  лет после формирования солнца (ПД  $\approx 10^{-7}$ ) до  $10^9$  лет (ПД  $\approx 10^{-4}$ ). Для моделирования ранней эволюции и дегазации Земли впервые объединены все три известные информативные изотопные системы, включающие (сравнительно) короткоживущие изотопы и позволяющие моделировать процессы ранней эволюции Земли на шкалах от 10 до 500 млн. лет.

Рассматриваемая модель дегазации предусматривает помимо резервуара летучих на границе ядро/мантия формирование в мантии Земли после сегрегации ядра древнего, менее дегазированного (богатого солнечными газами), не участвующего в мантийной конвекции резервуара; согласно оценкам, основанным на данных  $^{182}Hf - ^{182}W$  изотопной системы, - не ранее 30 млн лет после формирования солнечной системы. Такой резервуар мог сформироваться на поздних стадиях аккреции Земли из вещества океанической коры с добавкой недегазированного хондритового материала. Последующие процессы,

предусмотренные моделью, включают перенос благородных газов из резервуара в конвектирующую мантию и дегазацию мантии.

Для анализа темпа дегазации мантии выполненные расчеты показали, что максимальные значения параметра дегазации (отношения концентрации стабильного изотопа  $^{130}\text{Xe}$  в мантии в данный момент времени к его начальной концентрации) достигают  $\text{ПД} = 2 \times 10^{-4}$ , хотя и низкие опубликованные ранее значения,  $\approx 10^{-6}$ , так же позволяют получить решение. Показано, что  $^{244}\text{Pu} - ^{238}\text{U} - ^{129}\text{I} - \text{Xe}(\text{Pu}, \text{U}, \text{I})$  система позволяет определить максимальное значение параметра дегазации, но не весь диапазон возможных значений. Впервые найдена зависимость между параметром дегазации и минимальным временем диссипации  $\text{Xe}$  из атмосферы Земли, которое меняется от  $10^8$  лет ( $\text{ПД} \approx 10^{-7}$ ) до  $10^9$  лет ( $\text{ПД} \approx 10^{-4}$ ) после формирования солнечной системы.

Рисунок показывает зависимость между параметром дегазации и временем (отсчитываемым от времени образования Солнца), когда количество  $^{129}\text{Xe} (^{129}\text{I})$  в мантии было равным количеству этого изотопа в атмосфере Земли. Атмосфера перестала терять  $\text{Xe}$  не ранее этого времени. При умеренных параметрах дегазации  $\approx 10^{-4}$  атмосфера теряла ксенон не менее 1 млрд лет (!). Зависимость между этими фундаментальными параметрами получена впервые.

Для более определенного суждения о времени формирования резервуара в модель включена еще одна изотопная система,  $^{147}\text{Sm} - ^{146}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd} - ^{142}\text{Nd}$ , в которую входит и долгоживущий ( $^{147}\text{Sm}$ , период полураспада 105 млрд лет) и короткоживущий ( $^{146}\text{Sm}$ , период полураспада 0.1 млрд лет) радиоактивные изотопы самария, распадающиеся (альфа-распад) в изотопы неодима. К настоящему времени в рамках модели удалось объяснить различие между изотопным составом неодима в хондритовых метеоритах и в силикатных оболочках Земли, - обедненной мантии и континентальной коре, в случае наиболее раннего формирования резервуара и его массе, не превышающей 10 % от массы мантии.

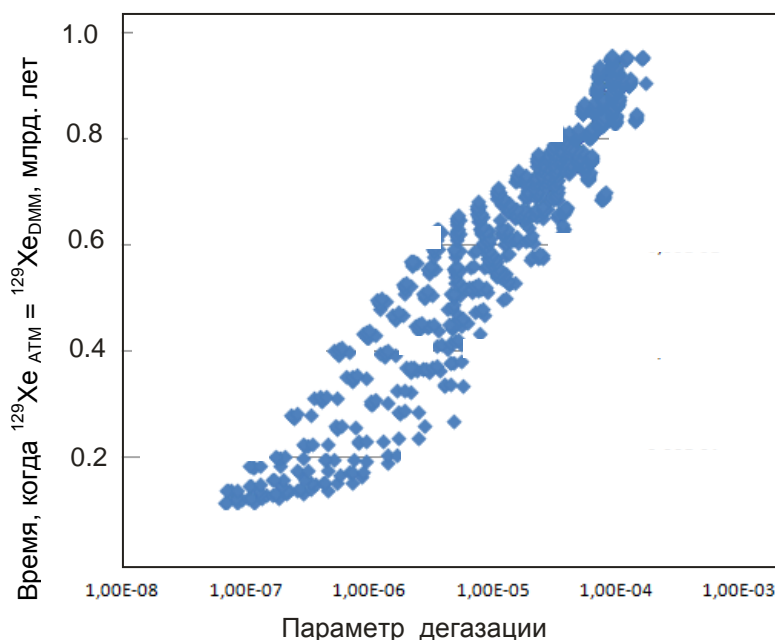


Рис. Зависимость между параметром дегазации и временем (отсчитываемым от времени образования Солнца), когда количество  $^{129}\text{Xe} (^{129}\text{I})$  в мантии было равным количеству этого изотопа в атмосфере Земли.

### 3.3 Экспериментально изучены особенности синтеза сложных органических соединений в азотно-метановой атмосфере при высокоскоростных ударных событиях, происходящих при падении каменных тел

Показано, что азотно-метановая атмосфера способствует синтезу сложных органических веществ при высокоскоростных ударных событиях с участием каменных тел даже при малом содержании в ней метана. При этом падающие тела могут не содержать углерод, водород и другие химические элементы, необходимые для образования органики. В подобных условиях, заметный вклад в ударно-индуцируемый синтез сложных органических веществ, по-видимому, вносят гетерогенно-каталитические реакции, в том числе, реакции типа Фишера-Тропша.

Моделирование ударного испарения перидотита – минерального аналога каменных астероидов, было выполнено на лазерной установке при температуре ~ 4000-5000 К и длительности импульса ~  $10^{-3}$  с. Газовая среда (96 % об.  $N_2$  и 4% об.  $CH_4$ ,  $P=1$  атм) была возможным аналогом ранних атмосфер планет земной группы и соответствовала современному составу атмосферы спутника Сатурна – Титана. Методом пиролитической газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией показано, что твердые конденсаты, полученные в лазерных экспериментах, содержат относительно сложные низко- и высокомолекулярные (керогеноподобные) органические соединения. Основными продуктами пиролиза конденсатов (рис. 1) были бензол и алкилбензолы (в том числе длинноцепочечные), неразветвленные длинноцепочечные алифатические углеводороды, и разнообразные азотсодержащие вещества (алифатические и ароматические нитрилы и пиррол).

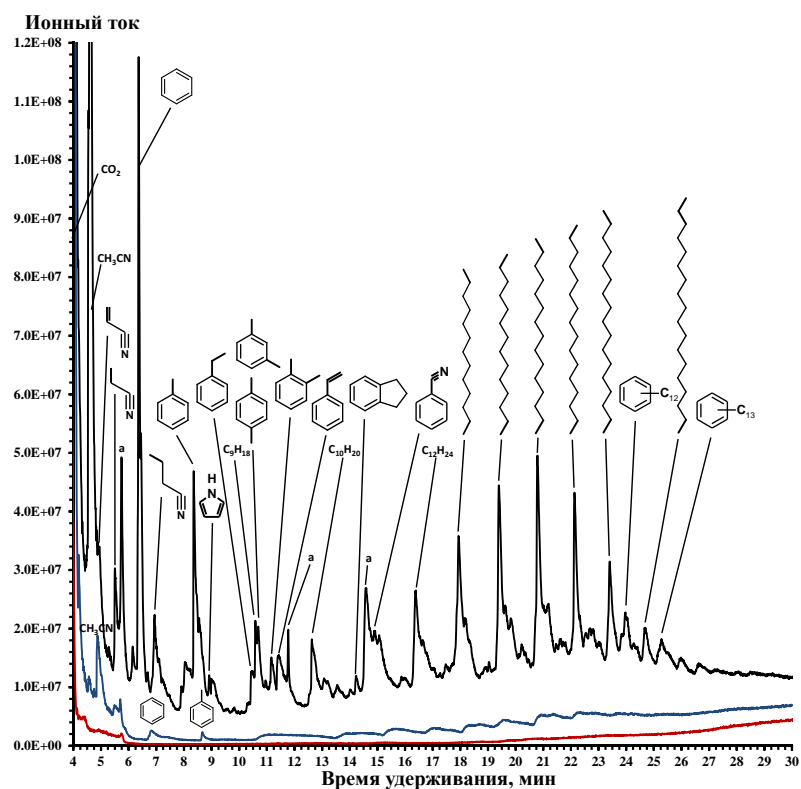


Рис.1. Хроматограммы продуктов пиролиза (при 460°C) 20 мг конденсата «96:4» (показана чёрным), исходного перидотита (показана синим) и холостого опыта без образца (показана красным). «а» - артефакты.

### 3.4 Методом пиролитической газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией (ПГХ/МС) проведено сравнительное исследование летучих органических продуктов пиролиза углистых хондритов Мёрчисон (Murchison, класса

## **СМ2) и Каинсаз (класса С03) и твёрдых конденсатов, полученных в результате модельного ударно-испарительного преобразования данных метеоритов**

Были обнаружены существенные различия в качественном и количественном составе продуктов пиролиза исходных метеоритов и их конденсатов. Все конденсаты давали менее разнообразные летучие продукты пиролиза в меньших абсолютных количествах, чем исходные метеориты. Конденсаты, полученные в атмосфере водорода, давали существенно бóльшие абсолютные количества летучих, чем конденсаты, полученные в атмосфере гелия.

Летучие продукты пиролиза “гелиевых” конденсатов содержали бóльшие относительные количества азот- и серосодержащих соединений и алифатических углеводородов, чем исходные метеориты и большие количества CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>. Летучие продукты пиролиза “водородных” конденсатов содержали бóльшие относительные количества ароматических и алкилароматических углеводородов, чем исходные метеориты. При этом серосодержащие органические вещества практически отсутствовали, но обнаруживалось значительное количество H<sub>2</sub>S.

Абсолютные количества летучих соединений, выделившихся при пиролизе исходного вещества хондрита Мёрчисон, были выше, чем соединений, выделившихся при пиролизе Каинсаза. Тем не менее, все конденсаты Каинсаза (“гелиевые” и “водородные”) выделяли большие количества органических веществ, чем конденсаты Мёрчисона и меньшие количества CO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>. Это можно объяснить различиями в элементном и компонентном составе метеоритов. Каинсаз является более восстановленным метеоритом, чем Мёрчисон. Так, например, он содержит ~5 об. % никелистого железа, а Мёрчисон <0.5 об. %. Это определяет различия окислительно-восстановительных условий, создающихся в ударно-индуцированном облаке. Кроме того, хорошо известно, что никелистое железо (микрочастицы которого могут конденсироваться из облака наряду с частицами силикатов) служит катализатором многих химических реакций, в т.ч. реакций типа Фишера-Тропша. В нашем случае реакции Фишера-Тропша являются вероятным источником углеводородов (особенно n-алканов и длинноцепочечных алкилароматических углеводородов). Возможно, что при испарении Каинсаза интенсивность таких реакций была существенно выше, чем при испарении Мёрчисона.

Несмотря на экстремальные условия в облаке испарённого вещества, в модельных ударных процессах с участием углистых хондритов образуются разнообразные органические вещества. Можно утверждать, что состав органических продуктов ударного преобразования метеоритного вещества определяется и элементным/компонентным составом метеорита и составом газовой атмосферы, в которой происходит ударное событие. Чем более восстановленным является вещество углистого метеорита (астероида), тем богаче состав и выше количественное содержание органических продуктов ударно-индуцированного синтеза (при сопоставимом содержании углерода в составе метеоритов). Синтез органических соединений происходит в различных условиях газовой атмосферы, однако, восстановительные условия повышают эффективность синтеза и способствуют сохранению органики за счёт подавления окислительных процессов в ударно-индуцированном облаке.

### **3.5 Исследования процессов эволюции кометных ядер и физических свойств планет и их спутников**

#### **3.5.1 Изучение свойства ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко**

В работах Л.В. Ксанфомалити, опубликованных в 2015 г. совместно с К.И. Чурюмовым и Л.М. Зеленым, рассматривались свойства ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко, на основе данных наблюдений, полученных в ходе миссии РОЗЕТТА-ФИЛЫ. Можно напомнить, что комета 67P/Чурюмова-Герасименко была выбрана как цель миссии «Розетта» Европейского космического агентства (ESA), после неудачной попытки запуска аппарата к комете Виртанена в 2002 г., когда произошёл отказ двигателей ракеты-носителя «Ариан-5». Аппарат «Розетта» был запущен с космодрома Куру во Французской



Гвиане 2 марта 2004 г. На полет к цели ушло более 10 лет, причем в полете аппарат сближался с астероидами Штейнс и Лютеция. На основе экспресс-материалов о ходе исследований ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко, выполненных аппаратами Розетта и Филы и опубликованных работ, были рассмотрены методы и условия выполнения задач миссии Розетта и состояние аппаратов после выполнения посадки зонда Филы на ядро кометы. По измерениям приборов, установленных на орбитальном аппарате, обнаружены пары воды, окись углерода, двуокись углерода, аммиак, метан, метанол, формальдегид, сероводород, цианистый водород, диоксид серы, дисульфид углерода, сера, натрий и магний. Газообразные составляющие комы включают ряд соединений, указывающих на важные особенности возникновения небесного тела. Само ядро кометы имеет резко неправильную форму с двумя частями, соединенными более узкой перемычкой, с общими размерами 1.3 x 3.2 x 4.1 км. На снимках поверхности видны грубые изломы поверхности, крутые горные склоны с признаками слоистости, испещренные провалами, хребтами и глыбами различных размеров и небольшие равнинные поля, покрытые раздробленным материалом. Под его слоем обнаружена твердая порода, которая не поддается бурению и долблению. Из-за отказов некоторых элементов посадочной техники, ряд экспериментов на поверхности ядра кометы выполнить не удалось. В работах Л.В. Ксанфомалити, опубликованных в 2015 г., были рассмотрены результаты выполненных экспериментов и проведено их сравнение с отечественной миссией ВЕГА (1986 г.) Были оценены перспективы восстановления работоспособности аппарата ФИЛЫ и показано, что они неудовлетворительны, что подтвердилось в дальнейшем. Удалось обработать изображение темной стены перед аппаратом ФИЛЫ и показать, что это - выступающая глыба, а освещенный участок в виде трапеции – это поверхность глыбы, а не опора аппарата, как сообщалось. Попытка определить положение Филы путем совмещения изображений опор аппарата с двумя белыми пятнами была ошибочной.

По итогам исследований ядра кометы опубликовано 3 научных и 2 научно-популярных работы, сделано 5 докладов (в том числе 2 на международных конференциях в США и Японии), несколько телевизионных выступлений.

### **3.5.2 Исследования процессов эволюции и разрушения кометных ядер**

Были продолжены исследования процессов эволюции и разрушения кометных ядер вытянутой и гантеле-подобной формы, начатые при изучении ядра кометы Хартли-2. В работе рассматривается также альтернативная гипотеза, возникающая при анализе эволюции ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко. Высокая механическая прочность материала шейки ядра приводит к предположению о слиянии планетезимальных тел с разными физическими свойствами и образовании агрегатного ядра, устойчивого к механическим напряжениям. Расчеты устойчивости ядер комет к разрушению также продолжены, подготовлен черновой вариант рукописи L.V. Ksanfomality. Disintegration of elongated cometary nuclei and asteroids by centrifugal forces. На генеральной ассамблее МАС был представлен доклад на ту же тему: «L.V. Ksanfomality. Disintegration of cometary nuclei and asteroids by centrifugal forces». Ранее было опубликовано несколько работ (без включения данных о комете 67P/Чурюмова-Герасименко) в журналах УФН, *Астрономический вестник*, *Наука и Жизнь*, ВПВ.

### **3.5.3 Материалы исследований Плутона на основе данных, полученных аппаратом New Horizons («Новые Горизонты»)**

В середине 2015 г. космический аппарат New Horizons сблизился с карликовой планетой Плутоном и в пролетном режиме выполнил обширную программу научных исследований. В последние десятилетия в исследовании Плутона с помощью новой астрономической техники были получены результаты, которые, в основном, подтверждены в миссии New Horizons. В 2006 г. на Генеральной Ассамблее МАС в Праге, Плутон был переведен в категорию Карликовых Планет, согласно критериям, которые МАС установил для понятия «планета». Вместе с тем, интерес к исследованиям Плутона только возрастал. Но исследование Плутона космическими средствами задерживалось. В 2006 г. аппарат New

Horizons Pluto («Новые Горизонты») начал свой путь к Плутону. Максимальное сближение аппарата с Плутоном произошло 14 июля 2015 г., в пролетном режиме. Подробно исследованы неоднородности и свойства поверхности и разреженной атмосферы. Из-за крайней удаленности аппарата и энергетических ограничений, на передачу всех данных уйдет 1.5 года. Вместе с предварительными результатами миссии New Horizons Pluto, в статье приводятся основные сведения о Плуtone и его спутниках, полученные в наземных наблюдениях и с помощью космического телескопа Hubble (HST). На поверхности Плутона и Харона мало метеоритных кратеров, что резко отличает их от таких спутников планет-гигантов, как Ганимед и Каллисто. Объяснение состоит в том, что поверхность Плутона молодая, её возраст оценивается менее чем в 100 млн лет. Обнаружены глетчеры из льдов, как предполагается, азотной природы. Азот также является основной составляющей атмосферы Плутона. Планета несет признаки процессов высокой геологической активности, однако источники энергии этих процессов неизвестны.

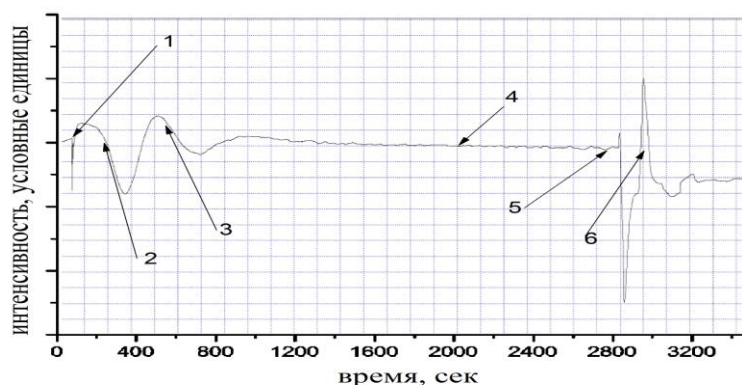
Карликовая планета 134340 Плутон, по происхождению относится к транснептуновым объектам. До миссии New Horizons предполагалось, что свойства Плутона в значительной мере должны быть подобны физическим свойствам спутников планет гигантов и, особенно свойствам Тритона, спутника Нептуна. Наземные и околоземные орбитальные наблюдения, а также теоретические расчеты позволяли сузить диапазоны ожидаемых параметров, но не более того. Выполненные с помощью орбитального телескопа Hubble наблюдения свидетельствовали о значительной неоднородности поверхности планеты, но получить более подробные изображения объекта с углом 0.082" было невозможно. Теперь это удалось сделать с помощью аппарата New Horizons. Полученные результаты демонстрируют удаленный объект Солнечной системы неизвестного типа, с непонятными глобальными эффектами не встречавшихся ранее геологических и атмосферных явлений. Насколько закономерны подобные свойства у планеты на далекой окраине Солнечной системы, следует ли ожидать, что подобными свойствами могут обладать и другие ТНО? New Horizons Pluto оказался миссией, которой стало суждено добавить новые страницы в планетную физику.

По материалам исследований подготовлена обзорная научная статья и опубликована научно-популярная работа. Сделано несколько докладов.

## 4 ЛУНА

### 4.1 Разработка методики разделения газовой смеси на основе различия времен удержания разных компонентов в адсорбционных накопителях

В рамках подготовки к миссиям «Луна-Ресурс» (2020) и «ЕхоMars» (2018) проведены лабораторные исследования, показывающие возможность выделения отдельных составляющих из исследуемой газовой смеси, путем применения составного адсорбционного накопителя и капиллярных колонок, располагающихся последовательно. Газохроматографический – масс-спектрометрический метод анализа будет использоваться на посадочных аппаратах в миссиях Луна-Ресурс» (2020) и «ЕхоMars» (2018) для исследования in-situ химического и изотопного состава летучих в грунте (Луна) и в атмосфере (Марс) этих космических объектов. На начальных этапах были получены времена удержания отдельных газов при различных параметрах эксперимента. На основе



полученных данных было осуществлено разделение газовой смеси, состоящей из аргона (Ar), оксида углерода (CO) и метана (CH<sub>4</sub>). Путем прокачки газовой смеси через систему было получено разделение группы Ar-CO и CH<sub>4</sub> (см. рис.). В качестве детектора применялся микрокатарометр. На основе полученных данных планируются эксперименты по разделению макроколичеств углекислого газа и воды от следовых компонентов благородных газов в атмосфере Марса и грунте Луны.

*Рис. Одновременный ввод Ar, CO, CH<sub>4</sub> при температуре АН -55°С, адсорбционный накопитель – Carbosieve SIII. Обозначения:*

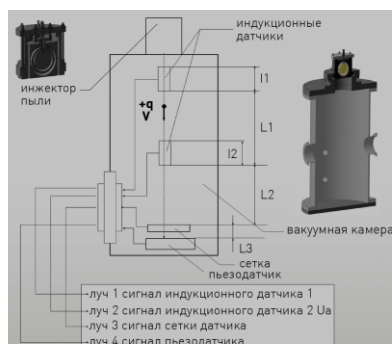
*1 – начало ввода смеси газов в систему, 2 – начало регистрации Ar, 3- начало регистрации CO, 4 – завершение выхода исследуемых веществ, 5 – импульсный нагрев до 150°С, 6 – регистрация CH<sub>4</sub>.*

#### 4.2 Исследование плазменно-пылевых эффектов у поверхности Луны

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

#### 4.3 Разработка экспериментальной установки для создания экзосферы Луны и Марса в лабораторных условиях

Проведена разработка экспериментальной установки, позволяющей имитировать падение микрометеоритов в приповерхностной экзосфере Луны. Работа установки подтверждена при взаимодействии с лабораторными и КДО макетами пылеударного прибора ПмЛ, или отдельными датчиками, предназначенного для изучения пылевой экзосферы Луны и его аналога для Марса.



#### 4.4 Лабораторное макетирование Лунной и Марсианской экзосферы

Проводились исследования среды, близкой к условиям на поверхности Луны и Марса.  
Луна:

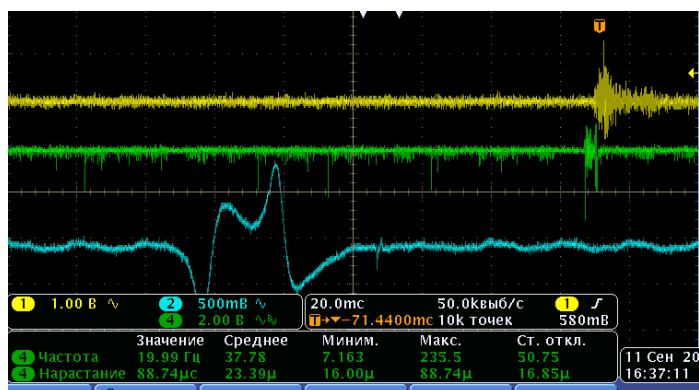


Рис. Заряженные пылевые частицы в вакуумной камере ( $d \approx 200$  мкм,  $V \approx 4$  м/с) желтая кривая соответствует потоку на PZT-сенсоре, зеленая – зарядовому сенсору, синяя – цилиндру Фарадея в вакуумной камере

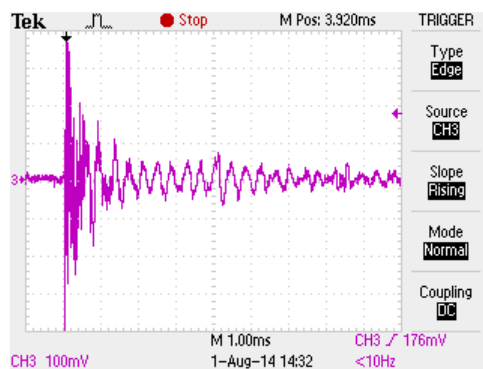


Рис. Отклик PZT-сенсора на пыль из полидисперсного вольфрама в вакуумной камере ( $d \approx 100$  мкм)

Марс:

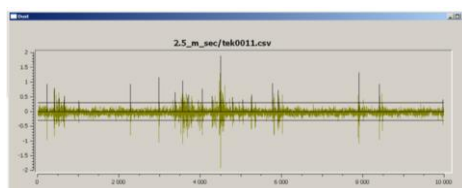


Рис. Детектирование потока пылевых частиц в аэродинамической трубе ( $d \approx 20$  мкм,  $V = 2,5$  м/с). Каждый пик соответствует регистрации пылевой частицы.

### 5 ВНЕСОЛНЕЧНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

#### 5.1 Создание космического телескопа для спектрального исследования планет Солнечной системы и получения изображения экзопланет методом звездной коронографии

5.1.1 Разработка малого космического телескопа «Планетный мониторинг» для технологической отработки наблюдения экзопланет ([http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment\\_q.aspx?idE=90](http://knts.tsniimash.ru/ru/site/Experiment_q.aspx?idE=90)).

Разработка большого космического телескопа «Звездный патруль» предназначенного для исследования экзопланет земного типа, изучения транзитов ([www.star-patrol.cosmos.ru](http://www.star-patrol.cosmos.ru)).

Результат. Выполнена проработка научных задач, предварительного проектного облика, определен перечень и проработаны критические технологии космических телескопов, предназначенных для исследования экзопланет (земного типа для телескопа «Звездный

патруль»), изучения транзитов, проработаны варианты приборного состава и определены основные характеристики научной аппаратуры орбитальных обсерваторий.

5.1.2 Разработка и лабораторное исследование интерференционного звездного коронографа с переменным углом вращения для непосредственного изображения экзопланет. Результат: возможность увеличения коронографического контраста, интерференционное погашение белого света, возможность астрономических наблюдений фазовых кривых нетранзитных экзопланет с меньшим коронографическим контрастом.

5.1.3 Разработка и исследование прецизионного контроля волнового фронта интерференционной системой адаптивной оптики для получения изображения экзопланет. Результат: показана возможность амплитудно-фазовой коррекции волнового фронта для задачи изображения землеподобной экзопланеты.

## **5.2 Физические процессы на экзопланетах и поиск среди обнаруженных объектов экзопланет, удовлетворяющих критериям гипотетической обитаемости**

Число найденных экзопланет приближается к 2000. В середине 2015 года было известно 1900 экзопланет в 1196 планетных системах. В итогах миссии «Кеплер» на июль 2015 года числится 4696 кандидатов, для получения которыми статуса планеты требуется подтверждение их наблюдений с помощью наземных телескопов. Среди результатов 2015 г. выделяется объект HD 219134b, обладающий самым близким к Солнцу положением (6.5 пк) среди транзитных экзопланет. Звезда HD 219134 видна невооруженным глазом в созвездии Кассиопеи. Критериям гипотетической обитаемости HD 219134b не удовлетворяет, орбита экзопланеты 3-суточная (очень низкая), что определяет высокую температуру ее поверхности. Благодаря транзитам и близкому положению, HD 219134b относится к наиболее удобным объектам исследований северного неба. Экзопланета HD 219134b – «классическая» СуперЗемля, имеет массу около 4.5 масс Земли, плотность, близкую к земной и радиус 1.6 земного, что дает ускорение свободного падения  $17.5 \text{ м с}^{-2}$ .

Чрезвычайно интересным оказался объект KIC 8462852, - звезда класса F3, исследованная в миссии «Кеплер», но приводимая в итогах, где экзопланеты не были обнаружены. В течение наблюдательного периода (1600 дней) несколько раз регистрировались падения блеска, вплоть до 22%, развивавшиеся за время 3-4 сут. Такая глубина транзита указывает на гигантские размеры затмевающего тела, в половину диаметра звезды,  $(0.22)^{1/2} = 0.469$ . События неперIODические и, за одним исключением, обладают весьма нерегулярной огибающей. Показано, что зарегистрированные события находятся в резком противоречии со II законом Кеплера: кривой единственного регулярного события соответствует скорость тела в периастре  $v_q = 15 \text{ км с}^{-2}$ . Но такая скорость не соответствует  $q = [GM(1 + \epsilon)/v_q^2]^{1/2} = 5.46 \text{ а.е.}$  (при  $\epsilon = 0$ ). Имеются и другие противоречия с основами физики. По материалам исследований подготовлена обзорная научная статья и опубликована научно-популярная работа. Сделано несколько докладов.

## **5.3 Наблюдения экзопланеты OGLE-2012-BLG-0563Lb**

В составе международной команды были проведены исследования экзопланеты OGLE-2012-BLG-0563Lb, открытой методом микролинзирования. Анализ наблюдений показал, что система звезда-планета находится на расстоянии около 1.3 кпс от нас, состоит из звезды массой порядка одной трети от массы Солнца и планеты с массой порядка массы Сатурна (0.4 массы Юпитера), находящейся на расстоянии 0.7-4.3 а.е. от звезды.

## **6 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **6.1 Магнитоактивные атмосферы экзопланет в приближении мелкой воды**

Получены новые уравнения, описывающие магнитогидродинамические течения в атмосферах экзопланет, захваченных приливными силами. Поведение различных звезд и планет описывается магнитной гидродинамикой тонких слоев плазмы со свободной границей в поле силы тяжести. Для описания таких течений астрофизической плазмы используется магнитогидродинамическое приближение мелкой воды и квазигеострофическое приближение в магнитной гидродинамике. Настоящая работа посвящена изучению слабонелинейных волновых взаимодействий в магнитогидродинамическом приближении мелкой воды. Уравнения вращающейся

магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды являются альтернативой магнитогидродинамическим уравнениям тяжелой жидкости со свободной границей в случае, когда исследуется слой малой толщины по отношению к характерному горизонтальному линейному размеру задачи, и вертикальными ускорениями можно пренебречь. Рассматривается слой несжимаемой невязкой жидкости со свободной поверхностью, находящийся в поле сил тяжести, в неинерциальной системе отсчета, вращающейся вместе с плазмой. Магнитогидродинамические уравнения мелкой воды получаются из классических уравнений магнитной гидродинамики несжимаемой плазмы осреднением по глубине в предположении гидростатичности распределения давлений и малости толщины слоя по отношению к характерному горизонтальному линейному размеру задачи. Полученная система играет такую же важную роль в космической и астрофизической плазме, как и классические уравнения мелкой воды в гидродинамике нейтральной жидкости.

Мы изучаем магнитогидродинамические уравнения мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле. Такая конфигурация магнитного поля характерна для нейтронных звезд и для экзопланет. В этом случае в магнитогидродинамическом приближении мелкой воды появляются дополнительные слагаемые, описывающие в линейном приближении два типа быстрых волн: волны магнито-Пуанкаре и магнитострофические волны. Работа является обобщением линейной теории магнитогидродинамических течений мелкой воды во внешнем магнитном поле на случай волн конечной амплитуды в приближении слабой нелинейности. В нашей работе показано, что закон дисперсии линейных волн во внешнем вертикальном магнитном поле обеспечивает условия синхронизма, необходимые для нелинейных взаимодействий. В отсутствие же внешнего вертикального магнитного поля, исчезают магнитострофические волны и остаются только гравитационные волны Пуанкаре в гидродинамике нейтральной жидкости в поле силы тяжести со свободной границей.

Мы исследовали взаимное влияние волновых пакетов во вращающейся магнитной гидродинамике мелкой воды. Анализ вида дисперсионных соотношений для обеих мод показал, что возможны несколько видов трехволновых взаимодействий: три магнито-Пуанкаре волны, три магнитострофические волны, а также межмодовые взаимодействия: две магнито-Пуанкаре волны и магнитострофическая волна, две магнитострофические волны и магнито-Пуанкаре волна. Для описания нелинейного взаимодействия волн использован асимптотический метод многомасштабных разложений. Для всех четырех случаев получены нелинейные уравнения взаимодействия амплитуд волн. Анализ полученных нелинейных уравнений, описывающих трехволновые взаимодействия, показал существование двух типов неустойчивостей: распадные неустойчивости и параметрическое усиление волн. Найдено, что существуют следующие четыре типа распадных неустойчивостей: магнито-Пуанкаре волна распадается на две магнито-Пуанкаре волны, магнитострофическая волна распадается на две магнитострофические волны, магнито-Пуанкаре волна распадается на одну магнито-Пуанкаре волну и одну магнитострофическую, магнитострофическая волна распадается на одну магнитострофическую и одну магнито-Пуанкаре волну. Получены инкременты найденных распадных неустойчивостей. Исследованы также следующие четыре механизма параметрического усиления волн: параметрическое усиление магнито-Пуанкаре волн, параметрическое усиление магнитострофических волн, а также усиление магнито-Пуанкаре волны в поле магнитострофической и усиление магнитострофической волны в поле магнито-Пуанкаре волны. Для всех видов неустойчивостей найдены коэффициенты параметрического усиления.

## **6.2. Исследования формирования спутниковых систем транснептуновых объектов на стадии разреженных сгущений**

Рассматривалась модель формирования транснептуновых объектов со спутниками из разреженных сгущений (препланетезималей). Показано, что значения момента количества

движения, которые использовались в расчетах Несворного и др. (Nesvorny et al., *Astron. J.*, 2010, 140, 785-793) в качестве исходных данных при моделировании сжатия препланетезималей, приводящего к формированию спутниковых систем, могли быть получены при столкновениях двух препланетезималей, двигавшихся до столкновений по круговым гелиоцентрическим орбитам. Эти исследования свидетельствуют в пользу формирования транснептуновых объектов со спутниками на стадии разреженных препланетезималей. В рамках этой модели объясняется, почему доля наблюдаемых спутниковых систем малых тел (среди всех тел) больше для больших расстояний от Солнца до места их происхождения.

На основе данных наблюдений спутников транснептуновых объектов (<http://www.johnstonsarchive.net/astro/astmoons/>) были изучены зависимости наклона  $i_s$ , орбиты спутника около объекта, движущегося в транснептуновом поясе, от расстояния спутника от объекта, от эксцентриситета орбиты спутника, и от элементов гелиоцентрической орбиты транснептунового объекта, а также зависимости расстояния спутника от объекта от большой полуоси орбиты объекта и зависимость эксцентриситета орбиты спутника от расстояния спутника от объекта. Все эти зависимости были объяснены в рамках модели приобретения основной части момента количества движения сгущения, породившего спутниковую систему, при столкновении двух сгущений. Исходные моменты количества движения сгущений (до их взаимных столкновений) положительны и недостаточны для формирования спутниковых систем. Доля наблюдаемых спутниковых транснептуновых систем с положительными осевыми моментами составляет около 40%. Такая же доля отрицательных моментов могла быть получена при столкновениях двух сгущений.

Показано, что угловой момент разреженной препланетезимали, образовавшейся при аккумуляции малых объектов (меньших сгущений, булыжников или пыли), достаточен для формирования спутниковой системы, если радиус препланетезимали близок к радиусу ее сферы Хилла. Этот момент всегда положителен. Поэтому большинство транснептуновых спутниковых систем не могли приобрести большую часть своего осевого момента при выпадении малых объектов на сгущение, породившее спутниковую систему, хотя такие выпадения могли внести некоторый вклад в осевые моменты некоторых сгущений.

### **6.3 Формирование и рост зародышей Земли и Луны**

Проведены исследования формирования и роста зародышей Земли и Луны для модели, в которой начальные зародыши образовались при сжатии одного разреженного сгущения. Получено, что момент количества движения при столкновении двух одинаковых разреженных сгущений размером со сферу Хилла, двигавшихся до столкновения по круговым гелиоцентрическим орбитам, такой же как у современной системы Земля-Луна при суммарной массе сгущений, равной 0.1 массы Земли. С учетом роста зародышей Земли и Луны масса сгущения, родительского для системы Земля-Луна, могла не превышать 0.02 массы Земли в случае, когда конечный момент количества движения системы равнялся современному значению.

Исходные значения момента количества движения, использовавшиеся Галимовым и Кривцовым (Galimov E.M. & Krivtsov A.M., *Origin of the Moon. New concept*, 2012) при моделировании сжатия сгущения, породившего зародыши Земли и Луны, могли быть получены при столкновении двух сгущений. В принципе, момент количества движения, необходимый для образования зародыша Луны, мог быть получен и при росте сгущения путем аккумуляции меньших объектов. Однако в этом случае можно было бы ожидать формирования крупных спутников и у других планет земной группы.

Проведены оценки относительного роста зародышей Земли и Луны. Показано, что в зависимости от эксцентриситетов орбит планетезималей, выпадавших на зародыши Земли и Луны, Луна могла приобрести 0.04-0.3 своей массы (нижняя оценка соответствует почти

круговым орбитам, а верхняя – сильно эксцентричным орбитам планетезималей) за время роста зародыша Земли в 10 раз.

#### **6.4 Моделирование доставки воды и летучих к планетам земной группы из зон питания планет-гигантов на ранних стадиях эволюции Солнечной системы**

Проведены расчеты миграции планетезималей (до их столкновений с планетами или Солнцем или до выброса на гиперболические орбиты) из зоны питания планет-гигантов к планетам земной группы при современных орбитах планет и отсутствии газа. При миграции планетезималей с начальными эксцентриситетами, равными 0.3, из диска, находившегося на расстоянии от 4.5 до 12 а.е. от Солнца, вероятность  $p_E$  столкновения планетезимали (за время ее динамической жизни) с Землей равнялась  $2 \times 10^{-6}$ . Вероятность столкновений планетезималей с Венерой была примерно такой же, как и с Землей. Отношение вероятности столкновения с планетой к ее массе для Марса и Меркурия было соответственно в 2 и 1.5 раза больше, чем для Земли.

Сделаны оценки доставки планетезималей к зародышу Земли массы  $m$  с учетом его роста. В случае миграции планетезималей из-за орбиты Юпитера количество вещества, доставленного на зародыш, пропорционально  $m^{0.74}$ . При росте массы зародыша Земли до половины современной массы Земли масса воды, доставленной к зародышу из-за орбиты Юпитера, могла быть порядка 30% от всей воды, доставленной из зон питания Юпитера и Сатурна. Приведенные выше оценки показывают, что зародыш Земли мог приобрести существенную массу воды, когда его масса была меньше массы Земли.

#### **6.5 Анализ выброса вещества с комет**

Проведенный нами анализ выброса вещества с комет свидетельствует в пользу частого наличия полостей с пылью и газом под давлением на глубине нескольких метров под поверхностью комет. В частности, глубина залегания полости с пылью и газом под давлением, вскрытой при ударе КА Дип Импаст с кометой Тэмпель-1, оценивается 6 м.

#### **6.6 Газодинамическая модель атмосферы Венеры**

В кооперации с ПГИ КНЦ РАН продолжено совершенствование численной модели общей циркуляции атмосферы Венеры, основанной на полной системе уравнений газовой динамики. В релаксационном приближении модель воспроизводит зональную суперротацию до высот 80-85 км и подсолнечно-противосолнечную циркуляцию выше 95 км, полярные вихри с переменными зональными волновыми числами, сложную динамику переходной зоны 80-95 км. Показано, что «горячий слой» атмосферы Венеры на высотах 85-90 км имеет динамическую природу и связан с диссипацией кинетической энергии зонального потока. Детально исследовано влияние рельефа планеты на динамику атмосферы, показано, что гравитационные волны, возникающие при обтекании крупных горных массивов, могут проявляться в надоблачной атмосфере планеты.

#### **6.7 Новый алгоритм расчета переноса теплового излучения в оптически плотной рассеивающей атмосфере**

На основе метода дискретных ординат в кооперации с ПГИ КНЦ РАН был разработан новый алгоритм расчета переноса излучения в оптически плотной рассеивающей атмосфере. Благодаря замене метода простой итерации, который используется в известных алгоритмах, на метод матричной прогонки удалось значительно повысить вычислительную эффективность метода. Детальное сравнение с алгоритмом DISORT на примере переноса теплового излучения в атмосфере Венеры показало, что новый метод позволяет сократить время расчета в 3-4 раза при сохранении точности. Предполагается, что данный метод будет использоваться в радиационных блоках моделей общей циркуляции планетных атмосфер.

### **Исследования по теме РАН ядерная планетология**

Основные исследования были посвящены анализу и интерпретации результатов измерений космического прибора ДАН на борту марсохода Кьюриосити. Были выполнены



оценки содержания водорода в веществе Марса для районов, пройденных в течение первых 200 километров вдоль трассы движения аппарата [1]. Также были получены оценки содержания воды и хлора для отдельных районов на дне кратера Гейла, через которые проходила трасса движения марсохода [2, 3]. На основе данных измерений прибора ДАН были сделаны оценки теплопроводности вещества Марса в районе посадки аппарата Кьюриосити [4].

Были продолжены исследования вещества Луны по данным нейтронного телескопа ЛЕНД: большой объем накопленных данных измерений позволил обнаружить суточные вариации содержания водорода в реголите в высокоширотных районах Луны [5]. Также были получены оценки нейтронного излучения Луны в зависимости от фазы солнечного цикла №24 [6].

### **Изучение космических гамма-всплесков**

Регистрация прибором ХЕНД космических гамма-всплесков позволила определить положение источника гамма-всплеска GRB 980425 и изучить вопрос о его возможном отождествлении со сверхновой SN 2012ap [7]. Обработка данных прибора ХЕНД по гамма-всплескам позволила подготовить и выпустить 12 Международных Циркуляров GRB Coordinates Network: Circular Service, которые содержат данные по локализации зарегистрированных гамма-всплесков на небесной сфере.

### **Изучение Луны и планет солнечной системы методами ядерной физики в рамках гранта РФФИ**

Во второй год реализации проекта РФФИ были завершены исследования спектрометрических параметров сцинтилляционного детектора гамма-лучей с инновационным кристаллом из бромида церия. Экспериментально показано, что применение бромида церия для спектроскопии гамма-лучей в широком энергетическом диапазоне до 3 МэВ позволяет значительно повысить отношение сигнал-шум для ядерных линий по сравнению с аналогичным детектором из бромида лантана. По результатам исследований в рамках проекта РФФИ были выработаны рекомендации по применению бромида церия для создания бортовых детекторов гамма-лучей для перспективных космических проектов по изучению Луны, Марса, Венеры и других небесных тел солнечной системы [8].

В 2015 году были также проведены лабораторные исследования по изучению применимости полупроводниковых фото-электрических умножителей (ПП-ФЭУ) для светосбора в сцинтилляционных детекторах гамма-лучей и нейтронов. Изучение возможностей применения опытного образца ПП-ФЭУ для детекторов нейтронов на основе сцинтилляционных кристаллов из стибьбена показало, что от ПП-ФЭУ требуется существенное сокращение времени измерения профилей импульсов отсчетов для того, чтобы обеспечить возможность эффективного разделения отсчетов от гамма-лучей и от нейтронов на основе аналоговой схемы разделения [9].

Во втором году проекта также были изучены условия возникновения помех от «микрофонного эффекта» в сцинтилляционных детекторах нейтронов и гамма-лучей с ЭВ-ФЭУ под воздействием вибромеханических нагрузок на борту космических аппаратов. Для конкретного типа ЭВ-ФЭУ установлено, что эффект наступает уже при амплитуде воздействия около 0.05 g [10]. При увеличении амплитуды вибрации эффект наблюдается все в более широком частотном диапазоне, и при амплитуде около 0.3 g он наблюдается практически во всем частотном диапазоне от 300 Гц до 1 кГц.

Исследования в проекте РФФИ проводились на двух специально созданных экспериментальных установках Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ)

[11, 12]. Полученные результаты подтвердили теоретические оценки чувствительности метода нейтронного зондирования к наличию водосодержащего слоя на глубинах от 0 до 60 см. Эти результаты нашли свое применение для анализа и интерпретации данных измерений активным нейтронным спектрометром ДАН на борту марсохода НАСА «Кьюриосити» в кратере Гейл на Марсе. В ОИЯИ была начата программа лабораторных измерений ядерного гамма-излучения от образцов порообразующих элементов в поле тепловых и эпитепловых нейтронов. Были измерены энергии и относительные интенсивности гамма-линий от хлорида натрия.

Численное моделирование ядерных процессов является необходимым элементом экспериментальных ядерно-физических исследований состава поверхности небесных тел. В рамках исследований были проведены расчеты потоков нейтронов для разной глубины залегания слоя полиэтилена в мишени стекло+полиэтилен под воздействием импульсов нейтронного генератора с вакуумной трубкой. Было показано хорошее согласие результатов расчетов потока вторичных нейтронов с экспериментальными данными. После этого были проведены более сложные численные расчеты вторичного нейтронного и гамма-излучения для стеклянной мишени со слоями из сплавов алюминия, железа и полимера. Хорошее согласие численных и экспериментальных результатов потоков гамма-лучей и нейтронов подтвердило высокую достоверность выполненных расчетов по моделированию ядерно-физических процессов в образце-аналоге планетного вещества. Для обработки данных космического эксперимента ЛЕНД на борту лунного спутника НАСА ЛРО были проведены расчеты потока излучения нейтронов с поверхности Луны для двухслойной модели распределения водосодержащего реголита под поверхностью. На основе проведенного анализа было установлено, что в веществе лунного полярного кратера Кабео содержание воды в водосодержащем слое под верхним слоем сухого реголита составляет от 0.5% по массе для пренебрежимо тонкого верхнего слоя, и возрастает до 11% по массе в том случае, если толщина верхнего сухого слоя составляет 100 см [13].

Была проведена детальная обработка данных космического эксперимента ДАН по активному нейтронному зондированию вещества поверхности Марса с борта марсохода НАСА «Кьюриосити» [14, 15]. На основе совместной обработки данных для 412 отдельных активных измерений вдоль трассы продолжительностью около 11 км было установлено, что примерно в 78% изученных районов распределение воды по глубине можно считать однородным, а ее средняя массовая доля в верхнем слое толщиной около 60 см составляет  $2.1 \pm 0.5\%$ . Для 22% остальных случаев измерений данные достоверно указывают на двухслойный характер распределения воды в грунте до глубины около 60 см. Во всех этих районах среднее содержание воды в верхнем слое составляет около 2–3% по массе и близко к значению для однородного распределения воды по глубине. В части районов с двухслойным распределением воды, которая составляет 8% от полного числа измерений, массовая доля воды в нижнем слое на глубине  $27 \pm 18$  см увеличивается до  $5.6 \pm 2.7\%$ . Напротив, для другой части таких районов, которая составляет 14% от полного числа, в нижнем слое на глубине  $14 \pm 7$  см наблюдается уменьшение массовой доли воды до  $1.2 \pm 0.5\%$ . Для интерпретации результатов этих измерений сделано предположение о существовании в кратере Гейл районов с высоким и низким содержанием воды в грунте, которые соответствуют древним горизонтам осадочных пород, образовавшимся в различные эпохи в истории Марса в процессах осаждения частиц вещества на поверхность, которое имело место в водной и атмосферной средах, соответственно.