

*К.И. ЧУРЮМОВ, д-р физ.-мат. наук, чл.-кор. НАН Украины, М.В. МЕЛЬНИК*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЯДРА И АТМОСФЕРЫ КОМЕТЫ ЧУРЮМОВА – ГЕРАСИМЕНКО КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ РОЗЕТТА И ПОСАДОЧНЫМ МОДУЛЕМ ФИЛЫ**

Проект "Розетта" был разработан в 1993 году и осуществлен Европейским космическим агентством в 2004 – 2016 гг. Основной задачей, поставленной перед космической миссией Розетта, было изучение проблемы происхождения комет, связи междукометного и межзвездного вещества и их значение для происхождения Солнечной системы. С помощью космической миссии Розетта предусматривалось исследование глобальных характеристик кометного ядра, определение его динамических свойств, изучение морфологии поверхностного слоя ядра и его химического состава, определение химической, минералогической и изотопного состава летучих и тугоплавких веществ в кометной ядре, исследование физических свойств и соотношения летучего и тугоплавкого компонентов кометного ядра, мониторинг развития кометной активности и физических процессов в поверхностном слое ядра и внутренней коме (взаимодействие газа и пыли), а также исследование глобальных характеристик астероидов, включая определение динамических параметров, поверхностной морфологии и состава малых планет.

На совещании Европейского космического агентства (ЕКА) 11 – 13 мая 2003 г. было принято окончательное решение: осуществить полет космического корабля "Розетта" к ядру периодической кометы 67P / Чурюмова – Герасименко [1, 2, 4].

В феврале 2004 г. открыватели кометы 67P по приглашению генерального директора Европейского космического агентства Жан-Жака Дордэн вылетели из Парижа специальным рейсом (VIP flight № 158) до Французской Гвианы в Южной Америке на космодром Куру, где велись приготовления к старту № 158 ракеты Ариан-5 с Розеттой на борту.

Розетта была запущена с космодрома Куру во Французской Гвиане 2 марта 2004 г. На полет к цели ушло более 10 лет, причем в полете аппарат сблизился с астероидами Штейнс и Лютеция. Баллистика полета предусматривала четыре гравитационных маневра, три – с прохождением около Земли и один – у Марса.

В августе 2014 г. произошло сближение космического аппарата Розетта с ядром кометы 67P/Чурюмова – Герасименко и началось дистанционное исследование ядра и атмосферы кометы приборами орбитального модуля [3, 5 – 16].

Основные количества летучих, выбрасываемых ядром, как и ожидалось, оказались парами воды и углекислого газа. Но состав разреженной атмосферы кометы оказался богат и другими летучими. Газовый состав комы (на период до ноября 2014 г.): вода, окись углерода, двуокись углерода, аммиак, метан, метанол, формальдегид, сероводород, цианистый водород, диоксид серы, дисульфид углерода, сера, натрий, магний. Уже самый предварительный анализ позволяет считать, что газообразные составляющие комы включают ряд соединений, которые указывают на важные особенности возникновения небесного тела. Например, сероводород содержит изотоп серы  $^{32}\text{S}$ , а газообразная фаза – это изотоп  $^{34}\text{S}$ . Размеры детектированных пылинок составляют от нескольких десятков до нескольких сотен мкм.

Температура поверхности ядра, дистанционно измеренная приборами Розетты на избранных участках, оказалась около  $-70^\circ\text{C}$ , что могло соответствовать негустому, «пушистому» пылевому слою. Комета 67P классифицирована как пылевая, с отношением пылевых и газовых выбросов примерно 3:1 [13]. Максимальная производительность пыли в 2002 – 2003 гг. оценивалась примерно в 60 кг/с, но в 1982 – 1983 гг. регистрировались выбросы до 220 кг/с.

Новые геометрические и физико-химические параметры ядра и комы 67P Чурюмова – Герасименко (по исследованиям Розетты, 2014 г.). Указаны приборы, с помощью которых выполнены измерения [3 – 16].

Размеры («голова» – меньшая часть) 2.5 x 2.5 x 2.0 км – OSIRIS.

Размеры («тело» – большая часть) 4,1 x 3,2 x 1,3 км – OSIRIS.

Период вращения ядра 12,4043 часов – OSIRIS

Ось вращения:  $\alpha = 69$  градусов;  $\delta = +64$  градусов – OSIRIS.

Масса ядра =  $10^{13}$  кг – RSI.

Объем =  $25 \text{ км}^3$  – OSIRIS.

Плотность =  $0,52 \text{ г / см}^3$  – RSI / OSIRIS.

Скорость выделения водяного пара: [Q] H<sub>2</sub>O = 300 мл/сек (июнь 2014 г.).

[Q] H<sub>2</sub>O = 1 – 5 л / сек (июль-август 2014) – MIRO.

Температура поверхности 205-230 К (июль-август 2014 г.) – VIRTIS.

Подповерхностные температуры 25-160К (август 2014 г.) – MIRO.

Перечисленные многочисленные летучие в атмосфере кометы в определенной степени были неожиданностью, так как комета находится еще далеко от Солнца и температура поверхности низкая.

Более ранние наблюдения также указывали на сложные органические соединения, содержащиеся в ядрах других комет. Исследование их спектров указывает на выделение ядрами комет следующих летучих: вблизи «головы» кометы это CN, C<sub>2</sub>, NH<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, OH, CN, NO, Na I, OI, CH<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, NH<sup>+</sup> и в «хвостах» CO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>OH, CN и OH<sup>+</sup>. Очень отличается количество выделенной ядрами пыли. Связано это с относительно малой массой кометы, в 60 раз меньше массы кометы Галлея или особенностями его происхождения? Пока активность кометы была небольшая, а длина ее хвоста не превышала 20 000 км.

После предусмотренной в миссии посадки зонда Филы его связь с Землей осуществлялась через орбитальный модуль. Возможная продолжительность радиоконтакта между зондом и орбитальным аппаратом определяется положением последнего на орбите, а также длительным орбитальным периодом  $T_{\text{orb}}$  аппарата. При высоте орбиты  $R = 20$  км, на которой в дальнейшем Филы отделились от Розетты и при массе ядра  $M_c = 10^{13}$  кг

$$T_{\text{orb}} = 2\pi (R^3/GM_c)^{1/2} = 2\pi (20 \cdot 10^3)^3 / 6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{13})^{1/2} = 191 \text{ час}$$

( $G$  – гравитационная постоянная). Соответственно на рабочих орбитах Розетты с  $R = 100, 30, 12$  и  $8$  км орбитальные периоды  $T_{\text{orb}}$  составляли 620, 350, 88 и 48 часов. Каждый маневр аппарата также требовал тщательной оценки видимости Фил, поскольку период обращения самого ядра 12.4 часов.

До отделения спускаемый аппарат Филы находился в специальном гнезде на задней стороне Розетты и оставался там до 12 ноября 2014 г. Команда на отделение было отдана после перебора возможных мест посадки.

Выбор места был чрезвычайно сложной операцией. Первые снимки показывали, что комета представляет собой раздвоенное тело неправильной формы, размерами около  $1.3 \times 3.2 \times 4.1$  км (рис.1). Следующие изображения демонстрировали как крутые горные склоны, испещренные провалами, хребтами и глыбами разных размеров (рис. 1, б), так и равнинные поля (рис. 1, в).

После изучения нескольких вариантов было выбрано место посадки, которое находится на небольшом равнинном участке меньшей части ядра, на внешней его стороне, вверху рис.1, г.

На гладкой, как бы пыльной, части шейки разбросаны большие глыбы. В обеих частях многочисленные следы ударных кратеров, имеющих различную глубину и разную степень сохранения, видно грубые изломы поверхности. Светлые оттенки обманчивы, поверхность очень темная, геометрическое альbedo около 6%.

Глубокие тени не обязательно указывают на провалы: поверхность освещена прямым солнечным светом, рассеянного света практически нет. Так выглядит поверхность тела, которая мало изменилась за 4,5 миллиарда лет, прошедших с момента возникновения Солнечной системы. Можно считать, что ядро 67P примерно соответствует ожиданиям ученых.

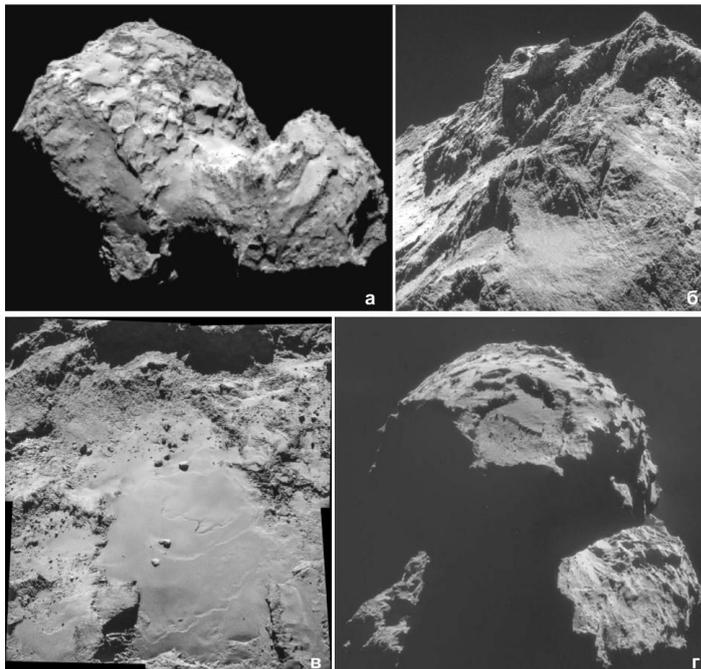


Рис. 1 Ядро кометы – раздвоенное тело неправильной формы (рис. 1, а) с размерами 2.5 x 2.5 x 2.0 км, две половины которого связаны более узкой «шейкой». В разных частях кометы видны крутые горные склоны, испещренные хребтами и провалами (рис. 1, б), а также равнинные участки (рис. 1, в). Один из равнинных участков находится на меньшей половине ядра кометы (рис. 1, г, вверху снимка) (Credit: ESA)

Филы – это первый зонд для мягкой посадки на ядро кометы. 12 ноября 2014 г. Филы были готовы к баллистическому (неуправляемому) спуску на ядро кометы, причем высота орбиты Розетты, на которой произошло отделение Фил, составляла 22.5 км. Выбранное место посадки показано на рис. 2. Благодаря низкой гравитации время спуска (фактически – падение на комету) достигло 7 часов. Скорость  $V$ , с которой Филы опустились на поверхность, была около 1 м/с.

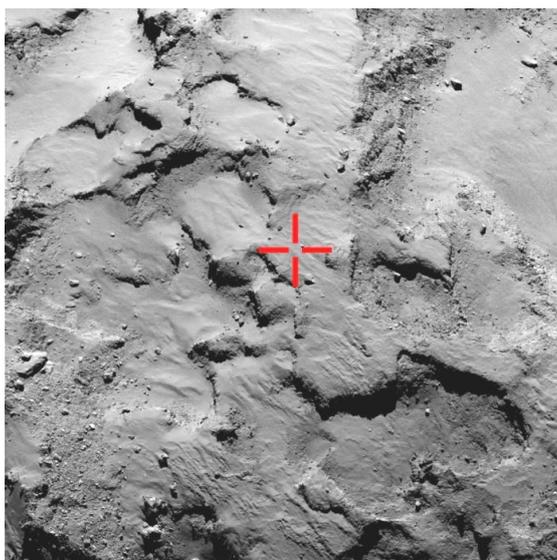


Рис.2. Место (крестик) намеченной посадки Фил. (Credit: ESA).

Спускаемый аппарат отделялся от корпуса Розетты и спускался с высоты 20 км по баллистической (неуправляемой) траектории, с посадкой на поверхности кометы со скоростью около 1 м/с. Система из трех опор была снабжена устройствами, которые должны были ослабить первоначальный удар при посадке, чтобы избежать отскока. Три устройства, прижимной двигатель на верхней стороне Фил, ледобуры на опорах и гарпуны должны были предотвратить отскок. Ледобуры, которые должны врезаться в поверхность, были установлены на каждой из опор. Они приводились в действие энергией удара при посадке. Затем в поверхность со скоростью 70 м/с должны были вонзиться гарпуны, которые отстреливались специальными пиропатронами. Прижимной двигатель был своеобразным ракетным устройством, работающим на охлажденном азоте. Он должен был уменьшить отскок аппарата при ударе и уменьшить отдачу от стрельбы гарпунами. К сожалению, как показано ниже, ни одно из трех устройств не работало, что объясняется воздействием на них протонов и электронов солнечного ветра и межпланетной пыли в течение 10,5 лет полета Розетты (своеобразной космической сварки) и порчи высокоточных узлов и посадочных мест этих специальных устройств на Розетте и Филах, которые должны были гарантировать закрепление посадочного модуля на выбранном участке поверхности ядра кометы Чурюмова – Герасименко.

Энергопитание Фил имело два режима. На борту были две батареи: первичная одноразовая батарея на 28 В и 1000 ватт-час. Она обеспечивала все приборы и службы модуля и полностью расходовалась в течение 60 часов. На втором этапе зонд должен был работать от перезаряжаемой вторичной аккумуляторной Ni-Cd батареи на 140 ватт-часов, которая заряжается от солнечных панелей. Вторичная батарея включалась только после исчерпания энергии первичной. Солнечные панели Фил имеют площадь 2.2 м<sup>2</sup> и обеспечивают мощность до 32 Вт на расстоянии 3 а.е. от Солнца при условии прямого освещения. Солнечные панели покрывают 5 из 6 сторон аппарата.

Среди других запланированных экспериментов следует отметить исследования хиральности органических соединений, присутствующих на комете. Несимметричная молекула может иметь «двойника» с такой же, но зеркальной структурой (рис. 3). Это свойство органических веществ выражается в их лево- или правосторонней структуре и называется хиральностью, которая проявляется, например, в поляризации света, прошедшего сквозь исследуемую среду. Вся биота Земли – левосторонняя. Предполагалось, что на комете 67Р.Чурюмова – Герасименко будет исследована хиральность органики.

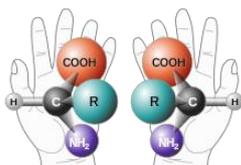


Рис. 3. К объяснению явления хиральности. (Credit: ESA)

Интересно, что аналогичная работа была выполнена еще примерно 35 лет назад, причем не в космосе, а в обычной лаборатории. Материал метеорита с высоким содержанием органических веществ был тщательно измельчен и на него было высажено растение. К эксперименту измерения показывали, что оба органических изомера присутствуют поровну.

В качестве растения был выбран картофель. Когда куст картофеля вырос, выяснилось, что картофель выбрал и усвоил только левый изомер. И вообще, вся земная биота полностью игнорирует правосторонние изомеры, если такие встречаются. Питаться ими невозможно.

После сообщения о посадке аппарата Филы у участников работы миссии Розетта было около 50 часов, чтобы провести все намеченные научные эксперименты. Время ограничивалось емкостью уже упоминавшейся основной батареи Фил, емкостью 1000 Вт-ч. На самом деле батарея давала энергию даже немного дольше: Филы работали в течение семи часов при

спуске и 57 часов на поверхности. Другая (аккумуляторная) батарея начала работать только после ее зарядки от солнечных voltaических батарей, которые покрывают почти всю поверхность, 5 из 6 сторон аппарата. Когда аппарат Филы приближался к выбранному месту посадки, то с высоты 40 м передал изображение поверхности (рис. 4). Произошла посадка.

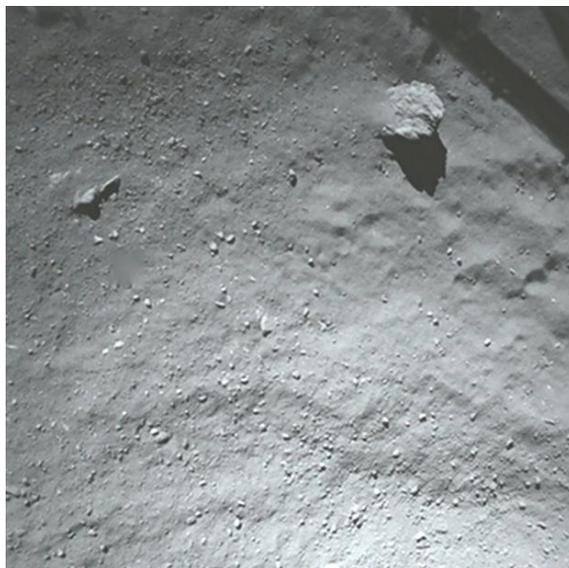


Рис. 4. Вид поверхности в намеченной точке посадки с высоты 40 м. (Credit: ESA)

К сожалению, оба гарпуна, которые должны были закрепить Филы на поверхности, так и не сработали (как и прижимной двигатель и ледобуры). Зонд на поверхности ничто больше не удерживало. Если предположить, что поверхность отстоит от гравитационного центра тела на  $r = 1$  км, ускорение свободного падения на комете  $g_c$  составит

$$g_c = GM/r^2 = 6.67 \cdot 10^{-11} \cdot 10^{13} / (10^3)^2 = 6.8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2,$$

а вес аппарата при его массе 100 кг составит всего 6,8 г. Три опоры аппарата, слегка погружившись в неплотный слой, на глубине около 20 см встретились с очень плотной породой. Далее опоры спружинили и в 15:33 GMT отбросили аппарат от поверхности вверх со скоростью около 0,4 м/с. При такой низкой гравитации кометы, скорости аппарата в момент посадки (около 1 м/с) и его кинетической энергии около 50 Дж оказалось достаточно, чтобы Филы поднялись на высоту 1 км и спустились обратно только почти два часа спустя, в 17:26 GMT. Аппарат затем поднялся снова, но невысоко, а окончательно "прикометился" в 17:33 GMT. После первого контакта на это ушло около двух часов.

Пока Филы взлетали и опускались, комета продолжала вращаться, причем довольно быстро. Вместо плоской, открытой местности, беспрепятственно освещаемой Солнцем, под Филами оказались грубые каменные склоны и провалы. Спускаемый аппарат, наконец, остановился, но остановился в крайне сложных условиях. ESA опубликовало панораму с Фил, что свидетельствовало об их неустойчивом положении. Зонд находится в углублении, среди высоких зазубренных каменных глыб, в глухой стене, причем одна его опора поднята вверх, а сам аппарат, почти весь находится в глубокой тени и на снимке его не видно (рис. 5).

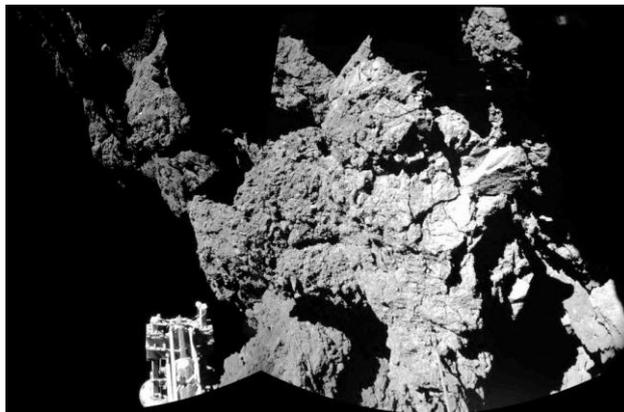


Рис. 5. Часть панорамы поверхности кометы, окружающей Филы. Внизу видна одна из опор аппарата. (Credit: ESA)

На объединенных панорамных снимках, которые передал аппарат, видно две его опоры, причем сообщалось, что одна из них, вероятно, не касается земли. Поверхность в месте посадки отличается наличием высоких остроконечных глыб и провалов. В первые часы работы 15 ноября 2014 г. зонд Филы сумел выполнить 80 % научной программы и через Розетту прислать полученные данные на Землю.

В концевых частях опор располагались датчики SESAME, которые зарегистрировали толчок при первой посадке. Система автоматики была построена так, что сигнал датчиков SESAME включил все приборы Фил для исследования поверхности кометы.

Установка SD2 предназначена для бурения грунта, отбора проб и доставки образцов грунта другим приборам. В связи с высоким потреблением энергии, SD2 была активирована в конце операций исследования поверхности, которые выполнялись после третьего контакта. Цель эксперимента SD2 была в том, чтобы провести бурение поверхности кометы для сбора, захвата и переноса образцов почвы в приборы COSAC и PTOLEMY, размещенные внутри посадочного зонда. Грунт увлекался в трубку, присоединенную к буру, а затем доставлялся в карусель с ячейками, которая распределяет его потребителям. Затем бур с образцами был поднят и перемещен к карусели, где смонтированы 26 нагревательных пиролизных высокочастотных микрочастиц. В одной группе образцы разогревались до 180°C, а в другой – до 800°C. Темп разогрева контролировался. Карусель вернулась в такое положение, что трубка с отбором проб остановилась над пиролизными микрочастицами. Проба с трубки была перемещена в микрочастицу, а карусель повернулась и доставила ее к прибору COSAC. Была получена информация, что микрочастицы сработали нормально. Направленная вниз камера ROLIS получила два изображения поверхности у аппарата, до и после того, как корпус посадочного аппарата был приподнят.

Анализ данных прибора COSAC, полученных в измерениях на поверхности, показывает, что COSAC уже при первом касании получил первые сведения об атмосфере кометы, которые указывают на выявление органических молекул: С помощью прибора COSAC были зарегистрированы следующие органические соединения: метан  $\text{CH}_4$ , цианистая кислота (циановодород)  $\text{HCN}$ , угарный газ  $\text{CO}$ , метиламин  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ , ацетонитрил  $\text{CH}_3\text{CN}$ , изоциановая кислота  $\text{HNCO}$ , ацетальдегид (уксусный альдегид)  $\text{CH}_3\text{CHO}$ , формамид  $\text{HCONH}_2$ , этиламин  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_2$ , метилизоциан  $\text{CH}_3\text{NCO}$ , ацетон  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ , пропаналь  $\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}$ , ацетамид  $\text{CH}_3\text{CONH}_2$ , гликолевый альдегид  $\text{CH}_2\text{OHCHO}$ , этиленгликоль  $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$ , причем впервые в кометах были обнаружены такие сложные молекулы, как ацетон, ацетамид, метилизоцианат и пропаналь [7 – 16].

Инструмент PTOLEMY также успешно собрал и проанализировал газ из окружающей среды кометы [3].

По данным прибора MUPUS Филы сели на запыленный лед. Комбинированный прибор MUPUS на посадочном модуле Филы был оснащен многоцелевыми датчиками для исследо-

вания поверхности и подповерхностных слоев почвы. Прибор MUPUS был включен 12 ноября 2014, начиная с момента отделения Фил от орбитального аппарата. Тепловой картограф MUPUS, расположенный на корпусе Фил, работал в течение спуска и во время всех трех посадок. В последнем месте посадки Фил MUPUS зафиксировал температуру окружающих объектов:  $-153^{\circ}\text{C}$ , близкую к температуре консоли самого посадочного аппарата. Затем, в течение примерно получаса, датчики остыли еще примерно на  $10^{\circ}$ . Это могло произойти либо из-за лучистого теплообмена с холодной стеной, видной на изображениях устройства CIVA, или из-за того, что зонд попал в слой холодной пыли.

Затем пенетратор прибора MUPUS начал долбить поверхность, но не смог продвинуться более чем на несколько миллиметров, даже при максимальном уровне мощности двигателя пенетратора. Из сравнения данных лабораторных измерений был сделан вывод, что зонд встретил твердую поверхность с прочностью твердого низкотемпературного льда. Сравнение результатов теплового картирования и зондирования приводит к предварительному выводу, что верхние слои поверхности кометы состоят из слоя пыли толщиной 10 – 20 см на механически прочной поверхности льда или смеси льда с пылью. На больших глубинах лед, вероятно, становится более пористым, на что указывает низкая средняя плотность ядра ( $0.52\text{ г/см}^3$ ), определенная с помощью приборов RSI/OSIRIS на орбитальном модуле Розетта [6, 7].

После завершения первого этапа работы с Филами, орбитальный аппарат Розетта вернулся на 30-километровую орбиту вокруг кометы. В течение 2015 г. он следовал за кометой, выполняя задачу изучения ядра по мере того, как активность ядра кометы росла на пути к перигелию (13 августа 2015 г.). Были проведены сближения Розетты с ядром и пролеты на высоте 8 и даже 2-3 км, что требует очень сложного управления аппаратом, и не только из-за опасно неправильной формы ядра. Вмешаться в работу Розетты в реальном времени было невозможно. В ноябре сигнал аппарата достигал Земли только через 28 мин, а узнать, выполнена ли отправленная команда, можно было только через час.

Данные, собранные орбитальным аппаратом, позволили наблюдать краткосрочные и долгосрочные изменения, которые происходили на ядре кометы и в ее атмосфере в процессе ее орбитального движения. Были затронуты важные вопросы, касающиеся истории Солнечной системы, и проведены актуальные исследования и дискуссии о том, какую роль сыграли кометы в эволюции планет, в доставке воды и органических веществ на Землю.

Дневная температура поверхности находилась в пределах от 180 до 230К. Важной особенностью полученных спектров является отсутствие полос поглощения воды. Это говорит о том, что на поверхности кометы нет больших участков, покрытых льдом. Отсутствие льда, а также относительно высокая температура поверхности свидетельствуют, что, по крайней мере, верхние несколько сотен микрон ядра представляют собой темное дегидратированное вещество.

Очень важные результаты спектральных наблюдений поверхности ядра кометы Чурюмова – Герасименко были получены в период с августа по сентябрь 2014 г. с помощью спектрометра VIRTIS, работающего в диапазоне от 0,25 до 5 мкм. Спектры всех трех частей кометы («голова», «шея», «туловище») характеризовались следующими общими характеристиками: низкое альbedo 0,06 (согласуется с другими данными), заметное поглощение в диапазоне 2,9 – 3,6 мкм, наклонный спектр (рост интенсивности с длиной волны) в диапазоне 0,5 – 0,8 мкм, изменение наклона спектра на длине волны 1 мкм и более пологий спектр в диапазоне от 1 до 2 мкм.

Наиболее заметной деталью спектра является полоса поглощения, протянувшаяся от 2,9 до 3,6 мкм. Полоса достаточно асимметричная, с более крутым наклоном с коротковолновой стороны. Центр полосы приходится на длины волн 3,2 – 3,3 мкм. По поверхности ядра параметры полосы меняются довольно слабо, с самыми вариациями в области «шеи», где полоса становится глубже, вероятно, из-за небольшого содержания льда. В других местах поверхность выглядит достаточно однородной по составу. В работе [16] сделан вывод, что «космическое выветривание» на наблюдаемый состав кометы повлияло незначительно, и поэтому

вещество, которое наблюдается на поверхности кометы, позволяет судить и в целом о составе ядра.

Полоса поглощения в спектре кометы Чурюмова – Герасименко существенно отличается от полос поглощения в спектрах других тел Солнечной системы. Интересно, что в спектрах других комет семейства Юпитера, в отличие от кометы Чурюмова – Герасименко, видна полоса поглощения водяного льда и предварительно идентифицирована слабая полоса на длине волны 2,39 мкм, которая, вероятно, принадлежит углеводородам.

Участок спектра вблизи 3 мкм обогащен различными деталями, которые возникают в результате колебательного возбуждения связей атомов водорода с атомами более тяжелых элементов. Наиболее подходящими кандидатами представляются связи ОН и СН. Тонкая структура полосы поглощения указывает, что ее происхождение связано со сложной смесью алифатических и ароматических связей СН. Полоса также согласуется с возможным наличием групп ОН в составе кислот и спиртов, внедренных в макромолекулярную органическую твердое вещество. Хорошо известно, что эти группы ответственны за образование полос поглощения в спектрах нерастворимого органического вещества примитивных метеоритов. Положение и форма полосы зависит от соотношения спиртов и кислот и частично может объяснять ее вариации на разных участках поверхности кометы.

Космический аппарат "Розетта" обнаружил в облаке газа вокруг ядра кометы Чурюмова – Герасименко неожиданно большое количество молекул кислорода  $O_2$ , причем оказалось, что концентрация кислорода одинакова для всех областей ядра кометы, что указывает на его невероятную древность. Кислород сохранился в материи ядра кометы со времен формирования Солнечной системы, что опровергает значительную часть современных теорий формирования планет. Оказалось, что кислород занимает четвертое место по концентрации и массе среди всех газов в газовом хвосте кометы, уступая только воде, угарному газу и углекислоте. Предполагается, что кислород попал в недра ядра кометы Чурюмова – Герасименко в то время, когда оно представляло собой набор из микроскопических зерен пыли и льда в окрестностях будущей Солнечной системы. Также впервые были обнаружены молекулярный азот в ядре кометы Чурюмова – Герасименко, отношение содержания которого к содержимому СО указывает не только на фазу формирования  $N_2$ , но и дальнейшую его эволюцию, в частности преимущественное испарение при прогреве ядра кометы в ходе его физической эволюции вдоль эволюционирующей орбиты [10].

Розеттой и Филами получен ряд и других важных результатов, таких как: отношение полутяжелой воды к обычной  $DHO/H_2O = 5.3 \times 10^{-4}$ , что в три раза больше чем в земных океанах [14]; индукция магнитного поля в плазменном хвосте кометы  $B \approx 100$  нТ; подробно исследовано развитие кометной активности и образование комы и хвоста у кометы. Оказалось, что атмосфера вокруг ядра кометы образуется из выбросов газа и пыли многочисленными дже-тами (струями), самые крупные и мощные из которых расположены в районе перемычки, соединяющей меньшую часть (голову) с большей (телом); обнаружены и изучены вариации газопроизводительности различных молекул в коме [5, 9], построен впервые в истории науки детальный глобус ядра кометы, получены другие уникальные результаты [3 – 16]. Обработка полученных Розеттой и Филами научных данных о ядре кометы Чурюмова – Герасименко и окружающей его атмосфере (коме и хвоста) продолжается.

**Список литературы:** 1. *K.I.Churyumov, S.I.Gerasimenko. Physical observations of the shortperiod comet 1969h // Motion, origin and evolution orbit of comets, 1972. Proceedings of Symp. 45 IAU. Dordrecht-Holland. P.27-34.* 2. *K.I.Churyumov. Discovery, observations and investigations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in Kyiv // in the book "The new ROSETTA targets", 2004. Kluwer acad. Publ. Collangelli et al. (Eds). p.1-13.* 3. *I. P. Wright et al. CHO-bearing organic compounds at the surface of 67PChuryumov-Gerasimenko revealed by Ptolemy// Science, 349. aab0673.* 4. *Rosetta. ESA's mission to the origin of the Solar system. 2009. Eds. : Rita Schulz et al. Springer. 785 pp. (monography).* 5. *M. Hässig et al. Time variability and heterogeneity in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko // Science 347, 2015. doi:10.1126/science.aaa0276.* 6. *F. Goesmann et al. Cosac, The cometary sampling and composition*

experiment on Philae // Space Sci. Rev. 128, 2007. 257–280. doi: 10.1007/s11214-006-9000-6. 7. *J. Bieler* et al. The landing(s) of Philae and inferences on comet surface mechanical properties // Science 349, 2015. 8. *A. Bieler* et al. Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Nature 526, 29 October 2015. 678–681. doi:10.1038/nature15707. 9. *C. Snodgrass* et al. Beginning of activity in 67P/Churyumov-Gerasimenko and predictions for 2014-2015 // Astron.Astrophys. 557, 2013. A33. doi:10.1051/0004-6361/20132202. 10. *Rubin M* et al. Molecular nitrogen in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko indicates a low formation temperature// Science 10 Apr 2015. Vol. 348, Issue 6231, pp. 232-235. 11. *G Filacchione* et al. Exposed water ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko// Nature, 368, 21 Jan. 2016. V. 529, Letter. 12. *N. Fougere* et al. Three-dimensional direct simulation Monte-Carlo modeling of the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko observed by the VIRTIS and ROSINA instruments on board the Rosetta // Astronomy and astrophysics · Feb. 2016. DOI: 10.1051/0004-6361/201527889. 13. *Rotundi A* et al. Cometary science. Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko inbound to the Sun. // Science. 347(6220), 2015 Jan. 23. aaa3905. doi: 10.1126/science.aaa3905. 14. *K. Altwegg* et al. Cometary science. 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio // Science 347, 2015. 15. *Fred Goesmann* et al. Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry// Science. 31 JULY 2015. V. 349. Issue 6247. 16. *Capaccioni* et al. The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS // Rosetta. Science, 347, 2015. aaa0628-1.

*Астрономическая обсерватория  
Киевского национального университета  
имени Тараса Шевченко*

*Поступила в редколлегию 20.03.2016*