

ПРИРОДА

10 18



Комета Чурюмова—Герасименко: исследования миссией «Розетта»

А.Т.Базилевский¹, В.А.Дорофеева¹

¹Институт геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского (Москва, Россия)

На снимках ядра кометы 67Р Чурюмова—Герасименко наблюдается консолидированный материал ядра и возникший в результате его выветривания мелкозернистый реголит. В пределах консолидированного материала видны трещины, образования типа пластов, бугорки различного размера, пикообразные «пиннаклы» и кратеро-видные депрессии. Поверхность реголита относительно гладкая, но в некоторых местах наблюдаются образования типа эоловых дюн. Комплексом приборов орбитального и спускаемого аппаратов на поверхности ядра и в коме определен минеральный состав ядра, идентифицирован ряд органических соединений и измерено отношение дейтерия к водороду, которое оказалось сильно отличающимся от значений в океанах Земли.

Ключевые слова: комета, ядро кометы, кома, консолидированный материал ядра, кометный реголит, текстура поверхности, линеаменты, кометные льды, изотопия водорода, азота.

Кометы — малые тела, которые приходят во внутреннюю часть Солнечной системы из далекого (30–55 а.е.) от Солнца и потому холодного Пояса Койпера и еще более далекого (50–100 тыс. а.е.) и более холодного Облака Оорта. Кометы богаты льдами различного состава, основную массу которых (до 80%) составляет лед воды. С приближением кометы к Солнцу льды начинают испаряться, их пары уходят в окружающее пространство, увлекая за собой частицы пыли. Вокруг прилетевшего из холодного далёка консолидированного тела (*ядра*) формируется сильно разреженная газопылевая оболочка (*кома*). Часть материала комы «сдувается» давлением солнечных лучей в сторону от Солнца, и возникает *хвост* кометы. Так образуются небесные тела, которые мы, обитатели внутренней части Солнечной системы, наблюдаем в телескопы (рис.1) и иногда даже невооруженным глазом.

Кометы интересны для нас как представители внешних частей нашей Солнечной системы, информация об их составе и строении важна для понимания общей картины формирования планетной системы в целом и отдельных ее частей. Об-



Александр Тихонович Базилевский, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории сравнительной планетологии Института геохимии и аналитической химии имени В.И.Вернадского РАН. Специалист в области геологии планетных и малых тел Солнечной системы. Лауреат Государственной премии СССР и премии Фонда Александра фон Гумбольдта (Германия). e-mail: atbas@geokhi.ru



Вера Алексеевна Дорофеева, доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией термодинамики и математического моделирования природных процессов того же института. Космохимик, область научных интересов — моделирование процессов образования и эволюции тел в ранней Солнечной системе.

суждается возможность того, что вода земных океанов, а также другие летучие компоненты, в частности азот, были, по крайней мере частично, привнесены на нашу планету кометами [1, 2]. Вместе с кометной пылью на Землю и другие тела Солнечной системы могли попасть сложные органические соединения — предшественники белковых моле-

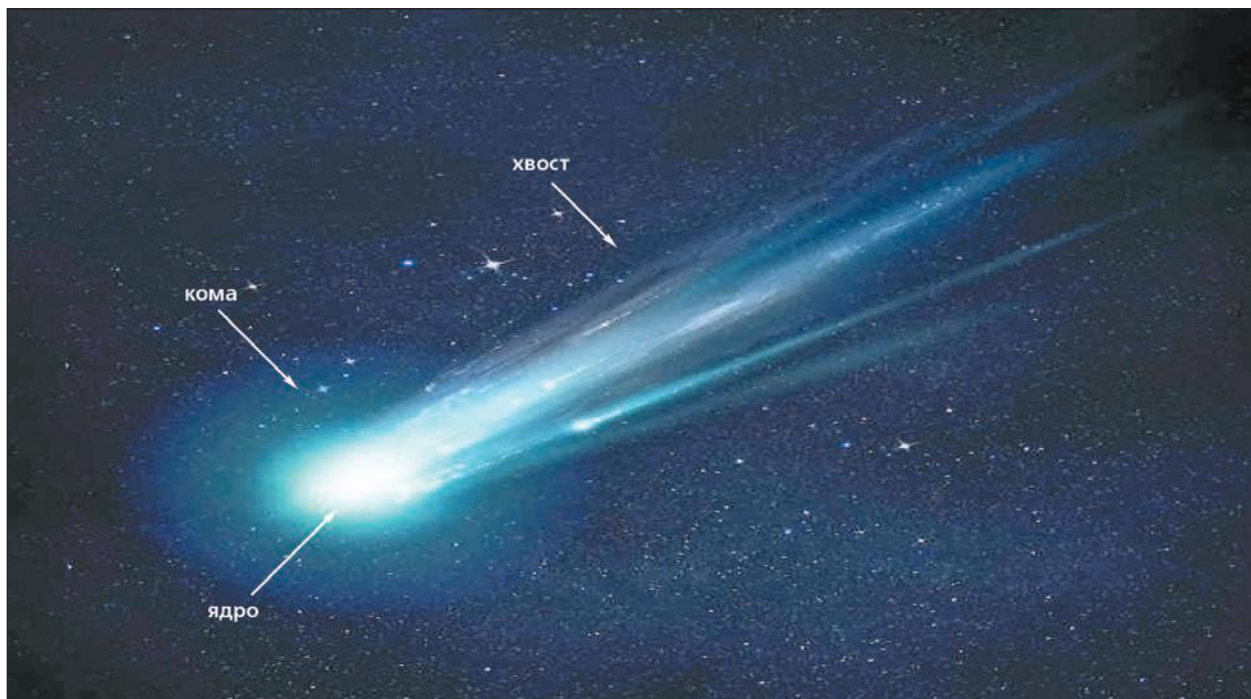


Рис. 1. Изображение кометы C/2012 S1 (ISON), полученное космическим телескопом «Хаббл».

opening.download/opening-download.html (НАСА, США)

кул, из которых затем могли развиваться различные формы жизни. На их поиски нацелены многие будущие космические миссии, в частности к крупным спутникам Юпитера и Сатурна — Европе, Ганимеду, Энцелладу и Титану, — на которых предполагается существование подповерхностных океанов.

Удары комет (и астероидов) по Земле могут представлять для нас хотя и эпизодическую, но довольно серьезную опасность. Тунгусская катастрофа 30 июня 1908 г., по-видимому, была взрывом в атмосфере Земли небольшой кометы [3, 4]. Мощности этого взрыва в тысячи раз больше мощности атомных бомб, взорванных над Хиросимой и Нагасаки. Если бы Тунгусская комета на пути к Земле задержалась примерно на 5 ч, многомегатонный взрыв в атмосфере случился бы не в безлюдном районе Сибири, а над Санкт-Петербургом. Для предотвращения таких ударов надо знать не только траектории, но и строение и состав приходящих из космоса «снарядов».

Почти вся масса кометы сосредоточена в ее ядре, и именно его изучение представляет для нас особый интерес. До космической миссии «Джотто» (Giotto) к комете Галлея (Halley) мы не видели изображений их ядер: мешало относительно яркое свечение комы и малый размер ядер. Миссия Giotto Европейского космического агентства (ЕКА) и несколько миссий НАСА (Deep Space 1, Stardust, Deep Impact, EPOXI) получили изображения ядер некоторых комет.

Ядра комет — тела неправильной формы размером от сотен метров до более чем 10 км. По-

верхность их черная (отражательная способность 0.03–0.05). По небольшому изменению траектории пролетающего мимо аппарата определялась масса кометы, а полученные изображения давали возможность оценить объем ядра. В результате рассчитывалась объемная плотность ядра, которая оказалась очень низкой (300–700 кг/м³), что указывает на высокую (>50–70%) пористость его материала [5, 6].

Проект «Розетта»

Полеты к кометам дали много важной информации. В частности, космическим аппаратам (КА) «Вега» при пролете сквозь кому кометы Галлея с помощью пылеударного масс-спектрометра удалось получить данные о составе отдельных частиц кометной пыли, а аппарат Stardust при пролете сквозь кому кометы Wild 2 захватил кометные частицы и доставил их на Землю. Но все эти миссии были пролетными и давали информацию о характеристиках кометы в течение короткого (часы) промежутка времени. Для длительных наблюдений за кометой ЕКА была осуществлена миссия «Розетта» с орбитальным и посадочным аппаратами* (рис.2) [7, 8].

Название миссии происходит от знаменитого Розеттского камня — каменной плиты с выбитыми на ней тремя идентичными по содержанию

* sci.esa.int/rosetta/

текстами, два из которых написаны на древнеегипетском языке (один — иероглифами, другой — демотическим письмом), а третий — на древнегреческом. Сравнивая тексты Розеттского камня, французский лингвист Ж.-Ф.Шампольон смог расшифровать древнеегипетские иероглифы.

На космическую миссию «Розетта» соответственно возлагались определенные надежды: собранные в ее ходе данные должны были помочь серьезно продвинуться в понимании ранней истории Солнечной системы. Космический аппарат «Розетта» стартовал с космодрома Куру, расположенного во Французской Гвиане на побережье Атлантического океана, 2 марта 2004 г. В качестве объекта исследований сначала предполагалась комета 46P/Wirtanen, но затем по техническим причинам запланировали полет к комете 67P Чурюмова—Герасименко (рис.3).

Эта комета была открыта в 1969 г. Климом Ивановичем Чурюмовым в Киеве на фотопластинках, снятых Светланой Ивановной Герасименко в Алма-Атинской обсерватории. Индекс 67P означает, что это 67-я открытая короткопериодическая (период обращения вокруг Солнца менее 200 лет) комета.

На сложной траектории движения к комете КА «Розетта» запланированно ускорял движение, пролетая один раз вблизи Марса, три раза вблизи Земли и мимо астероидов Штейнс и Лютеция, а в августе 2014 г. приблизился к комете 67P и стал сопровождать. На рис.3 показано ядро этой кометы размером 4.1×3.2×2.5 км, состоящее из трех частей, которые неофициально называют Телом, Головой и Шеей [9].

После детальной ТВ-съемки ядра было выбрано место посадки спускаемого аппарата «Филы» — на «верхушке» Головы ядра. И 14 ноября 2014 г. аппарат совершил посадку. После нескольких незапланированных подпрыгиваний длиной в сотни метров (отказали удерживающие гарпуны и прижимной ракетный двигатель) он «успокоился» в затененном месте, поэтому программа научных наблюдений выполнена им лишь частично. Орбитальный аппарат, то сближался с ядром до расстояния в несколько километров (когда газо-выделение было относительно слабым), то удалялся на сотни километров (когда поток газов усиливался, и захваченные им крупные пылинки могли повредить аппаратуру космического ко-



Рис.2. Орбитальный аппарат «Розетта» и спускаемый аппарат «Филы» над кратерообразной депрессией Хатмехит на Голове ядра кометы 67P (blogs.esa.int/rosetta/2014/10/31/rosetta-lined-up-for-lander-delivery, Artist impression. Credit: ESA–C. Carreau/ATG medialab). Изображение ядра получено 21.08.2014 камерой NavCam. Часть снимка ROS_CAM1_20140821T220718.

рабля). Миссия продолжалась до 30 сентября 2016 г., затем аппарат направили на сближение с ядром, и он запланированно столкнулся с ним в «верхушечной» части Головы.

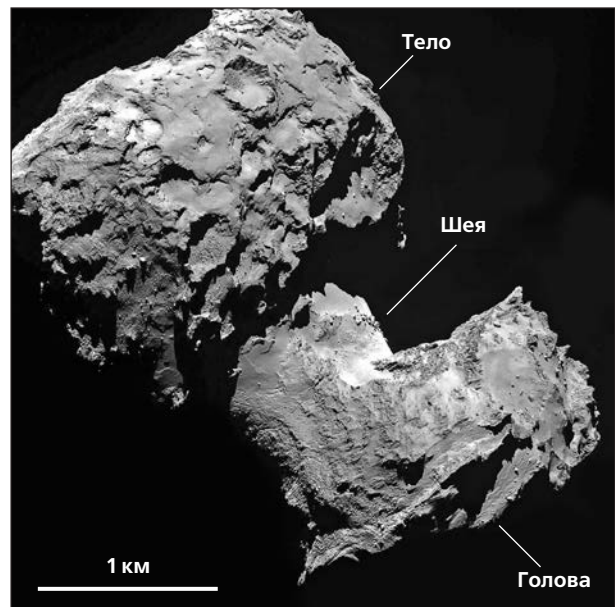


Рис.3. Изображение ядра кометы Чурюмова—Герасименко, полученное 06 августа 2014 г. ТВ-камерой OSIRIS.

Здесь и далее снимки ESA/ROSETTA/OSIRIS и NavCam
Снимок N20140806T041959143ID30F28

Материал ядра кометы

На снимках, полученных ТВ-камерами миссии «Розетта», различаются два типа вещества ядра: консолидированный материал, по-видимому, слагающий ядро на всю глубину, и перекрывающий его рыхлый реголит (рис.4).

На снимках консолидированный материал ядра выглядит трещиноватым, т.е. он обладает определенной связностью (прочностью), хотя и меньшей по земным меркам. По геометрии нависающих уступов и отсутствию видимых деформаций в основании крутых уступов оценена прочность этого материала на разрыв (от 1.5 до 100 Па), на сдвиг (от ~13 до ≥30 Па) и на сжатие (от 30 до 150 Па, возможно, до 1.5 кПа) [10, 11]. Это очень низкие значения. С учетом зависимости результатов измерений от размеров измеряемого объекта они близки к значениям для сухого свежевыпавшего снега при $t = -10^{\circ}\text{C}$. Однако в условиях очень низкой силы тяжести (10^{-4} земной) на поверхности ядра кометы блоки консолидированного материала, не разрушаясь, выдерживают падение с высоких уступов.

В команде «Розетты» рыхлый реголит называют *airfall deposits* — отложениями, осажденными из «воздуха». При сублимации льда, входящего в состав приповерхностного слоя ядра, этот материал, частица за частицей, увлекался образующимся газом и поднимался. Одна его часть, подхваченная потоком газа, мигрировала в открытый космос, а другая могла осесть на поверхности кометы, словно через «воздух». Но рыхлый материал поверхности образуется и при сублимационном вы-

ветривании обнажающегося на склонах консолидированного материала ядра. Рыхлый «остаток» ссыпается вниз и накапливается у склонов, например в основании уступа Хатор [12]. По глубине ямок от удара опорами аппарата «Филы» и измеренной динамике удара сделан вывод, что по крайней мере до глубины ~20 см реголит — зернистый (размер зерен ≤1 см) и сравнительно мягкий с максимальной прочностью на сжатие около 1–3 кПа [13]. С учетом влияния скорости удара прочность этого материала, по-видимому, составляет всего несколько сотен паскалей [11].

Текстуры поверхности консолидированного материала

На снимках поверхности консолидированного материала можно разглядеть два типа структур: линеаменты и бугорки.

На снимке крутого уступа Хатор (рис.5) на поверхности обнажающегося консолидированного материала различаются вертикальные линеаменты типа трещин и горизонтальные — типа пластовой отдельности [12, 14], а на участках, близких к горизонтальным, поверхность покрыта реголитом. Ниже склона видна существенно реголитовая поверхность Шеи. В основании уступа реголитовый материал «взбирается» на него, что свидетельствует о его ссыпании. Трещины в консолидированном материале наблюдаются практически во всех местах его обнажения (рис.6).

По длине трещин и среднему расстоянию между ними можно оценить глубину их проникнове-

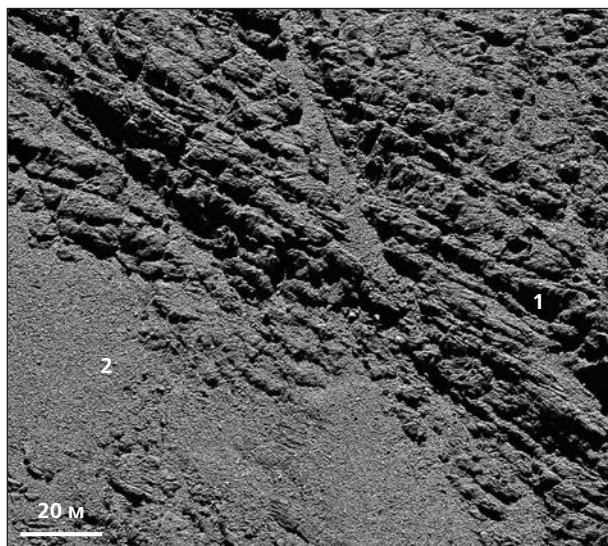


Рис.4. Консолидированный материал (1) и рыхлый кометный реголит (2) в юго-восточной части Головы ядра. Снимок получен 7 сентября 2016 г. камерой OSIRIS с разрешением 9 см на элемент изображения.

Часть снимка N20160917T191735352ID30F22

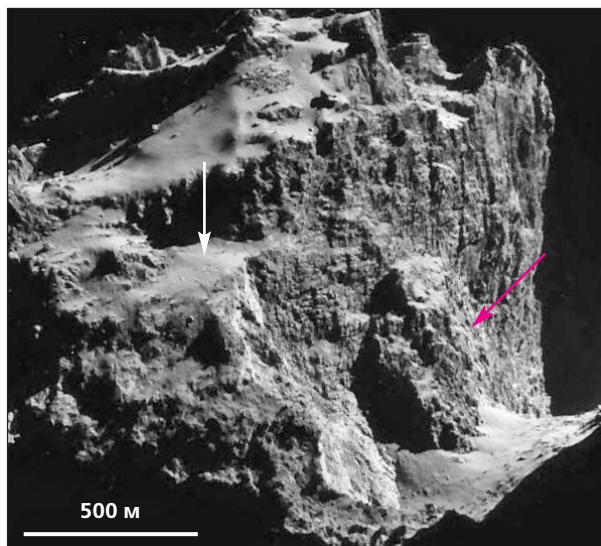


Рис.5. Самый высокий почти вертикальный уступ Хатор, на котором обнажается консолидированный материал. Красная стрелка указывает на тело предполагаемого оползня, белая — на участок, покрытый рыхлым реголитом.

Часть снимка N20141106T202256

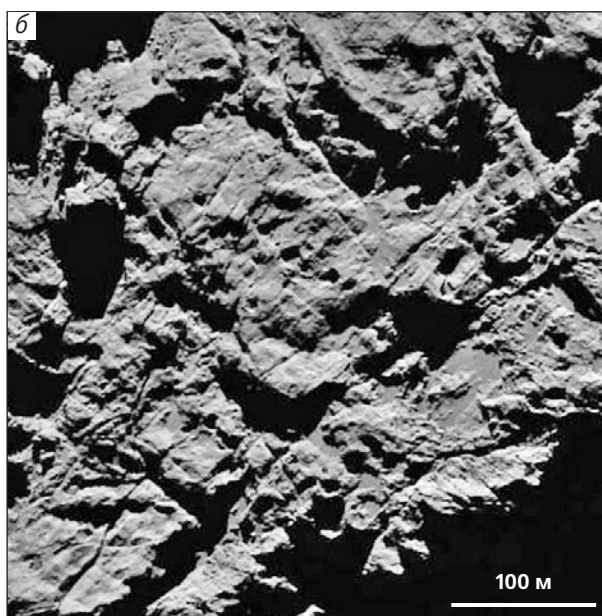
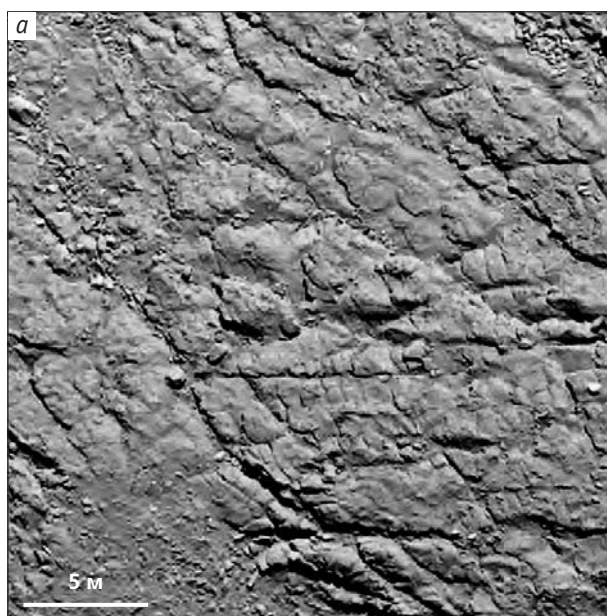


Рис.6. Трещины длиной около 1 м в консолидированном материале ядра на его Голове (а), и трещины длиной десятки и сотни метров — на его Теле (б).

Снимки W20160930T102837743ZIS201397549000F12, N20160207T082551483ID30F22

ния в ядро. В большинстве изученных случаев она не превышает нескольких метров, что соответствует глубине проникновения тепловой волны при сезонных (зима—лето) колебаниях температуры поверхности ядра [15]. По-видимому, это трещины растяжения, которые характеризуют только приповерхностный слой консолидированного материала.

На многих снимках различаются структуры, напоминающие слои в земных осадочных породах или пластовую отдельность — например, в гранитах.

На рис.7,а видны структуры типа пластов, «уходящих» вглубь ядра, а на рис.7,б — многочисленные террасы, которые могут быть поверхностным выражением примерно горизонтальных пластов.

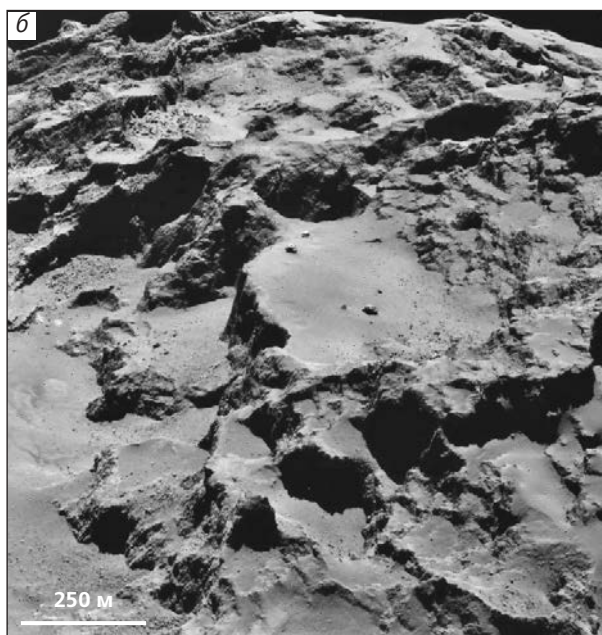
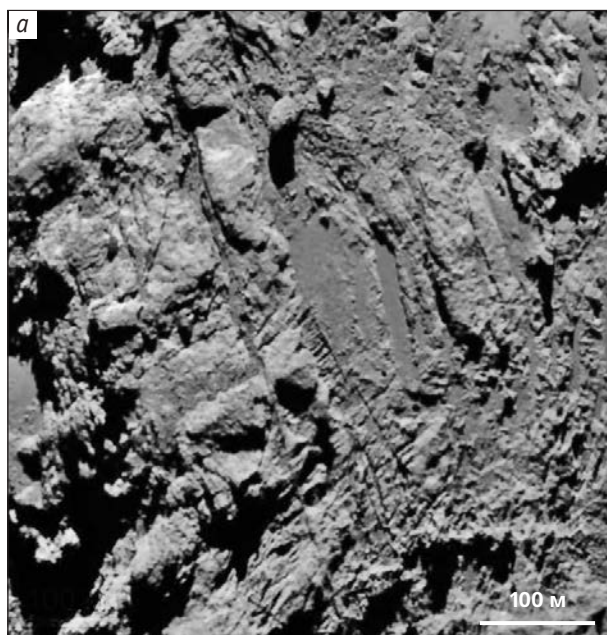


Рис.7. Структуры типа пластовой отдельности (а) и вид на склон Шеи, противоположный уступу Хатор (б).

Части снимков N20160130T131149715ID30F22, NavCam 2014–10–01T222256

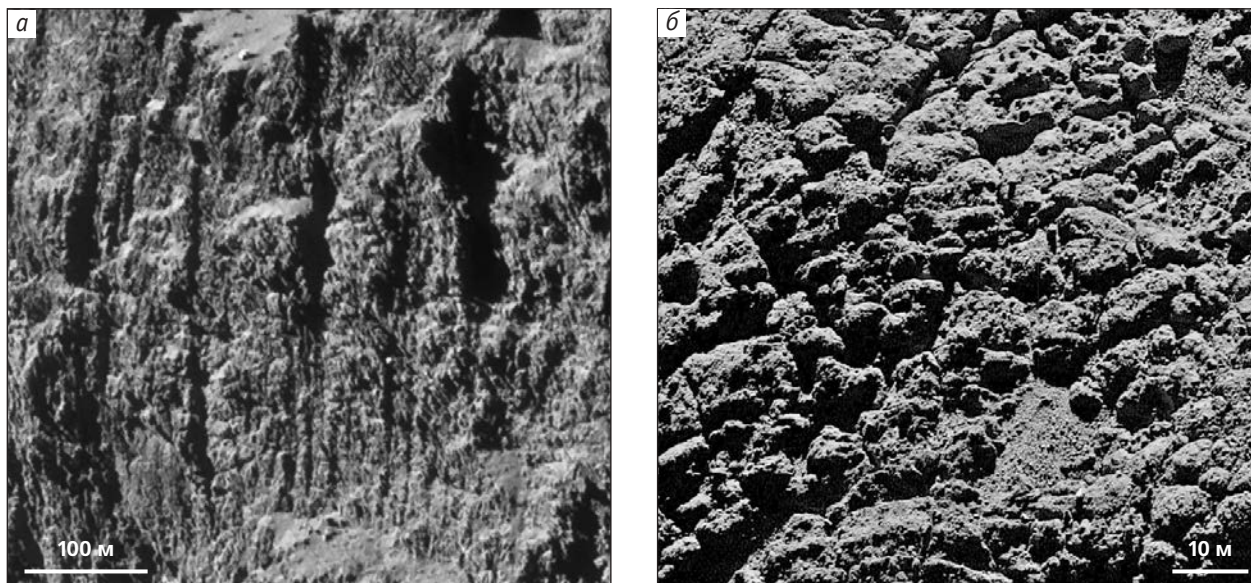


Рис.8. Бугристая текстура поверхности: в верхней части уступа Хатор, снимок повернут против часовой стрелки (а) и в южной части Головы (б).

Снимки ROS_CAM1_20160906T175932F, N20160519T110837677ID30F22

Проследив ориентировку таких террас по поверхности всего ядра, М.Массирони с соавторами обнаружили, что пласты «облекают» отдельно Тело и отдельно Голову [16]. Это позволило предположить, что данные две части ядра когда-то существовали независимо, затем встретились и при низкоскоростном столкновении слились. Следует сказать, что не все пластовые структуры ядра укладываются в облегающие образования, и внешне привлекательная гипотеза требует дальнейшей проработки.

Кроме линейментов на поверхности консолидированного материала ядра встречаются бугор-

ки (рис.8). На верхней части уступа Хатор хорошо видны вертикальные линейменты типа трещин, поверхность между ними имеет бугристую текстуру. Поперечники бугорков составляют несколько десятков метров.

Иногда на снимках отдельно лежащих блоков консолидированного материала, которые явно испытали сублимационное выветривание, различаются еще более мелкие бугорки — несколько десятков сантиметров. На рис.9 виден блок поперечником около 5 м. Диаметр бугорков на его поверхности составляет несколько десятков сантиметров. Очевидно, бугорчатость поверхности консолидированного материала отражает его «зернистое» строение в интервале размеров — от десятков метров до дециметров и меньше [6, 12]. По-видимому, это первичное свойство материала кометных ядер, отображающее специфику его образования.

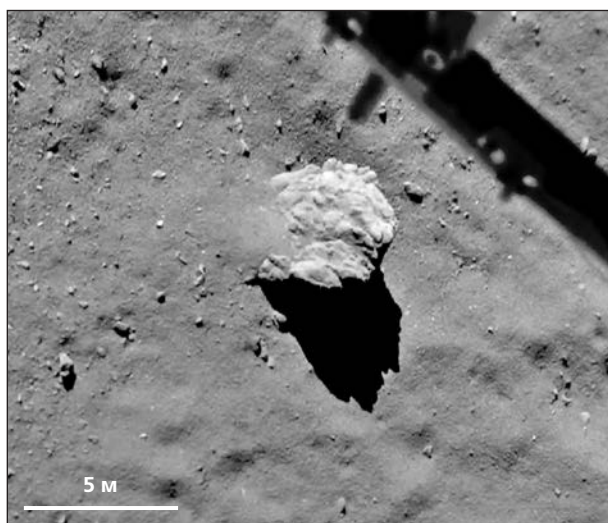


Рис.9. Блок консолидированного материала с бугорчатой поверхностью в районе Агилкия на Телe ядра.

Снимок камеры ROLIS, установленной на аппарате «Филы»

Пиннаклы

Во многих местах ядра кометы 67P видны пикообразные возвышенности — пиннаклы (рис.10). Кометные пиннаклы впервые были замечены на поверхности ядра кометы Wild 2 [17]. На снимках ядра кометы Чурюмова—Герасименко с более высоким разрешением пиннаклов гораздо больше и видны они лучше [18]. Считается, что кометные пиннаклы — это останцы более устойчивого к сублимационной эрозии вещества, которое находится в виде включений в материале ядра. Пиннаклы известны и на Земле, только эрозия здесь не сублимационная, а обыкновенная водная. Происхождение кометных пиннаклов предполагает, что их макси-

мальная высота соответствует минимальной толщине эродированного слоя. Для ядра кометы Чурюмова—Герасименко максимальная высота наблюдаемых пиннаклов составляет 100–200 м. Это может говорить о том, что ядро потеряло слой толщиной как минимум 100–200 м [18].

Кратерообразные формы рельефа

В ряде мест на поверхности ядра видны круглые в плане депрессии (см. рис.10). Внешне они похожи на частично разрушенные ударные кратеры. Их диаметры варьируют от 1 м до 1 км. Из некоторых выделяется газ с взвешенной мелкой пылью. Похожие структуры отмечены и на ядрах других комет. Скорее всего, это провальные депрессии, не имеющие отношения к ударным кратерам [19]. Единственный вероятный ударный кратер диаметром 35 м и глубиной 9 м (рис.11) обнаружен в области Аш [14].

Движение вещества вниз по склонам рельефа

На ядре кометы 67P довольно много крутых уступов, и в этих местах хорошо заметны следы движения вещества вниз по склонам рельефа.

На рис.12 видно, что по крайней мере часть блоков консолидированного материала размером около 1 м (и крупнее) при падении с уступов не разрушается. Очевидно, причина этого в очень низкой силе тяжести на поверхности ядра. Простой расчет показывает: свободное падение с высоты 200 м займет около 5 мин, а падающий блок наберет скорость всего около 30 см/с.

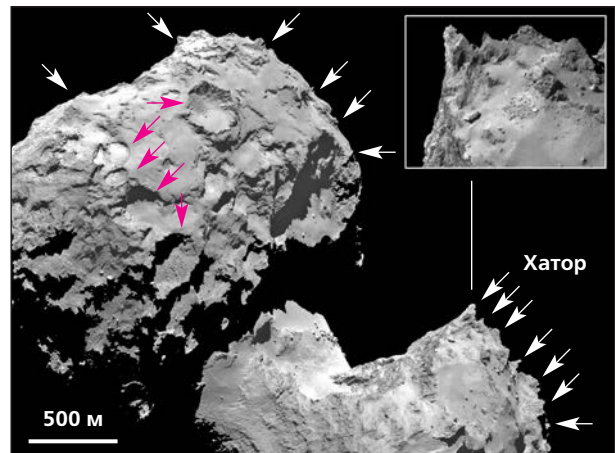


Рис.10. Пиннаклы (белые стрелки) на ядре кометы 67P. В врезке группа пиннаклов над уступом Хатор. Красные стрелки указывают на кратерообразные формы рельефа.

Снимок N20140806T041959143ID30F28

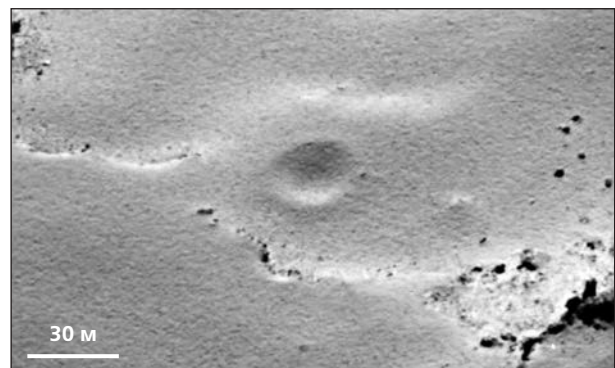


Рис.11. Вероятный ударный кратер на ядре кометы 67P.

Часть снимка N20140910T183412825ID30F16

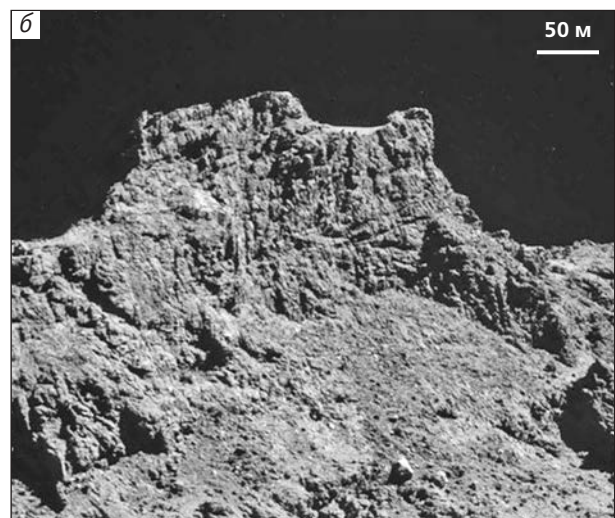
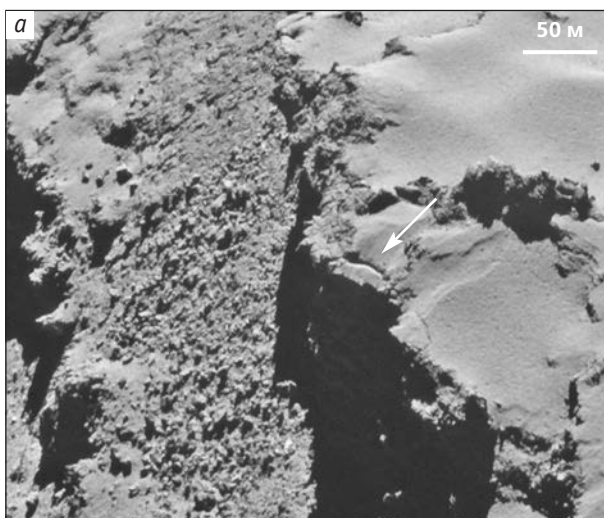
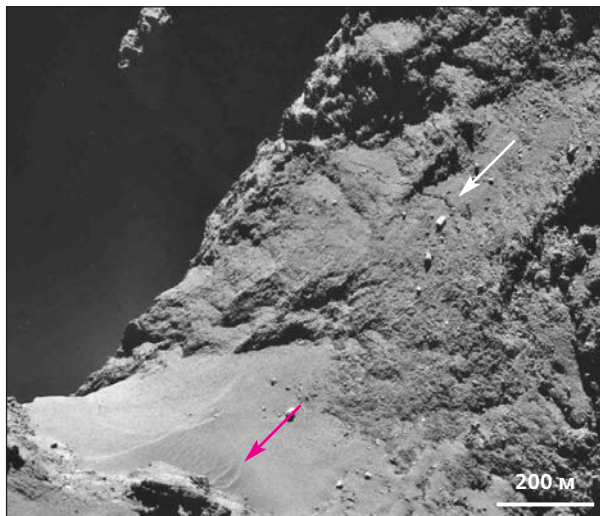


Рис.12. Крутой уступ с осыпью обвалившихся обломков. Стрелка указывает на зияющую трещину отрыва — предвестник нового обвала (а); высокий (~200 м) уступ с обнажающимся консолидированным материалом и осыпью обломков в основании (б).

Снимки N20141028T020855, NavCam ROS_CAM1_20141021T060855

Дюны

В нескольких местах на поверхности ядра наблюдаются образования типа эоловых дюн [14, 20] длиной десятки метров и шириной несколько метров (рис.13). Они очень похожи на эоловые дюны Земли и Марса. Однако механизм их образования не очень понятен. Для формирования эоловых дюн нужен ветровой поток. Как возможность такого можно было бы рассматривать поток газа из трещины растяжения, показанной на рис.13. Но дюнных полей на ядре 67P несколько, и только одно из них находится вблизи такой трещины. Необходимо какое-то более универсальное объяснение. Обсуждается возможность образования дюн под воздействием направленных потоков газа комы между освещенными и не освещенными в данный момент частями ядра [21].



Химия кометы 67P

Кометы относятся к наиболее примитивным объектам Солнечной системы. Согласно современным космогоническим и динамическим моделям [22], кометы, точнее, их ядра, образовались в транснептуновом регионе, на радиальных расстояниях от Солнца $r \sim 15-25$ а.е., в околосолнечном газопылевом протопланетном диске на самых ранних этапах его эволюции — в первые 1–3 млн лет. Впоследствии из-за гравитационного влияния входивших в резонанс планет-гигантов большая часть кометных ядер попала на Солнце, а остальные были выброшены на периферию Солнечной системы в регион Облака Оорта, либо вытеснены в регион Пояса Койпера (рис.14). Облако Оорта — источник долгопериодических комет, а Пояс Койпера и прилегающий к нему так называемый рассеянный диск — короткопериодических. В процессе эволюции Солнечной системы часть комет рассеянного

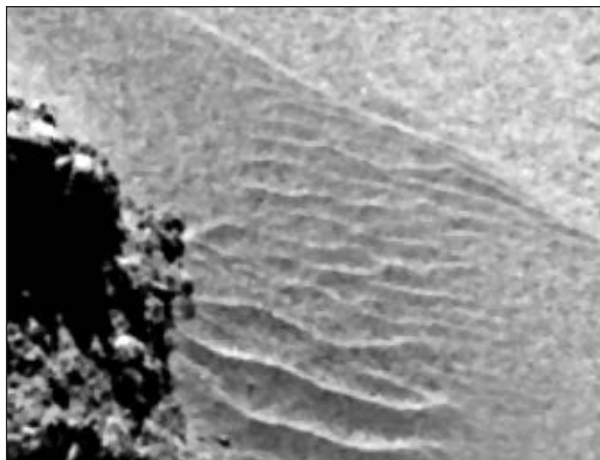


Рис.13. «Эоловые» дюны (красная стрелка) в районе Хапи на Шее ядра кометы 67P. Белая стрелка указывает на трещину разрыва. Внизу — увеличенное то же дюнное поле.

Снимки NavCam ROS_CAM1_20141018T102254, OSIRIS N20140917T235243330ZID101397549400F22

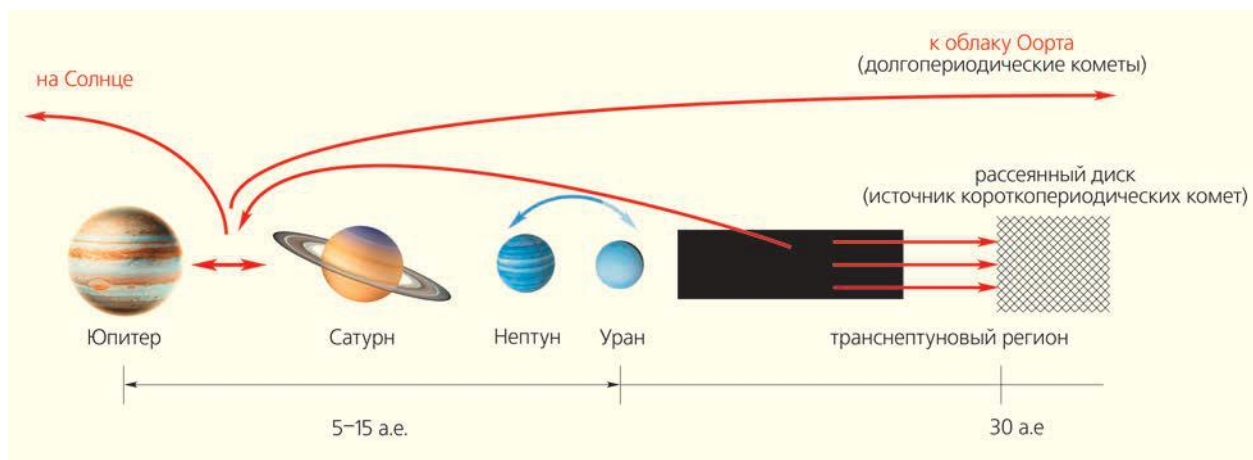


Рис.14. Схема эволюции орбит каменно-ледяных тел транснептунового региона в околосолнечном протопланетном диске на ранних этапах его эволюции.

диска благодаря гравитационному влиянию планет-гигантов могут менять свои орбиты и образуют семейства. Самое крупное из них — семейство Юпитера. Кометы движутся вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, при этом точка перигелия (минимальное расстояние до Солнца) часто находится внутри орбит планет земной группы, что облегчает их изучение.

Большая часть жизни комет проходит на периферии Солнечной системы. К тому же, обладая высокой пористостью, их ядра имеют низкую теплопроводность. Из-за этого при приближении к Солнцу прогревается и изменяется состав только внешнего слоя толщиной всего несколько метров. Поэтому ядра комет в течение всей жизни сохраняют первичное каменно-ледяное вещество околосолнечного диска, из которого они образовались, в практически неизменном виде.

Особая значимость получаемой при исследовании комет информации заключается в том, что кометы — единственные объекты Солнечной системы транснептунового региона, которые на сегодняшний день доступны для непосредственного изучения.

Ядра комет состоят из каменной (минеральной) пыли, тугоплавких органических соединений (в сумме ~50–70 мас.%) и смеси льдов (~30–50 мас.%). Главный компонент кометного льда — лед H_2O (80–85%), остальные — льды CO_2 , CO , CH_4 , CH_3OH , NH_3 и др. О химическом составе ядер комет судят в основном по составу кометной комы — газопылевой оболочки диаметром несколько десятков тысяч километров, которая образуется вокруг ядра при испарении льдов, когда комета приближается к Солнцу на $r \leq 5$ а.е., т.е. при пересечении орбиты Юпитера. Благодаря переходу льдов в газообразное состояние появляется возможность спектроскопическими методами определить не только качественный, но и количественный состав комы. Сейчас в комах комет различных динамических типов экспериментально обнаружено более 20 так называемых материнских молекул и радикалов и большое количество вторичных (дочерних) молекул. В ряде из них были определены значения изотопных отношений, например D/H в молекулах H_2O и HCN , $^{14}N/^{15}N$ в CN , HCN и NH_2^+ .

При планировании исследований химического и изотопного состава кометы 67P с помощью аппаратуры, установленной на КА «Розетта» и посадочном модуле «Филы», преследовались главные образом три цели.

Во-первых, определить состав кометного ядра и, сравнив его с составом ядер других комет, получить представление о составе каменно-ледяных планетезималей, из которых вероятнее всего образовались все объекты внешней части Солнечной системы. Помимо этого, знание состава кометных ядер помогает оценить физико-химические и динамические условия как во внешней части газопыле-

вого околосолнечного диска на ранних стадиях его эволюции, так и в диске в целом. Во-вторых, найти аргументы в пользу или против гипотезы кометного происхождения воды и иных летучих на Земле и на других внутренних планетах. Эта гипотеза еще два десятилетия назад была преобладающей, да и сейчас у нее остается много сторонников. И наконец, главная задача миссии — найти свидетельства того, что именно благодаря кометам на Земле и на других телах Солнечной системы могла зародиться жизнь. Это одна из самых увлекательных проблем современной науки, и, возможно, именно вещество комет играет здесь ведущую роль.

Химический состав ядра кометы 67P как индикатор условий его образования

Рассмотрим составы тугоплавкой и ледяной составляющих ядра.

Тугоплавкая (пылевая) компонента. Как мы уже говорили, более или менее подробно проанализировать состав тугоплавкой компоненты оказалось возможным только для двух комет: *in situ* для кометы Halley и в лабораторных условиях на Земле — для кометы Wild 2. Основная задача при сборе кометной пыли — сохранить все ее компоненты. Из-за большой разницы скоростей кометы и приемника (установленного на пролетающем вблизи космическом аппарате) при ударе о мишень многие составляющие пыли разрушались. Информация, полученная в ходе космической миссии Rosetta, представляет особую ценность. Во-первых, изучение кометы 67P длилось более двух лет (как до, так и после прохождения перигелия) и космический аппарат в определенные периоды подходил на очень близкое (менее 10 км) расстояние к ядру. Во-вторых, и это главное, КА мог максимально (до $< 10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) сблизать свою скорость со скоростью кометы, и значительное количество частиц, уловленных мишенью, во многом сохранили свой химический состав и физическую структуру. Всего удалось уловить более 35 тыс. пылевых частиц размером от 10 до 1000 мкм и проанализировать около 250 из них.

Исследования частиц проводились с помощью приборов: COSIMA (Cometary Secondary Ion Mass Analyzer) — масс-спектрометра вторичных ионов, предназначенного для определения элементного и изотопного состава пылинок, анализа неорганической и органической фаз в них, и картирующего спектрометра VIRTIS (Visible InfraRed Thermal Imaging Spectrometer) видимого и теплового ИК-диапазона, используемого для изучения свойств грунта. Полученные результаты показали, что тугоплавкая компонента ядра кометы 67P на ~55% по массе состоит из минеральной пыли и на 45% — из сложных органических соединений. Минеральная пыль представляет собой неравновесную смесь безводных силикатов, сульфида железа и аморфно-

го углерода [23–25]. Силикаты включают в себя железомagneиные оливины $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ и пироксены $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$. В целом такой состав отвечает составу межзвездной пыли, а соотношения основных породообразующих элементов (Fe, Mg, Si, Al, Na, K, Ca, а также Sr и Mn) близки к хондритовому, как и в ранее исследованных кометах Halley и Wild 2.

Помимо этого, в составе минеральной фракции кометы 67P найдено одно зерно, по составу подобное обогащенным Ca и Al тугоплавким включениям (CAI), которые входят в состав некоторых углистых хондритов [26]. Это наиболее древние объекты Солнечной системы, вероятнее всего образовавшиеся вблизи Солнца в результате высокотемпературной конденсации газовой фазы протопланетного диска и затем вынесенные в его внешнюю часть. Ранее такие включения были обнаружены в пылевой компоненте кометы Wild 2 [27]. Их присутствие свидетельствует о том, что в околосолнечном газопылевом диске существовал эффективный перенос вещества из внутренних горячих зон наружу (на десятки астрономических единиц), во внешние холодные регионы, где формировались кометные ядра.

Из двух сотен частиц, проанализированных инструментом COSIMA, в семи пылинках были обнаружены сложные органические вещества [28]. Они представляют собой смесь высокомолекулярных алифатических и ароматических углеводов, состоящих в основном из C, H, O, N. По составу этот материал аналогичен нерастворимому органическому остатку углистых хондритов, но содержит значительно большее количество водорода. Последнее может свидетельствовать о том, что, в отличие от астероидов, вероятно потерявших свой водород при нагревании, кометное вещество никогда не подвергалось сильному нагреву и сохранило водород. Таким образом, оно представляет собой наиболее примитивное вещество, сохранившее свой состав с момента возникновения Солнечной системы. Предполагается, что местом образования тугоплавкого органического вещества комет и метеоритов могли быть межзвездные молекулярные облака [29] или холодные внешние регионы протопланетного околосолнечного диска [30]. Возможно, часть присутствовавших в пыли алифатических углеводов могла термически разложиться при ударе о мишень, превратившись в аморфный углерод, который также установлен в собранной кометной пыли.

В целом можно сказать, что в тугоплавкой компоненте кометы 67P обнаружено высокое содержание углерода и азота, которые в основном входят в состав тугоплавких органических соединений. Атомное соотношение C/Si в пылевой компоненте кометы 67P в среднем составляет $5.5^{+1.4}_{-1.2}$ [25]. Это на порядок выше, чем в веществе примитивных углистых хондритов, но близко значению 4.4 ± 1.3 , полученному для пыли кометы Halley [31], и почти вдвое меньше протосолнеч-

ного значения $\text{C/Si}_{\text{Solar}} = 7.19 \pm 0.83$ [32]. Из этого следует важный вывод, что в газовой фазе протопланетного диска в виде легких углеводородов могла находиться всего лишь четверть всей массы углерода (или немного больше).

Относительное содержание азота в пылевой компоненте кометы 67P, как и в комете Halley, также высоко: $\text{N/C} = 0.035 \pm 0.011$ [33], что втрое выше, чем в углистых хондритах. А вот содержание кислорода в пылевой компоненте обеих комет ниже, чем в примитивных хондритах, $\text{O/Si}_{67\text{P}} = 5.5 \pm 0.5$. Это объясняется тем, что в состав кометного вещества входят только негидратированные минералы, в то время как в примитивных углистых хондритах типа CI силикаты гидратированы. Высокое содержание углерода и отсутствие гидратированных силикатов в кометной пыли однозначно свидетельствует о первичности вещества комет. Оно не прошло никакой постагреационной переработки, близко по составу межзвездному веществу и, таким образом, характеризует первичный состав пылевой компоненты в околосолнечном газопылевом протопланетном диске.

Ледяная компонента. Состав льдов определен для многих комет при спектроскопическом анализе их ком. Ледяная компонента ядра кометы 67P изучалась с помощью ИК-спектрометра высокого разрешения VIRTIS-H и масс-спектрометров DFMS и RTOF прибора ROSINA (Rosetta's Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis). Это спектрометр ионов и нейтральных атомов для определения элементного, изотопного и молекулярного состава комы. Установлено, что основные газы комы кометы 67P (как и ком большинства других комет) — H_2O , CO_2 и CO. В качестве компонентов-примесей в ней присутствуют CH_4 , C_2H_4 , CH_3OH , C_2H_6 и другие легкие углеводороды, а также соединения азота (HCN, NH_3 и N_2) и серы (H_2S , SO_2 , COS).

Кроме того, были идентифицированы инертные газы (Ar, Kr, Xe) и определен их изотопный состав. Результаты сравнения этих определений с данными для 30 других комет различных динамических типов представлены на рис.15. Поскольку вода — основной компонент кометных льдов и, соответственно, комы, содержания всех остальных ее составляющих определяются именно относительно содержания $\text{H}_2\text{O}_{\text{gas}}$. Число молей любого газа нормируется к 100 молям H_2O .

Из рис.15 видно, что относительные содержания, измеренные для всех компонентов комы 67P в южном полушарии (красные звездочки) кометы существенно выше, чем в северном (синие звездочки). Например, относительно содержание CO колеблется от 2.7 до 20%, а содержание CO_2 варьирует от 2.5 до 80%. Какие же данные правильнее (корректнее) отражают состав кометного ядра?

Дело в том, что кометы, как и все другие тела Солнечной системы, вращаются не только вокруг Солнца, но и вокруг собственной оси, которая у кометы 67P наклонена к плоскости эклиптики под уг-

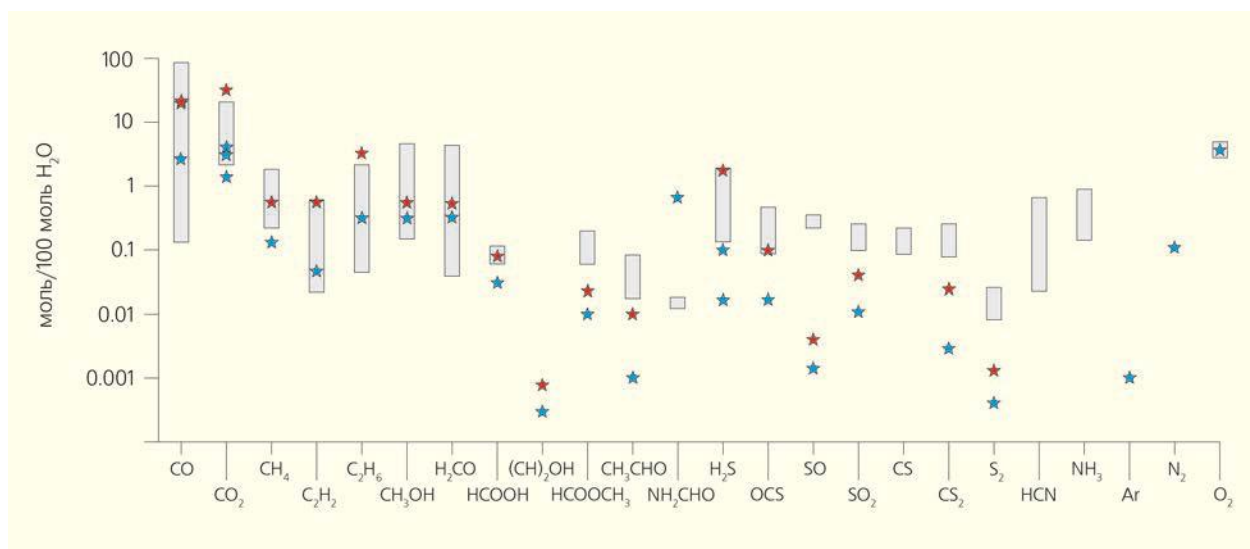


Рис.15. Относительные содержания компонентов комы кометы 67P в период ее нахождения на расстоянии $r \approx 3$ а.е. от Солнца. Затененными прямоугольниками показаны интервалы значений относительных содержаний компонентов ком 30 комет [34, 35]. Синия звездочка — северное полушарие, красная — южное.

лом 52° . На ее ядре, как и на Земле, происходит смена сезонов, но из-за того что орбита кометы не круговая, а эллиптическая, лето в северном полушарии длится 5.6 года, т.е. большую часть ее орбитального периода (≈ 6.4 года). Однако в это время комета находится далеко от Солнца, поэтому температура ее поверхности низка и сублимация газов из поверхностного слоя кометы незначительна, а главное, происходит практически без его разрушения. Данные термодинамических расчетов при общем давлении $\sim 10^{-6}$ – 10^{-8} бар дают следующие температуры сублимации (T_s) льдов: наиболее летучие льды CO, O₂, Ar и N₂ имеют T_s в интервале 20–25 K, далее по мере приближения кометы к Солнцу и повышению температуры поверхности ее ядра сублимируют CH₄ ($T_s = 31$ K), C₂H₆ ($T_s = 44$ K), NH₃ ($T_s = 75$ K), CO₂ ($T_s = 80$ K), HCN ($T_s = 95$ K), CH₃OH ($T_s = 99$ K) и, наконец, при $T_s \approx 150$ K сублимирует лед воды.

В южном полушарии лето на комете 67P длится только 10 мес, но в это время она проходит перигелий, поверхность ядра максимально нагревается. Из-за этого темпы эрозии южного полушария значительно выше. Оно теряет часть поверхностного слоя, в результате обнажаются свежие, недегазированные слои ядра кометы. Относительные содержания всех летучих компонентов, сублимирующих из южного полушария, выше, чем из северного (даже когда комета находилась на расстоянии от Солнца ≈ 3 а.е., т.е. в северном полушарии было лето, а в южном — зима).

Отметим, что измерения содержаний всех высоколетучих компонентов (O₂, Ar и N₂) могли происходить, только когда комета была значительно удалена от Солнца, газы выделялись незначительно и КА «Rosetta» находился на расстоянии ≥ 10 км

от ядра, не опасаясь разрушения приборов частицами пыли и камнями. Но поскольку в этот период освещалось только северное полушарие, более эродированное и подвергшееся за время жизни кометы сильной дегазации, полученные данные, видимо, следует считать заниженными относительно содержания высоколетучих компонентов в ядре кометы.

Обнаружение молекулярного азота (N₂) и кислорода (O₂), а также инертных газов (аргона, ксенона и криптона) в коме кометы свидетельствует об образовании 67P при очень низких температурах, близких к 20 K.

В постперигелийный период, когда комета находилась на расстоянии $r = 1.3$ а.е. от Солнца (перигелий отвечает $r = 1.24$ а.е.) в южном летнем полушарии измерялись относительные содержания лишь нескольких летучих компонентов: CO₂, CH₄ и COS [35]. В среднем южное полушарие в летний период оказалось примерно в 10 раз более продуктивным по CO₂ и COS относительно воды и в 2–5 раз более продуктивным по CH₄, чем северное полушарие летом. Однако различие концентраций этих компонентов в летний и зимний период для южного полушария невелико: содержания CO₂ и CH₄ практически совпадают, а содержание COS лишь в 1.5 раза выше.

Какие из приведенных наборов значений более адекватно отражают первичный состав ледяной компоненты ядра кометы 67P? Однозначного ответа на этот вопрос пока нет. Нужны дальнейшие исследования комет *in situ*, результаты которых позволят учитывать не только состав летучих в коме, но и разницу в летучестях ее компонентов, а также особенности состояния участков поверхности, на которых измеряется дегазация.

Изотопный состав воды кометы 67P и гипотезы кометного происхождения летучих на Земле

Важнейшее летучее соединение на нашей планете и по массе, и по значению — вода. Поступила ли она на Землю (так же, как и другие летучие вещества) с кометами, можно оценить по изотопному составу водорода в молекуле H_2O . В предшествующих экспериментах было измерено отношение дейтерия к водороду (D/H) в молекулах воды в комах 14 комет, из которых две короткопериодические принадлежат семейству Юпитера: 103P/Hartley 2 и 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková. У первой D/H_{H_2O} равно, а у второй близко изотопному составу океанской воды Земли ($1.56 \cdot 10^{-4}$) (рис.16). Остальные 12 долгопериодических комет имеют D/H_{H_2O} , превышающее D/H океанской воды Земли, как правило, в 2–3 раза. Напротив, D/H_{H_2O} примитивных метеоритов, родительские тела которых образовались в поясе астероидов, отвечает изотопному составу воды Земли.

До эксперимента «Розетта» высказывались предположения, что источником воды и других летучих компонентов на Земле могли быть короткопериодические кометы, подобные 103P и 45P. Однако полученные «Розеттой» результаты этого предположения не подтвердили. Оказалось, что у короткопериодической кометы 67P значение $D/H_{H_2O} = (5.3 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$ [36], т.е. оно более чем в три раза выше земной величины и значений для двух других комет семейства Юпитера. Таким образом, несмотря на то что астероиды содержат меньше воды, воздействие их большого количества на Землю могло привести к появлению океанов на нашей планете.

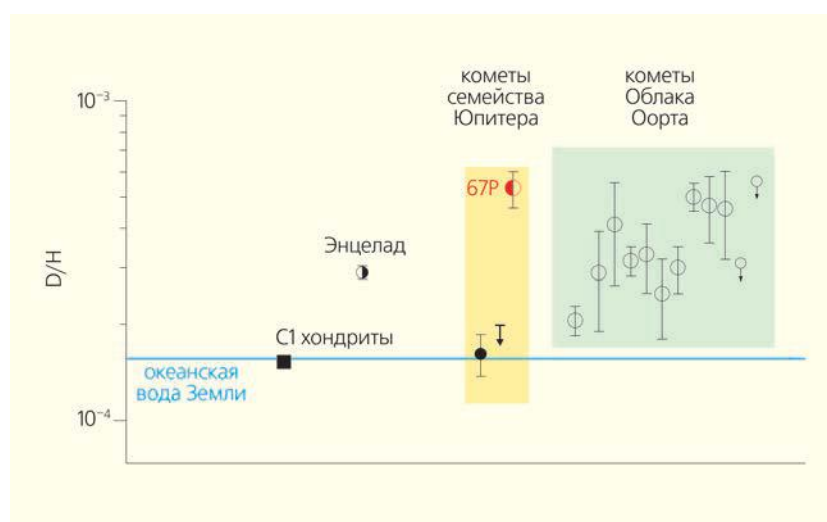


Рис.16. Изотопный состав водорода в воде (D/H_{H_2O} , нормированный по эталону VSMOW), в углистых хондритах (C1), в водных плюмах спутника Сатурна — Энцеллада, в трех короткопериодических кометах семейства Юпитера и 12 долгопериодических кометах Облака Оорта.

Роль комет в возникновении биологической жизни на Земле

Как уже упоминалось, одна из целей космического эксперимента «Розетта» заключалась в оценке возможной роли вещества комет в происхождении жизни на Земле, в частности в ответе на вопрос, могли ли кометы принести на нашу планету жизненно важные биологические соединения или вещества-предшественники для их образования. Эту идею впервые высказал Дж.Оро (John Oro) в 1960 г. [37]. Ответ должен был дать спускаемый зонд «Филы», оборудованный инструментами для анализа химического состава газа (Ptolemy) и пыли (COSAC), отобранных непосредственно с поверхности кометного ядра. COSAC проанализировал вещество, попавшее в его приемник в момент первого контакта с поверхностью кометы [38]. Материал оказался беден льдом, но богат органическими соединениями. Были идентифицированы 16 различных органических соединений, в том числе метилизоцианат (CH_3NCO), ацетон (CH_3COCH_3), пропионовый альдегид (C_2H_5CHO) и ацетамид (CH_3CONH_2) — вещества, которые ранее в кометной пыли не обнаруживали.

Одновременно Ptolemy проанализировал состав эфемерной атмосферы вокруг посадочного аппарата и зафиксировал основные ее компоненты — водяной пар, угарный и углекислый газы. В качестве примесей было обнаружено еще несколько летучих органических соединений, в том числе формальдегид [39]. Некоторые из этих соединений (в особенности те, которые содержат углерод-азотные связи) играют ключевую роль в синтезе аминокислот, сахаров и нуклеинов. На-

пример, формальдегид, зафиксированный в коме 67P, участвует в формировании рибозы, производная которой глицин (компонент ДНК) обычно встречается в белках. Все это говорит о том, что с учетом присутствия большого количества воды и углекислого газа кометное вещество содержит необходимые строительные блоки для синтеза аминокислот, сахаров и нуклеинов — необходимых компонентов для зарождения жизни.

* * *

Миссия «Розетта» завершилась два года назад, и многие из полученных ею результатов еще не до конца обработаны и осмыслены. Но некоторые итоги можно подвести уже сейчас.

Геолого-морфологический анализ изображений ядра коме-

ты 67P показал, что, несмотря на необычный характер его вещества (высокопористый малопрочный материал, состоящий из смеси минералов, органических соединений и различных льдов) и весьма специфическую обстановку (очень низкая сила тяжести и периодически возникающая сильно разреженная атмосфера), на поверхности ядра действует ряд знакомых нам процессов. Конечно, главный процесс (во многом определяющий течение других) — сублимация ледяной составляющей материала ядра. При сублимации неледяные частицы материала ядра мобилизуются и в большинстве случаев покидают его, образуя пылевую составляющую комы, а с течением времени рассеиваются в межпланетном пространстве. Небольшая часть мобилизованного материала остается на ядре, образуя кометный реголит. По высотам вышеописанных пиннаклов удалось оценить, что ядро кометы 67P в ходе сублимационной эрозии потеряло слой толщиной как минимум 100–200 м.

Консолидированный материал ядра с поверхности деформирован трещинами, часть из них, вероятно, возникла в результате сезонных колебаний температуры поверхности. Бугристая текстура разного масштаба на поверхности, по-видимому, отражает первичные неоднородности в материале ядра. Наблюдаются образования, напоминающие слоистость в осадках или слоистость в некоторых магматических породах. Природа их пока непонятна. Совершенно неожиданно на поверхности ядра обнаружили небольшие дюны, очень похожие на эоловые дюны планет с атмосферами. Были отмечены и кратерообразные депрессии, скорее всего, неудачного происхождения. Возможно, это результат проявления неоднородностей в материале ядра при его сублимационной мобилизации. На крутых склонах поверхности ядра видны следы обвалов и оползней.

Химический и фазовый состав вещества кометы 67P определялся приборами орбитального и посадочного аппаратов. Удалось проанализировать около 250 пылевых частиц, захваченных из комы, и определить их фазовый состав. Результаты анализа подтверждают первичный, не измененный со времени аккреции, состав вещества этой кометы. «Розетта» проводила изучение кометы Чурюмова—

Герасименко в течение двух лет, до прохождения ею перигелия и после него, что позволило понять, какие измерения состава газов комы лучше характеризуют состав летучих компонентов ядра. Оказалось, те, что выполнены после прохождения перигелия, когда интенсивный нагрев поверхности привел к значительной эрозии и обнажению свежего, недегазированного материала ядра.

В водяном паре комы было измерено отношение дейтерия к водороду и установлено, что оно заметно отличается от значений в земных океанах. Это противоречит популярным ранее предположениям, что источником воды и других летучих компонентов на Земле могли быть короткопериодические кометы. Измерения, выполненные спускаемым аппаратом «Филы» (рис.17), определили в составе материала поверхности ядра 16 органических соединений, причем некоторые из них ранее в составе кометного вещества не находили.

Накопление знаний о составе органических соединений, возможных предшественников и строительных блоков живого вещества Земли приближа-



Рис.17. А.Т.Базилевский с внуком Гошей сидят на макете ядра кометы Чурюмова—Герасименко. На заднем плане — спускаемый аппарат «Филы», который при посадке завалился на бок. Фойе Института Макса Планка по исследованию Солнечной системы (Max Planck Institute for Solar System Research. г.Геттинген, Германия).

ет нас к пониманию происхождения жизни на нашей планете. Очевидно, что это необходимо, но также очевидно, что только этих знаний недоста-

точно. Нужна теория, предлагающая механизм перехода от неживых строительных блоков к живому саморазвивающемуся веществу. ■

Работа поддержана Программой I.28 Президиума РАН (тема 0137-2018-0038). Авторы признательны Европейскому космическому агентству и команде «Розетты» за предоставление снимков ядра кометы 67P.

Литература / References

1. Owen T., Bar-Nun A. From the interstellar medium to planetary atmospheres via comets. *Faraday Discussions*. 1998; (109): 453–462.
2. Marty B., Yokochi R. Water in the Early Earth. *Water in Nominally anhydrous Minerals. Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2006; 62: 421–450.
3. Фесенков В.Г. О природе Тунгусского метеорита. *Метеоритика*. 1961; XX: 27–31. [Fesenkov V.G. On the nature of Tunguska meteorite. *Meteoritics*. 1961; XX: 27–31. (In Russ.).]
4. Флоренский К.П. Проблема космической пыли и современное состояние изучения Тунгусского метеорита. *Геохимия*. 1963; (3): 284–296. [Florensky C.P. Problem of cosmic dust and the modern status of study of Tunguska meteorite. *Geokhimiya*. 1963; (3): 284–296. (In Russ.).]
5. Базилевский А.Т., Келлер Х.У. Кратеры, участки гладкой поверхности, потоки и слоистость на ядрах комет. *Астрономический вестник*. 2007; 41(2): 1–10. [Basilevsky A.T., Keller H.U. Craters, smooth terrains, flows, and layering on the comet nuclei. *Solar System Research*. 2007; 41(2): 109–117.]
6. Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C. et al. The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*. 2016; 592: A63.
7. Taylor G.G.T., Altobelli N., Buratti B.J., Choukroun M. The Rosetta mission orbiter science overview: The comet phase. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2017; A375: 20160262.
8. Boehnhardt H., Bibring J.-P., Apathy I. et al. The Philae lander mission and science overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2017; A375: 20160248.
9. Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L. et al. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Science*. 2015; 347(6220): aaa1044–1–5.
10. Groussin O., Jorda L., Auger A.-T. et al. Gravitational slopes, geomorphology and material strengths of the nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko from OSIRIS observations. *Astronomy & Astrophysics*. 2015; 583: A32.
11. Базилевский А.Т., Красильников С.С., Ширяев А.А. и др. Оценка прочности материала ядра кометы 67P Чурюмова–Герасименко. *Астрономический вестник*. 2016; 50(4): 241–251. [Basilevsky A.T., Krasil'nikov S.S., Shiryayev A.A. et al. Estimating the strength of the nucleus material of comet 67P Churyumov–Gerasimenko. *Solar System Research*. 2016; 50(4): 225–234.]
12. Basilevsky A.T., Mall U., Keller H.U. et al. Geologic analysis of the Rosetta NavCam, Osiris and ROLIS images of the comet 67P/Churyumov–Gerasimenko nucleus. *Planetary and Space Science*. 2017; 137: 1–19.
13. Biele J., Ulamec S., Maibaum M. et al. The landing(s) of Philae and inferences about comet surface mechanical properties. *Science*. 2015; 349(6247): aaa9816–1.
14. Thomas N., Sierks H., Barbieri C. et al. The morphological diversity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Science*. 2015; 347(6220): aaa0440–1–6.
15. Базилевский А.Т., Скоров Ю.В., Хвид Ш.Ф. и др. Линеаменты, наблюдаемые на поверхности консолидированного материала ядра кометы 67P Чурюмова–Герасименко. *Астрономический вестник*. 2018. (В печати). [Basilevsky A.T., Skorov Yu.V., Hviid S.F. et al. Lineaments observed on the surface of the consolidated material of nucleus of comet 67P Churyumov–Gerasimenko. *Solar System Research*. 2018. (In press).]
16. Massironi M., Simioni E., Marzari F. et al. Two independent and primitive envelopes of the bilobate nucleus of comet 67P. *Nature*. 2015; 526: 402–405.
17. Brownlee D.E., Horz F., Newburn R.L. et al. Surface of young Jupiter family comet 81 P/Wild 2: view from the Stardust spacecraft. *Science*. 2004; 304(5678): 1764–1769.
18. Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Mall U. et al. Pinnacles on the 67P comet nucleus: Evidence for large scale erosion and hierarchical agglomeration of the nucleus. *Planetary and Space Science*. 2017; 140: 80–85.
19. Ip W.-H., Lai L.-L., Lee J.-C. et al. Physical properties and dynamical relation of the circular depressions on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*. 2016; 591: A132.
20. Thomas N., Davidsson B., El-Maarry M.R. et al. Redistribution of particles across the nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Astronomy & Astrophysics*. 2016; 583: A17.
21. Jia P., Andreotti B., Claudin P. Giant ripples on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko sculpted by sunset thermal wind. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 2017; 114(10): 2509–2514.

22. *Emel'yanenko V.V., Asber D.J., Bailey M.E.* A Model for the Common Origin of Jupiter Family and Halley Type Comets. *Earth, Moon, and Planets.* 2013; 110(1–2): 105–130.
23. *Rotundi A., Sierks H., Della Corte V. et al.* Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko in bound to the Sun. *Science.* 2015; 347(6220): aaa3905.
24. *Wooden D.H., Isbii H.A., Zolensky M.E.* Cometary dust: the diversity of primitive refractory grains. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2017; 375(2097): 20160260.
25. *Bardyn A., Baklouti D., Cottin H. et al.* Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov–Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2017; 469(2): S712–S722.
26. *Paquette J.A., Engrand C., Stenzel O., Hilchenbach M., Kissel J.* Searching for calciumaluminum-rich inclusions in cometary particles with Rosetta/COSIMA. *Meteorit. Planet. Sci.* 2016; 51(7): 1340–1352.
27. *Simon S.B., Joswiak D.J., Isbii H.A. et al.* A refractory inclusion returned by Stardust from comet 81P/Wild 2. *Meteoritics & Planetary Science.* 2008; 43(11): 1861–1877.
28. *Fray N., Bardyn A., Cottin H. et al.* High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Nature.* 2016; 538: 72–74.
29. *Bockelée-Morvan D., Lis D.C., Wink J.E. et al.* New molecules found in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). Investigating the link between cometary and interstellar material. *Astron. Astrophys.* 2000; 353: 1101–1114.
30. *Ciesla F.J., Sandford S.A.* Organic synthesis via irradiation and warming of ice grains in the solar nebula. *Science.* 2012; 336: 452–454.
31. *Jessberger E.K., Christoforidis A., Kissel J.* Aspects of the major element composition of Halley's dust. *Nature.* 1988; 332: 691.
32. *Lodders K.* Solar system abundances of the elements. *Principles and Perspectives in Cosmochemistry.* A.Goswami, B.E.Reddy (eds). *Astrophysics and Space Science Proceedings.* Berlin; Heidelberg, 2010; 379–417.
33. *Fray N., Bardyn A., Cottin H. et al.* Nitrogen-to-carbon atomic ratio measured by COSIMA in the particles of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2017; 469: S506.
34. *Le Roy L., Altwegg K., Balsiger H. et al.* Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA. *Astron. Astrophys.* 2015; 583(A1).
35. *Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Erard S. et al.* Evolution of CO₂, CH₄, and OCS abundances relative to H₂O in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS-H observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2016; 462(1): S170–S183.
36. *Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A. et al.* 67P/Churyumov–Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science.* 2015; 347(6220): 1261952–1. Doi:10.1126/science.1261952.
37. *Oró J.* Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth. *Nature.* 1961; 190: 389–390.
38. *Goesmann F., Rosenbauer H., Bredehöft J.H. et al.* Organic compounds on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry. *Science.* 2015; 349(6247): aab0689–1.
39. *Wright I.P., Sheridan S., Barber S.J. et al.* CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov–Gerasimenko revealed by Ptolemy. *Science.* 2015; 349(6247): aab0673–1.

Churyumov–Gerasimenko Comet: Results of the Studies by “Rosetta” Mission

A.T.Basilevsky¹, V.A.Dorofeeva¹

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS (Moscow, Russia)*

In the images of nucleus of comet 67P Churyumov–Gerasimenko consolidated material and fine-grained regolith formed due to its weathering are observed. Within the consolidated material the fractures, layer-like forms, knobs of different sizes, pinnacles and crater-like depressions are seen. Surface of the regolith is relatively smooth, but in some places features looking as eolian dunes are seen. By a set of instruments of orbital spacecraft and lander on the nucleus surface and in coma the mineral composition of the nucleus material was determined, a number of organic compounds were identified and deuterium/hydrogen ratio was measured. The latter one turned to be very different from that of terrestrial oceans.

Keywords: comet, comet nucleus, consolidated nucleus material, cometary regolith, surface texture, lineaments, cometary ices, isotope composition of hydrogen and nitrogen.