

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

К 30-летию миссии Вега: сравнение некоторых свойств комет 1P/Галлея и 67P/Чурюмова – Герасименко

Л.В. Ксанфомалити

Тридцать лет назад, 6 и 9 марта 1986 г., российские аппараты "Вега-1" и "Вега-2" впервые в истории науки сблизилась с ядром кометы Галлея (1P/Halley) и прошли на небольшом расстоянии от него. За ними 14 марта 1986 г. последовал аппарат Giotto (Европейское космическое агентство, ESA). Вместе с японским аппаратом Suissei ("Суйсей", Японское агентство аэрокосмических исследований, JAXA) они успешно положили начало исследованиям кометных ядер с помощью космических аппаратов. Непосредственные исследования кометных тел, которые несут следы формирования самой Солнечной системы, были продолжены в последующих миссиях к кометам. Аппарат Rosetta, находившийся на низкой орбите у ядра кометы 67P/Чурюмова – Герасименко, с 2014 г. по сентябрь 2016 г. выполнил сложные исследования. Проводится сопоставление некоторых результатов, полученных в названных миссиях. Статья основана на докладах на мемориальной конференции в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) в марте 2016 г., посвящённой 30-летию миссии "Вега", и не претендует на исчерпывающее освещение результатов проведённых миссий или проблем кометной физики.

Ключевые слова: кометы, физика комет, космические исследования, сравнение комет

PACS numbers: 01.65. + g, 96.25. – f, 96.30.Cw

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037867>

Содержание

1. Введение (311).
 2. Морфологические свойства поверхности, ограниченные возможности сравнения и посадка зонда Philae (314).
 3. Потери массы при прохождении кометами перигелия (319).
 4. Происхождение и обогащённость дейтерием комет 1P/Галлея и 67P/CG (323).
 5. Образование сложных кометных ядер в процессе низкоскоростных столкновений (324).
 6. Заключение (325).
- Список литературы (325).

1. Введение

В исторических материалах появление комет всегда относили к главным событиям. Комета Галлея впервые упоминается в древнегреческих хрониках 468–466 гг. до нашей эры и в тот же период отмечается в китайских хрониках. Лишь с 1531 и 1607 гг. появление кометы Галлея стало отмечаться в юлианском и григорианском календарях соответственно. Но до Эдмонда Галлея (Edmond Halley, 1656–1742) кометы почти не рассматривались в качестве объектов, относящихся к Солнечной системе. Согласно Аристотелю (384–322 до н.э.), ко-

меты — явление атмосферное, а не астрономическое. В отличие от планет, их появление было непредсказуемо, как и их движение, которое не связано с созвездиями зодиака, в поясе которых движутся все планеты. Кометы появляются "ниоткуда" и исчезают в "никуда". Всё это позволяло Аристотелю утверждать, что кометы — это пары, поднимающиеся от Земли и накапливающиеся в верхней, "огненной" части атмосферы, где они медленно сгорают. Прошли века. Первым, кто утверждал, что движение комет вне пояса зодиака не может быть основанием не считать их астрономическими объектами и что кометы — вечное произведение природы, был Луций Сенека (4 до н.э. – 65 н.э.).

Затем пришло другое время. В 1578 г. Андреус Селичиус (Andreas Celichius) критиковал взгляды Аристотеля следующим образом: "Густой дым человеческих грехов, возрастающий с каждым днём, каждым часом, каждым мгновением, дым, полный зловония и ужаса перед лицом Бога, постепенно становится настолько плотным, что образует комету со скрученными и расплюснутыми косичками, которые, наконец, загораются в горячем и яростном гневе Небесного Верховного Судьи" (цитируется по обзору [1, 2]).

Около 1740 г. комета Галлея стала одним из доминирующих катализаторов в развитии астрономии и до сих пор остаётся предметом глубоких исследований. Появление кометы Галлея в 1758–1759 гг. было предсказано вычислениями Эдмонда Галлея (1656–1742) и последующими работами Ньютона. Наряду с научными, есть две другие причины публичного интереса к комете. Во-первых, комета Галлея возвращается примерно каждые 76 лет, промежуток времени между возвращениями

Л.В. Ксанфомалити. Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: ksanf@iki.rssi.ru, leksanf@gmail.com

Статья поступила 3 апреля 2016 г.,
после доработки 10 июля 2016 г.

не слишком долгий для полной утраты интереса к событию, но и не слишком короткий, чтобы появление большой кометы стало тривиальным явлением. Во-вторых, хотя в большинстве кометы не настолько ярки, чтобы привлечь внимание человека с улицы, но они достаточно яркие, чтобы быть видными невооружённым глазом любознательного любителя астрономии. Комета Галлея относится к наиболее ярким из группы короткопериодических комет (орбитальный период которых менее 200 лет). В XVII в. её называли кометой de la Caille, в честь французского астронома аббата Николя Луи де Лакайля (Nicolas-Louis De la Caille). Но уже к моменту своего следующего возвращения в 1835 г. название "Комета Галлея" стало общепринятым [2].

Комете Галлея (1P/Halley), одной из крупнейших короткопериодических комет, было суждено дважды сыграть главную роль в кометных исследованиях. Первый раз — это работы Эдмонда Галлея, который впервые наблюдал комету в 1682 г. в Лондоне и в дальнейшем посвятил кометам всю свою жизнь. Э. Галлею впервые удалось установить периодичность появлений 1P/Halley и других комет, а также создать аналитический аппарат для их исследований, причём к этой работе ему удалось привлечь Ньютона. История вопроса изложена в подробном исследовании [2] (1986). Интересно отметить заключение Ньютона, приводимое в его *Principia*: "Тела комет являются твёрдыми, компактными, фиксированными и прочными, как тела планет". Вероятно, к такому выводу Ньютон пришёл в основном потому, что комета 1680/1 сохранилась после прохождения своего крайне близкого к Солнцу перигелия. Вместе с тем, он же писал: "Приближаясь к Солнцу, вещество головы кометы постепенно нагревается и начинает испаряться в эфирную среду, заполняющую межпланетное пространство, которая, таким образом, и сама нагревается. От нагревания межпланетный эфир становится разреженным и движется по направлению от Солнца, увлекая за собой кометные испарения"... Через два года после кончины Э. Галлея большую комету 1744 г. наблюдал М.В. Ломоносов, который пришёл к следующему заключению: "На теневой стороне холод, на солнечной жар. Около тени сильное движение атмосферы и трение, а это является той причиной, по которой возбуждается и рождается великая электрическая сила"[3].

Второй раз комета Галлея вышла на первые полосы научных изданий 300 лет спустя, в 1986 г., как первая комета, на встречу с ядром которой вышли космические аппараты. Историческим исследованиям кометы 1P/Halley (1986) аппаратами "Вега", Giotto и Suisei исполнилось 30 лет. С тех пор космические аппараты исследовали пять других комет. Прошло более двух лет с начала непосредственного исследования кометы 67P/Чурюмова – Герасименко (далее 67P/CG). По выполненным исследованиям опубликованы многочисленные работы, результаты которых частично рассматриваются ниже. Русскоязычный обзор самых предварительных результатов опубликован в *Астрономическом вестнике* [4]. Одним из наиболее существенных выводов становится всё усложняющаяся физика комет, указывающая на чрезвычайную разнородность исследуемых объектов. Различия в физических свойствах комет указывают на крайнюю сложность физико-химических свойств среды их возникновения.

Многие кометные ядра сохраняют следы процессов, происходивших на первых этапах образования Солнеч-

ной системы. В наши дни совершенство спектроскопической научной аппаратуры наземных и орбитальных обсерваторий позволяет исследовать кометные эмиссии с очень высоким разрешением. Казалось бы, химический состав кометных ядер должен быть известен со всей необходимой точностью. Однако дело обстоит не так просто. Спектр фотометрического "ядра" может быть просто отражённым солнечным непрерывным или эмиссионным молекулярным спектром, который о природе отразившей его области никакой информации не несёт. Сам эмиссионный газовый спектр даёт сведения о химическом составе именно атмосферы, окружающей ядро, но не о его поверхности. Излучающие в исследуемом диапазоне молекулы, такие как C₂, CN, CH, NH и другие, являются вторичными, дочерними молекулами более сложных молекул или молекулярных комплексов, из которых состоит ядро. Эти сложные родительские молекулы сублимируются в надъядерную газопылевую оболочку и подвергаются немедленному разрушению под действием солнечной радиации и взаимодействия с окружающей средой. Они распадаются или диссоциируют на более простые молекулы, эмиссионные спектры которых и "видят" спектрометры, а сами родительские молекулы дают главным образом непрерывный спектр. Что касается пыли, она чаще всего представляет собой смесь углеродно-водородно-кислородно-азотных тугоплавких органических соединений (CHON) и каменного вещества хондритового состава.

Наконец, ещё одна очевидная задача, которую не решить без космического аппарата, — исследование рельефа, морфологии и детального состава разных частей самих ядер. В этом отношении результаты исследований в миссии Rosetta кометы 67P/Чурюмова – Герасименко превзошли все ожидания, как показано ниже. Ожидалось также проведение подробных исследований непосредственно на поверхности ядра, но неудачная посадка в 2014 г. аппарата Philae стала большой потерей миссии Rosetta. Далее необходимо развитие именно этого типа исследований.

Образно можно сказать, что задачи исследования кометных ядер — это задачи исследования космических тел весьма малой массы, обладающих большим научным багажом. При подготовке миссии "Вега" один из французских участников сравнил интерес к исследованиям комет с эффектами, создаваемыми продукцией парфюмерии: "Малые количества вещества, которые рожают сильные эмоции".

Актуальность исследований ядер комет космическими аппаратами в значительной мере вызвана именно разнородностью получаемых результатов. Наличие у комет плазменного и пылевого хвостов можно считать общеизвестным, как и неизменное присутствие в их комах и хвостах водяного пара, углекислого газа, монооксида углерода и многих десятков разнородных ионов, атомов и молекул, но чаще всего комета имеет свой собственный набор компонентов. Разнородным оказывается относительное содержание дейтерия (отношение D/H), которое, как принято считать, характеризует не только физические условия, в которых возникло тело, но и в какой-то мере роль комет в создании земной гидросферы. Сравнение морфологических свойств поверхности кометных ядер, например, поверхности ядер 67P/CG, 1P/Halley, 19P/Borrelly и 103P/Hartley-2 указывает на сложность и чрезвычайную разнородность про-

цессов их формирования, исследование которых возможно только с близко расположенной космической лаборатории или зонда, спускаемого на поверхность ядра.

Важную роль играет возможность длительных наблюдений объекта и его эмиссий, проводимых с посадочного или низкоорбитального аппарата у объекта. Иногда бывает, что полученные результаты ставят исследователей в тупик, например, локальные выбросы кислорода ядром 67P/CG (как предполагается — кислорода реликтового происхождения) или присутствие разных компонентов, по-разному обогащённых разными изотопами серы. Хотя ядра принято делить на типы по выбросам: преимущественно газовой или пылевой компоненты — до сколько-нибудь подробной классификации ядер комет, по-видимому, ещё далеко.

Предлагаемая статья основана на докладах на мемориальной конференции в Институте космических исследований (ИКИ) РАН в марте 2016 г., посвящённой 30-летию миссии "Вега", и не претендует на исчерпывающее освещение проблем кометной физики. Метеоритная опасность, связанная с кометами, рассматривалась, в частности, в статье [5]. Вероятность подобных событий невелика, хотя недавние события, происходившие в районе г. Челябинск — у озера Чебаркуль (2013 г.), достаточно шумно напомнили о её существовании [6].

На рисунке 1 приводится подробный наземный снимок кометы Галлея (1P/Halley), полученный в период 6–9 марта 1986 г., когда аппараты "Вега-1" и "Вега-2" сближались с кометой на встречных с ней курсах со скоростью до 79 км с^{-1} . На снимке отчетливо видны многочисленные полосы, струи и "лучи", образованные потоками газа и пыли, связанные с отдельными источниками на поверхности ядра. Сравнительно медленное его вращение вызывает появление повторяющихся кластеров материала (за пределами снимка).

Опубликованные к настоящему времени материалы миссий 67P/CG и 1P/Halley позволяют сравнить некоторые их результаты. Но сами условия выполнения экспериментов были несопоставимы. Так, аппарат Rosetta находился на орбите квазиспутника кометы. Пылевая составляющая выбросов кометы 67P/CG попадала на аппарат с небольшими скоростями, не представлявшими для аппарата Rosetta серьёзной угрозы, хотя вблизи перигелия (в августе 2015 г.) в целях безопасности его удерживали на расстоянии не менее 350 км от



Рис. 1. Наземный снимок кометы Галлея 1P/Halley, одной из крупнейших короткопериодических комет, полученный во время работы аппаратов "Вега" у кометы 6 и 9 марта 1986 г. (Источник: архив ИКИ РАН.)

ядра. В противоположность этому, сближение аппаратов "Вега-1" и "Вега-2" с ядром кометы происходило на встречных курсах с огромной относительной скоростью, до 79 км с^{-1} . Передача изображений ядра и детальное исследование состава пыли и газа, выбрасываемых ядром, магнитного поля и плазмы, окружающей комету, проходило в никогда ранее не встречавшихся условиях огромной метеоритной опасности. Впервые, на расстоянии около 1 млн км, аппараты пересекли ударную волну (рис. 2), а на расстоянии около 160 тыс. км пересекли теоретически предсказанную "кометоплазму", где произошло резкое изменение функции распределения протонов.

Энергия, которую несли с собой пылевые частицы и обломки корки кометы, превосходила (на единицу массы) энергию артиллерийского снаряда в 7000 раз. Поэтому космические аппараты "Вега-1" и "Вега-2", разработанные и созданные в Научно-производственном объединении (НПО) им. С.А. Лавочкина, были оснащены беспрецедентными средствами защиты, что в значительной мере обеспечило успех миссии [8].

6 и 9 марта 1986 г. российские аппараты "Вега-1" и "Вега-2" [9], а за ними, 14 марта 1986 г., космический зонд Giotto [10] Европейского космического агентства (European Space Agency, ESA), исторически положили начало исследованиям кометных ядер с использованием косми-

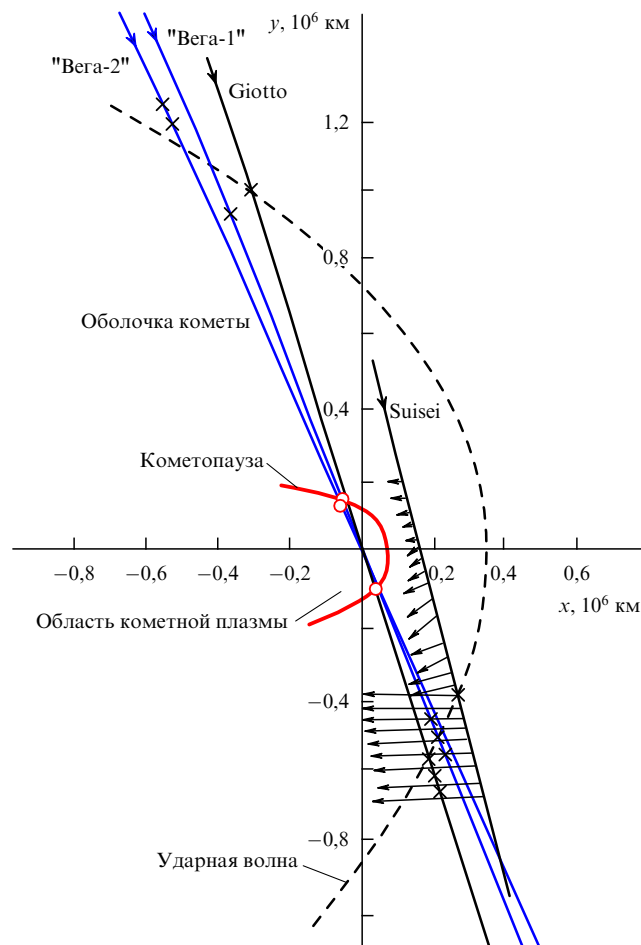


Рис. 2. Траектории аппаратов "Вега-1", "Вега-2", Giotto и Suisei, сближавшихся с ядром кометы Галлея. Стрелки на трассе Suisei показывают изменения магнитного поля. (Из работы [7].)

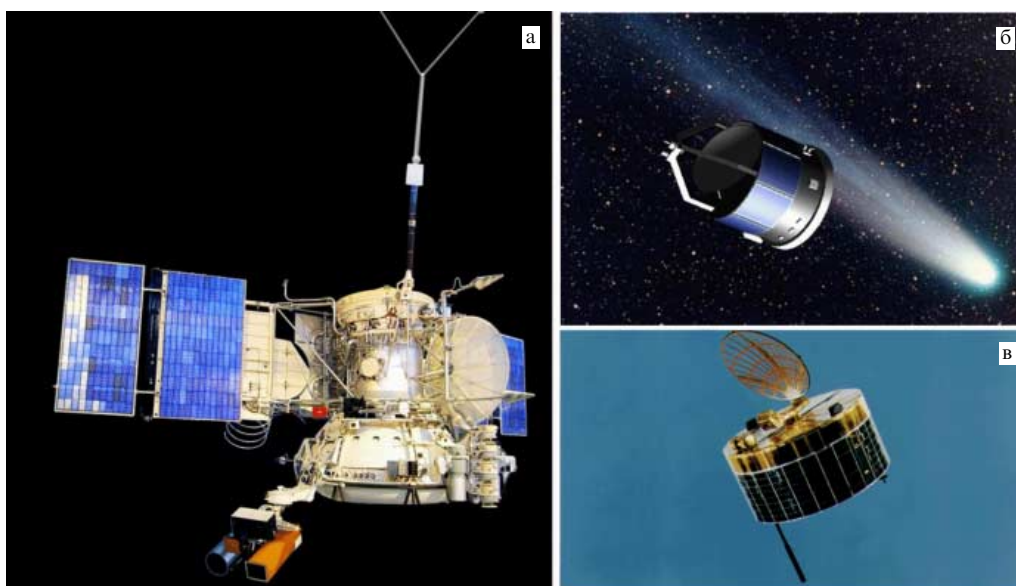


Рис. 3. Аппараты "Vega" (а), Giotto (б) и Suissei (в). Масштаб изображений различен. Аппараты показаны без теплоизолирующего "одеяла". (Источник: архив ИКИ РАН.)

ческих аппаратов. В тот же период, 8 марта 1986 г., аппарат Suissei ("Планета") Японского космического агентства (JAXA) прошёл на большем расстоянии от кометы Галлея [11].

Комета 67P была открыта 23 октября 1969 г. астрономами К.И. Чурюмовым и С.И. Герасименко в Астрономической обсерватории Киевского государственного университета им. Т. Шевченко (КГУ), при анализе пяти фотопластинок, полученных 9, 11 и 21 сентября 1969 г. в ходе программы патрулирования комет. Программа выполнялась экспедицией КГУ в Алма-Атинской обсерватории. Комета 67P получила имя кометы Чурюмова – Герасименко (67P/CG). Заслуги авторов открытия были отмечены медалью Астрономического совета Академии наук СССР "За обнаружение новых астрономических объектов". Исследование комет было делом всей жизни К.И. Чурюмова. Комета 67P/CG регулярно наблюдается астрономами; с момента открытия она проходила перигелий семь раз, в 1976, 1982, 1989, 1996, 2002, 2009 и 2015 гг. В 2014–2016 гг. комета стала объектом исследований миссии Rosetta Европейского космического агентства.

В предлагаемой статье приводятся некоторые результаты обеих миссий: к комете Галлея и к комете Чурюмова – Герасименко. Сравнение основных численных данных для обеих комет приводится в сводной таблице, составленной К.И. Чурюмовым и опубликованной в работе [12]. Некоторые уточнения комментируются в тексте и приводятся в примечании к таблице.

2. Морфологические свойства поверхности, ограниченные возможности сравнения и посадка зонда Philae

Аппараты, перечисленные выше, показаны на рис. 3, аппарат Rosetta на предполётной подготовке — на рис. 4. Начиная с кометы Галлея, на начало 2016 г. космические аппараты исследовали уже шесть ядер комет, причём получение изображений исследуемых тел относится к главным и наиболее значимым задачам миссий, о чём, например, говорят затраты на создание телевизион-



Рис. 4. Аппарат Rosetta в собранном виде на испытаниях. Серый выступающий блок — зонд Philae. (ESA, 140109134929-rosetta-spacecraft-horizontal-large-gallery).

ного эксперимента, с масштабами которых остальные эксперименты несопоставимы. То же относится и к научной нагрузке аппарата Rosetta, где, наряду с узкоугольной камерой (NAC) и широкоугольными камерами [13], изображения в разных диапазонах спектра создавались и другими приборами (<http://sci.esa.int/rosetta/35061-instruments>). Примером может быть также система OSIRIS (Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System). Получено значительное число подробных изображений. Но наиболее сложно сравнивать морфологию поверхности 67P/CG и 1P/Halley. Если для 67P/CG имеется богатый альбом подробных изображений с разрешением до нескольких десятков сантиметров, то разрешение на снимках поверхности ядра кометы Галлея — около 1 км. Ядро наблюдалось сквозь довольно плотную среду газа и пыли, интенсивно выбрасываемых ядром (нечёткие изображения на рис. 5а слева).

К тому же всеми аппаратами, участвовавшими в исследовании кометы Галлея, было уверенно сфотографировано только около 25 % поверхности, а в миссии Rosetta — практически вся поверхность ядра.

Исходные изображения ядра кометы Галлея [14], сделанные ПЗС-камерой аппарата "Vega", показаны на

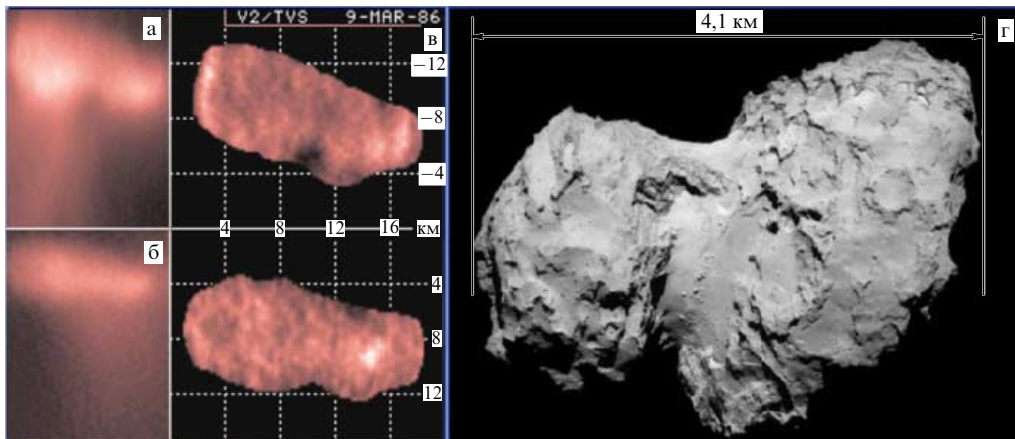


Рис. 5. (а, б) Первые снимки кометы Галлея (1P/Halley). Снимок с аппарата "Вега", камера TVS (1986 г.), до обработки. (в) Ядро кометы Галлея после обработки снимков [15]. Чёткость снимков ограничена интенсивными выбросами газа и пыли с ядра кометы, сквозь которые наблюдалось ядро. (г) Один из первых снимков ядра кометы 67P/CG, сделанный с аппарата Rosetta в 2014 г. (<http://rosetta.esa.int/>).

рис. 5а,б. В ходе дальнейшей обработки снимков [15] удалось получить улучшенное изображение ядра и уточнить его форму (рис. 5в). На рисунке 5г показано ядро кометы 67P/CG. Масштаб изображений показан на рисунке; размеры обоих тел $15,3 \times 7,2$ км и примерно $4,1 \times 3,1 \times 2,2$ км соответственно. Шкала на рисунке позволяет оценить размеры отдельных элементов ядра. Отмечалось, что ядро кометы Галлея представляет топографически разнообразную поверхность с холмами, горами, хребтами, провалами и, по крайней мере, одним крупным кратером. На нижней части орбиты, вблизи перигелия, с повышением температуры на поверхности ядра происходили активные процессы с разрушением одних и возникновением других форм. В перигелии кометы Галлея, который составляет 0,5712 а.е., зарегистрированная температура тёмной корки ядра была около 300 К, а в наиболее горячих точках достигала 400 К [16].

Вблизи перигелия нагретые куски корки разрушались, отделялись и уносились потоками пыли и газа. Тем не менее было установлено, что в глубине тела ядра сохраняется очень низкая температура, что также отмечалось и в случае кометы 67P/CG. Так, по данным эксперимента VIRTIS (Visible and Infrared Thermal Imaging Spectrometer), при дневной температуре поверхности около 200 К уже на глубине 5–6 см температура на исследованных участках оставалась постоянной, около 130 К [17]. Анализ условий образования некоторых

выбрасываемых газообразных составляющих соответствует температуре 35 К в глубине ядра.

Более детальные снимки кометы Галлея (рис. 6) были получены камерой аппарата Giotto [10, 18], которая работала на траектории более тесного сближения с ядром, но на расстоянии 1200 км была повреждена и вышла из строя. Наблюдалась противоположная сторона ядра по сравнению с верхним снимком "Веги" на рис. 5. Благодаря удачному положению аппарата газовые выбросы меньше закрывали ядро. Его изображение, построенное по результатам аппарата Giotto, показано на рис. 7б в сравнении с 67P/CG.

Используя новые методы обработки [19], удалось получить более подробное его изображение, приводимое на рис. 8, на котором в какой-то мере ядра кометы Галлея и 67P/CG уже можно сравнивать. Прежде всего обращает на себя внимание общее подобие формы двух тел, несмотря на четырёхкратное различие в их размерах. В целом, сходство поверхности обеих комет прослеживается в крупных деталях. "Голова" — большая часть ядра 67P/CG, заканчивающаяся районом Imhotep, имеет более плоскую форму, чем голова ядра кометы Галлея (рис. 8). Посадка зонда Philae предполагалась вблизи области Imhotep, в районе Agilkia. Спектрофотометриче-

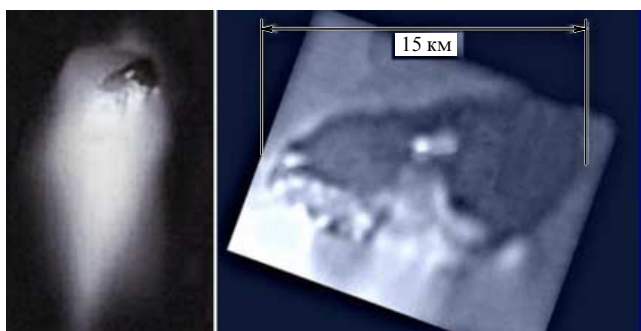


Рис. 6. Снимок кометы Галлея, полученный камерой аппарата Giotto 14 марта 1986 г. (Источник: архив ИКИ РАН.)

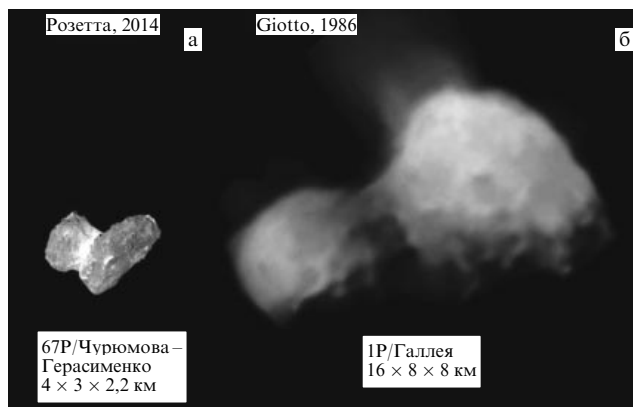


Рис. 7. (а) Снимок ядра кометы 67P/CG (<http://rosetta.esa.int/>). (б) Снимок ядра кометы Галлея, полученный с аппарата Giotto в 1986 г. Объекты показаны в одинаковом масштабе.

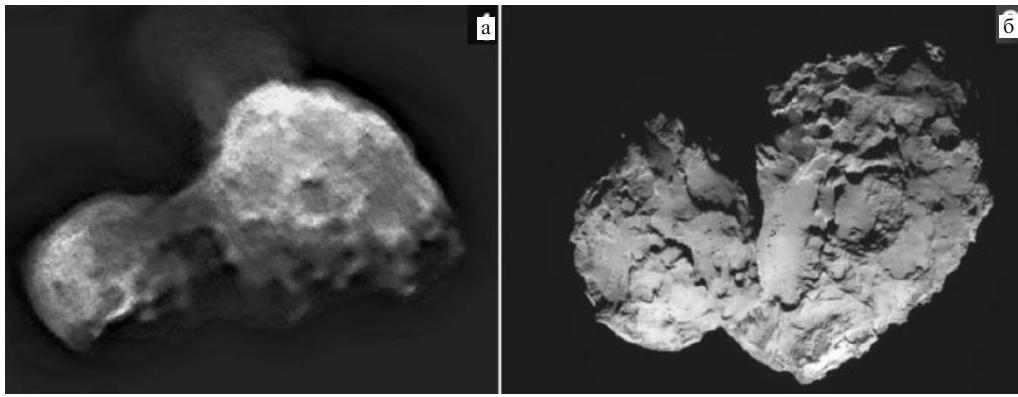


Рис. 8. (а) Снимок кометы Галлея, полученный с аппарата Giotto, в обработке автора (публикуется впервые); масштаб 1:4. (б) Один из первых снимков ядра кометы 67P/CG (<http://rosetta.esa.int/>), масштаб 1:1.

ские свойства этих районов рассмотрены в работе [20]. Среднее геометрическое альbedo поверхности очень низкое и у кометы Галлея близко к 0,04, а у кометы 67P/CG — около 0,065 на длине волны 649 нм.

Ядра обеих комет похожи также узкой областью, "шейкой", светлой у 67P/CG и тёмной у 1P/Halley (см. рис. 7, 8). Шейка у ядра кометы Галлея менее выражена и относится к самым тёмным районам поверхности.

Следует отметить, что физические условия у "шейки" несколько отличаются от периферийных частей. Таковы, например, радиационные условия. Телесный угол, под которым площадка на плоской поверхности у шейки "видит" свободное пространство, составляет 2π , а площадка у шейки — меньше 2π . Как показано ниже, плотность материала шейки может значительно отличаться от плотности прилегающих частей. Тёмная впадина у шейки ядра кометы Галлея имеет сложный вид и может быть развивающимся процессом разрушения тела. Вместе с тем происхождение шейки у 67P/CG может быть следствием других процессов [21]. В статье [22] приводился расчёт напряжённого состояния шейки кометы на примере 103P/Hartley-2, близкой к разрушению. Удлиненные гантелевидные кометные ядра (как у кометы

103P/Hartley-2) наиболее удобны для анализа физического состояния и возможной эволюции ядра кометы. Что касается кометы Галлея, подробный расчёт для неё не проводился. Комета намного больше и по размерам R , и по массе M , но скорость её вращения ω вдвое меньше (период вращения ядра кометы Галлея 52 ч, а кометы 67P/CG — 12,40 ч). Напряжения F от центробежных сил в равновесном сечении от всех элементов массы M_i составляют

$$F = \sum_{i=1}^N M_i R \omega^2$$

и получаются близкими к разрушающим, но меньшими, чем в случае 103P/Hartley-2. Однако для подробных расчётов необходимо более точно знать форму ядра кометы 1P/Halley. На рисунке 8 на поверхности большей части ядра кометы Галлея (в центре и справа) можно видеть три крупных кольцевых образования (по-видимому, кратеры) и более сложную структуру в левой части ядра, где, вероятно, видны два тесно связанных объекта со светлой границей. В обеих частях к ним примыкают протяжённые равнины. Контуры кольцевых образований нечёткие, возможно, это полуразрушенные кратеры.

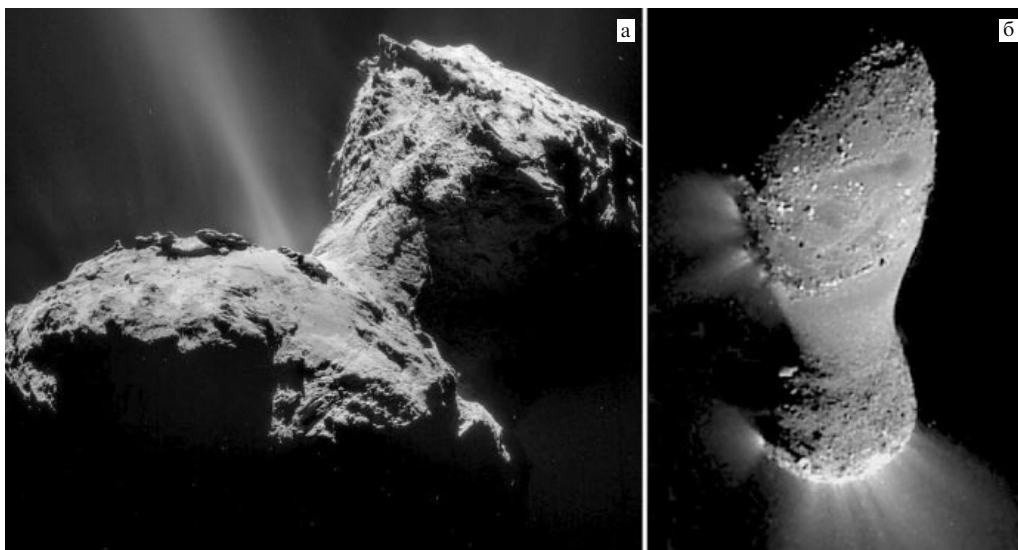


Рис. 9. Многообразие форм и рельефа кометных ядер. (а) Вид поверхности ядра 67P/CG (снимок ESA/Rosetta/Navcam — CC BY-SA IGO 3.0, получен 31 января 2015 г.), (б) поверхность ядра 103P/Hartley-2 (снимок JASA, 2005 г.). Характерные размеры ядра 67P/CG вдвое больше (4,1 и 2,2 км соответственно).

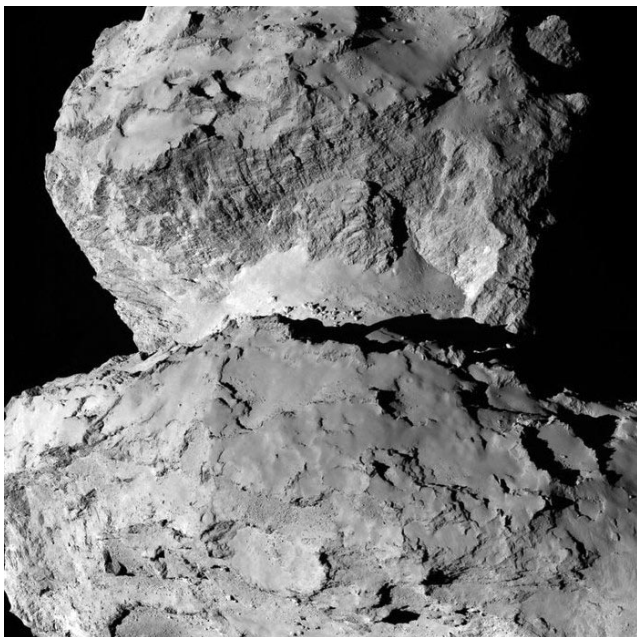


Рис. 10. Один из наиболее подробных снимков, представляющий обе половины и шейку ядра. Снимок сделан узкоугольной камерой аппарата Rosetta 7 августа 2015 г. с расстояния 104 км. (Снимок: MPS/MPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.)

Заметны также холмы, горы и впадины. Следует отметить, что часть наиболее мелких деталей на рис. 8 может оказаться артефактом — таковы особенности кодов обработки. Механическая модель для 67P/CG гораздо сложнее и включает момент от выступающих частей и сложную эпору распределения механических напряжений. Оценочные результаты напряжений получаются примерно такими же, но требуют уточнений.

Поверхность ядра 67P/CG, которая исследована несравненно более подробно, оказалась весьма неоднородной по сравнению с поверхностью кометы Галлея. Детальные снимки, приводимые ниже, показывают своеобразные свойства этого ядра, резко отличающие его от уже знакомых 1P/Halley или 103P/Hartley-2, с которым 67P/CG сравнивается на рис. 9, где представлены типичные виды поверхности ядра 67P/CG и 103P/Hartley-2. Слева на рис. 9 показан вид на глубокую седловину между большей и меньшей половинами ядра. Как можно видеть, поверхности настолько различны, что их свойства трудно сопоставить. В отличие от сравнительно гладкого пылевого покрытия 103P/Hartley-2, ядро 67P/CG покрывают грубые разломы, провалы и глыбы.

Снимки, сделанные в разных положениях ядра, демонстрируют особенности природы ядра и его поверхности. Один из наиболее подробных снимков показан на рис. 10. Видны обе половины и шейка. На гладкой, как бы запорошенной, части шейки Нарі разбросаны крупные глыбы. Разрешение на снимке около 30 см. У примыкающего к ней склона Nathor (меньшей половины ядра) чётко выделяется слоистая структура с резкой границей у более гладкой поверхности вверху. По-видимому, природа последней представляет собой более поздние разрушения и идентична природе обращённой к зрителю нижней половины кометы. В обеих частях видны многочисленные следы ударных кратеров, имеющих разную глубину и разную сохранность, а также грубые изломы

поверхности. Светлые оттенки на рисунке обманчивы, поверхность очень тёмная, альbedo около 3 % (темнее сажи). Светлой её можно считать только по сравнению с примыкающим чёрным космическим фоном. Глубокие тени не обязательно указывают на провалы: поверхность освещена прямым солнечным светом, а рассеянный свет отражён другими участками рельефа. Так выглядит поверхность тела, мало изменившегося за 4,5 млрд лет, прошедших с возникновения Солнечной системы.

Крутой слоистый склон Nathor на рис. 10 имеет высоту около 1 км. Барический центр тела находится у седловины Нарі вблизи большей половины тела. Обломки и пылевые отложения образованы, по-видимому, осыпаниями со склонов Nathor. Но, как выяснилось при посадке Philae, местами под тонким пылевым слоем, покрывающим поверхность, может скрываться весьма твёрдая порода, не поддающаяся бурению. Предполагается, что её состав — низкотемпературная ледяная среда с включёнными пылью и обломками силикатных пород. Само осыпание происходит очень медленно, причём ускорение свободного падения $g_c = GM/r^2$ вверху и внизу стены неодинаково. При массе тела $M = 10^{13}$ кг и постоянной гравитации G ускорение g_c составляет $0,167 \times 10^{-3}$ м с⁻² у вершины ($r = 2$ км до гравитационного центра) и $0,667 \times 10^{-3}$ м с⁻² на поверхности седловины ($r = 1$ км). В этих условиях на падение обломка с вершины уйдёт более часа.

На основе морфологических и структурных признаков авторы [23] выделили 19 характерных типов поверхности, каждый из которых получил название, связанное с древнеегипетской мифологией. Районирование, выделенное по геоморфологическим принципам, с нанесёнными наименованиями объектов показано на рис. 11.

Ядро вращается с периодом 12,4043 ч вокруг оси, проходящей через центр масс. Вращение приводит к возникновению центробежных сил. Можно предположить, что под их действием происходит медленное, но непрерывное удлинение шейки, которое должно завершиться разделением фрагментов ядра. Этому препятствуют прочность материала шейки, притяжение между частями ядра и постепенное замедление его вращения из-за потерь на трение в материале шейки и постепенного удлинения тела.

Многообразие рельефа ядра 67P/CG иллюстрирует также рис. 12, где показано обработанное изображение района сложного рельефа Atum-Anubis (на рис. 11 он находится на проекциях 1 и 2), протяжённость 1,6 км. Среди видов поверхности наиболее распространён тип, который авторы назвали консолидированной и разрушенной поверхностью. В ряде случаев к ней примыкают районы с гладкой поверхностью, образованные мелкозернистым пылевым материалом с глыбовыми включениями. Такие районы также многочисленны. Авторы [23] отмечают, что процессы их образования, вероятно, связаны с происходящей сублимацией летучих, входящих в состав ядра кометы. Очевидна неоднородность распространения сублимирующих включений, что проявляется в образовании огромных провалов. Во многих местах наблюдается слоистая структура поверхности. Интересна структура обширного, до 1 км, крутого склона "головы" ядра (рис. 12) с осыпаниями разрушающегося материала и признаками расслоения, что представляет резкий контраст по сравнению с прилегающим районом "шейки". Разнообразие районов включает небольшие холмы, кольцевые образования, некоторые из которых,

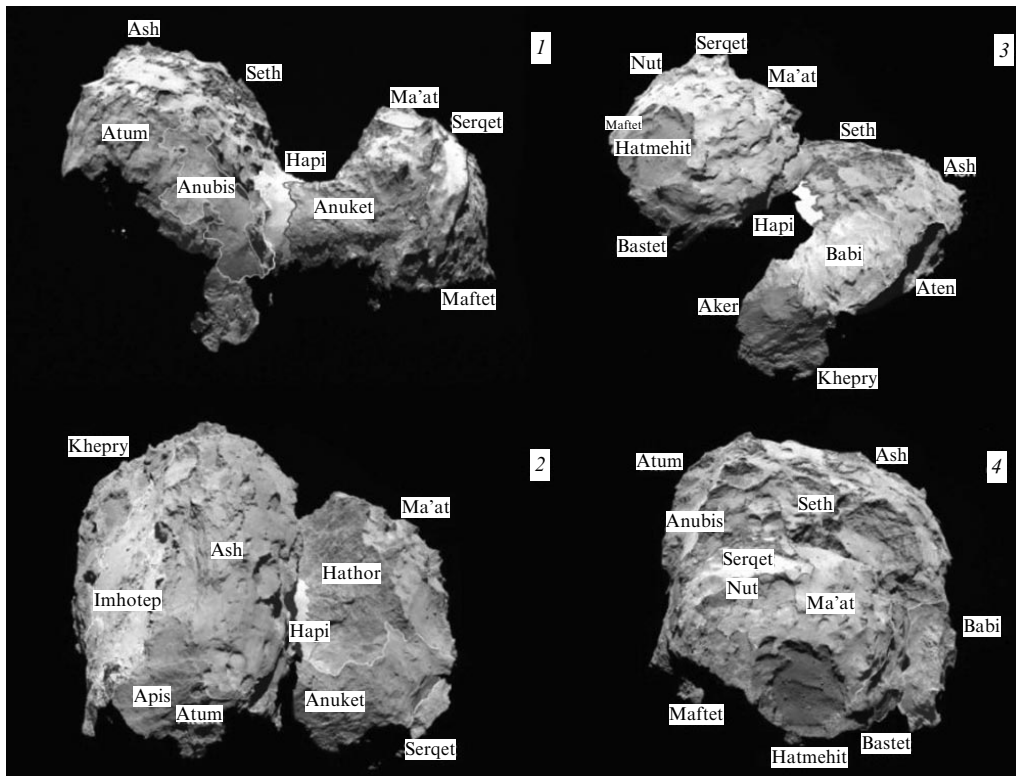


Рис. 11. Ядро кометы 67P/CG в четырёх положениях с нанесёнными границами и наименованиями выделенных районов (из работы [23]). На проекции 1 ось вращения направлена вертикально и лежит в плоскости рисунка, на проекции 2 она направлена на зрителя.

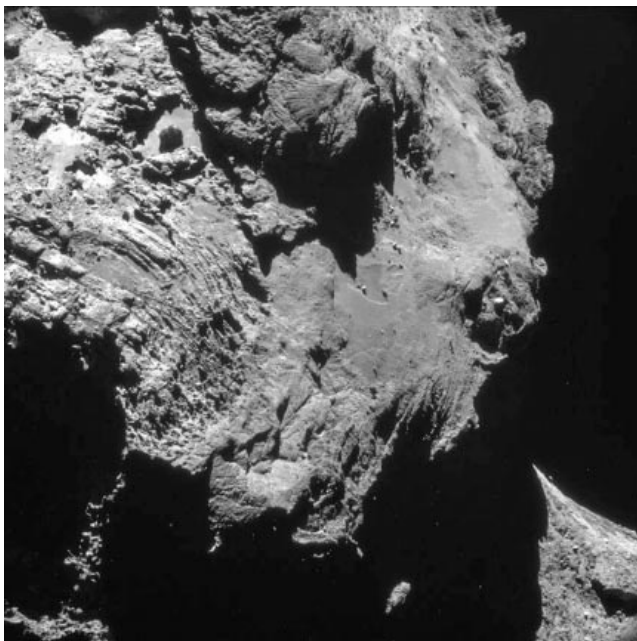


Рис. 12. Разнородный район Atum-Anubis, протяжённость участка 1,6 км, разрешение 1,6 м/пиксел. Снимок получен 1.05.2016 с расстояния 18,8 км. (Снимок © ESA/Rosetta/NAVCAM — CC BY-SA IGO 3.0.)

возможно, являются разрушенными кратерами, равнины и глубокие разломы. Поверхность чрезвычайно разнородна: в левой части района она сложена элементами, напоминающими слоистые структуры, а район Anubis (справа) покрыт более гладкими отложениями. Справа внизу видна часть затенённой "шейки".

Именно частичная сублимация материала ядра оставляет непрочные образования причудливой формы. Происхождение некоторых объектов, особенности и неоднородность, "пестрота" структуры поверхности 67P/CG подробно рассматриваются в работах [13, 23–27] и др. Предполагалось, что в развитие темы важные данные будут получены от зонда Philae.

В миссию Rosetta впервые был включён посадочный зонд для исследований на поверхности ядра. Philae — это первый зонд для мягкой посадки на ядро кометы. Он был оснащён обширным комплексом приборов для научных исследований. Масса Philae 100 кг. До миссии Rosetta два аппарата, NEAR Shoemaker (Near Earth Asteroid Rendezvous Shoemaker) (2000 г.) у астероида Эрос и аппарат Hayabusa ("Сапсан") у астероида Итокава (2005 г.) совершили экспериментальную (ранее не запланированную) мягкую посадку, причём аппарат Hayabusa затем взлетел и вернулся на Землю. Баллистический (неуправляемый) спуск зонда Philae состоялся 12 ноября 2014 г. Важным был выбор места посадки. С одной стороны, предполагалась возможность удобного обзора примыкающего рельефа и исследования поверхности, с другой — безопасность поверхности для посадки, а условия освещения должны были обеспечивать работу солнечных батарей. Благодаря низкой гравитации время спуска (фактически — падения на комету с высоты 20 км) достигло 7 ч. Аппарат спускался по баллистической (неуправляемой) траектории, с посадкой на поверхность. Система из трёх опор была снабжена устройствами, которые должны были ослабить удар при посадке. Три устройства, прижимной двигатель на верхней стороне зонда Philae, ледобуры на опорах и вонзающиеся в поверхность гарпуны — всё должно было предотвратить

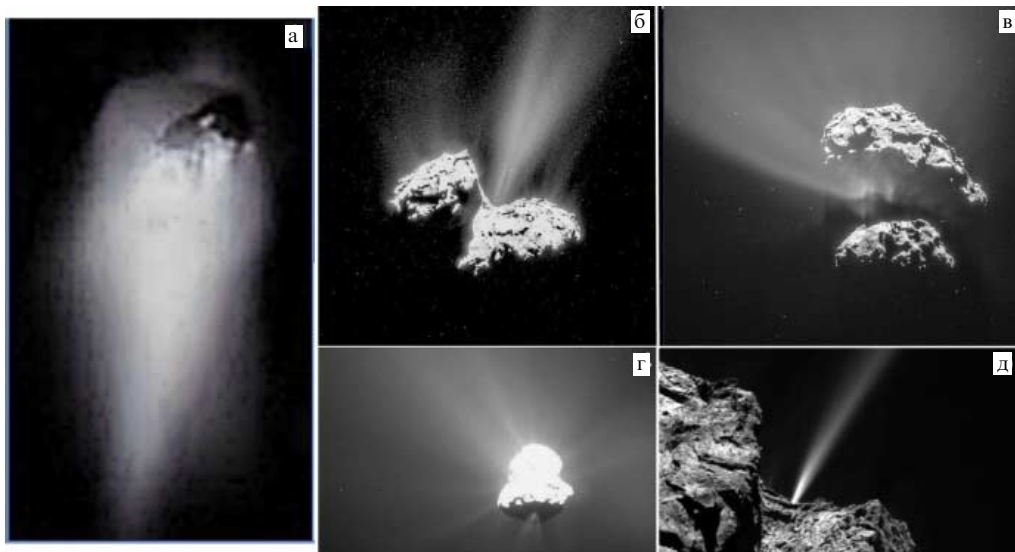


Рис. 13. (а) Активность ядра кометы Галлея (1986). Развитие активности кометы 67P/CG в период февраль–июль 2015 г. (б) Выбросы из шейки, 6 февраля 2015 г. Снимок ESA/Rosetta/NAVCAM — CC BY-SA IGO 3.0. (в) Развитие газопылевых выбросов из шейки (район Нарі), 9 февраля 2015 г. Снимок ESA/Rosetta/NAVCAM — CC BY-SA IGO 3.0. (г) Высокая активность газопылевых выбросов, 12 марта 2015 г. Виден фонтанирующий выброс из нижней, неосвещённой, части ядра. Снимок: ESA/Rosetta/MPS/MPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA. (д) Нерегулярный узкий джет, 29 июля 2015 г. (камера OSIRIS. Снимок © ESA/rosetta/MPS for OSIRIS team).

отскок. "Ледобуры" приводились в действие энергией удара при посадке и врезались в поверхность. Затем со скоростью 70 м с^{-1} в поверхность должны были вонзиться гарпуны, которые отстреливались специальными пиропатронами. Прижимной двигатель был своеобразным ракетным устройством, но работающим на холодном газе, чтобы не загрязнять исследуемую поверхность. Он должен был уменьшить отскок аппарата при ударе и уменьшить отдачу от стрельбы гарпунами. К сожалению, ни одно из трёх устройств свою задачу не выполнило [4]. Единственное, что могло удержать Philae от прыжка, был ничтожный вес аппарата на поверхности кометы. Если принять, что поверхность отстоит от гравитцентра тела на $r=1 \text{ км}$, ускорение свободного падения на комете g_c составит всего $6,8 \times 10^{-4} \text{ м с}^{-2}$, а вес аппарата при его массе 100 кг составит всего 0,068 Н. Опоры спружинили и отбросили аппарат вверх со скоростью около $0,4 \text{ м с}^{-1}$. При низкой гравитации кометы кинетической энергии аппарата в момент посадки (около 50 Дж) оказалось достаточно, чтобы Philae поднялся на высоту около 1 км и опустился обратно только почти два часа спустя. Аппарат затем спружинил и поднялся снова, но невысоко, а окончательно остановился через второй час после первого контакта. Пока зонд Philae взлетал и падал, комета продолжала вращаться. Вместо плоской, открытой местности, беспрепятственно освещаемой Солнцем, под аппаратом оказались грубые каменные склоны и провалы. Спускаемый аппарат, наконец, остановился, но в крайне сложных условиях. Зонд оказался в углублении среди высоких зазубренных каменных глыб, у глухой стены, причём сам аппарат находился в глубокой тени, где солнечные батареи бесполезны. До исчерпания энергии аккумуляторов аппарат сумел передать только накопленные при посадке данные. Неудача с посадкой Philae очень досадна, но её удалось частично скомпенсировать последующими сближениями аппарата Rosetta с ядром на расстояние до нескольких километров.

3. Потери массы при прохождении кометами перигелия

По мере приближения к перигелию активность ядер обеих комет возрастала. Комета Галлея в перигелии (0,5712 а.е.) выбрасывала наиболее интенсивные газопылевые джеты (рис. 13а), уходившие на сотни тысяч километров. Ядро наблюдалось с аппарата в пролётном режиме 14 марта 1986 г. Перигелий кометы 67P/CG был расположен гораздо дальше. Дневная температура поверхности лежала в пределах 140–200 К [17, 28] и лишь в некоторых точках повышалась до 230 К. Потери ядра кометы 67P/CG были намного меньше, как и из-за более высокого перигелия (1,2432 а.е.), так и из-за меньших размеров ядра. По сравнению с кометой Галлея масса ядра кометы 67P/CG меньше в 22 раза. Изменения газопылевой активности ядра кометы 67P/CG представлены на рис. 13, кадры б–д. Активностью выделялись районы шейки 67P/CG (рис. 13б, в), но не только. На кадре г выбросы охватывают значительную часть ядра и видны в центре нижней, неосвещённой его части, где виден фонтанирующий выброс. Как можно видеть на снимках, приведённых на рис. 13, в отличие от кометы Галлея, истечение вещества с ядра 67P/CG было ограничено локальными источниками. Но следует напомнить, что суммарная площадь самих источников выбрасываемой газопылевой среды кометы Галлея в перигелии тоже оценивалась только в 10% [29], хотя выбросы были несравнимо большими по массе и протяжённости, чем у 67P/CG. Узкий джет (рис. 13д) 29 июля 2015 г. появлялся нерегулярно. Подобные джеты наблюдались и в других районах.

Пылевые частицы кометы Галлея представляют собой главным образом смесь углеродно-водородно-кислородно-азотных тугоплавких органических соединений (CHON) и каменного вещества хондритового состава.

В экспериментах GIADA (The Gran Impact Analyser and Dust Accumulator) и OSIRIS на аппарате Rosetta

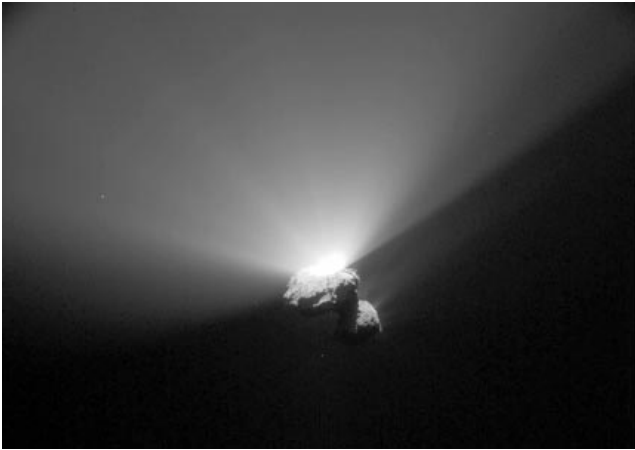


Рис. 14. Комета 67P/CG проходит перигелий. Активность выбросов значительно увеличилась. Снимок © ESA/Rosetta/NAVCAM — CC BY-SA IGO 3.0, 22 августа 2015 г.

вдоль трассы полёта в интервале 3,6–3,4 а.е. регистрировался пылевой компонент в окрестностях ядра кометы [30]. Всего в экспериментах было зарегистрировано 35 частиц или обломков с массами от 10^{-7} до 10^{-4} г и 48 с массами от 10^{-2} до 10 г. Осреднённое отношение пыль/газ над дневной стороной ядра составило 4 ± 2 (с учётом данных эксперимента MIRO (Microwave Instrument for the Rosetta Orbiter)) [29].

Указывается, что в среднем отношение пыль/газ составляет 3. Над ядром обращается до 100×10^3 частиц и обломков с размерами до метра, а плотность самих частиц близка к $(1,9 \pm 1,1) \times 10^3$ кг м⁻³. Потери воды за 3 месяца, июнь–август 2014 г., возрастали с 0,3 до 1,2 л с⁻¹. Суммарные потери массы ядра 67P/CG за одно прохождение перигелия составляют $(3-5) \times 10^9$ кг [32]. Активность ядра вблизи перигелия значительно возросла (рис. 14), но абсолютные значения потерь оставались небольшими.

Границы поперечного сечения комы кометы Галлея превышали 10^5 км, что типично для крупных комет. Под действием фотолиза основная составляющая, водяной пар, диссоциировал, а оценки протяжённости газовой и ионной составляющих (водород и другие летучие) достигали 20×10^6 км. Потери массы кометы Галлея в перигелии рассматривались в многочисленных работах (обзор [29]).

Согласно данным К.И. Чурюмова (см. таблицу), газопродуктивность воды Q_{H_2O} у кометы Галлея после прохождения перигелия, на расстоянии 0,9 а.е. от Солнца, составляла 4×10^{29} с⁻¹, или $4 \times 10^{29} \times 18 \times 1,66 \times 10^{-27} = 1,20 \times 10^4$ кг с⁻¹. Атмосфера кометы 67P/CG примерно на 80% состоит из водяного пара, причём с июня по август 2014 г. потери воды возрастали с 0,3 до 1,2 л с⁻¹, а изменения достигали пяти раз [31]. В августе 2015 г. газопродуктивность H_2O , согласно [33], лежала в пределах от 10^{24} (с ср)⁻¹ до 3×10^{25} (с ср)⁻¹, причём в течение месяца максимальные изменения производительности H_2O достигали 30 раз (эксперимент MIRO [33]). Таким образом, максимальная производительность H_2O составляла $4\pi \times 3 \times 10^{25} \times 18 \times 1,66 \times 10^{-27} = 112,6$ кг с⁻¹, а минимальная 3,75 кг с⁻¹. Некоторое противоречие связано с размерностью данных: авторы [31] указывают 2×10^{25} молекул с⁻¹ (в июне

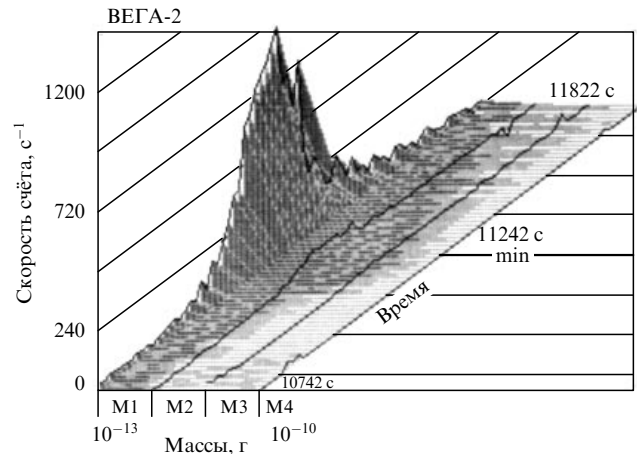


Рис. 15. Изменения скорости счёта пылевых частиц в эксперименте ДУСМА 9 марта 1986 г. [38] при прохождении "Вегой-2" максимального сближения с ядром (8045 км).

2014 г.), а авторы [33] дают до 3×10^{25} молекул (с ср)⁻¹ в августе 2014 г.

17% атмосферы кометы 67P/CG приходится на моноксид углерода и около 3% — на углекислый газ. Среди малых составляющих были обнаружены метан и аммиак [34]. Более сложными были измерения пылевой составляющей. При отношении газ/пыль 7:1 (кратковременно) по массе суммарные потери достигали $1,60 \times 10^4$ кг с⁻¹. Существуют значительные расхождения в оценках потерь массы кометы Галлея вблизи перигелия. Оценки потерь Δm за один орбитальный период (~ 76 лет) варьируют от $2,2 \times 10^{11}$ до 5×10^{11} кг, т.е. от 10^{-3} до 2×10^{-3} полной массы ядра. На аппаратах "Вега-1" выполнялись три пылевых эксперимента, ДУСМА (от англ. Dust Counter and Mass Analyzer), СП-1 и СП-2 [35–37]. В работах [35, 38, 39] приводились данные эксперимента ДУСМА на "Вега-1" и "Вега-2" о регистрации частиц с массами от $1,5 \times 10^{-13}$ до 10^{-8} г. Рисунок 15 иллюстрирует возрастание и последующее уменьшение скорости счёта в эксперименте ДУСМА [38] при сближении с ядром до расстояния 8045 км. Интегрирование данных пылевых приборов с принятыми функциями распределения частиц по массам дало возрастание максимальных потерь массы в перигелии до $2,9 \times 10^4$ кг с⁻¹.

Следует отметить, что полная масса ядра кометы Галлея ($2,2 \times 10^{14}$ кг) (см. таблицу) рассчитывается на основе точно не известной плотности тела [40], оцениваемой от 100 до 700 (и даже до 1500) кг м⁻³ и плохо известной плотности пылевых частиц. Обычно принимается 600 кг м⁻³, что указывает на высокую пористость ядра, образованного большим числом мелких слабо связанных элементов.

Предполагается, что комета Галлея проходила перигелий уже примерно 2300 раз [29], что приводит к очень большому значению исходной массы, если принять указанные выше потери Δm от 10^{-3} до 2×10^{-3} полной массы ядра. Исходная масса $M_0 = M_{\text{Halley}} / (1 - \Delta m)^n$, где n — число прохождений, что составляет $M_{\text{Halley}} = 2,2 \times 10^{14}$ кг и $M_0 = 2,2 \times 10^{15}$ кг для $\Delta m = 10^{-3}$ и $2,2 \times 10^{16}$ кг для $\Delta m = 2 \times 10^{-3}$. Кометы со столь большими массами неизвестны. Но на больших масштабах времени, за пределами, например, 40–50 орбит, расчёт динамики кометы

Таблица

	Комета 1P/Галлея	Комета 67P/Чурюмова – Герасименко
Дата открытия	1758 г. (первый предсказанный перигелий)	22 октября 1969 г.
Характеристики орбиты	Эпоха 17 февраля 1994 г. (JD 2449400,5)	Эпоха 9 декабря 2014 г. (JDТ 2457000,5)
Эксцентриситет e	0,9671	0,641
Большая полуось a	17,8584 а.е.	3,4628 а.е.
Перигелий q	0,5712 а.е.	1,2432 а.е.
Афелий Q	35,082 а.е.	5,722 а.е.
Период обращения P	75,5 лет	6,44 лет
Наклонение орбиты	162,2366°	7,0401°
Последний перигелий	9 февраля 1986 г.	13 августа 2015 г.
Следующий перигелий	28 июля 2061 г.	21 января 2021 г.
Долгота восходящего узла	58,9407°	50,1409°
Аргумент перигелия	111,33249°	12,7868°
Размеры	15,3 × 7,2 × 7,2 км	"Голова" (меньшая часть) 2,6 × 2,3 × 1,8 км, "тело" (большая часть) 4,1 × 3,3 × 1,8 км
Масса	2,2 × 10 ¹⁴ кг	10 ¹³ кг
Средняя плотность	550 ± 250 кг м ⁻³ (оценки варьируются от 200 до 1500 кг м ⁻³)	470 кг м ⁻³ , пористость 70–80 %*
Альbedo	0,04	0,065
Сфотографировано поверхности ядра	25 %	> 95 %
Период вращения вокруг собственной оси	52 ч	12,4 ч
Химический состав ядра	H ₂ O — около 80 %, CO ₂ — от 3 до 4 %, CO — около 27 %	H ₂ O, CO ₂ , CO (нет точных данных)
Температура поверхности ядра	300–400 К (27–127 °С) на расстоянии 0,9 а.е. от Солнца (после прохождения перигелия)	200 К (–70 °С) на расстоянии 3,7 а.е. от Солнца ("горячие" пятна до –40 °С)
Газопродуктивность воды (после прохождения перигелия)	$Q_{\text{H}_2\text{O}} \approx 4 \times 10^{29} \text{ с}^{-1}$ на расстоянии 0,9 а.е. от Солнца	$Q_{\text{H}_2\text{O}} \approx 10^{27} \text{ с}^{-1}$ на расстоянии 1,35 а.е. от Солнца**
Атомы и ионы	H, O, C, S, Na, K, Ca, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, H ⁺ , C ⁺ , CO ₂ ⁺ , Fe ⁺ , Ca ⁺ , CH ⁺ , CN ⁺ , N ₂ ⁺ , H ₂ O ⁺ , H ₂ ⁺	S Na ⁺ , Mg ⁺
Молекулы	C ₂ , CH, CN, CO, CS, NH, OH, C ₃ , NH ₂ , H ₂ O, HCN, CH ₃ CN, S ₂ , HCO, NH ₃ , NH ₄	H ₂ O, CO, CO ₂ , NH ₃ , CH ₄ , CH ₃ OH, CH ₂ O, H ₂ S, HCN, SO ₂ , CS ₂
Магнитное поле в коме (постепенное возрастание)	до 75–80 нТл на расстоянии 0,9 а.е. от Солнца	До 100–110 нТл на расстоянии 3,4 а.е. от Солнца
Изотопный состав D/H	(3,06 ± 0,34) × 10 ⁻⁴	(5,3 ± 0,7) × 10 ⁻⁴
Отношение пыль/газ	1:7–1:8	2:1–4:1

* По данным [27] ядро кометы 67P/CG обладает плотностью 533 ± 6 кг м⁻³ и имеет высокую пористость, 72–74 %.

** Газопродуктивность паров воды на орбитальном расстоянии около 3,4 а.е. $Q_{\text{H}_2\text{O}} \approx 2 \times 10^{25} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ [33].

становится ненадёжным. При темпе потерь 2,9 × 10⁴ кг с⁻¹ в перигелии и 1,20 × 10⁴ кг с⁻¹ на расстоянии 0,9 а.е. величина 10⁻³ массы действительно накапливается вблизи проходимого перигелия быстро, менее чем за 220 сут. Скорость ядра V_{Halley} в перигелии:

$$V_{\text{Halley}} = \left(\frac{GM_{\odot}(1 + e_{\text{Halley}})}{q_{\text{Halley}}} \right)^{1/2} = 55,2 \text{ км с}^{-1},$$

где $q_{\text{Halley}} = 0,5712$ а.е. — расстояние в перигелии, эксцентриситет $e_{\text{Halley}} = 0,9671$, масса Солнца $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30}$ кг. Орбита наклонена к эклиптике на 162° (обратное вращение).

По измерениям в начале 2015 г. газовый состав комы 67P/CG включал воду, окись углерода, двуокись углерода, аммиак, метан, метанол, формальдегид, сероводород, цианистый водород, диоксид серы, дисульфид углерода, серу, карбонил-сульфид, а также натрий и магний в составе пылинок [28, 32, 34]. В ранних сообщениях указывалось, что сероводород содержит изотоп серы ³²S, а изотоп ³⁴S может иметь другое происхождение. В ядре кометы в эксперименте ROSINA, вместе с другими газообразными, найден инертный газ аргон (рис. 16 [41]), причём отношение изотопов ³⁶Ar/³⁸Ar составляет (5,4 ± 1,4), что близко к земному, 5,3. Аргон

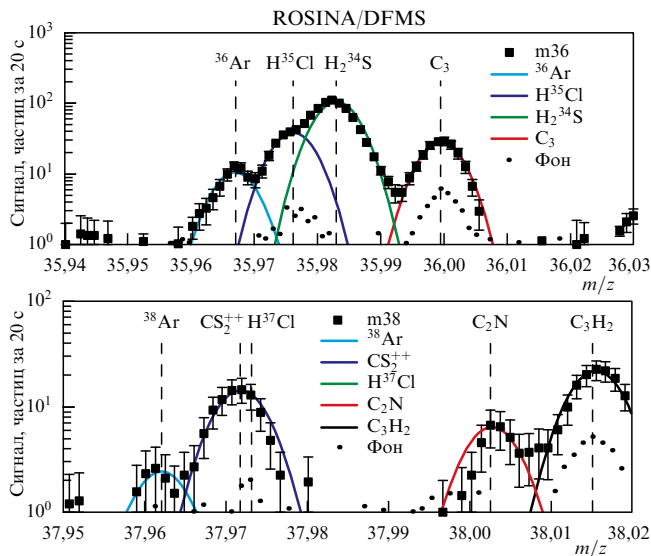


Рис. 16. Изотопы ^{36}Ar , ^{38}Ar и другие газообразные составляющие кометы 67P/CG, зарегистрированные в эксперименте ROSINA (Rosetta Orbiter Spectrometer for Ion and Neutral Analysis) [39].

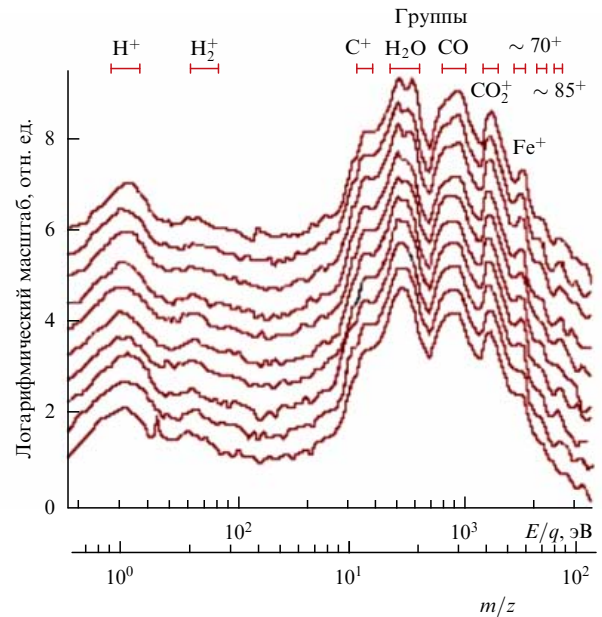


Рис. 18. Ионы железа Fe^+ были впервые обнаружены в плазме кометы Галлея в экспериментах миссии "Вега". Кривые были получены в ходе сближения аппарата с ядром [7].

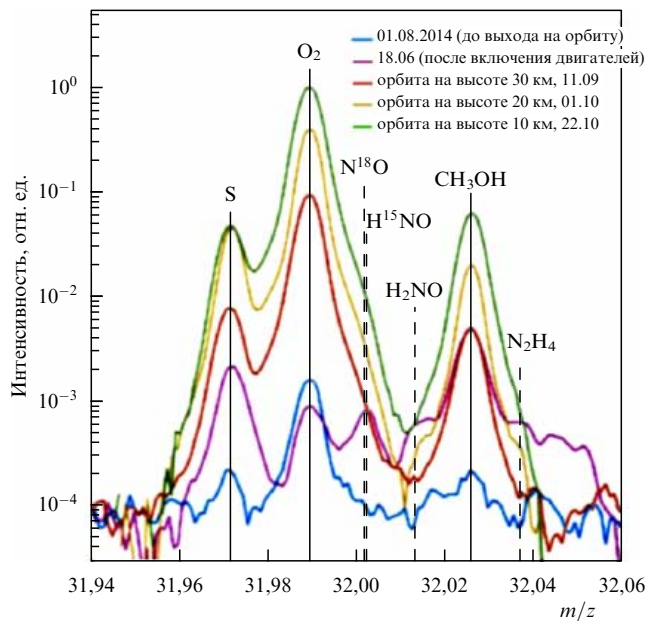


Рис. 17. (В цвете онлайн.) Обилие кислорода O_2 и других газообразных составляющих в атмосфере кометы 67P/CG по измерениям масс-спектрометра ROSINA с разных расстояний от ядра [44]. Пик справа — метанол (CH_3OH).

в кометах обнаружен не впервые. Ранее сообщалось об эмиссиях аргона у "Большой кометы 1997 г." — кометы Хейла–Боппа [42], у которой также был предположительно обнаружен синтез органических веществ [43].

Важным стало обнаружение в атмосфере кометы молекулярного кислорода O_2 с помощью масс-спектрометра ROSINA на аппарате Rosetta [44], причём кислород оказался среди четырёх наиболее обильных составляющих атмосферы кометы (рис. 17). Его концентрация (от 1 до 10 % к водяному пару, 3,8 % в среднем) мало менялась в течение полугода, когда выполнялись измерения, что указывает на ядро как стабильный его источник.

Кислород диффундирует из недр ядра и, как предполагается, не является продуктом диссоциации воды, но сохранился в ядре со времени образования последнего. Однако остаётся неясным, какая исходная среда могла быть значительно обогащена реликтовым кислородом и почему кислород, элемент химически высокоактивный, не оказался связанным в реакциях с материалами ядра. Следует отметить, что проблема связи обилия наблюдаемых компонентов с исходным составом ядра кометы относится к актуальным вопросам физики комет [45].

Главная особенность миссии Rosetta по сравнению с "Вегой" состоит в том, что благодаря квазиспутниковому положению аппарата относительно ядра кометы 67P/CG становятся возможными систематические и длительные наблюдения, как в случае обнаружения кислорода. Тем не менее в миссии "Вега" в процессе кратковременного сближения аппаратов с кометой также было много неожиданностей. Непосредственные прямые измерения состава кометной плазмы указали на присутствие ионов с массой 56 (рис. 18), которые были гипотетически отождествлены с ионами железа Fe^+ и ранее в плазме кометы Галлея не наблюдались.

Как отмечалось выше, комета 67P/CG, в отличие от кометы Галлея, относится к пыле-газовым кометам. В таблице К.И. Чурюмова отношение пыль/газ оценивается как 4:1, но, по-видимому, оно ближе к 3:1. Указанная пиковая производительность пыли вблизи перигелия 2002–2003 гг. была 60 кг с^{-1} , а в 1982–1983 гг. достигала 220 кг с^{-1} . При пересчёте в производительность H_2O , от $3,75 \text{ кг с}^{-1}$ до 112 кг с^{-1} , согласно [33], эти значения согласуются с приведёнными выше пределами. Производительность паров воды, $Q_{\text{H}_2\text{O}} \approx 4 \times 10^{25} \text{ с}^{-1}$, в 10^4 раз меньше, чем у кометы Галлея. Поэтому указанные отношения пыль/газ приводят к минимальной оценке потерь пыли около 15 кг с^{-1} . В целом, разброс в оценках затрудняет определение суммарных потерь, но по сравнению с массой ядра (10^{13} кг) они пренебрежимо малы. Эффекты динамического воздействия микрометеоритов,

газа и плазмы на поверхность ядра и кому в целом, если учитывать только орбитальное движение кометы, намного ниже, чем у кометы Галлея. Орбитальная скорость V_{67P} в перигелии ($q_{67P} = 1,2432$ а.е., $\varepsilon_{67P} = 0,6410$):

$$V_{67P} = \left(\frac{GM_{\odot}(1 + \varepsilon_{67P})}{q_{67P}} \right)^{1/2} = 34,2 \text{ км с}^{-1}.$$

Интересное явление было обнаружено в результате быстрого движения самих аппаратов "Вега" относительно ядра кометы Галлея. Пространственное распределение пылевых частиц в окрестностях ядра было неоднородным и указывало на определённую периодичность в структуре пылевой среды. Явление было интерпретировано О.Л. Вайсбергом как пространственная спиральная форма наиболее интенсивных пылевых джетов, возникающая благодаря вращению ядра [37, 46]. Благодаря быстрому движению, аппараты ВЕГА последовательно пересекали их несколько раз [39].

4. Происхождение и обогащённость дейтерием комет 1P/ Галлея и 67P/CG

Сопоставление сведений о составе кометных атмосфер, приведённых в таблице, указывает на значительные различия комет 1P и 67P, что связано с различиями в их происхождении. Пояс Койпера считается той областью Солнечной системы, где могут находиться тела, подобные комете 67P [47]. Особенности орбиты кометы Галлея указывают на её давнее происхождение из более удалённой области, из Облака Оорта, тела в котором никак не связаны с положением плоскости эклиптики и своим отношением D/H могут выделяться среди других тел Солнечной системы. Ныне комета Галлея относится к короткопериодической группе (период менее 200 лет), но именно орбитальные особенности позволяют предположить, что возникла она в облаке Оорта и, благодаря возмущениям планетами-гигантами в нижней части её орбиты, оказалась на короткопериодической орбите. Вместе с тем имеющиеся исторические сведения показывают, что на современной, более или менее устойчивой орбите, 1P/Halley находится очень давно [29]. В древнегреческих и китайских источниках её первое упоминание относится к 468–466 гг. до нашей эры, а её описание содержится в китайских материалах, датированных 240 г. до н.э. В средние века в юлианском и григорианском календарях отмечались даты появления 1P начиная с 1531 и 1607 гг. соответственно. Эволюция орбиты 67P/CG так далеко не прослеживается. Расчёты эволюции до XIX в. дают ненадёжные результаты. До 1840 г. её расстояние в перигелии, как показывает обратное интегрирование орбиты, было втрое больше современного, 4,0 а.е. Далее серия сближений с Юпитером уменьшила расстояние в перигелии до 3,0 а.е., а затем до 2,77 а.е. Совсем недавно, в 1959 г., произошло дальнейшее снижение перигелия кометы до 1,29 а.е. Ныне орбитальный период 67P составляет 6,45 года.

Чрезвычайно важным оказалось измерение отношения D/H (дейтерий – протий). В экспресс-обзоре [4] отмечалось, что анализ изотопного состава значительных масс водяного пара, выделяемого ядром 67P/CG, указал на необычно высокое отношение D/H. Поскольку новые работы уже опубликованы, уместно рассмотреть как результаты новых измерений [47], так и их интерпре-

тацию. Тема отношения дейтерий – протий в связи с происхождением земных океанов рассматривалась многими авторами, среди которых отметим авторов [47–49] Tobias C. Owen и Akiva Bar-Nun, чьи работы охватывают период с 1980-х гг. по настоящее время. Предполагалось, что летучие попадали на внутренние планеты в виде планетезималей и ледяных ядер комет [48] и что до 40 % воды в земных океанах принесли кометы, а около 60 % выделили планетезимали и астероиды. Экспериментальные факты об отношении дейтерий – протий, которые накапливались постепенно, смещали, однако происхождение земной воды в пользу планетезималей и астероидов [49]. В работе [50] отмечается, что океаны Земли не могли создать только кометы, для этого были необходимы другие источники с низким отношением D/H. Подробно тема рассматривалась в статье [51]. Измеренное D/H в экспериментах на аппарате Rosetta составляет $(5,3 \pm 0,7) \times 10^{-4}$ [52]. Как отмечают авторы, более ранние кометные измерения и новые результаты позволяют предположить, что широкие пределы отношения D/H в воде семейства комет Юпитера исключают возможность того, что этот резервуар был единственным источником воды океанов Земли. Заключение осторожное, тем не менее появились многочисленные комментарии о том, что результаты Rosetta окончательно закрывают вопрос о кометах, что неверно. Не исключено, что и само земное отношение D/H также могло эволюционировать [53]. Хотя на самой поверхности кометного ядра воды в различных фазах мало [17], причём наблюдаются суточные

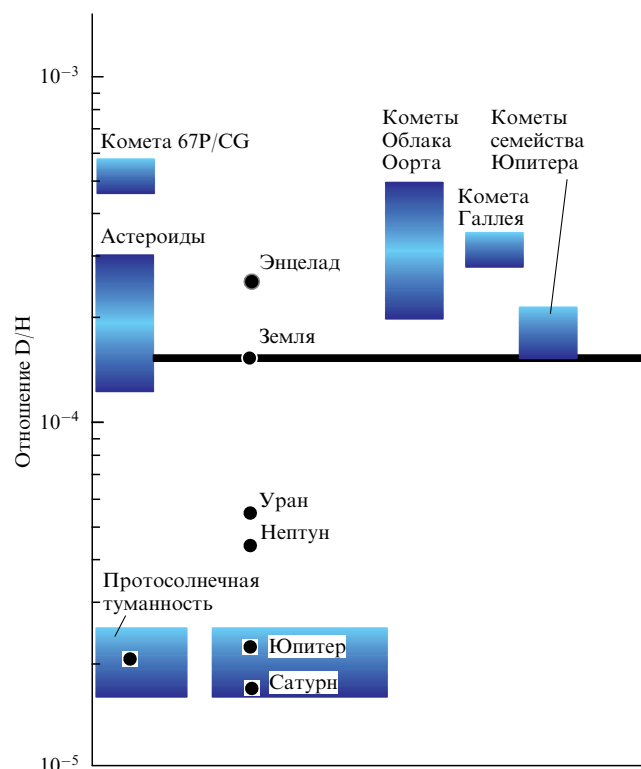


Рис. 19. Обобщённая диаграмма для отношения D/H у тел Солнечной системы. Энцелад — спутник Сатурна. Высота прямоугольников показывает различия значений в группе или разброс измерений. Горизонтальная линия — вода Земли. Верхнее значение, 530 ppm — данные для 67P. Исходное отношение D/H в протозвёздной туманности около 20 ppm. Близким отношением D/H обладают Юпитер и Сатурн. Двукратные (в среднем) земные значения D/H характерны для комет Облака Оорта (как комета Галлея).

фазовые циклы, но водяной лёд входит в основные составляющие кометных ядер, на которые приходилась значительная часть вещества, поступающего на Землю. Если на 10^6 молекул обычной земной воды (H_2O) приходится 156 молекул тяжёлой воды (HDO), т.е. 156 ppm, то измерения Rosetta дают 530 ppm (parts per million — миллионная доля), т.е. 530 молекул HDO на 10^6 молекул обычной воды.

Рисунок 19 построен по материалам [47] и других опубликованных источников. У кометы Галлея отношение D/H было 310 ppm [54], что вдвое больше земного (156 ppm). Почти таким же (330 ppm) оказалось отношение у кометы Hale–Bopp [55]. Таким образом, эти небесные тела обогащены дейтерием по сравнению с Землёй в 2 и в 3,4 раза соответственно и более чем в 15 раз по сравнению с протозвёздной туманностью. Горизонтальная линия на рис. 19 — вода Земли (156 ppm), в нижней части рисунка — исходное отношение D/H в протозвёздной туманности (20–23 ppm [56]). Недавние измерения для 103P/Hartley-2 дали отношение D/H $(1,61 \pm 0,24) \times 10^{-4}$ [57]. Хотя обе кометы, 103P/Hartley-2 и 67P/CG, по-видимому, пришли из пояса Койпера [45], но отношениями D/H они различаются в 3 раза.

Считать, что по результатам исследований 67P/CG вопрос о происхождении воды в земных океанах исчерпан, наивно. Рисунок 19 также указывает на сложность проблемы, а концентрация значений D/H вблизи земных величин скорее свидетельствует в пользу планетезималей и астероидов, хотя были и другие источники воды. Несомненно, часть воды океанов также приносили кометы [41], а вода океанов представляет смесь разных источников. Тем не менее рис. 19 лишней раз указывает на сложность проблемы.

5. Образование сложных кометных ядер в процессе низкоскоростных столкновений

Значительная часть кометных ядер имеет форму гантели с узкой "шейкой", разделяющей более массивные части. Таковы ядра комет 67P/CG, 1P/Halley, 103P/Hartley-2, 19P/Borreli и многие другие. Как и в случае 67P/CG, наиболее интенсивные выбросы материала часто наблюдаются именно с узкой шейки, что позволяет предполагать, что постепенное разрушение ядер происходит именно в узком сечении. Уменьшению шейки сопутствует увеличение механических напряжений, возникающих под действием центробежных сил от вращения тела, и ряд других физических факторов. Пример анализа механических напряжений приводился в работе [5] для случаев кометы 103P/Hartley-2, где тело удерживают от разрыва только силы трения. Вероятно, в ряде случаев разрыв и происходит, если реголит шейки достаточно рыхлый. Ядро кометы Галлея имеет среднюю плотность около 550 кг м^{-3} (см. выше) и пористость около 50%. Это указывает, что оно состоит из большого количества мелких элементов, слабо скреплённых между собой.

Ядро кометы 67P/Чурюмова–Герасименко также обладает невысокой плотностью, по уточнённым данным $533 \pm 6 \text{ кг м}^{-3}$, и высокой пористостью, 72–74% [27]. Авторы отмечают, что в основном пылевой состав и пористость тела 67P/CG подобны таким же характеристикам кометы 9P/Tempel 1. Вероятное отношение смеси пыль : лёд около 4 по массе и 2 по объёму. Аналогичные результаты миссии Rosetta уже приводились выше [31].

Материал ядра достаточно однороден, а наличие пустот маловероятно.

Вместе с тем, как показали эксперименты, выполненные при посадке зонда Philae, хотя средняя пористость ядра высока, но материал в окончательной точке посадки в районе Abydos имел жёсткость прочно смёрзшейся смеси льда с зёрнами пыли, а в точке первого контакта (Agilkia) поверхность была малопрочной (но достаточно жёсткой для отскока зонда). Материал поверхности неоднороден.

В результате этих наблюдений всё больший интерес стали привлекать известные предположения о том, что гантелеобразная форма кометных ядер — это результат давнего слияния независимых тел, а не сигнал о предстоящем их разрушении. Именно ядро кометы 67P/CG представляет такие свидетельства, которые рассматриваются в работах [21, 25, 58] и др. Авторы [21] рассматривают также гипотезу отложения слоёв материала на уже образовавшееся тело. Форма ядра и её свойства ставят вопрос, образовалось ли тело в контакте двух крупных планетезималей 4,5 млрд лет назад, или же это единое тело, эволюция которого идёт по пути медленного разрушения [24]. Идея образования ядра из сталкивающихся тел не нова, но встречается с той трудностью, что энергия, выделяющаяся при столкновениях, скорее разрушает импакторы, чем их объединяет.

Разумеется, в большинстве случаев именно такие разрушающие столкновения и происходили. Но сталкивающихся тел было очень много, среди них встречались и такие, у которых скорости столкновений были невелики, $1 - 10 \text{ м с}^{-1}$, а импакторы могли объединяться без существенных разрушений, причём материал шейки мог спрессовываться. Такие условия могли привести к образованию гантелеобразных ядер комет (67P/CG, 103P/Hartley-2, 1P/Halley), что, конечно, не противоречит их продолжающемуся разрушению в узком сечении.

Убедительный пример разнородности частей ядра кометы 67P/CG представлен на рис. 20. Уступ Nathor несёт признаки продолжающегося разрушения, а обнажённая поверхность имеет структуру, напоминающую слоистость. У основания уступа виден осыпающийся материал и оторвавшиеся глыбы, покрывающие шейку Нарі. Как можно видеть, поверхность неоднородна и несёт следы разрушений и трещины [24]. Структура противоположной стороны Seth совершенно другая [24]. Таким образом, две части ядра 67P/CG имеют различную природу [21], что больше свидетельствует в пользу гипотезы о слиянии протокометных тел. В таком случае можно ожидать, что в районе контакта сталкивающихся тел реголит должен иметь повышенную плотность. Возможно, именно такая неоднородность реголита на поверхности ядра 67P/CG встретилась при посадке зонда Philae.

Гипотеза слияния кометных ядер в низкоскоростных столкновениях находит многочисленных сторонников. Вероятность разрушения при столкновениях намного выше, чем объединения, но во время образования Солнечной системы среди бесчисленных первичных тел происходили и низкоскоростные столкновения. Процесс объединения первичных тел должен происходить по-разному у тел малой и большой массы. У последних, даже при малых скоростях столкновения, рассеиваемая энергия настолько значительна, что контактная область должна полностью сминаться. Если предположить, что ядро кометы Галлея также прошло через подобный



Рис. 20. Склон меньшей половины ядра кометы 67P/CG (уступ Nathor) имеет высоту около 1 км. На снимке виден разрушающийся склон и осыпавшиеся на шейку Нарі реголит и глыбы. Противоположная сторона, область Seth, имеет другую природу. (Снимок © OSIRIS, ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA, с изменениями).

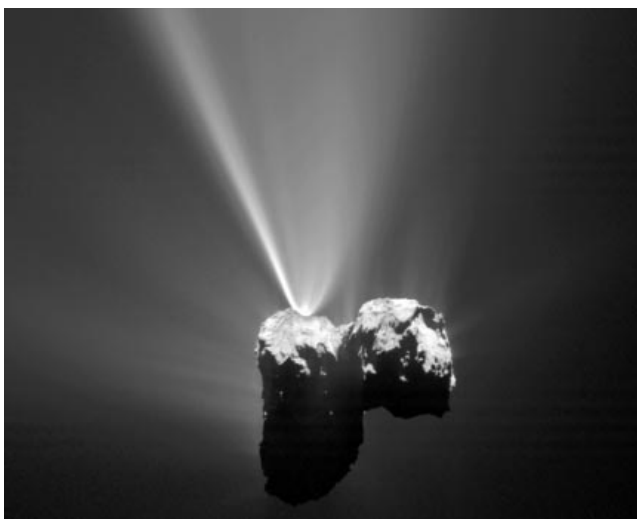


Рис. 21. Вероятность разрушения при столкновениях тел во время образования Солнечной системы была намного выше, чем их объединения, но среди бесчисленных первичных тел происходили и низкоскоростные столкновения. Не исключено, что ядро 67P/CG когда-то возникло в таком процессе объединения. (Снимок © ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA, 12 августа 2015.)

процесс, его вид (рис. 8), возможно, подтверждает эту мысль. Но статистика ещё слишком мала. Таким образом, "шейки" должны встречаться у кометных тел (и астероидов) тем чаще, чем меньше их масса, как у ядра

67P/CG (рис. 21). Конечно, снимок на рис. 21 не может быть прямым доказательством когда-то произошедшего слияния независимых ядер, но впечатление такое, что их объединение произошло именно по плоскости узкого сечения на рисунке. Развитие гипотезы о слиянии протокометных тел, как новый крупный шаг в исследовании комет, было представлено Мемориальной Груберовской лекцией [58] на XXIX Ассамблее МАС 2015, посвящённой новым представлениям о процессах образования Солнечной системы.

6. Заключение

Приведённое выше сопоставление некоторых свойств кометных ядер, разумеется, далеко не исчерпывает тему. Непосредственное исследование кометных ядер, начатое 30 лет назад космическими аппаратами "Вега", показывает многообразие природы кометных тел, их атмосфер и областей их образования. Сравнение наиболее подробно исследованных комет, таких как комета 1P/Галлея и комета 67P/Чурюмова – Герасименко, указывает на существенные различия в их физико-химических свойствах, происхождении, динамике и эволюции. Можно даже отметить, что часто встречающееся утверждение о том, что изучение физики и эволюции комет ускорит решение кардинальных вопросов происхождения нашей Солнечной системы, несколько наивно. Наоборот, раскрываются всё новые процессы, усложняющие представления о её возникновении.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 15-02-01989.

Список литературы

1. Hughes D W et al. *Philos. Trans. R. Soc. A* **323** 349 (1987)
2. Hughes D W "Development of cometary history", in *Symp. on Halley's Comet. Papers Read at a Joint Meeting of the Royal Society and the American Philosophical Society, April 1986* (Philadelphia, PA: Independence Square, 1986) p. 45–92
3. Чурюмов К И *Кометы и их наблюдения* (М.: Наука, 1980)
4. Ксанфомалити Л В, Чурюмов К И *Астрон. вестн.* **49** 224 (2015)
5. Ксанфомалити Л В *УФН* **182** 147 (2012); Ksanfomality L V *Phys. Usp.* **55** 137 (2012)
6. Емельяненко В В, Шустов Б М *УФН* **183** 885 (2013); Emel'yanenko V V, Shustov B M *Phys. Usp.* **56** 833 (2013)
7. Веригин М И "ВЕГА – 1, 2: Перехват кометы Галлея", Постер (М.: ИКИ РАН, 2015)
8. Сагдеев Р З и др. *Письма в Астрон. журн.* **12** 581 (1986); Sagdeev R Z et al. *Sov. Astron. Lett.* **12** 243 (1986)
9. Sagdeev R Z et al. *Nature* **321** 259 (1986)
10. Reinhard R *Nature* **321** 313 (1986)
11. Hirao K, Itoh T *Nature* **321** 294 (1986)
12. Зеленый Л М, Ксанфомалити Л В *Вестн. НПО им. С.А. Лавоочкина* (3) 81 (2015)
13. Auger A-T et al. *Astron. Astrophys.* **583** A35 (2015)
14. Сагдеев Р З и др. *Космич. исслед.* **25** 820 (1987)
15. Аванесов Г А, Зиман Я Л, Гарнопольский М И, в кн. *Телевизионная съёмка кометы Галлея* (Отв. ред. Р З Сагдеев) (М.: Наука, 1989) с. 295
16. Combes M et al. *Nature* **321** 266 (1986)
17. De Sanctis M C et al. *Nature* **525** 500 (2015)
18. Keller H U et al. *Nature* **321** 320 (1986)
19. Ксанфомалити Л В и др. *Космич. исслед.* **54** 229 (2016); Ksanfomality L V et al. *Cosmic Res.* **54** 217 (2016)
20. Fornasier S et al. *Astron. Astrophys.* **583** A30 (2015)
21. Massironi M et al. *Nature* **526** 402 (2015)
22. Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **45** 518 (2011); Ksanfomality L V *Solar Syst. Res.* **45** 504 (2011)

23. El-Maarry M R et al. *Astron. Astrophys.* **583** A26 (2015)
24. Sierks H et al. *Science* **347** aaa1044 (2015)
25. Vincent J-P et al. *Nature* **523** 63 (2015)
26. Oklay N et al. *Astron. Astrophys.* **586** A80 (2016)
27. Pätzold M et al. *Nature* **530** 63 (2016)
28. Capaccioni F et al. *Science* **347** aaa0628 (2015)
29. Cevolani G, Bortolotti G, Hajduk A *Nuovo Cimento C* **10** 587 (1987)
30. Rotundi A et al. *Science* **347** aaa3905 (2015)
31. Gulkis S et al. *Science* **347** aaa0709 (2015)
32. Taylor M G G T et al. *Science* **347** 387 (2015)
33. Lee S et al. *Astron. Astrophys.* **583** A5 (2015)
34. Biver N et al., in *European Planetary Science Congress 2015, EPSC, 27 September–02 October 2015, Nantes, France Abstracts 10, EPSC2015*, p. EPSC2015-503
35. Simpson J A et al., in *Asteroids, Comets, Meteors III, Proc. of a Meeting, AMC 89, Uppsala, June 12–16, 1989* (Eds C I Lagerkvist, H Rickman, B A Lindblad) (Uppsala: Reprocentralen HSC, 1990) p. 435
36. Мазец Е П и др. *Письма в Астрон. журн.* **12** 624 (1986); Mazets E P et al. *Sov. Astron. Lett.* **12** 262 (1986)
37. Вайсберг О Л и др. *Космич. иссл.* **25** 867 (1987)
38. Симпсон Дж А и др. *Астрон. вестн.* **27** 45 (1993); Simpson J A et al. *Solar Syst. Res.* **27** 35 (1993)
39. Simpson J A et al. *Adv. Space Res.* **9** 259 (1989)
40. Sagdeev R Z, Elyasberg P E, Moroz V I *Nature* **331** 240 (1988)
41. Balsiger H et al. *Sci. Adv.* **1** e1500377 (2015)
42. Stern S A et al. *Astrophys. J.* **544** L169 (2000)
43. Rodgers S D, Charnley S B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **320** L61 (2001)
44. Bieler A et al. *Nature* **526** 678 (2015)
45. Marboeuf U, Schmitt B *Icarus* **242** 225 (2014)
46. Vaisberg O L et al. *Nature* **321** 274 (1986)
47. Altwegg K et al. *Science* **347** 1261952 (2015)
48. Owen T, Bar-Nun A *Icarus* **116** 215 (1995)
49. Owen T "On the origin of planetary atmospheres: The influence of ice", in *Planetary Systems: the Long View. 9th Rencontres de Blois, June 22–28, 1997, France* (Eds L M Celnikier, J Trân Thanh Van) (Paris: Editions Frontières, 1998) p. 219
50. Owen T C, Bar-Nun A *Origins Life Evolution Biosphere* **31** 435 (2001)
51. Drake M J *Meteorit. Planet. Sci.* **40** 519 (2005)
52. Auger A-T et al. *Astron. Astrophys.* **583** A35 (2015)
53. Genda H, Ikoma M *Icarus* **194** 42 (2008)
54. Eberhardt P et al. *Astron. Astrophys.* **187** 435 (1987)
55. Meier R et al. *Science* **279** 842 (1998)
56. Geiss J, Gloeckler G *Space Sci. Rev.* **84** 239 (1998)
57. Ceccarelli C et al. "Deuterium fractionation: the Ariadne's thread from the precollapse phase to meteorites and comets today", in *Protostars and Planets VI* (Eds H Beuther et al.) (Tucson, AZ: Univ. of Arizona Press, 2014); arXiv:1403.7143
58. Benz W "Rosetta and the formation of the solar system", in *IAU 2015. Peter Gruber Memorial Lecture, Honolulu, Hawaii. August 4, 2015*

30 years of the Vega mission: Comparison of some properties of 1P/Halley and 67P/Churyumov–Gerasimenko comets

L.V. Ksanfomality

*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
E-mail: ksanf@iki.rssi.ru, leksanf@gmail.com*

On March 6 and 9, 1986, for the first time in the history of science, the Russian Vega-1 and Vega-2 spacecraft approached and closely passed the nucleus of Halley's comet (1P/Halley). A few days later, on March 14, 1986, the same was done by the European Space Agency's (ESA) Giotto spacecraft. These missions, together with the Japanese Suisei (JAXA) made a successful start in the spacecraft exploration of cometary nuclei. Subsequent missions to other comets were aimed at directly studying cometary bodies carrying signs of Solar system formation. The Rosetta spacecraft, inserted into a low orbit around the nucleus of the 67P/Churyumov–Gerasimenko comet, performed its complex measurements from 2014 to September 2016. In this review, some of the data from these missions are compared. The review draws on the proceedings of the Vega 30th anniversary conference held in the Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Science in March 2016 and is not meant to be exhaustive in describing the mission results and problems in the physics of comets.

Keywords: comets, cometary physics, space investigations, comparison of comets

PACS numbers: **01.65. + g**, **96.25. – f**, 96.30.Cw

Bibliography — 58 references

Received 3 April 2016, revised 10 July 2016

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (3) 311–326 (2017)

Physics–Uspekhi **60** (3) (2017)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2016.07.037867>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.07.037867>