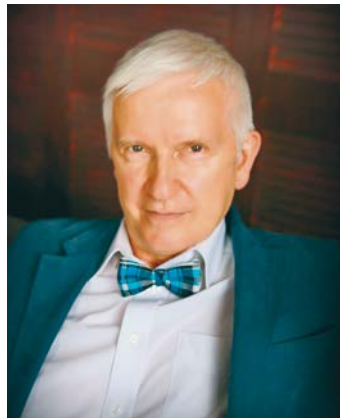


## Кометные летописи рождения и эволюции Солнечной системы

Б.М. ШУСТОВ,  
член-корреспондент РАН  
Институт астрономии РАН

---

Происхождение Солнечной системы, формирование планеты Земля и появления на ней жизни, в том числе и нас самих, и будущая эволюция – несомненно,



одна из важнейших проблем, разрабатываемых современной наукой. Мы находимся на очень интересном этапе развития этого направления.

КОМЕТЫ – СВИДЕТЕЛИ  
ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ  
РАННЕЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

В последние годы появилась возможность наблюдать «со стороны» образование внесолнечных молодых планетных систем и структуру уже сформировавшихся. Множественность «миров» (планетных систем), о которых догадывались великие еретики прошлого, ныне доказана открытием тысяч экзопланет (Земля и Вселенная,

2010, № 4; 2014, № 5), хотя если говорить о жизни на других телах, то эти открытия еще впереди. Мощный скачок в накоплении важнейших данных о структуре и эволюции протопланетных дисков происходит буквально в последние годы (Земля и Вселенная, 2017, № 3). Очень важные и часто неожиданные данные приносят такие потрясающие инструменты как гигантский, состоящий

из 66 антенн, радиоинтерферометр ALMA (Atacama Large Millimeter Array – Большая антенная решетка миллиметрового диапазона в Атакамке) в Чили. Некоторые из этих данных существенно влияют и еще повлияют на многие аспекты космогонической модели нашей Солнечной системы, основы которой заложили И. Кант, С. Лаплас, О. Ю. Шмидт и другие ученые (Земля и Вселенная, 2002, № 2).

Особо отмечу роль выдающегося советского ученого-космогониста Виктора Сергеевича Сафронова (1917–1999). Именно В. С. Сафронов и его современники сформировали основы теории происхождения и эволюции Солнечной системы на количественном – то есть на глубоком научном уровне (Земля и Вселенная, 1982, № 3).

Но все-таки исследования протопланетных дисков и планетных систем вокруг других звезд пока не могут дать нам достаточно исчерпывающую информацию для понимания свойств и истории нашей Солнечной системы. Главным источником получения знаний остается наблюдение тел Солнечной системы с помощью наземных инструментов и космических аппаратов, в том числе способных проводить измерения *in situ*, и, конечно, изучение «небесных гостей» нашей планеты – метеоритов. Построить существенно непротиворечивую космогоническую модель непросто, ведь получаемая сейчас информация включает множество последующих исторических «наслоений» и изменений, которые затрудняют выделение сведений о самых ранних стадиях образования и эволюции Солнечной системы. Здесь очень важны исследования

«свидетелей» (небесных объектов), сохранивших информацию о зарождении планет.

Принято считать, что именно кометы являются одними из главных «свидетелей» образования и эволюции ранней Солнечной системы и что почти все они имеют возраст, близкий к ее возрасту. Еще одно важное замечание – почти все кометы живут долго и незаметно, причем на протяжении почти всей жизни меняются мало. Наблюдаемые время от времени «хвостатые звезды» (которые в обычном представлении и есть кометы) – это уже относительно очень короткая и финальная стадия «бурной старости» некоторых кометных тел, перешедших на близкие к Солнцу орбиты. Ледяные кометные ядра, попадающие во внутренние области Солнечной системы, не могут выжить более нескольких десятков тысяч лет.

КАК И ГДЕ  
ОБРАЗОВАЛИСЬ КОМЕТЫ

В настоящее время считается, что во внешней части Солнечной системы существуют две области малых тел, которые являются источниками наблюдаемых комет: транснептуновая область (ТНО, протянувшаяся почти на 1000 а.е.) и еще более крупное

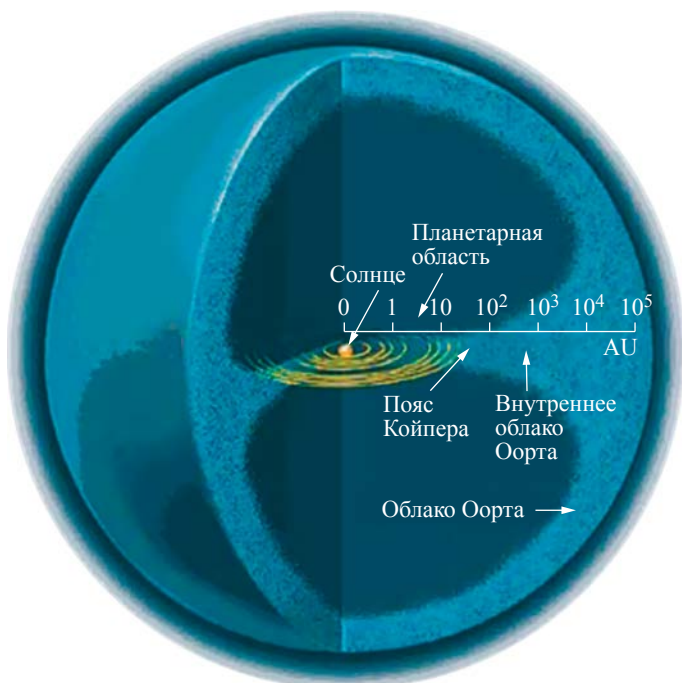
образование – облако Оорта размером 50–100 тыс.а.е. ТНО – включает в себя пояс Койпера (30–45 а.е.) и рассеянный диск. Транснептуновые объекты рассеянного диска – это довольно крупные тела, сравнимые по размерам с Плутоном. Они могут уходить по эллиптическим орбитам далеко за пределы сравнительно компактного торообразного пояса Койпера. Некоторые тела удаляются от Солнца на многие сотни астрономических единиц (например, Седна уходит от Солнца на расстояние до 900 а.е.), в область внутреннего облака Оорта. И по динамическим, и по физическим (размер, цвет) характеристикам они существенно отличаются от объектов пояса Койпера.

Самые крупные тела – карликовые планеты размером до 2500 км (то есть они намного крупнее комет) – в транснептуновой области наблюдаются довольно интенсивно, а вот облако Оорта наблюдать непосредственно невозможно, хотя число составляющих облако ледяных тел, по-видимому, измеряется многими сотнями миллиардов; но уж слишком далеки и малы объекты. Кометной активности, приводящей к увеличению блеска в миллионы раз, эти тела не проявляют из-за весьма низкой температуры на периферии

Схема структуры облака Оорта. Адаптировано автором с сайта *Pics-about-space.com*.

Солнечной системы и остаются незаметными, пока у какого-нибудь из тел под внешним воздействием не изменится орбита, вследствие чего оно приблизится к Солнцу и не начнет выглядеть как «настоящая» комета. Собственно, главным свидетельством существования облака Оорта и являются такие так называемые долгопериодические кометы, время от времени входящие в окосолнечное пространство по очень вытянутым (практически параболическим) орбитам. В среднем за год насчитывается 5–10 появлений таких тел довольно крупного размера (от 1 км до примерно 10 км). Более мелкие тела, размером в сотни и десятки метров, появляются гораздо чаще, но обнаружить их сложно.

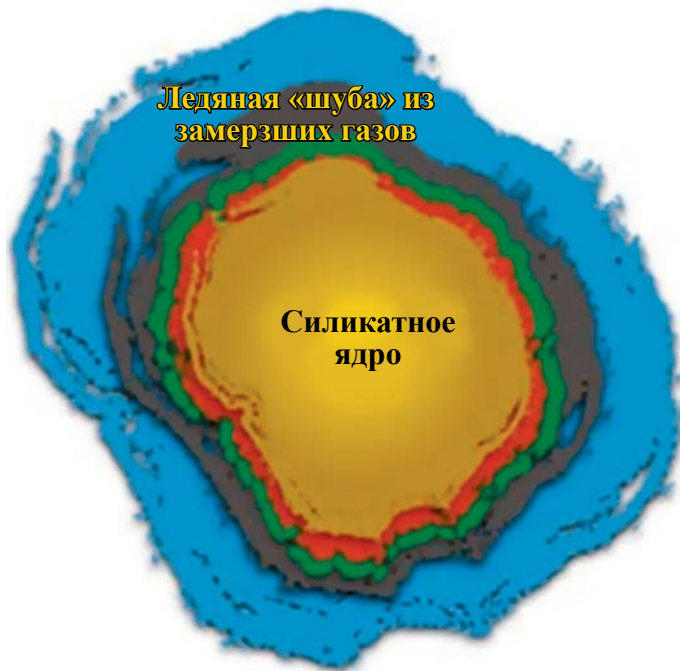
Анализ многочисленных современных научных источников позволяет сформулировать наиболее принятую гипотезу образования комет и таких структур, как облако Оорта. Она состоит в том, что кометы сформировались на самых ранних стадиях образования нашей планетной системы.



Вероятнее всего, кометы образовались в первые несколько миллионов лет жизни протопланетного диска. В более поздние времена, когда значительная доля вещества уже была потрачена на образование планетезималей и планет, образование комет было затруднено, так как плотность газопылевого вещества протопланетного диска сильно уменьшилась. Мы не рассматриваем уж очень экзотичную и недоказанную гипотезу Ж.-Л. Лагранжа, развитую советским исследователем комет С.К. Всехсвятским, о выбросах комет с поверхности планет и их спутников или так же недоказанную гипотезу о захвате комет из

межзвездного пространства. Впрочем, есть аргументы, что часть комет могла образоваться из осколков более крупных каменно-ледяных планетезималей, причем и в отсутствии газа. Такие кометы могли быть составлены уже из «проэволюционировавшего» вещества.

Ранняя Солнечная система была населена множеством тел кометного типа («кометезималей», «протокомет»), образовавшихся еще в газопылевом протопланетном диске в результате слипания (коагуляции) и роста пылинок. В холодных областях протопланетного диска пылинки состояли из тугоплавких ядер (типичной пыли, наблюдаемой в межзвездном



Строение пылинки в холодной плотной части протопланетного облака.

«грязными снежками» («dirty snowballs») или «грязными айсбергами» («dirty icebergs»). Новые исследования ядер комет Темпель 1 (15 февраля 2011 г.) и 67P Чурюмова–Герасименко (2014–2016 гг.; Земля и Вселенная, 2011, № 4, с. 30; 2013, № 1; 2015, № 4) показали, что масса тугоплавких частиц может доминировать над массой льдов. Таким образом, кометами также могут считаться и грязевые сгустки с примесью льдов («snowy dirtballs»); скорее всего, эти кометы уже испытали значительные эволюционные изменения. По-видимому, наиболее существенные заключения о первичном состоянии вещества ядер комет могли бы дать исследования *in situ* ядер долгопериодических комет, причем для гарантии первичности нужно исследовать вещество с глубин не менее 10 м; но ни одной космической экспедиции к таким телам пока что организовано не было.

Отметим, что кометезимали не могли образовываться на расстояниях, сравнимых с размерами облака Оорта. На столь большом удалении от центральной звезды плотность

пространстве), большая часть которых образовалась в веществе, истекающем из звезд на поздних стадиях звездной эволюции, и окружающих эти ядра «шуб» из замерзших летучих (льдов). Напомним, что под термином «летучие» (*volatiles*) в космохимии понимаются такие соединения, как  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CH_3OH$ ,  $N_2$ ,  $NH_3$ ,  $COS$ ,  $H_2S$  и др. (которые в нормальных условиях – температура  $25^\circ C$ , давление 1 бар – находятся в газообразном состоянии), а также воду. К летучим относятся также  $H$ ,  $C$ ,  $O$ ,  $N$ ,  $S$  и инертные газы –  $He$ ,  $Ne$ ,  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ . Все другие вещества называются тугоплавкими (*refractories*). Это могут быть магниевые

силикаты и железо, тугоплавкие органические соединения (полициклические, полиароматические и др. высокомолекулярные соединения, смеси многих органических молекул). Ледяные «шубы» на мелких (не более 0,1 мк) ядрах-пылинках намерзают еще в плотных молекулярных облаках и могут увеличиваться в холодных областях протопланетного облака. Соответственно тела, образовавшиеся при их слипании, также имели каменно-ледяной состав. Возможно, сгустки пылинок на данной стадии слипания выглядели, как показано на рисунке.

По этой причине американский астроном Фред Уиппл называл кометы

*Модель агломерата из слипшихся силикатно-ледяных частиц кометы. Рисунок из книги U. Meierhenrich «Comets and their Origin» (Wiley, 2015).*

вещества исчезающе мала и соответствует концентрации частиц в межзвездном газе (от  $10^4$  до  $10^6$  частиц газа/м<sup>3</sup>). Следовательно, кометы, составляющие облако Оорта, образовались где-то в более внутренних областях протопланетного облака и затем были выброшены на его периферию. Согласно распространенным представлениям, кометы массово образовывались в самом начале формирования Солнечной системы в транснептуновой области. Там было достаточно холодно, и в то же время вещества было достаточно для образования небольших тел, но столкновения этих тел были редки и не приводили к интенсивному образованию очень крупных тел, сравнимыми по массе с планетами-гигантами.

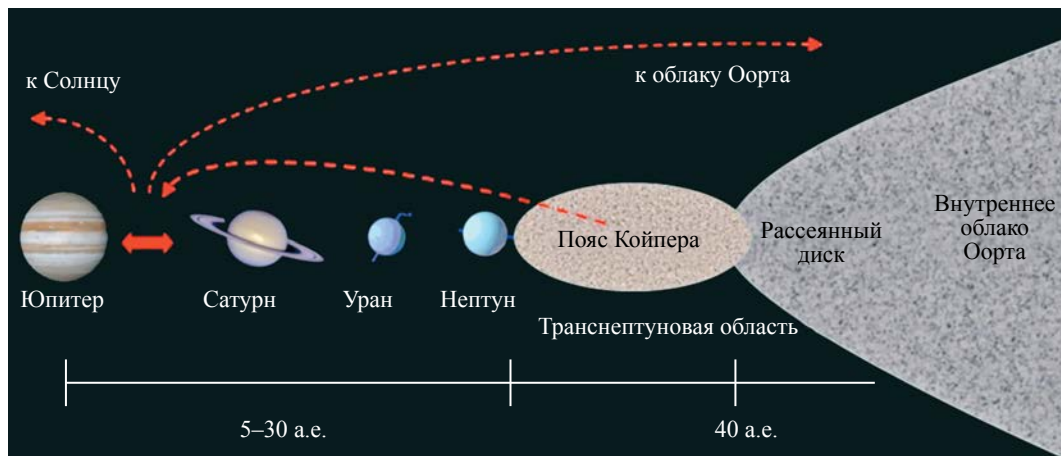
Согласно теории В.С. Сафронова, в областях близ центральной плоскости пылегазового протопланетного диска вследствие гравитационной неустойчивости образовывались крупные сгустки, из которых формировались более крупные тела размером



в несколько десятков километров, которые удерживались как целое не только за счет сил межмолекулярного сцепления, но и за счет гравитации; такие тела и называют «планетезималиями». Последующая эволюция населения планетезималей и кометезималей, а также остатков газа и пыли, в большой степени определялась конкурентным процессом аккреции (поглощения) более мелких тел более крупными из-за гравитационного взаимодействия. Первые крупные планеты образовались в результате аккреции газа околосолнечного диска на каменно-ледяные ядра массой в несколько масс

Земли. Эти первые массивные планеты сильно изменили динамическую структуру протопланетного облака: появились кольцевые зоны пониженной плотности в диске. В последние годы такие кольцевые зоны массово и в деталях наблюдаются в протопланетных дисках вокруг других звезд – например, с помощью интерферометра ALMA. Считается, что пустоты «контролируются» первыми достаточно массивными планетами. Массивные планеты (особенно те, что находились во внутренней, наиболее населенной части ранней Солнечной системы) эффективно «расчищали» такие зоны, поглощая или «выбра-





сывая» кометезимали и планетезимали за пределы протопланетного диска.

В целом картина динамической эволюции ранней Солнечной системы была весьма сложной. Согласно одному из популярных представлений, кометы из транснептуновой области, попадая вследствие динамической эволюции в зону планет-гигантов, испытывали столь мощные динамические возмущения, что часть из них была выброшена на очень далекую периферию Солнечной системы (или даже за ее пределы); часть выпала на Солнце или перешла в семейство комет, ассоциированные с планетами-гигантами. Самое известное из них – семейство Юпитера. Планеты-гиганты выбрасывали кометы в дальний космос, меняя исходные наклоны орбит достаточно хаотическим образом, поэтому облако

Оорта имеет форму, близкую к сферической.

В эти, классические, представления в последние 10–15 лет была внесена значительная поправка. Недавно (начиная с 2006 г.) начались открытия комет Главного пояса астероидов. Существует довольно много короткопериодических комет, которые в афелии проходят через пояс астероидов, но всех их от нового класса таких объектов отличают большие эксцентриситеты и наклоны орбит. Кометы Главного пояса астероидов вращаются вокруг Солнца по слабо эллиптическим орбитам и при прохождении вблизи перигелия проявляют кометную активность – у них появляется газопылевой хвост. Кометная активность длится от одного до нескольких месяцев, а оборот вокруг Солнца такие кометы совершают за ~5–6 лет. На данный

*Схемы миграции комет на ранних стадиях эволюции Солнечной системы. Рисунок автора статьи, выполненный по макету В.А. Дорофеевой.*

момент обнаружено пять комет данного класса, три из которых движутся по орбитам во внешней части пояса астероидов. В класс комет Главного пояса астероидов относят кометы: 133P/Эльста–Писарро, 176P/LINEAR, 238P/Read, P/2008 R1 (Garradd), P/2010 R2 (La Sagra). Некоторые исследователи считают, что эти кометы являются, по сути, ледяными астероидами; лед в них находится глубоко под поверхностными каменистыми слоями астероида, теплопроводность которых очень мала и нагрев излучением Солнца не может привести к быстрому испарению льда. Однако при их столкновении

с другим астероидом (что вполне возможно) внутренне, богатые льдами слои, обнажаются и они, активно испаряясь под действием солнечного излучения, обеспечивают проявления кометной активности, которую мы можем наблюдать. Кометы (ледяные астероиды) Главного пояса – тема очень интересная, но она выходит за рамки данной публикации. Мы же рассмотрим другой вопрос – о том, как формировались и изменялись в процессе эволюции протопланетного облака химические характеристики комет и могут ли данные о химическом составе комет пролить свет на вопросы: где образовались кометы и какова была их динамическая эволюция.

#### О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЮТ ХИМИЧЕСКИЕ ПОРТРЕТЫ КОМЕТ

Известно, что вода является основным компонентом кометных льдов. Естественно, что пары воды должны быть и в комах комет. Однако идентификация воды в кометных комах не является тривиальной. Прямые наблюдения воды в инфракрасном спектральном диапазоне встречаются редко, поэтому используют косвенные наблюдения: прежде всего, радикала OH – продукта фотолиза воды. Излучение

молекул OH можно зарегистрировать в радио- или ультрафиолетовом спектрах.

Если в дальнем космосе, в межзвездном пространстве, «главной молекулой» считается молекулярный водород  $H_2$ , то в Солнечной системе главная молекула –  $H_2O$ , «потому что без воды...». Шутка шуткой, но утверждение о том, что кометы – один из «поставщиков» воды на нашу планету – очень популярная, интересная и важная тема. Однако в последние годы эта, казалась бы, доказанная точка зрения подверглась существенной критике. Эта тема, конечно, достойна отдельной статьи в уважаемом журнале «Земля и Вселенная». Здесь мы остановимся на других составляющих комет.

Как уже упоминалось, химический состав комет весьма разнообразен и включает органические и неорганические вещества: железо- и магниевые силикаты, сложные органические соединения. С помощью наземных средств можно изучать химический состав лишь ком комет. Напомним, что кома – это огромное, радиусом до 1,5 млн км, шарообразное газопылевое облако, окружающее относительно небольшое (несколько километров) ядро. Кома появляется и развивается, когда ядро кометы

приближается к Солнцу и начинается бурный процесс испарения льдов и истечения газа, образующегося в результате испарения; причем газ несет с собой много пыли. На фотографии кометы C/2012 S1 (ISON), полученной 15 ноября 2013 г. британским астрономом-любителем Д. Пичем, хорошо видна кома размером 5–6' и длинный хвост кометы (Земля и Вселенная, 2014, № 3).

В последние десятилетия в комах комет с помощью методов спектрального анализа в широком диапазоне длин волн (от ультрафиолетового до микроволнового) обнаружено около трех десятков молекул (HCN,  $CH_3OH$ , CO,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $H_2S$ ,  $H_2CO$ ,  $CH_3CN$ , CS). Конечно, с запуском космических аппаратов, способных приблизиться к кометам и даже сесть на поверхность ядра кометы, мощным средством изучения состава комет стала масс-спектроскопия. Общий вывод в результате всех этих исследований состоит в том, что состав комы очень разнообразен по составу и содержанию отдельных компонентов. Относительное содержание молекул вещества (по отношению к молекулам воды) может меняться от кометы к комете на порядок (и даже в одной комете, в зависимости от фазы наблюдения).



Химия комет интересна и важна как сама по себе, так и для анализа космогонических аспектов. Кометное вещество в облаке Оорта, находясь практически все время существования Солнечной системы на далекой периферии, не подвергалось интенсивному воздействию (нагреву, бомбардировке частицами мощного солнечного ветра, облучению жесткими квантами) и поэтому его физические и химические свойства менялись очень мало. При низких температурах и интенсивности солнечного облучения в этих зонах химические реакции на поверхности льдов протекали весьма медленно; они практически совсем «замирали»

в недрах комет. Считается, что, изучая кометы на фазе истечения (испарения) из глубин кометных ядер вещества, мы можем получить данные о свойствах самой ранней Солнечной системы: в первую очередь, о химическом составе протопланетного облака. Возможно, даже поверхностные истечения из долгопериодических комет несут эту информацию. А вот химический состав поверхностных слоев комет, побывавших в окрестностях Солнца, уже существенно изменился и свидетельствует о бурной химической и динамической истории этих комет.

Итак, только глубинные истечения могут сохранять информацию

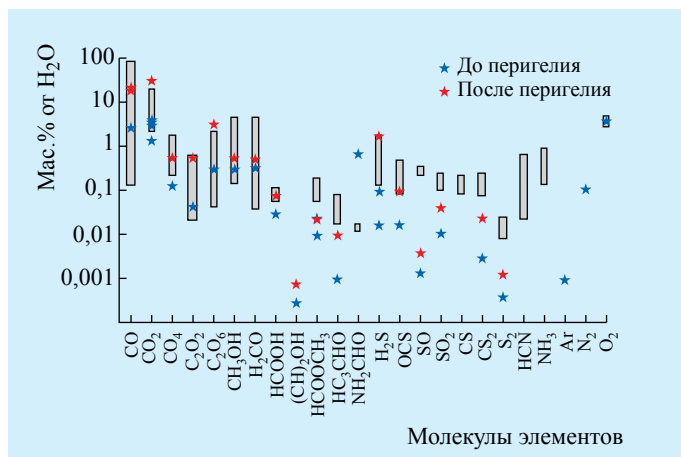
*Комета C/2012 S1 (ISON). Ее хвост растянулся на сотни тысяч километров. Снимок сделан 15 ноября 2013 г. британским астрономом-любителем Д. Пичем.*

---

о свойствах кометы в период ее образования. Главная проблема здесь состоит в трудности определения соответствия наблюдаемого состава комы, в которой даже на больших расстояниях от Солнца протекают химические реакции в кометных ядрах и составе ядра. Практически каждая наблюдаемая комета имеет индивидуальный химический состав; кроме того, кометные комы показывают различный состав – в зависимости



Относительное содержание (по массе) различных молекул к молекулам воды в коме кометы 67P Чурюмова–Герасименко до и после перигелия. Видно, что после перигелия увеличивается относительное содержание практически всех молекул. Построено В.А. Дорофеевой, по данным AMC «Розетта» (ESA).



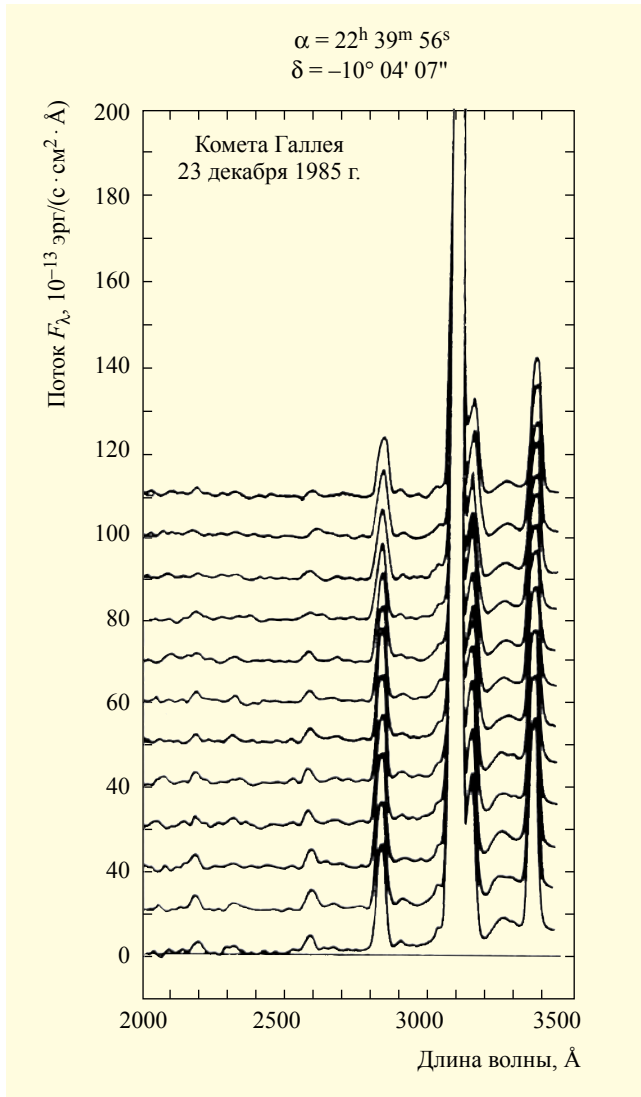
от близости к Солнцу. На графике (предоставлен В.А. Дорофеевой) показано относительное содержание молекул в коме кометы 67P Чурюмова–Герасименко до и после перигелия. Видно, что после перигелия содержание молекул (по массе) по отношению к молекулам воды на порядок выше, чем до перигелия.

Отсутствие какой-либо четкой корреляции между составом ледяной фракции комет и их динамическим происхождением (из пояса Койпера или облака Оорта) согласуется с гипотезой общего происхождения этих двух популяций. С другой стороны, разнообразие составов может отражать особенности химической структуры ранней протопланетной туманности. Как показывают модели физико-химической эволюции газопылевых протопланетных дисков (размеры которых

в тысячу раз меньше размеров облака Оорта), в этих объектах структурные изменения, определяемые изменениями физических параметров, и химическая эволюция протекали довольно сложным образом, при этом химический состав протопланетного диска зависел от расстояния от центральной звезды. Можно предположить, что ядра комет, выброшенных из ранней Солнечной системы, сохранили информацию о химической структуре той зоны, из которой они были выброшены.

Автор и группа исследователей из ИНАСАН и ГЕОХИ РАН решили подключиться к погоне за космогонической истиной с помощью методов изучения химических и динамических свойств комет в нашей Солнечной системе. Подчеркиваем – “в нашей” – потому что недавно кометы обнаружены (правильнее

сказать – имеются свидетельства существования комет) и в других планетных системах. Их называют “экзокометами”, в научной литературе описаны уже многие сотни случаев обнаружения таких свидетельств в окрестностях одиннадцати звезд. Отметим, что элементы предложенного подхода не новы, но в сочетании (в комплексности) подхода видятся новые перспективы: будут использованы как наблюдательные методы (о перспективном методе, относящемся к внеатмосферной астрономии см. ниже), так и модели динамических и химических процессов. Наблюдения – это всегда первично и важно; моделирование же – необходимый этап для понимания природы объектов и процессов. Фактически моделирование обеспечивает результат процесса познания, основанного как на получении



*Серия УФ-спектров кометы Галлея, полученных 23 декабря 1985 г. с помощью российской космической обсерватории «Астрон».*

ния физических процессов в них могут быть решены только с использованием наблюдательных данных в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра. Вследствие непрозрачности земной атмосферы такие исследования могут проводиться с Земли (в ограниченной области близ порога прозрачности атмосферы – примерно 300 нм) и в гораздо более широком диапазоне (300–30 нм) с помощью космических аппаратов, используя методы внеатмосферной астрономии. Наблюдения в УФ-диапазоне необходимы, так как именно в этом диапазоне находится большинство важных резонансных линий атомов (O I, C I, N I и т.д.), молекул (CO, CO<sub>2</sub>, OH и др.) и их ионов. Конечно, для решения ряда задач УФ-данные должны быть дополнены наземными наблюдениями.

Космические аппараты позволили сделать несколько важных открытий: в 1970 г. на космической обсерватории «ОАО-2» (США; 1968–1975) по излучению в эмиссионной линии Лайман-альфа на

новых данных, так и на анализе всего накопленного их объема. Например, весьма важно представлять (точно моделировать) детали фотохимических процессов, вызываемых излучением Солнца. Фотохимические процессы являются основным источником ионов и электронов, которые далее инициируют

ключевые газофазные реакции, приводящие к образованию множества молекул и атомов и их превращениям, наблюдаемым в кометах.

#### НАБЛЮДЕНИЯ КОМЕТ В УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

Многие вопросы определения химического состава комет и исследова-

длине волны 121,6 нм были обнаружены гигантские облака водорода (водородные короны), окружающие кометы Таго–Сато–Косака 1969g (C/1969 T1) и Беннета (C/1969 Y1). В 1985 г. на советской космической обсерватории «Астрон» (1983–1989; Земля и Вселенная, 1983, № 4, с. 2–3) была обнаружена вода в комете Галлея – точнее, гидроксил (ОН), появляющийся при фотохимическом распаде молекул воды (Земля и Вселенная, 1987, № 2). На рисунке показана серия спектров комы кометы Галлея, полученная с помощью космической обсерватории «Астрон»; в спектре доминирует сильнейшая полоса гидроксила ( $\lambda = 309$  нм).

В 1983 г. с помощью космической обсерватории «IUE» (1978–1995) по характерным эмиссионным линиям ( $\lambda = 283–305$  нм) впервые обнаружена двухатомная сера ( $S_2$ ) в коме кометы IRAS-Araki-Alcock 1983d. Очень интересные наблюдения кометы 67P Чурюмова–Герасименко были сделаны недавно с помощью спектрографа ALICE (слово ALICE – не акроним; это имя нравилось разработчику крохотного, по сравнению с другими, инструмента,

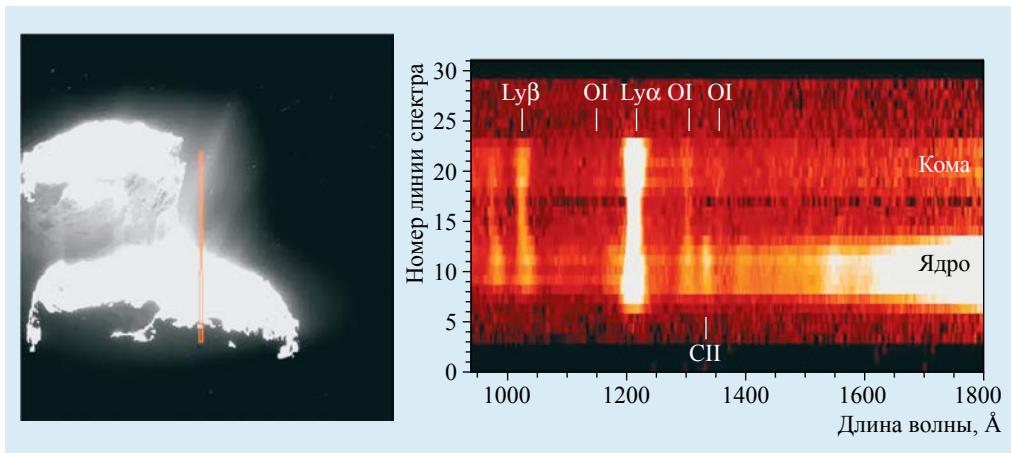
масса – 3 кг, энергопотребление – 4 Вт; [www.spaceflightinsider.com](http://www.spaceflightinsider.com)). Миниатюрный спектрограф с длинной (спектроскописты говорят – «высокой») щелью и возможностью построения изображений (imaging spectrograph) был предназначен для получения спектров в диапазоне длин волн 70–205 нм со спектральным разрешением 0,4–0,8 нм для точечных источников и 0,8–1,2 нм для протяженных источников. Угловое разрешение спектрографа –  $0,05^\circ \times 0,6^\circ$  при поле зрения – до  $0,1^\circ \times 4^\circ$ .

По мнению экспертов NASA, ALICE – ключевой инструмент, предназначенный для анализа тепловой истории кометы. Если знать тепловую

историю, то она может рассказать о том, где образовалась и где путешествовала комета. Например, если мы знаем, что комета никогда не нагревалась выше определенной температуры, то можем заключить, что она никогда не приближалась к Солнцу. Это можно узнать по тепловым маркерам – благородным газам (He, Ne, Ar, Kr), так как известны точные температуры испарения замороженных газов. Например, если бы ALICE обнаружила Ne – это означало бы, что комета не нагревалась до температур, превышающих 16 К. Если неон обнаруживается в наблюдениях – значит, комета должна была образоваться в области пространства холоднее 16 К. Пока таких



*Сборка спектрографа ALICE. Фото ESA.*



данных, к сожалению, нет, но получено много других результатов: это обнаружение молекулярного кислорода при удивительно высоком его содержании в коме; отсутствие сильных признаков водяного льда на поверхности кометы во время приближения к перигелию; многочисленные результаты мониторинга кометных вспышек; большая база данных, касающихся эволюции содержания атомов и молекул, по мере приближения кометы к Солнцу. Все эти выводы сделаны на основе анализа спектров 67P Чурюмова–Герасименко, полученных с помощью спектрографа ALICE. Пример спектров представлен на рисунке. Хорошо видно, что спектры ядра и комы сильно различаются, что объясняется различием условий на поверхности ядра кометы и в ее коме.

Кометы, конечно же, были и являются «излюбленной» целью Космического телескопа им. Хаббла. С момента запуска в 1990 г. эта обсерватория обладает уникальными возможностями для дистанционного наблюдения комет. Использовались как камеры, так и различные спектрографы, последний из которых – COS – работает до сих пор. С помощью COS в дальнем ультрафиолете наблюдались четыре кометы: 103P/Hartley 2, C/2009 P1 (Garradd), C/2012 S1 (ISON) и C/2014 Q2 (Lovejoy). Спектрограф COS отличается высокой чувствительностью, хотя и не имеет пространственного разрешения (нет канала длинной щели); главная цель была – определить относительное содержание CO по системе полос в спектральном диапазоне от 140 до 170 нм. С помощью другого

Пример спектральных измерений кометы 67P Чурюмова–Герасименко. Слева – ядро кометы (показано расположение щели спектрографа). Снимок получен в сентябре 2014 г. с помощью камеры OSIRIS AMC «Розетта». Фото ESA. Справа – примеры УФ-спектров ядра и комы кометы, полученных с помощью спектрографа ALICE AMC «Розетта» (из работы Feldman и др. 2015).

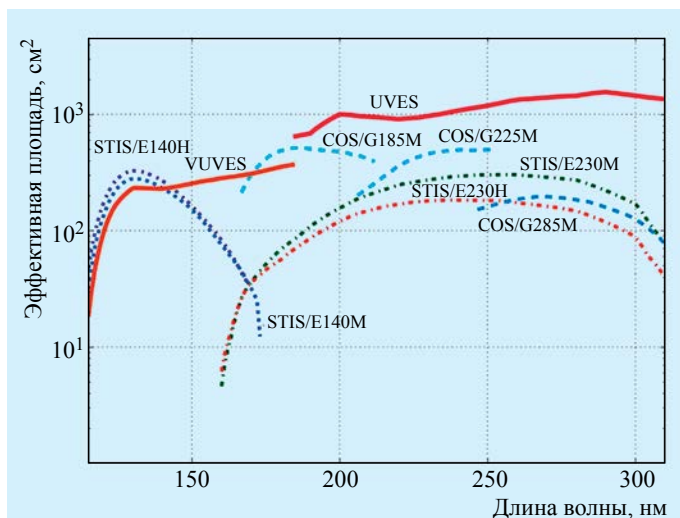
спектрографа – STIS – из наблюдений полосы OH на 308,5 нм была определена скорость производства воды. Интересно, что полученное отношение скорости производства CO/H<sub>2</sub>O варьировалось от ~ 0,3% (для кометы 103P/Hartley 2) до ~ 20% (для кометы C/2009 P1 Garradd).

В амбициозном российском (с участием Испании) проекте «Спектр-УФ» – крупной космической обсерватории УФ-диапазона – исследованию

График сравнительной эффективности будущих спектрографов VUVES и UVES проекта «Спектр-УФ» и спектрографов STIS и COS Космической обсерватории им. Хаббла. Составлен автором статьи.

комет будет уделено особое внимание (Земля и Вселенная, 2009, № 6). В реализации проекта заинтересованы и зарубежные ученые и, что очень важно, сотни и тысячи астрономов и физиков нашей страны. Проект включен в Федеральную космическую программу России на период 2016–2025 гг.

В состав комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ» входят: телескоп Т-170М (апертура 170 см), спектрографы высокого (разрешающая сила  $R = 55\,000$ ) и низкого ( $R = 1000$ ) разрешения, блок камер поля. Инструменты предназначены для работы в дальнем и ближнем ультрафиолетовых участках спектра. Для наблюдения комет будут использоваться все каналы (спектрографы) и камеры поля.



Спектрограф низкого разрешения с длинной щелью позволит работать в режиме построения изображений, а спектрографы высокого разрешения должны превзойти COS. Сравнение эффективности будущих спектрографов проекта «Спектр-УФ» и Космического телескопа им. Хаббла можно выразить в эффективной площади инструментов: чем она больше, тем инструмент эффективнее.

В качестве общего вывода отметим, что кометная химия и динамика – интереснейшее научное

направление, имеющее отношение и к Земле, и к Вселенной; в мире ему уделяется очень большое внимание. Надеемся, что у него хорошие перспективы развития и в нашей стране.

Автор выражает благодарность доктору физико-математических наук В.А. Дорофеевой (ГЕОХИ РАН) за предоставленную основу двух рисунков, а также за полезное обсуждение.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 17-12-01441).