*АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2020, том 54, № 2, с. 110–134*

*УДК 523.64*

# ХИМИЧЕСКИЙ И ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ КОМЕТЫ 67P/ЧУРЮМОВА–ГЕРАСИМЕНКО (ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОЙ МИССИИ ROSETTA–PHILAE). СЛЕДСТВИЯ ДЛЯ КОСМОГОНИИ И КОСМОХИМИИ

**© 2020 г. В. А. Дорофеева***

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия*

**e-mail: dorofeeva@geokhi.ru*

Поступила в редакцию 18.09.2019 г.
После доработки 28.10.2019 г.
Принята к публикации 31.10.2019 г.

Результаты изучения состава и строения короткопериодической кометы семейства Юпитера 67P/Чурюмова–Герасименко, полученные в ходе недавней космической миссии Rosetta-Philae, во многом уникальны, поскольку впервые комета продолжительное время исследовалась *in situ* в условиях меняющейся инсоляции и активности. В результате посадки зонда Philae впервые получены данные о составе минеральной и органической фракций, образцы которых были взяты непосредственно с ядра кометы. Измерения состава комы приборами КА Rosetta в ранний период наблюдений позволили впервые получить данные о составе ее сверхлетучих компонентов ($N_2$, Ar), а анализ состава комы, выполненный в постперигельный период, дал наиболее адекватное представление о составе ледяной фракции ядра кометы. В обзоре, наряду с обобщением экспериментальных данных, обсуждаются вытекающие из них следствия для космогонии и космохимии.

**Ключевые слова:** комета, химический и изотопный состав, органические соединения, кометные льды, гетерогенность состава ядра, северное и южное полушария, Rosetta, Philae

**DOI:** 10.31857/S0320930X20020024

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка теории происхождения Солнечной системы, оценка состава газопылевого вещества, из которого около 4.6 млрд лет назад она образовалась, по сей день остаются актуальными задачами космогонии и космохимии. Их решению способствуют накопление и анализ экспериментальных данных по строению и составу кометных ядер, которые, вероятнее всего, являются первичными телами Солнечной системы (например, Davidsson и др., 2016). Ядра комет образовались в первые миллионы лет ее эволюции врегионе, где температуры не превышали 20–25 K. В силу своего небольшого размера (не более нескольких десятков км) (Lamy и др., 2005), даже с учетом очень низкой теплопроводности из-за большой пористости ядра, не могли быть существенно нагреты радиогенным теплом короткоживущих изотопов ($^{26}$Al и $^{60}$Fe) и вследствие этого полностью потерять даже самые легколетучие элементы, такие как CO, $N_2$ и Ar. Кроме того, из-за очень высокой микропористости (до 70%) теплопроводность вещества кометных ядер крайне низка, поэтому даже при значительной инсоляции в период прохождения ими перигелия солнечное тепло распространяется только на первые метры вглубь, не изменяя состава ядер в целом (Rusol, Dorofeeva, 2018). Таким образом, кометы несут в себе ценную информацию о термодинамических и динамических условиях в дальних регионах околосолнечного газопылевого протопланетного диска.

Комета 67P/Чурюмова–Герасименко (далее 67P) принадлежит к семейству короткопериодических комет, орбиты которых эволюционируют во времени под воздействием как гравитационных, так и негравитационных факторов. Анализ показал, что на современной, наиболее близкой к Солнцу орбите комета 67P находится с 1959 г.: ее перигелий составляет 1.24 а. е., афелий 5.68 а. е., а период обращения 6.44 года (Maquet, 2015). Важной особенностью ядра 67P, которая обуславливает вариации состава ее комы, является то, что ось его собственного вращения наклонена к плоскости орбиты под большим углом (52°). Благодаря этому, а также эллиптической форме орбиты лето в северном полушарии длится 5.6 года, т.е. бóльшую часть ее орбитального периода, но в этот период комета находится вдалеке от Солнца и поэтому ее инсоляция не слишком интенсивна.

Южное полушарие освещается Солнцем лишь около 10 месяцев, но в этот период инсоляция поверхности кометы, как и интенсивность газовыделения, максимальна.

Космический аппарат (КА) приблизился к комете на расстояние ~100 км в августе 2014 г., когда она находилась на гелиоцентрическом расстоянии $r \approx 3.59$ а. е. и сопровождал ее 26 месяцев до 30 сентября 2016 г., когда после прохождения кометой перигелия в августе 2015 г. (1.24 а. е.) на $r \approx 3.5$ а. е. КА запланированно столкнулся с ее ядром. Помимо орбитального модуля в состав КА Rosetta входил также спускаемый зонд Philae, который 12 ноября 2014 г. впервые в истории совершил посадку на ядро кометы, когда она находилась на $r \approx$ $\approx 3$ а. е. Зонд был предназначен для исследования химического состава и физических свойств ядра, а также состава газов, окружающих его. Однако, поскольку посадка произошла в затененном месте, программа научных исследований была выполнена частично: аппаратура смогла проработать лишь 56 ч на предварительно заряженных аккумуляторных батареях. В целом результаты, полученные на КА Rosetta дали много уникальной информации, которая ранее не могла быть получена с помощью пролетных миссий. Их анализ, с одной стороны, позволяет продвинуться в понимании ряда космогонических и космохимических проблем, а с другой, ставит новые вопросы, ответы на которые могут быть получены только с помощью дальнейших космических экспериментов.

## ВАЖНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДРА КОМЕТЫ 67P

КА Rosetta был оснащен достаточным набором инструментов, позволивших определить основные физические характеристики ядра кометы 67P. Итоговые результаты обобщены в работах (Jorda и др., 2016) и (Pätzold и др., 2016; 2019). Полученные характеристики ядра 67P оказались аналогичными характеристикам ядер комет этого же динамического класса: оно имеет небольшой размер $(4.34 \pm 0.02) \times (2.60 \pm 0.02) \times (2.12 \pm 0.06)$ км и состоит из двух фрагментов, соединенных перешейком, что типично для многих короткопериодических комет. Бóльший из фрагментов, условно именуемый вслед за (Sierks и др., 2015) “телом”, имеет размер $4.1 \times 3.52 \times 1.63$ км, а меньший (“голова”) $2.50 \times 2.14 \times 1.64$ км. Основываясь главным образом на данных системы визуализации OSIRIS (OSIRIS – Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging System), в состав которой входили две камеры разного разрешения для детальной съемки ядра кометы, была построена его 3D модель, что позволило получить оценку объема, которая составила $18.8 \pm 0.3$ км$^3$. Измерения гравитационного поля кометы, проводившиеся в течение трех месяцев с расстояния 10–100 км, дали возможность получить массу ядра: $M = (9982 \pm 3) \times 10^9$ кг (Pätzold и др., 2016) и среднее значение плотности $532 \pm 7$ кг м$^{-3}$ (Jorda и др., 2016). Для расчета пористости были использованы данные работы (Rotundi и др., 2015), в которой определено среднее значение массового отношения пылевой и газовой фракций в коме, в период, когда комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии 3.6–3.4 а. е.; $M_{dust}/M_{ice}$ составило $4 \pm 2$. Авторы сделали предположение, что полученное значение отражает соотношение масс пыли и льда воды в ядре кометы. В результате было получено значение его пористости 70–75%. Отметим, что весь комплекс данных, полученных в эксперименте Rosetta свидетельствует, что столь высокое значение пористости ядра обусловлено, вероятнее всего, микропористостью составляющих его частиц (пеблов, от английского “pebbles”); в макромасштабе ядро кометы однородно и не содержит больших пустот.

Оценки основных физических свойств ядра 67P приведена также в работе (Pätzold и др., 2016), которые немного отличаются от оценок, данных в (Jorda и др., 2016). Авторами было выбрано несколько меньшее значение объема ядра 67P ($18.7 \pm 0.2$ км$^3$) и соответственно получено чуть большее значение плотности $(533 \pm 6)$ кг м$^{-3}$. При оценке пористости ядра 67P ими также использованы данные (Rotundi и др., 2015), но состав пылевой фракции рассмотрен более детально: использован вывод Greenberg (2000), что в кометной пыли массы силикатной и органической составляющих равны. В итоге была получена оценка пористости ядра 67P 72–74% (Pätzold и др., 2016), что не противоречит результатам, полученным в работе (Jorda и др., 2016).

Поверхность ядра кометы 67P темная, ее геометрическое альбедо ($A_{geo}$) составляет $0.065 \pm 0.002$% (Fornasier и др., 2015). Значение хорошо согласуется с результатами, полученными с помощью прибора VIRTIS и OSIRIS на длине волны 550 нм: $0.060 \pm 0.003$ (Capaccioni и др., 2015) и $0.059 \pm 0.002$ (Sierks и др., 2015) соответственно. Отметим, что это самое высокое значение альбедо, когда-либо полученное для кометных ядер. В то же время, впервые на поверхности ядра кометы наблюдались вариации цвета и альбедо: так область Hapi, расположенная на перешейке, на ~16% ярче, чем поверхность в среднем, в то время как регионы Apis и Seth (тело) на ~8–10% темнее; измерения проводились на длине волны 535 нм. Предполагается, что увеличение альбедо связано с локальным повышением содержания на поверхности льдов $H_2O$ и $CO_2$ (Fornasier и др., 2015).

Ядра комет состоят из каменной (минеральной) пыли, тугоплавких органических соединений (в сумме ~50–70 мас. %) и смеси льдов (~30–50 мас. %), в основном это лед $H_2O$. Когда комета

приближается к Солнцу на $r \leq 5$ а. е., т.е. пересекает орбиту Юпитера, наиболее летучие льды ($N_2$, Ar) начинают испаряться и вокруг ядра образуется кометная кома – газопылевая оболочка диаметром до нескольких десятков тысяч километров. Важной особенностью дегазации кометных ядер является то, что газовыделение происходит не со всей поверхности ядра, а лишь из нескольких депрессий (pits, holes), неравномерно распределенных по его поверхности, причем общая площадь депрессий составляет лишь ~10% от общей площади ядра (Vincent и др., 2015). Ранее подобные депрессии наблюдались на ядрах комет, которые исследовались с помощью пролетных космических аппаратов, – 1P/Halley, 19P/Borrelly, 81P/Wild, 9P/Tempel, 103P/Hartley (Meech, 2017). За период наблюдений в северном полушарии 67P было обнаружено около 20 депрессий, из которых только семь оказались активными, остальные либо умеренно активными, либо уже потухшими. Активные депрессии представляли собой округлые структуры диаметром от 50 до 300 м при соотношении ширины к высоте по одним данным от 0.1 до 0.9 (Vincent и др., 2015), а по другим 0.1–0.3 (Ip и др., 2016). Отметим, что именно этот интервал значений характерен для всех исследованных ранее кометных ядер. Депрессии имеют крутые склоны и плоское дно, что в корне отличает их от кратеров ударного происхождения, обнаруженных, например, на Луне или астероидах. На дне депрессий обнаружены валуны (до 15-ти штук) диаметром до 9-ти метров (Vincent и др., 2015). Происхождение этих структур до конца не ясно, но все авторы сходятся во мнении, что геометрия депрессий вероятнее всего указывает, что основная причина их возникновения – эндогенная активность. Расположение депрессий, размер, интенсивность и длительность дегазации определяется вероятнее всего неравномерностью инсоляции, геоморфологией поверхности и условиями ее изменения при очередном проходе через перигелий (Ip и др., 2016; Vincent и др., 2015). Немалую роль вероятно играет и локальная неоднородность состава ядра (Vincent и др., 2016a); более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже.

## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА КОМЕТЫ 67P В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ROSETTA-PHILAE

Космический проект Rosetta-Philae, осуществленный ESA в 2004–2014 гг., имел своей целью длительное систематическое изучение строения и состава ядра кометы 67P/Чурюмова–Герасименко, исследования химического и изотопного состава вещества ее комы. В числе приоритетных были заявлены следующие цели (Taylor и др., 2017).

Во-первых, определить состав кометного ядра, и, сравнив его с составом ядер других комет, получить представление о составе каменно-ледяных планетезималей, из которых, вероятнее всего, образовались другие транснептуновые объекты, в том числе Плутон и его спутники, Тритон – крупнейший спутник Нептуна, нерегулярные спутники Сатурна и другие объекты. Помимо этого, знание состава кометных ядер необходимо для оценки физико-химических и динамических условий, как во внешней части газопылевого околосолнечного диска, так и в диске в целом.

Во-вторых, найти аргументы “за” или “против” гипотезы кометного происхождения воды и иных летучих на Земле и на других внутренних планетах. Эта гипотеза еще два десятилетия назад была преобладающей (Owen, Bar-Nun, 1998), но и сейчас у нее остается много сторонников (Marty и др., 2016; 2017; Маров, Ипатов, 2018).

И, наконец, главная задача миссии заключалась в том, чтобы оценить возможную роль вещества комет в происхождении жизни на Земле и других телах Солнечной системы. В частности, ответить на вопрос, могли ли кометы принести на нашу планету жизненно важные биологические соединения, или вещества-предшественники (прекурсоры) для их образования в условиях ранней Земли. Эта идея впервые была высказана Oró (1961) и в дальнейшем развита в работах (Chyba, Sagan, 1997; Delsemme, 2000 и др.).

Выполнение этих задач подразумевало тщательный анализ состава пылевой и газовой фракций кометы 67P, для чего на борту было размещено несколько приборов, среди которых: ALICE – УФ-спектрометр для анализа газового состава комы; MIRO – микроволновой зонд для измерения газовых компонентов комы; ROSINA – спектрометр ионов и нейтральных атомов для определения элементного, изотопного и молекулярного состава комы; COSIMA (COmetary Secondary Ion Mass Analyzer) – масс-спектрометр вторичных ионов для определения элементного и изотопного состава пыли, а также неорганической и органической фаз в ней; VIRTIS (Visible InfraRed Thermal Imaging Spectrometer) — тепловой спектрометр видимого и ИК-диапазона, используемый для изучения свойств грунта, а также анализатор кометной пыли GIADA (GrainImpact Analyserand Dust Accumulator). В состав посадочного зонда “Philae” входили инструмент COSAC (COmetarySamplingAndCompositionexperiment) – анализатор определения элементного и молекулярного состава летучих веществ ядра и органических молекул; Ptolemy – газовый хроматограф для определения изотопного состава легких элементов, а также APXS – альфа-протон-рентгеновский спектрометр для определения элементного состава грунта.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОЙ ФРАКЦИИ КОМЕТЫ 67P

Изучение генезиса компонентов вещества кометных ядер, в том числе ее пылевой (тугоплавкой) фракции, позволяет получить важнейшую информацию об источниках вещества каменно-ледяных тел транснептунового региона и динамических условий в околосолнечном газопылевом диске. Долгое время в космохимии господствовало представление, что минеральное вещество, входящее в состав пылевой фракции кометных ядер – наиболее примитивное в Солнечной системе, образовавшееся в межзвездной среде. Попав в околосолнечный диск и находясь на значительном (>15–20 а. е.) удалении от Солнца, оно не могло претерпеть существенных изменений. Такая точка зрения была обусловлена еще и тем, что на первом этапе изучения вещества комет состав их пылевой фракции определялся наземным путем при исследовании спектров частиц метеорных потоков, связанных с кометами. Метод имел большие погрешности, обусловленные в основном влиянием земной атмосферы (Явнель, 1988). Однако за последние десятилетия, по мере накопления данных экспериментальных исследований состава пыли ряда комет (эксперименты Giotto, Vega, Stardust, NExT, EPOXI, Rosetta), а также объектов, происхождение которых связывается с разрушением кометных ядер – субмикронных безводных пористых частиц межпланетной пыли (IDPs и CP IDPs) (Лаврухина, Мендыбаев, 1987; Corrigan и др., 1997) и ультра-углеродистых антарктических микрометеоритов (UCAMM), эта точка зрения существенно изменилась. Результаты исследований показали, что тугоплавкое вещество комет представляет собой неравновесную в субмикронных масштабах смесь высоко- и низкотемпературных компонентов различного генезиса (Wooden и др., 2017). Ее основными составляющими являются аморфные и кристаллические силикаты, сульфид железа, металл (Fe–Ni) и тугоплавкое органическое вещество широкого спектра состава.

Впервые изучить состав тугоплавкой фракции кометы *in situ* удалось в 1986 г., когда к комете Галлея (1P/Halley) одновременно было направлено пять космических аппаратов, но основные результаты были получены советскими аппаратами Vega-1 и -2 (Sagdeev и др., 1987 и др.), а также аппаратом ESA Giotto (Jessberger и др., 1988 и др.). Было установлено, что валовый состав минеральной составляющей пыли кометы Галлея близок к хондритовому, но содержание некоторых летучих компонентов в несколько раз превосходило их содержание в наиболее примитивных углистых CI хондритах: углерода в 11 раз, азота в 8 раз, водорода в 4 раза (Engrand и др., 2016). Из этого был сделан вывод, что кометное вещество более примитивно, чем вещество углистых CI хондритов и что оно могло подвергаться лишь минимальным изменениям (Jessberger и др. 1988). Кроме минеральной составляющей, в составе пыли присутствовало высокомолекулярное тугоплавкое органическое вещество, состоящее из углерода (C), водорода (H), кислорода (O) и азота (N), получившее название CHON (Clark и др., 1986). Для кометы 1P/Halley его состав описывался условной формулой $C_{100}H_{80}O_{18}N_3S_3$ (Kissel, Krueger, 1987). Соотношение в ней O/C ≈ 0.2, что близко к таковому в нерастворимом органическом веществе (IOM-Insoluble organic matter) метеорита Murchison, хотя элементный состав органической фракции хондрита дается несколько отличный: $C_{100}H_{70}O_{18}N_3S_3$ (Alexander и др., 2007) и $C_{100}H_{155}O_{20}N_3S_3$ (Quirico, 2014).

Силикатная фракция кометной пыли представлена как аморфными Fe–Mg силикатами, пироксеном и оливином (Dorschner и др., 1995), так и кристаллическими, преимущественно обогащенными магнием оливинами (Fabian, 2001). Массовое соотношение между кристаллическими и аморфными силикатами варьируется в широких пределах и составляет ~0.2–2. Кристаллические силикаты были обнаружены в комах комет разных динамических типов: как в короткопериодических – 103P/Hartley 2 (Harker и др., 2018), 81P/Wild 2, 9P/Tempel, 78P/Gehrels, 73P/Schwassmann-Wachmann, так и в долгопериодических, таких как C/2001Q4 (NEAT) и C/1995 O1 (Hale-Bopp). Размер кристаллических зерен силикатов составляет <~1 мкм, а массовая доля существенно выше по сравнению с содержанием кристаллических силикатов в межзвездных молекулярных облаках (ISM), где их содержание не превышает первых процентов (Kemper и др., 2004; 2005; Li, Draine, 2001). Поэтому более обоснованной выглядит версия образования кристаллических магниевых силикатов в околосолнечном газопылевом диске (солнечной небуле). Действительно, согласно моделям внутреннего строения диска (Макалкин, Дорофеева, 2009), на ранней стадии его эволюции (до ~ 1 млн лет) в областях близких к Солнцу ($r < 1$ а. е.) максимальные температуры были достаточно высоки ($T > 1500$ K при $P = 10^{-3}$–$10^{-4}$ бар), поэтому основная масса пыли диска была испарена. На последующей стадии остывания диска, как показали термодинамические расчеты, в системе солнечного состава, в которой парциальное давление водорода $\left(p_{H_2}\right)$ на 3 порядка выше, чем парциальное давление любого другого химически активного компонента, в том числе и $p_{O_2}$, образуются кристаллические магниевые силикаты, преимущественно в форме форстерита и иногда энстатита, а также металл (Fe–Ni), который в дальнейшем при понижении температуры, взаимодействуя с $H_2S_г$, частично преобразуется в сульфид железа (Petaev, Wood, 1998). Дополнительным до-

казательством небулярного происхождения кристаллических силикатов служат открытия экзосистем с дисками, в которых внутренние области обогащены кристаллическими силикатами по сравнению с их внешними зонами (Bouwman и др., 2003; Olofsson и др., 2009).

Попадание мелкокристаллических магниевых силикатов в зону образования каменно-ледяных тел, в том числе и ядер комет, как было показано в ряде работ (например, Bockelée-Morvan и др., 2002), могло происходить благодаря турбулентной диффузии, обеспечившей вынос газопылевого вещества из внутренней горячей зоны околосолнечного диска в холодные внешние области, за характерные времена ~ $n \times 10^4$ лет, т.е. еще до образования Юпитера. Реальность существования такого механизма подтверждается обнаружением в пылевой фракции ряда комет наиболее древнего вещества Солнечной системы – обогащенных алюминием и кальцием тугоплавких включений (CAIs); они были найдены в кометах 1P/Halley (Schulze и др., 1997) и 81P/Wild 2 (Matzel и др., 2010), а также в большом кластере межпланетной пыли (giant cluster IDP) U2-20GCP, имевший вероятнее всего кометное происхождение (Joswiak и др., 2014). Размеры CAIs колеблются от ~1 до 15 μm, что подтверждает возможность их переноса с малых радиальных расстояний в область образования комет вместе с газом на ранней стадии эволюции небулы (Hughes, Armitage, 2010).

Наряду с обогащенными магнием кристаллическими силикатами в минеральной фракции кометных ядер были найдены кристаллические силикаты с высоким содержанием железа, у которых значение Fe/(Fe + Mg) варьируется в пределах от 0.1 до хондритового значения ~0.5 (Zolensky и др., 2008). Вопрос об образовании этих фаз остается до сих пор открытым.

Аморфные Fe–Mg силикаты, впервые обнаруженные при наземных наблюдениях в ИК диапазоне долгопериодической кометы C/1995 O1 Hale-Bopp (Crovisier, 1997), вероятнее всего имеют досолнечное происхождение; они попали в околосолнечный диск вместе с веществом межзвездного молекулярного облака, фрагмент которого послужил строительным материалом для нашей Солнечной системы. Генезис вещества ISM связан с эволюцией звезд большой массы, в которых происходит нуклеосинтез основных породообразующих элементов. Конечный этап эволюции массивной звезды – взрыв сверхновой. При остывании в ее оболочке, имеющей высокие $p_{O_2}/p_{H_2}$, конденсируются кристаллические Fe–Mg силикаты микронного размера. При дальнейшем рассеивании звездной оболочки микронные пылинки кристаллических силикатов находятся в межзвездном пространстве. Со временем они могут войти в состав межзвездных молекулярных облаков (ISM), из фрагмента которых образуются звезды следующего поколения; у некоторых из них могут образоваться протопланетные диски. Однако наблюдения показывают, что межзвездные молекулярные облака содержат в основном аморфные Fe–Mg силикаты, а содержание кристаллических силикатов в ISM не превышает по одним данным 2.5% (Kemper и др., 2004; 2005), а по другим 5% (Li, Draine, 2001). Следует отметить, что важной составляющей аморфных силикатов является стекло $SiO_2$ с вкраплениями металла и сульфидов, идентифицируемое как GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides) (Bradley, 2013). Можно предположить, что аморфизация кристаллических Fe–Mg силикатов, как и образование GEMS происходит на стадии, когда кристаллические Fe–Mg силикаты находились в межзвездном пространстве, подвергаясь воздействию межгалактических космических лучей.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос о возможном присутствии в составе вещества кометной пыли минералов, образование которых требует присутствия жидкой воды; такие минералы были обнаружены при исследовании некоторых комет. Так, в пылевой фракции кометы 81P/Wild 2 были найдены ряд сульфидов – кубанит, пирротин, сфалерит (Berger и др., 2011), – а также магнетит (Stodolna и др., 2012) и карбонат магния (Flynn, 2008). Присутствие карбонатов магния ранее было зафиксировано в пылевой фракции кометы Галлея (Fomenkova и др., 1992) и 9P/Tempel 1 (4.7%). Кроме того, в 9P/Tempel были найдены гидратированные силикаты (8.2%) (Lisse и др., 2006), которые столь характерны для вещества примитивных углистых хондритов (Zolensky и др., 2008). О происхождении в пылевой фракции комет минералов гидротермального генезиса нет единого мнения, но сам факт их обнаружения принципиален для космогонии. Он может свидетельствовать, например, о том, что кометы не являются первичными телами, а образуются при импактном разрушении более крупных каменно-ледяных тел диаметром >~50 км, в которых в течение первых нескольких миллионов лет был возможен нагрев и плавления льда воды за счет радиогенного тепла $^{26}$Al и $^{60}$Fe (Макалкин, Зиглина, 2004); этой точки зрения придерживаются A. Morbidelli и его коллеги (Morbidelli, Rickman, 2015; Jutzi и др., 2017). Однако возможны и другие объяснения. Так в (Levasseur-Regourd и др., 2018) высказывается предположение, что идентификация гидросиликатов, возможно, была ошибочной, поскольку эталонные стандарты, использованные при расшифровке спектров кометы 9P/Tempel, могли не отражать все особенности исследуемых минеральных зерен кометной пыли. С другой стороны, минералы гидротермального генезиса могли быть привнесены вместе с газом в виде мелкой пыли из внутренних областей протопла-

нетного диска, а затем аккрецированы образующимися протокометными телами. Но следствием такого предположения будет то, что аккреция Юпитера началась достаточно поздно – после образования родительских тел недифференцированных хондритов и их постаккреционного нагрева и ударного разрушения, поскольку радиальный транспорт вещества из внутренних зон диска в транснептуновый регион после начала аккумуляции Юпитера был затруднен.

Таким образом, весь комплекс полученных до 2014 г. данных свидетельствует, что минеральная фракция комет – это совокупность частиц вещества, как досолнечного, так и небулярного происхождения, мало измененного вторичными процессами, химически неравновесного по составу в субмикрометровых масштабах. Основная проблема при изучении кометной пыли состояла в трудностях ее сбора, поскольку из-за большой разницы относительных скоростей кометы и приемника, установленного на пролетающем вблизи кометы космическом аппарате (~6 км $с^{-1}$): при ударе о мишень часть вещества, в особенности органических компонентов пыли термически разрушалась или испарялась. В отличие от прошлых космических экспериментов KA Rosetta мог сближать свою скорость со скоростью кометы до ~10 м $с^{-1}$ и потому значительное количество частиц, уловленных мишенью, в основном сохранили свой химический состав и физическую структуру (Rotundi и др., 2015). Всего удалось уловить более 35 тысяч пылевых частиц размером от 10 до 1000 мкм и проанализировать около 250 из них (Merouane и др., 2017). Исследования частиц проводились с помощью масс-спектрометра вторичных ионов COSIMA и картирующего спектрометра VIRTIS. Основные результаты представлены в (Fray и др., 2016; Wooden и др., 2017; Bardyn и др., 2017) и в некоторых других работах. К сожалению, поскольку изучение минеральной фракции кометной пыли в эксперименте Rosetta-Philae не было приоритетным направлением исследования, возможности приборов в этом отношении были ограничены. Так диаметр электронного пучка в COSIMA (40 мкм) сопоставим с размером крупнейших частиц, доставленных на Землю в эксперименте Stardust. Реально спектрометр мог анализировать частицы пыли в интервале размеров от 50 до 1000 мкм (Bardyn и др., 2017) и с его помощью было практически невозможно идентифицировать отдельные минералы в каждой анализируемой частице. Возможно по этой причине в конечном итоге все железо было отнесено к сульфидным фазам, а силикаты с высоким содержанием Fe вообще не были определены (Rotundi и др., 2015; Hilchenbach и др., 2016). Однако доказательство миграции газопылевого вещества из внутренних зон диска в регион образования кометы все же было найдено: в составе минеральной фракции 67P обнаружено одно зерно, по составу подобное обогащенным Ca и Al тугоплавким включениям (CAI) (Paquette и др., 2016; Joswiak и др., 2017).

Полученные результаты показали, что тугоплавкая фракция ядра кометы 67P состоит из минеральной пыли и сложных тугоплавких органических соединений. Минеральная составляющая представляет собой неравновесную смесь безводных силикатов, сульфида железа типа троилита и пирротина (FeS), солей аммонияи аморфного углерода. Особо отметим, что минералов, образование которых требует присутствия жидкой воды, в составе пыли кометы 67P обнаружено не было (Stenzel и др., 2017). В целом минеральный состав кометы 67P отвечает составу межзвездной пыли, а соотношения основных породообразующих элементов (Fe, Mg, Si, Al, Na, K, Ca, а также Cr и Mn) близко к хондритовому, как и в ранее исследованных кометах Halley и Wild 2. Исключением является углерод, о чем свидетельствуют, в частности, результаты измерения составов с помощью масс-спектрометра COSIMA пылевых частиц комы размером от 50 до 1000 мкм, собранных за двухлетний период, в которых атомное отношение $(C/Si)_{dust} = 5.5^{+1.4}_{-1.2}$ (Bardyn и др., 2017), что в 7 раз превышает хондритовое ($0.76 \pm 0.10$), но меньше протосолнечного значения $(C/Si)_{solar} = 7.19 \pm 0.83$ (Lodders, 2010). Согласно данным, полученные с помощью анализатора пыли GIADA содержание тугоплавких углеводородов в пылевой фракции кометы 67P составляет ($38 \pm 8$) мас. %, а содержание минеральной фракции ($62 \pm 8$)% (Fulle и др., 2018). Эти данные близки значениям, полученным для кометы Halley: $(C/Si)_{dust} = 4.4 \pm 1.3$ и массовая доля CHON ≈ 36 мас. % (Jessberger и др., 1988). Дополнительные источники информации – межпланетная пыль и арктические микрометеориты – дают более широкий диапазон значений массовой доли CHON: от $26 \pm 6$ до $58 \pm 14$ мас. % (Wooden и др., 2018).

Помимо CHON, в состав тугоплавкой фракции комет входит значимое количество аморфного углерода. Для 67P было получено значение объемного соотношения аморфного углерода и оливина ~66% (Bockelée-Morvan и др., 2017).

Высказано предположение, что аморфный углерод является продуктом термического разложения алифатических углеводородов при ударе о мишень. В ряде других работ предполагается, что аморфный углерод имеет межзвездное происхождение, поскольку он не может образовываться в околозвездных дисках, в которых неизбежно будет окислен $H_2O_{газ}$ до CO, или $CO_2$ (подробнее в Wooden и др., 2017).

Таким образом, исследование минеральной фракции кометной пыли позволяет сделать важные космогонические выводы, поэтому оно должно

быть одной из приоритетных тем дальнейших космических экспериментов. В особенности это касается массовой доли углерода, поскольку она, как будет показано далее, в конечном итоге, определяет такой важнейший параметр ранней Солнечной системы, как содержание воды в небуле в целом, и в ее дальних регионах в частности.

## ТУГОПЛАВКОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В СОСТАВЕ ПЫЛИ КОМЕТЫ 67P

Тугоплавкое органическое вещество ранее, как уже отмечалось, было найдено в составе кометной пыли ряда комет – 1P/Halley, 81P/Wild 2, 9P/Tempel 1, 26P/Grigg-Skjellerup, в примитивных метеоритах, а также в частицах межпланетной пыли и высокоуглеродистых арктических микрометеоритах. Оно представляет собой смесь макромолекулярных полимеров ароматической и алифатической структур, состоящих в основном из C, H, O и N, при этом состав CHON непостоянен даже в пределах одного объекта (Clark, 2018). CHON термически устойчив вплоть до $T \sim 500$ K (Pollack, 1994). Его образование, предположительно, происходило в межзвездной среде, в холодных молекулярных облаках (Greenberg, 1998) в пользу чего свидетельствует их обогащение тяжелыми изотопами азота и водорода (Alexander, 2019). Помимо досолнечного происхождения в литературе рассматривается образование CHON в дальних регионах околосолнечного протопланетного диска (Ciesla, Sandford, 2012); вероятно были возможны оба сценария (Wooden, 2008).

Сбор высокомолекулярных органических соединений кометной пыли для последующих исследований в еще большей степени, чем сбор минеральной пыли, осложнен их импактным нагревом и последующим разрушением вследствие большой разницы относительных скоростей комет и пролетных космических аппаратов (Brownlee, 2014). Поэтому столь ценными являются данные по составу тугоплавкого органического вещества пылевых частиц кометы 67P. CHON были обнаружены инструментом COSIMA в семи из более чем двухсот проанализированных пылинок (Fray и др., 2016). Две частицы, названные Kenneth и Juliette размером более 100 мкм, были признаны наиболее представительными и изучены наиболее тщательно. Оказалось, что исследованный материал чрезвычайно разнообразен по составу; он аналогичен нерастворимому органическому остатку примитивных углистых хондритов Orgueil и Murchison (Alexander, 2007), но имеет более высокое атомное соотношение H/C, что может указывать на более примитивный характер кометного тугоплавкого углеродсодержащего вещества в отличие от астероидного, поскольку родительские тела хондритов вероятно частично потеряли водород в процессе внутреннего нагрева за счет короткоживущих $^{26}$Al и $^{60}$Fe (Alexander и др., 2008).

При анализе органической фракции в пылевой составляющей 67P отмечалось отсутствие легких углеводородов, по составу аналогичных растворимому органическому веществу хондритов: алифатических и циклических углеводородов, карбоновых и аминокислот и других соединений (Fray и др., 2016). На основании этих результатов делается вывод, что источники сложных органических комплексов и летучих органических соединений, обнаруженных в составе комы, в ядре кометы различны.

Характерной особенностью тугоплавкого органического вещества кометы 67P, как и кометы 1P/Halley, является высокое содержание азота: так отношение $N/C = 0.035 \pm 0.011$ (Fray и др., 2017), что втрое выше, чем в углистых хондритах. А вот содержание кислорода в пылевой фракции обеих комет ниже, чем в примитивных хондритах, $O/Si_{67P} = 5.5 \pm 0.5$. Это объясняется тем, что в состав кометного вещества входят только негидратированные минералы, в то время как в примитивных углистых хондритах типа CI все силикаты гидратированы.

Помимо анализа пылевых частиц, выброшенных газовым потоком, спектрометром VIRTIS изучался состав органических соединений, обнаруженных на поверхности кометы 67P (Capaccioni и др., 2015; Quirico и др., 2016). Наряду с многоатомными тугоплавкими соединениями были идентифицированы льды летучих углеродсодержащих соединений, таких как $CH_4$, CO, $CO_2$, $CH_3OH$, а также льды карбоновых кислот общей формулы R-COOH. Один из важных результатов исследований с помощью инструмента VIRTIS состоял в том, что на поверхности 67P не было обнаружено никаких признаков присутствия гидратированных минералов, что может служить свидетельством отсутствия постаккреционного внутреннего нагрева ядра 67P.

В ходе эксперимента Rosetta-Philae впервые был проанализирован состав вещества, отобранного непосредственно с поверхности кометного ядра, что было сделано с помощью приборов, установленных на борту зонда Philae – это первый в истории космический аппарат, совершившимягкую посадку на ядро кометы. К сожалению, посадка произошла в месте, не позволившем зонду использовать солнечные батареи, и все измерения были проведены за 57 ч за счет энергии предварительно заряженных аккумуляторов. Результатам исследований был посвящен специальный выпуск “Science” от 30 июля 2015 г.

Помимо иных приборов, зонд Philae был оборудован двумя масс-спектрометрами: COSAC в комплекте с газовым хроматографом, предназна-

ченный для анализа химического состава пыли, и Ptolemy – ионный масс-спектрометр для анализа химического и изотопного состава газа. COSAC проанализировал вещество, попавшее в его приемник в момент первого контакта с поверхностью кометы в области Agilkia. Материал оказался беден льдом, но богат органическим веществом (Goesmann и др., 2015). Было идентифицировано 16 различных органических соединений, в том числе карбоксильные кислоты (Quirico и др., 2016), полиоксиметилен (Wright, 2015), аминокислота глицин ($C_2H_5NO_2$), а также фосфор (Altwegg и др., 2015), без которых невозможен синтез белков. Следует отметить, что ранее глицин (Elsila и др., 2009) и еще несколько аминов и аминокислот были найдены в доставленном на Землю веществе кометы Wild 2 (Sandford и др., 2006; Cody и др., 2007). Однако корректность этих результатов была поставлена под сомнение из-за возможной контаминации земным веществом, поскольку оболочка капсулы при приземлении была повреждена. Молекулы глицина были также обнаружены в составе межзвездных молекулярных облаков и в органической составляющей углистых хондритов.

Исследование *in situ* вещества кометы 67P однозначно показало присутствие в ее составе важнейших компонентов, входящих в состав многих белков и биологически активных соединений. В ходе исследований были также найдены четыре органических соединения, которые прежде не обнаруживались на кометах. Это метилизоцианат ($CH_3NCO$), ацетон ($CH_3COCH_3$), пропионовый альдегид ($C_2H_5CHO$) и ацетамид ($CH_3CONH_2$) (Goesmann и др., 2015).

Одновременно Ptolemy проанализировал состав эфемерной атмосферы вокруг посадочного аппарата и зафиксировал основные ее компоненты – водяной пар, угарный и углекислый газы. В качестве примесей было обнаружено еще несколько летучих органических соединений, в том числе формальдегид (Wright и др., 2015).

Сравнительный анализ составов органических соединений, идентифицированных в пылевой фракции кометы 67P с помощью масс-спектрометров ROSINA–DFMS KA Rosetta и COSAC в эксперименте Philae, показал их качественное совпадение. Они включают большое число сложных органических соединений, содержащих группы $CH^-$, $CHN^-$, $CHS^-$, $CHO_2^-$ и $CHNO^-$, а также серу и фосфор (Altwegg и др., 2017). Некоторые из этих соединений, в особенности те, которые содержат углерод-азотные связи, играют ключевую роль в синтезе аминокислот, сахаров и нуклеинов. Например, формальдегид, зафиксированный в коме 67P, участвует в формировании рибозы, производная которой глицин (компонент ДНК) обычно встречается в белках, а фосфор является ключевым компонентом ДНК и клеточных мембран. Все это говорит о том, что с учетом присутствия большого количества воды и углекислого газа, кометное вещество содержит строительные блоки для синтеза аминокислот, сахаров и нуклеинов — необходимых компонентов для зарождения жизни. Однако, чтобы однозначно ответить на вопрос, достаточно ли обнаруженного набора органических молекул, чтобы кометное вещество стало источником возникновения органической жизни, в частности, на Земле, необходимы дальнейшие исследования.

Вопрос о происхождении органических соединений в кометах однозначно не определен. С одной стороны, известно, что некоторые из них наблюдаются в межзвездных молекулярных облаках, например, цианистый водород (HCN). В то же время, это соединение, наряду с некоторыми другими того же семейства, были обнаружены во внешних холодных областях протопланетного диска, окружающего молодую звезду MWC 480 (Guzman и др., 2015). Примечательным является то, что обилие молекул, найденное телескопом ALMA в протопланетном диске звезды MWC 480, значительно превышает то, которое характерно для межзвездных облаков. Это может означать, что сложные органические молекулы образуются в протопланетных дисках, причем на относительно коротких временных масштабах. Однако, чтобы делать более обоснованные выводы, необходимы дальнейшие исследования.

Обобщая данные по составу кометной пыли, полученные в ходе эксперимента Rosetta-Philae, можно сделать следующий вывод. Высокое содержание углерода и отсутствие гидратированных силикатов, высокое значение C/H в органическом веществе пыли свидетельствуют о том, что пылевое вещество комет не подвергалось постаккреционной переработке и, таким образом, характеризует первичный состав пылевой фракции околосолнечной небулы и является важнейшим источником информации о физических, химических и динамических условиях в протопланетном дискена ранних этапах его эволюции. Дополнительные аргументы в пользу этого тезиса приведены в следующем разделе.

## СООТНОШЕНИЕ МАСС ПЫЛЕВОЙ И ГАЗОВОЙ ФРАКЦИЙ В ЯДРЕ 67P

Соотношение масс тугоплавкой фракции и льдов ($M_{dust}/M_{ice}$), и в частности, соотношение масс тугоплавкой фракции и льда воды ($M_{dust}/M_{ice_H_2O}$,) являются ключевыми параметрами моделей внутреннего строения газопылевого околосолнечного диска, происхождения кометных ядер, а также позволяет судить о термодинамических условиях в регионе образования комет. Представления о воз-

можном значении этих параметров за последние десятилетия существенно изменились: от модели Уиппла (Whipple, 1950), считавшего, что ядро кометы это ком грязного снега (“dirty snowballs”) с соотношением масс пыли и льда ~1, до современных моделей, согласно которым, кометное ядро с бóльшим основанием можно назвать комом замороженной грязи (“frozen mudballs”) с соотношением масс пыли и льда >1 (Sykes, Walker, 1992). Однако получить точное значение $M_{dust}/M_{ice}$ в коме кометы и соотнести его со значением в ядре весьма трудно; это обусловлено сложностями в оценке максимального размера твердых частиц в газопылевом потоке комы, распределения частиц по размерам, их плотности и состава, массы тугоплавкой фракции, безвозвратно теряемой ядром и переотложенной на поверхности ядра, а также не определенностью многих других факторов, подробно изложенных в (Fulle и др., 2019). Поэтому результаты исследования состава комы кометы 67P с помощью инструментов MIRO и ROSINA, установленных на борту КА Rosetta, ожидались с особым интересом.

Анализ первых полученных результатов позволил получить оценку значения $M_{dust}/M_{ice} = 4 \pm 2$, где $M_{ice} = M_{ice_H_2O} + M_{ice_CO} + M_{ice_CO_2}$, а с учетом того, что по данным (Hässig и др., 2015) $M_{ice_CO} + M_{ice_CO_2} = 0.5 M_{ice_H_2O}$, было получено значение $M_{dust}/M_{ice_H_2O} = 6 \pm 2$ (Rotundi и др., 2015). В расчетах максимальный размер тугоплавких частиц был принят 2 см, их форма – сферической, скорость потери пыли $7 \pm 1$ кг $с^{-1}$, плотность пылевых частиц $1.9 \pm 1.1$ г $см^{-3}$.

В работе (Moreno и др., 2016) были использованы данные наземных наблюдений (VLT, Чили), из которых авторы вывели законы распределения мелких (<1 мм) и крупных (>1 мм) пылевых частиц по размерам, что позволило рассчитать скорость потери массы пыли в период, когда комета находилась на гелиоцентрических расстояниях от 4.4 до 2.9 а. е. В сочетании с данными о темпах потери воды (MIRO, Rosetta) был оценен интервал возможных значений соотношения масс пыли и воды в коме кометы 67P от 3.8 до 6.5, что не противоречит оценкам (Rotundi и др., 2015).

В работе (Fulle и др., 2017), авторы уточнили полученное ими ранее значение $M_{dust}/M_{ice}$. Было принято во внимание, что вблизи точки перигелия происходит переотложение значительной части пыли из южного региона ядра кометы в северный, при этом льды летучих компонентов из достаточно большого объема вещества полностью теряются, сохраняясь лишь в крупных пылинках. Этот процесс приводит к увеличению с каждым оборотом вокруг Солнца доли пыли в ядре кометы и в настоящее время для 67P оно оценивается величиной $M_{dust}/M_{ice}$, обозначаемой как $\delta = 7.5$. Полученное значение соответствует ≈12 мас. % льда воды, что даже ниже, чем в CI хондритах, в которых гидратированные фазы силикатов могут содержать до 15 мас. % $H_2O$ (Marty и др., 2016; Alexander, 2019).

В последующей работе (Fulle и др., 2019), авторы постарались количественно учесть влияние на значение массового соотношения тугоплавкой и ледяной составляющих пыли, переотложенной после ее выброса из южного полушария во время прохождения кометой перигелия в период с 24 июля 2015 г. по 15 сентября 2015 г. (максимальное сближение с Солнцем происходило в августе 2015 г.). Согласно приведенным оценкам, в этот период значительной эрозии подвергается ≈1/5 общей поверхности ядра (Preusker и др., 2017), что составляет ≈10 $км^2$. Средняя толщина эродированного слоя оценивается по величине обнажившихся после прохождения перигелия камней примерно в 4 м (El-Maarry и др., 2017), при этом предполагается, что ~80% выброшенной массы вещества переоткладывается на поверхности ядра кометы в основном в ее северном полушарии, образуя слой пыли толщиной до 0.8 м, практически не содержащей летучие. Подобного рода оценки были сделаны также в (Thomas и др., 2018), они примерно в 1.5–2 раза превышают оценки (Fulle и др., 2019): площадь эрозии 14 $км^2$ и толщина слоя пылевого осадка $1.8 \pm 1.6$ м. В то же время в работе (Lai и др., 2016 и ссылки там же) указывается, что в период максимальной освещенности, согласно наблюдениям и сделанным на их основе численным оценкам, за одно прохождение перигелия южное полушарие ядро кометы 67P теряет в среднем слой вещества толщиной 1–2 м. Такое расхождение, по мнению (Fulle и др., 2019), в основном объясняется большой неопределенностью параметров, входящих в расчет указанных значений.

При последующем движении по орбите большая часть этого вновь образованного на поверхности ядра пылевого слоя, главным образом в северном полушарии, уносится вместе с газом, но в некоторых областях происходит его накопление, что наблюдается, например, в области Hapi (Pajola и др., 2017). Переотложенная пыль препятствует газовыделению, как с поверхности, так и из субповерхностных слоев, поскольку она является хорошим теплоизолятором, но сама летучих практически не содержит. Таким образом, с каждым новым оборотом кометы вокруг Солнца в несколько раз повышается значение $M_{dust}/M_{ice}$ в ядре кометы. С учетом этого, а также ряда других факторов, их количественную неопределенность в (Fulle и др., 2019) получен вероятный нижний предел значений массового отношения тугоплавкой и ледяной составляющих в ядре кометы 67P $\delta > 3$. Авторы особо подчеркивают, что полученная оценка удовлетворяет требуемым значениям

исходных параметров модели образования кометных ядер в процессе мягкого гравитационного коллапса пебблов (камешков) размером ~1 см, наступающего вследствие потоковой неустойчивости (Blum и др., 2017). Анализ и оценка этой модели выходит за рамки настоящей работы, хотя автор придерживается той точки зрения, что образование кометных ядер по механизму потоковой неустойчивости (Davidsson и др., 2016) выглядит с учетом новых данных о внутреннем слоистом строении кометы 67P и мелкомасштабной химической неоднородности предпочтительнее, нежели модель импактного разрушения крупных каменно-ледяных тел (Morbidelli, Rickman, 2015; подробнее см. Емельяненко, 2018 и ссылки в ней). Дополнительным аргументом в пользу гипотезы первичного происхождения кометных ядер, помимо приведенных в предыдущем разделе, является присутствие в коме 67P не только плотных пылевых частиц размером 80–800 мкм и плотностью $(1.9 \pm 1.1) \times 10^3$ кг м$^{-3}$, но и очень рыхлых (флаффированных) структур размером 0.2–2.5 мм с плотностью менее 1 кг м$^{-3}$ (Della Corte и др., 2015; 2016). Их образование связывается с процессами в раннем газопылевом протопланетном диске и "выжить" в крупном теле размером несколько сотен километров подобные агрегаты вряд ли могли.

Однако следует отметить, что, полученные высокие значения $\delta > 3$ и $M_{min} : M_{org} = 55 : 45$ для комы вряд ли можно переносить на состав кометных ядер; в лучшем случае они могут характеризовать *текущее значение* этих параметров в некотором участке ядра, но не величину на момент образования первичных каменно-ледяных тел в транснептуновом регионе. Эти значения противоречат данным о солнечной распространенности элементов в протопланетном диске 4.56 млрд лет назад (Lodders, 2010) и друг другу. Покажем это на примере. В системе, содержащей 1 моль Si, как это принято в космохимии, масса минеральной фракции пыли в системе солнечного состава составляет $M_{min} \approx 175$ г (все дальнейшие расчеты будут также вестись на 1 моль Si). Тогда при соотношении $M_{min} : M_{org} = 55 : 45$ масса органического вещества $M_{org} \approx 143$ г. Массовая доля углерода в нем будет составлять ≈0.7 вне зависимости какой из предложенных химических формул описывается состав CHON (Alexander и др., 2007; Quirico, 2014). Отсюда масса углерода в кометной пыли составит $M_{C_dust} \approx 100$ г или $n_{C\ dust} \approx 8.4$ моля на 1 моль Si, что превышает значение относительной распространенности углерода C/Si ≈ 7.2 (Lodders, 2010), при этом 11 молей кислорода (4.7 молей заключено в пылевой фракции) должно находиться в форме льда воды, что составляет 198 г. В итоге получаем $M_{dust}/M_{ice} = (175 + 143)/198 = 1.6$, что существенно меньше предполагаемого (Fulle и др., 2019). Отметим, что, исходя из солнечных пропорций и принятого во многих работах предположения, что в тугоплавком органическом веществе содержится ≈50% ΣC, значение соотношения $M_{min} : M_{org} \approx 75 : 25$.

Значение $M_{dust}/M_{ice}$ определяется помимо значения $M_{min} : M_{org}$ еще и соотношением основных углерод содержащих газов – CO, $CO_2$, $CH_3OH$ и $CH_4$, которое нам точно неизвестно. Но с учетом всего комплекса космохимических данных о составе межзвездных молекулярных облаков и газопылевых околозвездных дисков, а также экспериментальных данных по составу кометных ком можно указать наиболее вероятный интервал *начальных значений* $M_{dust}/M_{H_2O}$ в ядрах комет и других первичных каменно-ледяных телах, образовавшихся в транснептуновом регионе: $\delta \approx 1.2–2$ (Дорофеева, Девина, 2018). Отметим, что в классической работе (Pollack и др., 1994) были получены близкие оценки: $M_{dust}/M_{ice} = 1.27$ и $M_{dust}/M_{H_2O} = 1.41$. Именно эти значения, с нашей точки зрения, и следует сравнивать с составом углистых хондритов, в которых $M_{dust}/M_{H_2O} \approx 5.5$ (Marty и др., 2016); из этого сравнения с очевидностью следует, что кометы содержат в 2–3 раза больше воды, чем родительские тела углистых хондритов. Разумеется, нужно согласиться с Fulle и др., 2019, что каждый последующий оборот кометы 67P вокруг Солнца увеличивает значение отношения $M_{dust}/M_{ice}$ в ее ядре. Однако, как было указано выше, на современной орбите с перигелием 1.24 а. е. комета 67P находится ~60 лет, совершив, таким образом, менее 10 оборотов. Даже, если за это время комета потеряла 50–100-метровый слой южного полушария и часть дегазированной пыли осела на поверхности северного полушария, трудно предположить, что при размере ядра ≈3.5 × 4.5 км соотношение в нем тугоплавкой и ледяной фракций вследствие этого радикально изменилось. Ранее же комета 67P находилась на значительно большем удалении от Солнца, и, следовательно, инсоляция ее ядра была на порядки ниже, хотя в литературе обсуждается возможное снижение содержания летучих в ядрах короткопериодических комет в период их нахождения на орбитах кентавров.

К тому же в период проведения эксперимента Rosetta были получены и иные оценки значения соотношения масс пыли и газа для локальных участков кометы 67P. Так в 12 марта 2015 г. на гелиоцентрическом расстоянии 2.12 а. е. был зафиксирован небольшой по мощности газопылевой джет, кратковременно исходивший из области Imhotep (торцевая часть бóльшей доли кометы), которая в этот период не была освещена Солнцем. Значение отношения масс пыли и газа в джете было оценено $\delta \approx 0.6–1.8$ (Knollenberg и др., 2016).

В заключение данного раздела отметим большую зависимость δ от многих параметров. Так с

помощью инструмента CONSERT (длинноволновой передатчик), установленного на Philae lander, было проведено зондирование малой доли ("головы") кометы и определена ее средняя диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1.27 \pm 0.1$ (Kofman и др., 2015), которая является функцией нескольких свойств ядра: пористости, состава, температуры, внутренней структуры, масштаба неоднородностей. Путем модельных оценок для данной $\varepsilon$ была получена оценка пористости для структурно гомогенного на масштабах десятков метров региона Abydos (север малой доли), которая составила 75–85% и значение объемного соотношения пыли и газа = 0.4–2.6. Но измерения также показали, что внешний слой ~5–10 м (предел разрешения CONSERT на длине волны 3 м), вероятно, несколько плотнее, т.е. имеет меньшую пористость, чем весь объем региона (Ciarletti и др., 2015). Указывается также, что диэлектрическая проницаемость уменьшается с глубиной, что может быть объяснено увеличением либо пористости, либо отношения лед/пыль, или изменением состава. Из этих экспериментальных результатов видно, на сколько велика зависимость $\delta$ от значения пористости, которая в свою очередь является производной целого ряда физических характеристик ядра.

Выше отмечалось влияние на значение $\delta$ распределение пылевой составляющей по размерам и оценка ее максимального размера. Возможно последний параметр еще до конца не оценен, поскольку помимо пыли, из ядра 67P выбрасывались и достаточно крупные камни. Так недавно на снимках, сделанных KA Rosetta, был обнаружен четырехметровый объект, расположенный на расстоянии от 2.4 до 3.9 км от центра кометы. Очевидно, что для более точного определения содержания воды и тугоплавкого органического вещества необходимы экспериментальные исследования материала ядра комет *in situ*, причем взятого в разных его регионах и с разной глубины, что видимо и будет целью дальнейших космических экспериментов по исследованию комет.

## СОСТАВ ЛЕДЯНОЙ ФРАКЦИИ КОМЕТЫ 67P. ХИМИЧЕСКАЯ ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ЕЕ ЯДРА

О химическом составе ледяной фракции ядра комет судят в основном по составу кометной комы – газопылевой оболочки диаметром в несколько десятков тысяч километров, которая образуется вокруг ядра благодаря испарению льдов при приближении кометы к Солнцу на $r \leq 5$ а. е., т.е. при пересечении орбиты Юпитера. Температуры сублимации основных льдов представлены в таблице. Благодаря переходу льдов в газообразное состояние, появляется возможность фотометрическими и спектроскопическими методами определить не только качественный, но и количественный состав комы. Таким образом он был определен для более чем 30-ти комет: основная составляющая кометных льдов – это лед $H_2O$ (80–85%), а также льды $CO_2$, CO, $CH_4$, $CH_3OH$, $NH_3$ и др. (Bockelée-Morvan, 2011).

**Таблица 1.** Температуры сублимации основных компонентов кометных льдовпри $P \sim 10^{-9}$ бар

| Лед | $T_{субл}$, K | Лед | $T_{субл}$, K | Лед | $T_{субл}$, K |
|---|---|---|---|---|---|
| $H_2O$ | 150–140 | HCN | 110–95 | CO | 25 |
| $CO_2$ | 90–80 | $NH_3$ | 80–70 | $N_2$ | 22 |
| $CH_3OH$ | 100 | $CH_4$ | 30 | Ar | 22 |

К настоящему времени в комах комет различных динамических типов экспериментально обнаружено более 20, так называемых материнских молекул и радикалов, и большое количество вторичных молекул, образующихся непосредственно в коме. В ряде молекул и радикалах были определены значения изотопных отношений, например, D/H молекулах $H_2O$ и HCN, а также $^{14}N/^{15}N$ в CN, HCN и $NH_2^+$. Установлено, что максимальными обилиями в комах комет, кроме молекул $H_2O$, обладают молекулы $CO_2$ и CO, остальные же компоненты, включая и многочисленные органические молекулы, содержатся в подчиненных количествах (менее 5%). Поскольку вода является основным компонентом кометных льдов и соответственно комы, содержания всех остальных ее составляющих определяются именно относительно содержания $H_2O_{газ}$ – число молей любого газа нормируется к 100 молям $H_2O$. В ряде случаев молекулярные обилия определяются по отношению к компоненту близкому по летучести, например, $CO/N_2$, $Ar/N_2$. Интервалы изменений содержаний газовых компонентов по отношению к воде в комах более чем 30-ти комет различных динамических типов показаны на рис. 1 серыми прямоугольниками, для построения которого использовался составленный автором банк данных комет (Дорофеева, 2019).

В литературе имеются также данные об обнаружении галогенсодержащих соединений HF, HCl и HBr, обилия которых относительно кислорода составляют $F/O \approx 8.9 \times 10^{-5}$, $Cl/O \approx 1.2 \times 10^{-4}$ и $Br/O \approx 2.5 \times 10^{-6}$. Определено также, что изотопные отношения $^{37}Cl/^{35}Cl$ и $^{81}Br/^{79}Br$ в пределах погрешности соответствуют средним значениям для Солнечной системы.

Состав ледяной фракции ядра кометы 67P изучался по составу газов ее комы с помощью ИК-спектрометра высокого разрешения VIRTIS-H (Visibleand Infrared Thermal Imaging Spectrometer) и масс-спектрометров DFMS и RTOF прибора ROSINA (Rosetta's Orbiter Spectrometer for Ion and

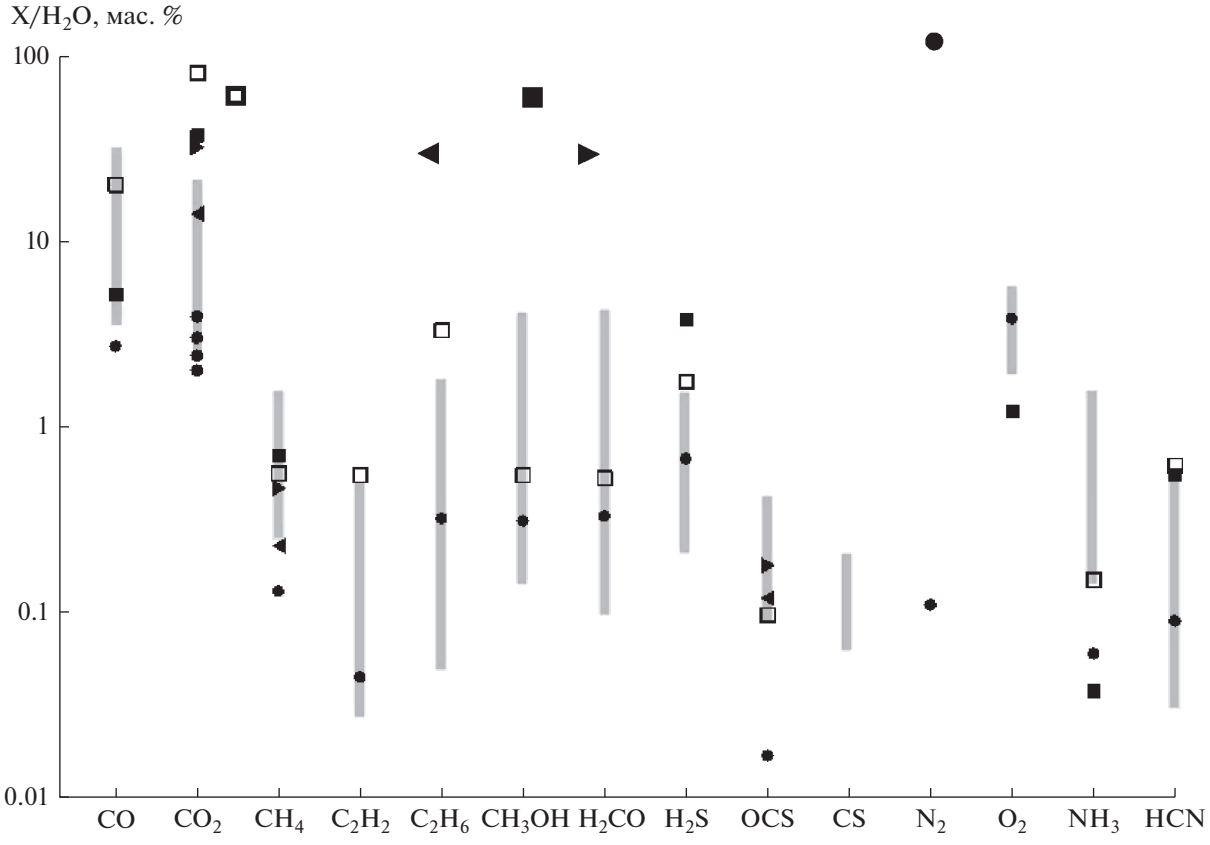


**Рис. 1.** Значения относительных содержаний наиболее обильных компонентов комы кометы 67P/Чурюмова–Герасименко для северного полушария летом (•), $r \approx 3$ а. е.; южного полушария зимой (□), $r \approx 3$ а. е. и летом (■), $r \approx 2$–2.7 а. е., а также для южного полушария вблизи перигелия, незадолго до (◄) и после (►) его прохождения. Затененными прямоугольниками обозначены интервалы значений относительных содержаний компонентов ком более чем 30-ти комет (использованы данные: Mumma, Charnley, 2011; Le Roy и др., 2015; Cochran и др., 2015; DelloRusso и др., 2016; Bockelée-Morvan и др., 2016; Gasc и др., 2017 и других работ).

Neutral Analysis) – спектрометра ионов и нейтральных атомов для определения элементного, изотопного и молекулярного состава газов. В период с августа 2014 г. (начало наблюдений) по май 2015 г., когда комета достигла точки равноденствия ($r \approx 1.7$ а. е.), Солнце освещало северное полушарие, поэтому именно оно было основным источником газовыделения. Как отмечалось выше, внешние слои северного полушария все предыдущие обороты дегазировали, но при этом не разрушались; потеря летучих происходит из слоя толщиной <1 м, поскольку именно на такую глубину прогревается ядро кометы при инсоляции даже при прохождении по орбите несколько десятков раз (Rusol, Dorofeeva, 2018). К тому же некоторые северные регионы после прохождения кометой перигелия засыпались переотлогавшимся из южного полушария веществом (Keller и др., 2015), которое неравномерно покрывало поверхность кометы, при этом мелкая пыль, которая была практически полностью дегазирована, экранировала поверхность, препятствуя газовыделению с ее активных участков. Более крупные куски, выброшенные газовым потоком, могли сохранить льды наименее летучих газов – $CO_2$ и $H_2O$ и стать таким образом дополнительным источником летучих в коме (так называемый, распределенный источник). Нечто подобное впервые наблюдалось при изучении состава комы гиперактивной кометы 103P/Hartley 2 (Kelley и др., 2013). Основной объем данных по относительным содержаниям компонентов в газе, источником которого было летнее северное полушарие, получены 19–20 октября 2014 г., когда комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии $r \sim 3$ а. е. (LeRoy и др., 2015). Полученные значения, показанные на рис. 1 черными кружками, и, как отмечал ряд авторов, вероятнее всего занижены относительно содержаний компонентов в ядре кометы (Bockelée-Morvan и др., 2016; Keller и др., 2017). Однако при сопоставлении данных, представленных на рис. 1, надо иметь в виду, что измерения для северного полушария 67P в доперигельный период проводились в основном на $r \sim 3$ а. е., в то время как для большинства других комет на $r < 2$ а. е.

Тем не менее полученные в этот период результаты оказались чрезвычайно важными и позволили сделать ряд космохимических выводов. Было определено, что основными газами комы 67P, как и ком большинства других комет, являются $H_2O$, $CO_2$ и CO. В качестве компонентов-примесей в ней присутствуют $CH_4$, $C_2H_4$, $CH_3OH$, $C_2H_3$ и другие легкие углеводороды, соединения азота – HCN, $NH_3$ и $N_2$ и серы – $H_2S$, $SO_2$, COS, а также молекулярный кислород $O_2$. Особый интерес, с точки зрения астробиологии, представляет определение в составе комы 67P большого количества углеводородов, включая органические соединения, в состав которых входит азот (Filacchione и др., 2019). Всего в коме 67P было определено 24 материнских молекул; кроме того, в ней присутствуют значительное количество вторичных (дочерних) молекул и радикалов. Помимо соединений химически активных элементов был идентифицирован инертный газ аргон и определен его изотопный состав: значение $^{36}Ar/^{38}Ar = 5.4 \pm 1.4$ (Balsiger и др., 2015), что в пределах ошибки согласуется со значением для солнечных обилий = 5.37. Кроме этого, в составе комы впервые был зафиксирован молекулярный азот $N_2$ и установленалинейная корреляция содержаний $N_2$ и $^{36}Ar$ (Balsiger и др., 2015). Поскольку температуры образования льдов $N_2$ и $^{36}Ar$ близки ($T_{субл} \approx 20$ K) этот факт может свидетельствовать об едином механизме аккумуляции этих газов в кометных ядрах. В то же время корреляции содержания $N_2$ и другого высоко летучего компонента CO ($T_{субл} \approx 25$ K) обнаружено не было – в серии из 138 замеров отношение $N_2/CO$ менялось от $1.7 \times 10^{-3}$ до $1.6 \times 10^{-2}$, среднее значение соотношения $N_2/CO = (5.70 \pm 0.66) \times$ $\times 10^{-3}$ (Rubin и др., 2015). Это может свидетельствовать о вторичных процессах, протекающих в ядре комет, связанных, например, с изменением агрегатного состояния льда воды – перехода из аморфного состояния в кристаллическое и образование кристаллогидратов, в частности $CO \cdot 5.75H_2O$, температура сублимации которого примерно на 20 K выше, чем $T_{субл}$ $CO_{лед}$. В то же время полученноезначение относительного содержания молекулярного азота $N_2/H_2O = (8.9 \pm 2.4) \times 10^{-4}$ более чем в 25 раз ниже, чем можно было ожидать, исходя из солнечных пропорций (Lodders, 2010), но дефицит $N_2$ характерен для всех комет, за которыми проводилось наблюдение. Причины этого кроются вероятнее всего в механизмах аккумуляции и температурах, при которых эта аккумуляция происходила.

Относительные содержания двух других инертных газов – криптона и ксенона были измерены позднее, в конце миссии, в мае 2016 года, когда КА “Rosetta” снова могла близко подойти к ядру. Было также определено соотношение обилий семи основных стабильных изотопов ксенона: $^{128}Xe$, $^{129}Xe$, $^{130}Xe$, $^{131}Xe$, $^{132}Xe$, $^{134}Xe$ и $^{136}Xe$, установлено обеднение тяжелыми изотопами $^{134}Xe$ и $^{136}Xe$ и обогащение более легким изотопом $^{129}Xe$ по отношению к солнечным и хондритным значениям (Marty и др., 2017). Там же обсуждаются возможные причины наблюдаемых отклонений. В этот же период было измерено относительное содержание изотопов криптона: $^{82}Kr$, $^{83}Kr$, $^{84}Kr$ и $^{86}Kr$. Единственный инертный газ, который не был обнаружен – это самый летучий из них неон. В (Rubin и др., 2018) обобщены данные по содержанию инертных компонентов в коме комет 67P и даны максимальные оценки их относительных содержаний: $Ar/H_2O = (5.8 \pm 2.2) \times 10^{-6}$, $Kr/H_2O = (4.9 \pm$ $\pm 2.2) \times 10^{-7}$, $Xe/H_2O = (2.4 \pm 1.1) \times 10^{-7}$.

Важным результатом первого периода наблюдения стало обнаружение в составе комы с помощью спектрометров (DFMS) и (ROSINA) молекулярного кислорода. Его относительное содержание варьировалось в интервале 1–10%, что значительно выше, чем ожидалось. В итоге молекулярный кислород оказалсячетвертым по обилию компонентом комы 67P/C-G со средним относительным содержанием $3.80 \pm 0.85\%$ (Bieler и др., 2015). Следует отметить, что после публикации этих данных были повторно проанализированы данные Neutral Mass Spectrometer, установленного на борту КА Giotto. В результате для кометы 1P/Halley было установлено близкое значение $O_2/H_2O = 3.7 \pm 1.7\%$ (Rubin и др., 2015; Keeney и др., 2019) и кислород стал третьим по обилию компонентом комы данной кометы.

Происхождение $O_2$ в кометах вызвало дискуссию, поскольку его содержание в межзвездной среде незначительно, например, в регионе маломассивной протозвезды NGC1333-IRAS4A значение $O_2/H_2O < 6 \times 10^{-9}$ (Yildiz и др., 2013). Обсуждаются несколько возможных механизмов образования $O_2$: досолнечный, т.е. в протосолнечном газопылевом облаке, в околосолнечном диске во время его формирования, а также в период его ранней эволюции при вспышках светимости молодого Солнца (Taquet и др., 2016). Первый механизм может быть связан с реакциями в поверхностных слоях льда межпланетной пыли (Taquet и др., 2016), или в результате газофазных реакций (Rawlings и др., 2019). Возможно также образование $O_2$ в межзвездной среде в процессе аморфизации кристаллических Fe–Mg силикатов и частичном их восстановлении с образованием GEMS – стекла $SiO_2$ с вкраплениями металла и сульфидов (Glass with Embedded Metal and Sulfides) – важной составляющей аморфных силикатов комет (Bradley, 2013). Рассматривается также возможность образования $O_2$ в результате радиолиза молекулы $H_2O_2$, относительное содержание которого в меж-

звездных льдах оценивается $H_2O_2/H_2O = 9 \pm 4\%$ (Dulieu и др., 2017). Однако эти и другие предлагаемые механизмы (Mousis и др., 2016а, 2016б и др.) сопряжены с рядом ограничений, одно из самых существенных – сложность объяснения, почему относительное обилие $O_2$ столь велико, а содержание $N_2$, который близок по свойствам $O_2$, в 25 раз ниже солнечного обилия азота. На данный момент очевидно, что является ли $O_2$ материнской или дочерней молекулой должны показать дальнейшие исследования.

Из макрокомпонентов, помимо содержания CO, было измерено относительное содержание $CO_2$. Когда комета находилась на $r = 3.5$ а. е., содержания обоих компонентов были невелики: $CO/H_2O = 0.13 \pm 0.07$, а $CO_2/H_2O = 0.08 \pm 0.05$ (Hässig и др., 2015) при том, что температура сублимации $CO_2$ втрое выше, чем CO (~80–90 K против 23–25 K). Но уже через месяц в середине октября, когда комета приблизилась к Солнцу на $r = 3.15$ а. е., содержания обоих компонентов увеличились более чем на порядок: $CO/H_2O = 2.7\%$ и $CO_2/H_2O = 2.5\%$ (LeRoy и др., 2015), что и отражено на рис. 1. Кроме указанных на рисунке,в коме кометы 67P были определены относительные содержания таких микрокомпонентов, как SO (0.004), $SO_2$ (0.011), $CS_2$ (0.003), $S_2$ (0.0004), HNCO (0.016), $CH_3CN$ (0.006), $HC_3N$ ($<2 \times 10^{-5}$).

В этот же период из-за сложной формы кометного ядра и его суточного вращения инсоляции подвергались некоторые регионы южного полушария, в котором была зима. Поскольку при предшествующих прохождениях перигелия внешние слои в этих регионах могли быть разрушены, вследствие чего обнажились недегазированные субповерхностные слои, были получены супервысокие значения, возможно отражающие только локальные содержания макрокомпонентов в регионе: $CO/H_2O \approx 20\%$ и $CO_2/H_2O \approx 80\%$ (LeRoy и др., 2015). Эти и относительные содержания других компонентов показаны на рис. 1 пустыми квадратами. Кроме того, были определены относительные содержания SO (0.0014), $SO_2$ (0.041), $CS_2$ (0.024), $S_2$ (0.0013), HNCO (0.031), $CH_3CN$ (0.016), $HC_3N$ ($<5 \times 10^{-4}$). Из рис. 1 видно, что все полученные значения оказались значительно выше, чем для северного летнего полушария, но нет уверенности, что указанные значения отражают реальные содержания компонентов в ядре кометы.

По достижении кометой точки равноденствия ($r \approx 1.7$ а. е., май 2015 г.) наступало лето в южном полушарии, и, хотя по продолжительности оно очень короткое (меньше года), значительная его инсоляция сопровождалась резким увеличением интенсивности выделения воды, а вместе с ней и интенсивности выделения других компонентов кометного льда. Так в июле–августе 2015 г. незадолго до прохождения перигелия ($q = 1.24$ а. е., август 2015 г.) были измерены относительные содержания $CO_2$, $CH_4$ и OCS; полученные значения оказались существенно выше, полученных ранее для летнего северного полушария: $CO_2$ – 14%, $CH_4$ – 0.23% и OCS – 0.12%. Но еще большее увеличение наблюдалось через две недели после прохождения перигелия: $CO_2$ – 32%, $CH_4$ – 0.47% и OCS – 0.18% (Bockelée-Morvan и др., 2016); обе серии измерений отмечены на рис. 1 черными треугольниками с разнонаправленными вершинами.

Следующая серия измерений была проведена в марте 2016 г., когда комета находилась на расстоянии 2–2.7 а. е. от Солнца (Gasc и др., 2017), на рис. 1 ее результаты показаны черными квадратами. Полученные значения оказались максимальными для южного полушария летом: $CO_2$ – 36.9%, CO – 5.17%, $CH_4$ – 0.7% и OCS – 0.12%. Видимо именно эти значения могут быть корректно сопоставлены со значениями для других комет. Отметим, что относительное содержание $CO_2$ является самым высоким из наблюдаемых в кометных комах. Ранее наибольшее $CO_2/H_2O \sim 10–20\%$ было установлено у гиперактивной кометы 103P/Hartley 2. Содержание CO ниже: $CO/CO_2$ в период наблюдений менялось в диапазоне от 0.1 до 0.6 (Herny и др., 2018). Таким образом, в среднем южное полушарие в летний период оказалось примерно в 10 раз более продуктивным по $CO_2$ и COS относительно воды и в 2–5 раза более продуктивным по $CH_4$, чем северное полушарие летом, при этом интенсивность выделения воды в перигелии возросло в 16 раз.

Какие из полученных за период наблюдений наборов значений наиболее адекватно отражают первичный состав ледяной фракции ядра кометы 67P? Представляется, что именно последние, полученные в (Gasc и др., 2017). Но чтобы быть уверенным в этом и тем более определить таковые для иных комет, нужны дальнейшие исследования *in situ*, результаты которых позволят учитывать не только состав летучих в коме, но и разницу в летучестях ее компонентов, а также особенности состояния участков поверхности, на которых измеряется дегазация. Но уже сейчас очевидно, что большой разброс данных по составу комы (до порядка величины), получаемый в один и тот же период наблюдений (Hässig и др., 2015), т.е. гетерогенность комы, зависит не только от изменения инсоляции исследуемого участка поверхности кометы, но и от гетерогенности состава ядра кометы в масштабах сотен метров (Hoang и др., 2017).

Очень трудно разделить влияние этих двух факторов на интенсивность газовыделения и неоднородность состава комы, но все же к настоящему времени накоплено достаточное количе-

ство фактов, свидетельствующих, что ядро кометы 67P, как и ядра других комет, неоднородно и по строению, и по составу (Luspay-Kuti и др., 2015; Fornasier и др., 2016). Возможно наиболее яркими проявлениями указанных свойств является неравномерное распределение на поверхности кометы депрессий, близкое расположение депрессий разной степени активности (Vincent и др., 2016b), а также наличие пинаклов. Пинаклы на поверхности комет 67P – это вертикальные структуры высотой до 100–200 м и диаметром у основания ~75–100 м (Basilevsky и др., 2017a), обнаруженные камерами NavCam и OSIRIS в регионах Hantor, Ash, Ma'at, Seth и др. Ранее подобные структуры наблюдались на поверхности другой короткопериодической кометы семейства Юпитера 81 P/Wild 2 (Brownlee и др., 2004). Происхождение пинаклов связывается с фракционным испарением материала комет, при этом мощность эродированных слоев, оцененная в среднем в десятки метров, коррелирует с предположением о крупноразмерной зернистости материала ядра (Basilevsky и др., 2017b; Davidson и др., 2016), которая вероятно отражает первичную неоднородность материала, из которого образовалось ядро кометы. Последнее согласуется с заключением Vincent и др. (2016a) и Ip и др. (2016), что неоднородность материала ядра примерно того же масштаба, что и размер круговых депрессий.

В заключение можно отметить, что вопрос о неоднородности кометных ядер тесно связан с вопросом их образования, который, как уже отмечалось выше, на сегодняшний день является одним из важнейших вопросов космогонии, но для его успешного решения необходимы новые данные исследования комет *in situ*.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗОТОПНЫХ СООТНОШЕНИЙ В КОМЕ 67P И ИХ КОСМОГОНИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

Значения изотопных соотношений атомов водорода, кислорода, серы, инертных газов служат индикаторами термодинамических условий, при которых они установились, что помогает оценить внутреннюю структуру и интенсивность динамических процессов в ранней Солнечной системе, а также механизмы и условия аккумуляции в ней тел, в частности, рассмотреть возможные источники вода и иных летучих на Земле и других внутренних планетах. Зародыши этих планет формировались во внутренней зоне околосолнечного диска, в которой температуры до диссипации газа не опускались ниже $T_{\mathrm{cond}\,H_2O}$ (Макалкин, Дорофеева, 2009), поэтому в их составе воды не могло быть. Тем не менее, хотя истинное содержание воды на Земле неизвестно, принято считать, что ее современное содержание составляет не менее $5 \times 10^{-4}$ $M_\oplus$. Было предложено несколько механизмов появления воды на Земле (O'Brien и др., 2018), но наиболее часто рассматривается радиальный транспорт вещества из внешних регионов диска. Это либо вещество из зоны Главного пояса астероидов, аналогичного по составу веществу углистых хондритов (Halliday, 2013; Alexander и др., 2018), либо вещество комет (Mandt и др., 2015). Идентифицировать источник можно по совпадению присутствующих в нем изотопных составов летучих с земными значениями, которые, как полагают, не претерпели кардинальных изменений с момента образования планеты. Наиболее информативным с этой точки зрения является соотношение изотопов водорода (D/H) в наиболее обильных молекулах протосолнечной туманности и околосолнечного газопылевого протопланетного диска – в молекулах $H_2$ и $H_2O$. Значение $D/H_{H_2}$ в солнечной небуле оценивается величиной $2.1 \times 10^{-5}$ (Hartogh и др., 2011), или $(2 \pm 0.35) \times \times 10^{-5}$, согласно оценке (Geiss, Gloecker, 2003), что лишь немногим ниже первоначального значения $D/H_{H_2}$ в момент образования водорода при Большом взрыве и равного $2.5 \times 10^{-5}$ (Cooke и др. 2014).

Начальное содержание дейтерия в молекуле воды $\left(D/H_{H_2O}\right)$ в протосолнечной небуле неизвестно; предполагается, что оно находилось в интервале значений от $1.0 \times 10^{-2}$ до $1.0 \times 10^{-3}$, определенные для молекул воды в молекулярных облаках (Ceccarelli и др., 2005) и межзвездной среды (Butner и др., 2007) соответственно. В тех регионах околосолнечного диска, где лед воды испарялся и достаточно долгое время вода находилась в газообразном состоянии, значение $\left(D/H_{H_2O}\right)$ понижалось благодаря протекавшей в газовой фазе реакции $H_2O_г$ с изотопно более легким и на 3 порядка более обильным $H_2$:

$$DHO_г + H_2 = H_2O_г + DH. \qquad (1)$$

Константа равновесия и кинетика реакции зависели от $T$ и $P$: и во внутренних регионах диска, где температура была выше 600 K, а давление $10^{-5}$ бар, по оценке (Yang и др., 2013), равновесие устанавливалось за несколько сотен лет. Понижение температуры до 300 K и давления до $10^{-7}$ бар увеличивало время достижения равновесия на 3 и более порядка. Поэтому с увеличением радиального расстояния скорость реакции (1) падала, а в регионах, где лед воды не испарялся (внешняя зона от "snowline", находившейся на $r \sim 4$–5 а. е.), она не протекала вообще и все изменения $D/H_{H_2O}$ определялись степенью ее смешения с водой (льдом), вынесенной туда благодаря радиальному транспорту газопылевого вещества из внутренних, более теплых зон диска. Репером для значения $D/H_{H_2O}$ во внутренней зоне, включая астеро-

идный пояс, может служить валовый изотопный состав воды на Земле $\left(D/H_{H_2O}\right)_\odot = 1.46 \times 10^{-4}$ (Lecuyer и др., 1998), где она, в отличие от Венеры и Марса, с момента образования не подвергалась глобальному изотопному фракционированию. Отметим, что возможно $\left(D/H_{H_2O}\right)_\odot$ еще ниже, если значения $D/H_{H_2O}$, полученные в (Hallis и др., 2015), окажутся представительными для всей нижней мантии. Но для внешней водной оболочки Земли в настоящее время принят, так называемый, венский стандарт океанической воды (VSMOW), согласно которому, $(D/H_{H_2O})_{SMOW} \approx \approx 1.56 \times 10^{-4}$ (Gonfiantini, 1978). Этому значению близки $D/H_{OH}$ в гидросиликатах углистых хондритов (Robert, 2006), образовавшихся в Главном астероидном поясе на $r \sim 2.5–3.5$ а. е. Именно поэтому вещество астероидного пояса принято считать основным источником летучих на Земле, но и возможный вклад кометного вещества активно обсуждается.

В предшествующих миссиях Rosetta экспериментах было измерено отношение $D/H_{H_2O}$ в комах более 10 комет. Для двух короткопериодических комет, принадлежащих семейству Юпитера (JFCs) – 103P/Hartley 2 и 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková, $D/H_{H_2O}$ оказалось равно (103P), или близко (45P) значению $D/H_{SMOW}$ (рис. 2), что свидетельствовало, о том, что короткопериодические кометы могли быть одним из вероятных источников летучих на Земле. Однако результаты изотопных исследований, проведенных в ходе эксперимента “Rosetta”, не подтвердили этих предположений, поскольку для JFC 67P было получено $D/H_{H_2O} = (5.3 \pm 0.7) \times 10^{-4}$ (Altwegg и др., 2015), т.е. более чем в три раза выше земной величины. Между тем в 2019 г. были опубликованы данные по $D/H_{H_2O}$ еще для одной короткопериодической кометы семейства Юпитера – 46P/Wirtanen (Lis и др., 2019): оно оказалось практически равным земному значению и составило $(1.61 \pm 0.65) \times 10^{-4}$.

У всех долгопериодических комет (LPCs) $D/H_{H_2O}$ превышало $D/H_{SMOW}$ в 2–3 раза, за исключением кометы C/2014 Q2 (Lovejoy), у которой, согласно наземным наблюдениям в доперигельный период (Biver и др., 2016), оно оказалось близким SMOW: $D/H_{H_2O} = (1.4 \pm 0.4) \times 10^{-4}$. Годом позже были опубликованные результаты измерений, проведенные для той же кометы, но в постперигельный период (Paganini и др., 2017), когда было получено $D/H = (3.02 \pm 0.87) \times 10^{-4}$. Возможные причины столь существенного различия подробно обсуждаются в (Paganini и др., 2017), но однозначного объяснения этого факта пока нет.

Свидетельствует ли результат определения $D/H_{H_2O}$, полученный для 67P, о немонотонном характере зависимости $D/H_{H_2O}(r)$, возможность которого была рассмотрена в (Yang и др. 2013), или о том, что, учитывая данные (Biver и др., 2016) по комете C/2014 Q2 (Lovejoy), зоны формирования двух семейств в значительной степени перекрывались и были растянуты в широком диапазоне гелиоцентрических расстояний (Brasser, Morbidelli, 2013), сказать в настоящее время трудно. Возможно также, что близкие к земным значениям $D/H_{H_2O}$ в кометах, в будущем будут скорректированы в сторону их увеличения, если подтвердится гипотеза, высказанная в (Lis и др., 2019), что низкие значения $D/H_{H_2O}$ характерны лишь для гиперактивных комет, к которым относятся и 103P/Hartley 2, и 46P/Wirtanen. У таких комет площадь газовыделения больше половины общей площади поверхности ядра, а радиус не превышает $<\sim 1.2$ км. Это увеличение площади происходит за счет того, что гиперактивные кометы имеют два источника поступления $H_2O_г$ в кому: само ядро и переотложенное, возможно переиспаренное вещество в виде ледяных зерен – так называемый, распределенный источник, который вероятно и обеспечивает снижение изотопного состава водорода кометной воды. Однако механизм изменения изотопного состава воды при переиспарении в вакууме, предложенный в (Lis и др., 2019), непонятен. Кроме того, во многих работах подчеркивается значительная неопределенность получаемого значения $D/H_{H_2O}$, благодаря ошибкам экспериментальных определений темпов выделения водяного пара, поэтому вполне вероятно, что часть значений будет впоследствии скорректировано.

Недавно были опубликованы значения $D/H_{H_2O}$ для основных объектов системы Сатурна: поверхности кольца B и регулярных спутников Реи, Гипериона и Япета, полученные по результатам спектральных исследований в эксперименте Cassini-Huygens (Clark и др., 2019). Все значения оказались близки VSMOW и значению D/H в молекуле метана (Nixon и др., 2012) в атмосфере крупнейшего регулярного спутника Сатурна Титана. Отметим, что метан, вероятнее всего, унаследовал изотопный состав водорода от молекул воды, которые участвовали в его образовании в условиях субповерхностного океана (Дорофеева, 2016). Ранее в водных плюмах Энцелада было экспериментально определено высокое, “кометное” значение $D/H_{H_2O} = (2.9 \pm 1.5) \times 10^{-4}$ (Waite и др., 2009), но для поверхности оно оказалось на треть ниже, что приближает его к $D/H_{SMOW}$. Если полученные значения $D/H_{H_2O}$ для колец и регулярных спутников Сатурна не обусловлены их постаккреционными изменениями, например, взаимодей-

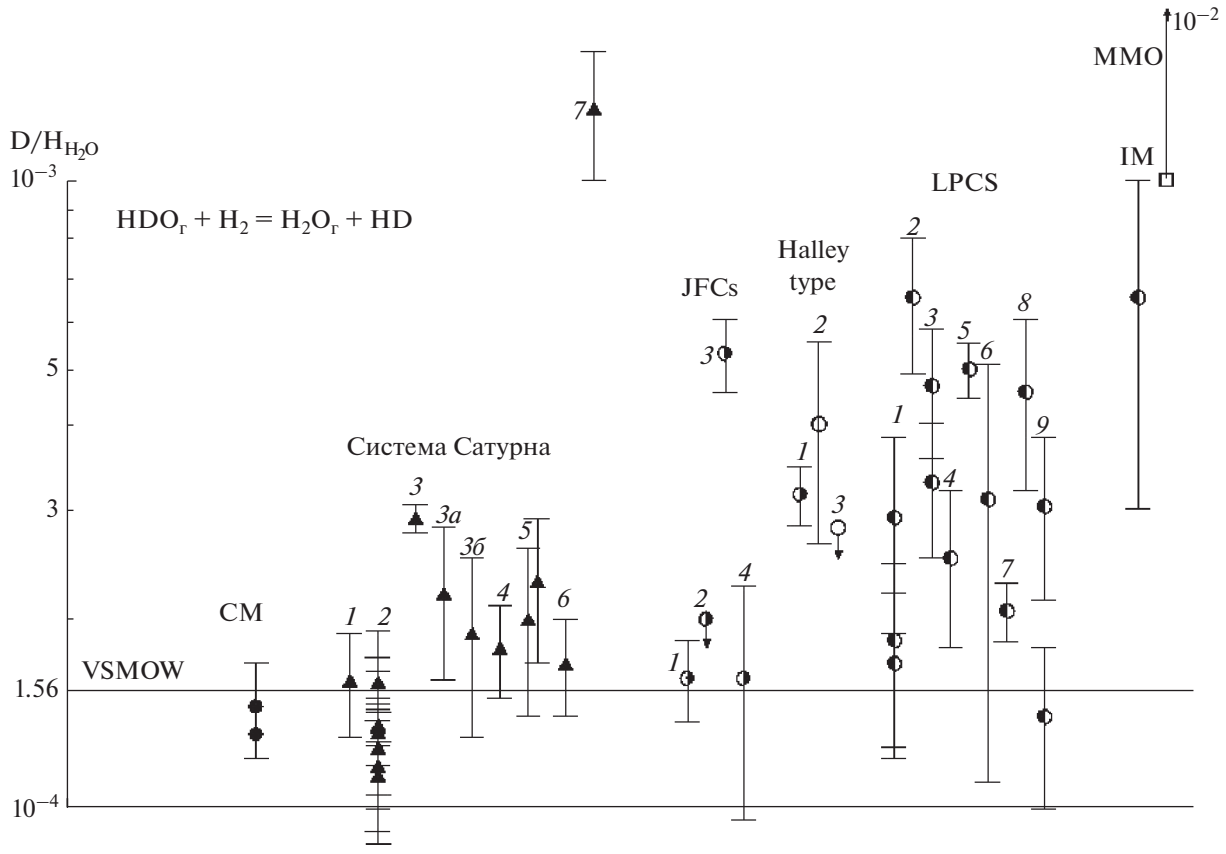


**Рис. 2.** Значения изотопных отношений водорода в молекуле воды ($D/H_{H_2O}$), измеренных в объектах внешней Солнечной системы в сравнении с данными для углистых CM хондритов и Венского стандарта морской воды Земли (VSMOW). Система Сатурна: *1* – кольцо B; регулярные спутники: *2* – $D/H_{CH_4}$ в атмосфере Титана; *3* – водные плюмы Энцелада; *3а* – поверхность Энцелада, северное полушарие; *3б* – поверхность Энцелада, южное полушарие; *4* – Рея; *5* – Гиперион; *6* – Япет: *7* – Феба (захваченный спутник). Короткопериодические кометы семейства Юпитера (JFCs): *1* – 103P/Hartley; *2* – 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková; *3* – 67P/C-G; *4* – 246P/Wirtanen. Кометы Галлеевского типа (Halleytipe): *1* – 1P/Halley; *2* – 8P/Tuttle; *3* – 153P/Ikeya-Zang. Долгопериодические кометы (LPCs): *1* – C/1996 B2 (Hyakutake); *2* – C/2012 (Lemmon); *3* – C/1995O1 (Hale-Bopp); *4* – C/200 T7 (LINEAR); *5* – C/2007 N3 (Lulin); *6* – D/2012 S1 (ISON); *7* – C/2009P1 (Garrad); *8* – C/2001 Q4 (NEAT); *9* – C/2014 (Lovejoy).

ствием поверхностных льдов с солнечным ветром, то возникает вопрос: как далеко радиальный транспорт мог выносить газ из внутренних областей диска и достигал ли он зоны образования не только протоспутниковых, но и протокометных тел. Все имеющиеся на данный момент данные по изотопным отношениям водорода в молекуле воды внешних регионов Солнечной системы представлены на рис. 2 в форме, впервые предложенной в (Hartogh и др., 2011).

Таким образом, роль комет в доставке летучих на внутренние планеты, как и механизм их образования остается неясным, но аргументы, приведенные ниже, позволяют говорить, что вещество Главного пояса астероидов, подобное CI/CM углистым хондритам, было все же основным источником воды и иных летучих на земные планеты (Halliday, 2013; Alexander и др., 2018). И хотя в нем валовое содержание воды ниже, чем в кометах, расчеты показали, что аккреции ~2–4% от массы Земли хондритового вещества типа CI/CM было бы достаточно для появления океанов на нашей планете (Alexander и др., 2012; Marty, 2012). И доказательства того, что JFCs не являлись основным источником летучих на Земле, были получены в эксперименте Rosetta. Так в комете 67P впервые было определено значение мольного отношения аргона к молекулярному азоту $^{36}Ar/N_2 = (9.1 \pm 0.3) \times 10^{-5}$ (Balsiger и др., 2015), в то время как на Земле $^{36}Ar/N_2 = 0.24 \times 10^{-5}$ (Halliday, 2013). Таким образом, кометы почти в 40 раз обогащены $^{36}Ar$ по сравнению с Землей, и трудно представить себе процесс, в результате которого ею будет потеряно 98% первоначально аккрецированного $^{36}Ar$.

Еще одно доказательство вытекает из впервые оцененного из данных эксперимента Rosetta содержания $N_2$ по отношению к CO. В серии из 138 замеров значение мольного отношения $N_2/CO$ менялось от $1.7 \times 10^{-3}$ до $1.6 \times 10^{-2}$, составив в

среднем $(5.70 \pm 0.66) \times 10^{-3}$ (Balsiger и др., 2015). Это на 2 порядка меньше, чем $NH_3/CO$, определенное ранее для нескольких комет (Dello Russo и др., 2016; Marty и др., 2016). В то же время известно, что в небуле основными азотсодержащими молекулами были $N_2$ и $NH_3$, имевшими различный изотопный состав азота. Для $N_2$ он был определен по солнечному ветру: $^{14}N_{N_2}/^{15}N_{N_2} = 441 \pm 5$ (Marty и др., 2010), а для $NH_3$ по кометным данным. Для 13 комет был измерен изотопный состав азота в радикале $NH_2$, который, как полагают, является продуктом диссоциации $NH_3$: $^{14}NH_2/^{15}NH_2 = 127$ (Rousselot и др., 2014). С этой оценкой согласуется значение $^{14}NH_2/^{15}NH_2 = 139 \pm 38$, полученное позднее для кометы C/2012 S1 (ISON) (Shinnaka и др., 2014). Отметим также, что эти значения близки к таковым в молекуле HCN и радикале CN, определенным в 23 кометах: $^{14}N_{HCN/CN}/^{15}N_{HCN/CN} = 147 \pm 6$.В атмосфере Земли $^{14}N_{N_2}/^{15}N_{N_2} = 272$ (Anders, Grevesse, 1989), что примерно соответствует среднему значению между изотопными составами $NH_2^+$ и $N_2$, если бы эти два соединения были бы аккрецированы Землей в равных мольных пропорциях. Как было показано выше, соотношение $NH_3$ и $N_2$ в веществе комет различается на 2 порядка и, таким образом, аккрецией кометного вещества невозможно обеспечить земное изотопное отношение $^{14}N/^{15}N$. Опираясь на данные Rosetta, авторы обобщающей работы (Marty и др., 2016), основываясь на сопоставлении изотопных составов летучих на Земле и в веществе комет, сделали вывод, что кометный вклад в баланс летучих Земли не мог превышать 1%. Динамические модели дают близкую оценку, согласно которой ≈4% земной воды может иметь кометное происхождение (Morbidelli и др., 2010; O'Brien и др., 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Миссия Rosetta-Philae к комете 67P/Чурюмова–Герасименко завершилась два года назад и многие из полученных ею результатов еще не до конца обработаны и осмыслены. Но некоторые итоги можно подвести уже сейчас. Полученные в ходе этого уникального космического эксперимента данные расширили наши представления о компонентном и изотопном составе вещества короткопериодических комет семейства Юпитера, о термодинамических условиях в транснептуновом регионе протопланетного газопылевого околосолнечного диска и динамических условий в нем, о составе первичных тел, из которых, помимо комет, в значительной мере образовались каменно-ледяные спутники планет-гигантов, тела транснептунового региона и койперовского пояса. Они, наряду сданными по составу других комет, позволяют более корректно оценить возможный вклад этих тел в состав летучих земных планет и планет-гигантов. Основные результаты определения химического и изотопного состава кометы 67P/Чурюмова–Герасименко в ходе космического эксперимента Rosetta-Philae и вытекающие из них следствия для космогонии и космохимииможно сформулировать следующим образом.

1. Химический и фазовый анализ минеральной фракции пыли 67P показал, что, как и в других кометах, она представляет собой неравновесную смесь веществ досолнечного и небулярного происхождения. Досолнечное вещество не подвергалось каким-либо изменениям, в том числе и с участием жидкой воды, что может служить одним из свидетельств отсутствия эффективного постаккреционного внутреннего нагрева кометных ядер. Таким образом, кометное вещество является практически единственным прямым источником знаний о составе протосолнечной материи. Обнаруженное зерно, подобное по составу CAI, – небулярного происхождения, служит доказательством существования миграции газопылевого вещества из внутренних зон диска в регион образования комет на ранней стадии эволюции Солнечной системы.

2. Доля минеральной фракции пыли 67P ($62 \pm 8$)%, ее состав подробно не изучался. Органическая фракция представлена тугоплавкими углеводородами ($38 \pm 8$ мас. %), аналогичными по составу нерастворимому органическому остатку углистых хондритов, но с более высоким атомным соотношением H/C, что указывает на их более примитивный характер. Атомное отношение $C/Si_{dust} = 5.5^{+1.4}_{-1.2}$, что в 7 раз превышает хондритовое. Характерной особенностью тугоплавкого органического вещества кометы 67P, как и кометы 1P/Halley, является высокое содержание азота: $N/C = 0.035 \pm 0.011$, что втрое выше, чем в углистых хондритах. Это свидетельствует о более низких температурах аккреции кометных ядер, чем родительских тел хондритов, что необходимо учитывать при построении динамических моделей околосолнечного диска.

3. В эксперименте Rosetta-Philae впервые было проанализировано вещество, отобранное непосредственно с поверхности кометного ядра. В его составе было идентифицировано 16 различных органических соединений, в том числе карбоксильные кислоты, полиоксиметилен, аминокислота глицин ($C_2H_5NO_2$), а также фосфор, без которых невозможен синтез белков; четыре соединения – метилизоцианат ($CH_3NCO$), ацетон ($CH_3COCH_3$), пропионовый альдегид ($C_2H_5CHO$) и ацетамид ($CH_3CONH_2$) – прежде в составе комет не обнаруживались. Некоторые из этих соединений, в особенности содержащие углерод-азотные связи, играют ключевую роль в синтезе

аминокислот, сахаров и нуклеинов. Таким образом, с учетом присутствия большого количества воды и углекислого газа, можно заключить, что кометное вещество содержит строительные блоки для синтеза аминокислот, сахаров и нуклеинов — необходимых компонентов для зарождения жизни. Полученные результаты приближают нас к пониманию происхождения жизни на Земле, но нужна теория, предлагающая механизм перехода от неживых строительных блоков к живому саморазвивающемуся веществу.

4. Состав ледяной фракции ядра кометы 67P изучался по составу комы, в которой было измерено относительное содержание 24 материнских молекул, в том числе таких макрокомпонентов, как $H_2O$, $CO_2$ и CO, а также легких углеводородов, соединений азота и серы и молекулярного кислорода $O_2$. Впервые в составе комы кометы был определен молекулярный азот $N_2$ и его относительное содержание: $N_2/H_2O = (8.9 \pm 2.4) \times 10^{-4}$, что более чем в 25 раз ниже солнечной пропорции. Дефицит азота, характерный для всех комет, свидетельствует, что температуры в регионе образования протокометных тел не достигали температур образования $N_{2(ice)}$ (~22 K), а аккумуляция высоколетучих $N_2$ и Ar возможно происходила в порах аморфного льда воды, образовавшегося в досолнечной небуле, о чем может свидетельствовать установленная тесная корреляция содержаний $N_2$ и $^{36}Ar$.

5. Впервые получены оценки относительных содержаний трех инертных газов: $Ar/H_2O = (5.8 \pm \pm 2.2) \times 10^{-6}$, $Kr/H_2O = (4.9 \pm 2.2) \times 10^{-7}$, $Xe/H_2O = = (2.4 \pm 1.1) \times 10^{-7}$, определен их изотопный состав. Самый летучий инертный газ – неон – обнаружен не был. Эти данные могут служить нижней оценкой для температур в регионе при создании моделей внутреннего строения околосолнечного газопылевого диска.

6. Показана зависимость состава и относительных содержаний газов комы как от гелиоцентрического расстояния, так и от освещаемого участка ядра кометы. Поверхностный слой вещества южного полушария оказался менее дегазирован, чем северного, что является следствием частичного разрушения поверхности южного полушария ядра при прохождении кометой перигелия. Колебания относительных содержаний компонентов комы, получаемых при дегазации близких участков поверхности, свидетельствуют о гетерогенности состава ядра в масштабах сотен метров. Все это осложняет сопоставление состава комы и состава летучих компонентов ядра кометы. Представляется, что достоверные сведения о составе ледяной фракции кометных ядер можно будет получить только при анализе *in situ* вещества, полученного с достаточных глубин из разных регионов.

7. Измерен ряд изотопных отношений. Установлено, что D/H в молекуле воды втрое выше земного, что противоречит предположениям, что основным источником воды и других летучих компонентов на Земле могли быть короткопериодические кометы. Вероятнее всего, их доля не превышала первых процентов.

Автор благодарит А.Т. Базилевского за ценные замечания к рукописи статьи.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ РАН при частичной поддержке гранта РФФИ 17-02-00507 и Программы Президиума РАН № 12.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Дорофеева В.А.* Генезис летучих регулярных спутников Сатурна. Происхождение атмосферы Титана // Геохимия. 2016. № 1. С. 11–31. (*Dorofeeva V.A.* Genesis of Volatile Components at Saturn's Regular Satellites. Origin of Titan's Atmosphere // Geochem. Int. 2016. V. 54. № 1. P. 7–26).

*Дорофеева В.А., Девина О.А.* Оценка массовой доли льда вода в каменно-ледяных планетезималях по космическим данным // Тр. Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ВЕСЭМПГ-18 / Ред. Луканин О.А. 2018. С. 306–309.

*Дорофеева В.А.* База данных по составу комет // Тр. Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии ВЕСЭМПГ-19 / Ред. Луканин О.А. 2019. С. 270–273.

*Емельяненко В.В.* Новые проблемы динамики и происхождения комет после космической миссии "Rosetta" // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 391–401 (*Emel'yanenko V.V.* Dynanics and origin of comets: New problems appeared after the *Rosetta* Space mission // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 371–381).

*Лаврухина А.К., Мендыбаев Р.А.* О генезисе космической пыли // Геохимия. 1987. № 12. С. 1674–1693.

*Макалкин А.Б., Дорофеева В.А.* Распределение температуры в околосолнечном протопланетном диске на последовательных стадиях его эволюции // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 6. С. 528–554 (*Makalkin A.B., Dorofeeva V.A.* Temperature distribution in the solar nebula at successive stages of its evolution // Sol. Syst. Res. 2009. V. 43. № 6. P. 508–532).

*Макалкин А.Б., Зиглина И.Н.* Образование планетезималей в транснептуновой области протопланетного диска // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. № 4. С. 330–343 (*Makalkin A.B., Ziglina I.N.* Formation of planetesimals in the trans-Neptunian region of the protoplanetary disk // Sol. Syst. Res. 2004. V. 38. № 4. P. 288–300).

*Маров М.Я., Ипатов С.И.* Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 402–410. (*Marov M.Ya., Ipatov S.I.* Delivery of water and volatiles to the terrestrial planets and the Moon // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 392–400).

*Явнель А.А.* К вопросу о составе пылевой компоненты кометных ядер // Геохимия. 1988. № 11. С. 1638–1642.

*Alexander C.M.O'D., Fogel M., Yabuta H., Cody G.D.* The origin and evolution of chondrites recorded in the elemental and isotopic compositions of their macromo-

lecular organic matter // Geochim. Et Cosmochim. Acta. 2007. V. 71. P. 4380–4403.

*Alexander C.M.O'D., Grossman J.N., Ebel D.S., Ciesla F.J.* The formation conditions of chondrules and chondrites // Science. 2008. V. 320. P. 1617–1619.

*Alexander C.M.O'D., Bowden R., Fogel M.L., Howard K.T., K. Herd C.D., Nittler L.R.* The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets // Science. 2012. V. 337. P. 721.

*Alexander C.M.O'D., McKeegan K.D., Altwegg K.* Water Reservoirs in Small Planetary Bodies: Meteorites, Asteroids, and Comets// Space Sci. Rev. 2018. V. 214. Iss. 1. Id. 36. 47 pp.

*Alexander C.M.O'D.* Quantitative models for the elemental and isotopic fractionations in chondrites: The carbonaceous chondrites // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2019. V. 254. P. 277–309.

*Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Bieler A., Bochsler P., Briois C., Calmonte U., Combi M., de Keyser J., Eberhardt P., and 21 coauthors.* 67P/Churyumov–Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio // Science. 2015. V. 347. Iss. 6220. 1261952-1. https://doi.org/10.1126/science.1261952

*Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.J., Bieler A., Calmonte U., Fuselier S.A., Goesmann F., Gasc S., Gombosi T.I., Le Roy L., and 7 coauthors.* Organics in comet 67P – a first comparative analysis of mass spectra from ROSINA–DFMS, COSAC and Ptolemy // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. S130–S141.

*Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements–Meteoritic and solar // Geochim. Et Cosmochim. Acta. 1989. V. 53. P. 197–214.

*Balsiger H., Altwegg K., Bar-Nun A., Berthelier J.-J., Bieler A., Bochsler P., Briois C., Calmonte U., Combi M., de Keyser J., and 21 coauthors.* Detection of argon in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Sci. Adv. 2015. V. 1. № 8. e1500377. https://doi.org/10.1126/sciadv.1500377

*Bardyn A., Baklouti D., Cottin H., Fray N., Briois C., Paquette J., Stenzel O., Engrand C., FischerH., Hornung K., and 16 coauthors.* Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. Iss. Suppl. 2. P. S712–S722.

*Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Mall U., Hviid S.F.S., Skorov Yu.V., Keller H.U.* Pinnacles on the 67P comet nucleus: Evidence for large scale erosion and hierarchical agglomeration of the nucleus // Planet. and Space Sci. 2017a. V. 140. P. 80–85.

*Basilevsky A.T., Mall U., Keller H.U., Skorov Y., Hviid S.F.S., Mottola S., Krasilnikov S., Dabrowski B.* Geologic analysis of the Rosetta NavCam, Osiris and ROLIS images of the comet 67P/Churyumov-Gerasimenko nucleus // Planet. and Space Sci. 2017b. V. 137. P. 1–19.

*Berger E.L., Zega T.J., Keller L.P., Lauretta D.S.* Evidence for aqueous activity on comet 81P/Wild 2 from sulfide mineral assemblages in Stardust samples and CI chondrites // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2011. V. 75. P. 3501–3513.

*Bieler A., Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Berthelier J.-J., Bochsler P., Briois C.*, Calmonte *U., Combi M., DeKeyser J., and 23 coauthors.* Abundant molecular oxygen in the coma of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Nature. 2015. V. 526. P. 678–681.

*Biver N., Moreno R., Bockelée-Morvan D., Sandqvist A., Colom P., Crovisier J., Lis D.C., Boissier J., Debout V., and 8 coauthors, the Odin team.* Isotopic ratios of H, C, N, O, and S in comets C/2012 F6 (Lemmon) and C/2014 Q2 (Lovejoy) // Astron. and Astrophys. 2016. V. 589. A78.

*Blum J., Gundlach B., Krause M., Fulle M., Johansen A., Agarwal J., von Borstel I., Shi X., Hu X., Bentley M.S., and 12 coauthors.* Evidence for the formation of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko through gravitational collapse of a bound clump of pebbles // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. Iss. Suppl. 2. P. S755–S773.

*Bockelée-Morvan D., Gautier D., Hersant F., Hure J.-M., Robert F.* Turbulent radial mixing in the solar nebula as the source of crystalline silicates in comets // Astron. and Astrophys. 2002. V. 384. P. 1107–1118.

*Bockelée-Morvan D.* An overview of comet composition // The Molecular Universe / Eds Cernicharo J., Bachiller R. IAU Symposium. Cambridge: Cambridge Univ. press, 2011. V. 280. P. 261–274.

*Bockelée-Morvan D., Crovisier J., Erard S., Capaccioni F., Leyrat C., Filacchione G., Drossart P., Encrenaz T., Biver N., de Sanctis M.-C., and 12 coauthors.* Evolution of $CO_2$, $CH_4$, and OCS abundances relative to $H_2O$ in the coma of comet 67P around perihelion from Rosetta/VIRTIS H observations // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. № 1. S170–S183.

*Bockelée-Morvan D., Rinaldi G., Erard S., Leyrat C., Capaccioni F., Drossart P., Filacchione G., Migliorini A., Quirico E., Mottola S., and 8 coauthors.* Comet 67P outbursts and quiescent coma at 1.3 AU from the Sun: dust properties from Rosetta/VIRTIS-H observations // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. S443–S458.

*Bouwman J., de Koter A., Dominik C., Waters L.B.F.M.* The origin of crystalline silicates in the Herbig Be star HD 100546 and in comet Hale-Bopp // Astron. and Astrophys. 2003. V. 401. P. 577–592.

*Bradley J.P.* How and where did GEMS form? // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2013. V. 107. P. 336–340.

*Brasser R., Morbidelli A.* Oort cloud and Scattered Disc formation during a late dynamical instability in the Solar System // Icarus. 2013. V. 225. Iss. 1. P. 40–49.

*Brownlee D.E., Horz F., Newburn R.L., Zolensky M., Duxbury T.C., Sandford S., Sekanina Z., Tsou P., Hanner M.S., Clark B.C., and 2 coauthors.* Surface of young Jupiter family comet 81 P/Wild 2: view from the Stardust spacecraft // Science. 2004. V. 304. № 5678. P. 1764–1769.

*Brownlee D.* The Stardustmission: analyzing samples from the edge of the solar system // Annu. Rev. Earth and Planet. Sci. 2014. V. 42. P. 179–205.

*Butner H.M., Charnley S.B., Ceccarelli C., Rodgers S.D., Pardo J.R., Parise B.*, Cernicharo *J., Davis G. R.* Discovery of interstellar heavy water // Astrophys. J. 2007. V. 659(2), L137–L140.

*Capaccioni F., Coradini A., Filacchione G., Erard S., Arnold G., Drossart P., De Sanctis M.C., Bockelee-Morvan D., Capria M.T., Tosi F., and 68 coauthors.* The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta // Science. 2015. V. 347 (6220). aaa0628.

*Ceccarelli C., Dominik C., Caux E., Lefloch B., Caselli P.* Discovery of deuterated water in a young protoplanetary disk // Astrophys. J. 2005. V. 631(1). L81–L84.

*Chyba C., Sagan C.* Comets as a source of Prebiotic Organic Molecules for the early Earth // Comets and the origin

and evolution of life / Eds Thomas P.J., Chyba C.F., McKay C.P. Springer. 1997. P. 147–173.

*Ciarletti V., Levasseur-Regourd A., Lasue J., Statz C., Plettemeier D., Herique A., Rogez Y., Kofman W.* CONSERT suggests a change in local properties of 67P/Churyumov-Gerasimenko's nucleus at depth // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. A40.

*Ciesla F.J., Sandford S.A.* Organic synthesis via irradiation and warming of ice grains in the solar nebula // Science. 2012. V. 336. P. 452–454.

*Clark B., Mason L.W., Kissel J.* Systematics of the CHON and other light-element particle populations in Comet Halley // Proc. 20th ESLAB Symp.on the Exploration of Halley's Comet. 1986. V. 3. P. 353-358 (SEE N87-26714 20-90).

*Clark B.* CHON-Na and Evidence for Large Scale Compositional Heterogeneity in the Cometary Nucleus // 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society, held 22–27 July 2018 in Moscow, Russia. LPI Contribution No. 2067. **2018**. id.6167

*Clark R.N., Brown R.H., Cruikshank D.P., Swayze G.A.* Isotopic ratios of Saturn's rings and satellites: Implications for the origin of water and Phoebe // Icarus. 2019. V. 321. P. 791–802.

*Cochran A.L., Levasseur-Regourd A.-C., Cordiner M., Hadamcik E., Lasue J., Gicquel A., Schleicher D.G., Charnley S.B., Mumma M.J., Paganini L., and 3 coauthors.* The Composition of Comets // Space Sci. Rev. 2015. V. 197. P. 9–46.

*Cody G.D., Yabuta H., Alexander C.M.O'D., Araki T., Kilcoyne A.L.D., and the STARDUST PET.* Placing comet 81P/Wild 2 organic particles into context with chondritic organic solids // Lunar and Planet. Sci. XXXVIII. 2007. 2286.

*Cooke R.J., Pettini M., Jorgenson R.A., Murphy M.T., Steidel C.C.* Precision measures of the primordial abundance of deuterium // Astrophys. J. 2014. V. 781. Iss. 1. Id. 31. 16 p.

*Corrigan C.M., Zolensky M.E., Dahl J., Long M., Weir J., Sapp C., Burkett P.J.* The porosity and permeability of chondritic meteorites and interplanetary dust particles // Meteorit. and Planet. Sci. 1997. V. 32. P. 505–515.

*Crovisier J., Leech K., Bockelee-Morvan D., Brooke T.Y., Hanner M.S., Altieri B., Keller H.U., Lellouch E.* The spectrum of Comet Hale–Bopp (C/199501) observed with the Infrared Space Observatory at 2.9AU from the Sun // Science. 1997. V. 275. P. 1904–1907.

*Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C., Marzari F., Pajola M., Rickman H., A'Hearn M.F., Auger A.-T., El-Maarry M.R., Fornasier S., and 38 coauthors.* The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2016. V. 592. Id. A63. 30 pp.

*Della Corte V., Rotundi A., Fulle M., Gruen E., Weissman P., Sordini R., Ferrari M., Ivanovski S., Lucarelli F., Accolla M., and 30 coauthors.* GIADA: Shining a light on the monitoring of the comet dust production from the nucleus of 67P/Churyumov–Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. Id. A13. 10 p.

*Della Corte V., Rotundi A., Fulle M., Ivanovski S., Green S. F., Rietmeijer F.J.M., Colangeli L., Palumbo P., Sordini R., Ferrari M., and 29 coauthors.* 67P/C-G inner coma dust properties from 2.2 au inbound to 2.0 au outbound to the Sun // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. P. S210–S219.

*Dello Russo N., Kawakita H., Vervack R.J., Weaver H.A., Vervack R.J., Jr.* Emerging trends and a comet taxonomy based on the volatile chemistry measured in thirty comets with high-resolution infrared spectroscopy between 1997 and 2013 // Icarus. 2016. V. 278. P. 301–332.

*Delsemme A.H.* Cometary origin of the biosphere // Icarus. 2000. V. 146. P. 313-325.

*Dhooghe F., De Keyser J., Altwegg K., Briois C., Balsiger H., Berthelier J.-J., Calmonte U., Cessateur G., Combi M.R., Equeter E., and 19 coauthors.* Halogens as tracers of protosolar nebula material in comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 472. P. 1336–1345.

*Davidsson B.J.R., Sierks H., Güttler C., Marzari F., Pajola M., Rickman H., A'Hearn M.F., Auger A.-T., El-Maarry M.R., Fornasier S.*, and *38 coauthors.* The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2016. V. 592. Id. A63. 30 pp.

*Dorschner J., Begemann B., Henning Th., Jäger C., Mutschke H.* Steps toward interstellar silicate mineralogy II. Study of Mg-Fe-silicate glasses of variable composition // Astron. and Astrophys. 1995. V. 300. P. 503–520.

*Dulieu F., Minissale M., Bockelée-Morvan D.* Production of $O_2$ through dismutation of $H_2O_2$ during water ice desorption: a key to understanding comet $O_2$ abundances // Astron. and Astrophys. 2017. V. 597. Id. A56. 5 pp.

*Engrand C., Duprat J., Dartois E., Benzerara K., Leroux H., Baklouti D., Bardyn A., Briois C., Cottin H., and 10 coauthors and the COSIMA team.*Variations in cometary dust composition from *Giotto* to *Rosetta*, clues to their formation mechanisms // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. S323–S330.

*El-Maarry M.R., Groussin O., Thomas N., Pajola M., Auger A.-T., Davidsson B., Hu X., HviidS. F., Knollenberg J., Güttler C., and 46 coauthors.* Surface changes on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko suggest a more active past // Science. 2017. V. 355. Iss. 6332. P. 1392–1395.

*Elsila J.E., Glavin D.P., Dworkin J.P.* Cometary glycine detected in samples returned by Stardust // Meteorit. and Planet. Sci. 2009. V. 44. Iss. 9. P. 1323–1330.

*Fabian D., Henning T., Jäger C., Mutschke H., Dorschner J., Wehrhan O.*Steps toward interstellar silicate mineralogy. VI. Dependence of crystalline olivine IR spectra on iron content and particle shape // Astron. and Astrophys. 2001. V. 378. № 1. P. 228–238.

*Filacchione G., Groussin O., Herny C., Kappel D., Mottola S., Oklay N., Pommerol A., Wright I., Yoldi Z., Ciarniello M., and 2 coauthors.* Comet 67P/CG Nucleus Composition and Comparison to Other Comets // Space Sci. Rev. 2019. V. 215. Iss. 1. Article id. 19. 46 pp.

*Flynn G.J.* Physical, Chemical, and Mineralogical Properties of Comet 81P/Wild 2 Particles Collected by Stardust // Earth Moon and Planets. 2008. V. 102. P. 447–459.

*Fomenkova M.N., Kerridge J.F., Marti K., McFadden L.A.* Compositional trends in rock-forming elements of Comet Halley dust // Science. 1992. V. 258. P. 266–269.

*Fornasier S., Hasselmann P.H., Barucci M.A., Feller C., Besse S., Leyrat C., Lara L., Gutierrez P.J., OklayN., Tubiana C., and 45 coauthors.* Spectrophotometric properties of the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from the OSIRIS instrument onboard the ROSETTA spacecraft // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. A30. 18 p.

*Fornasier S., Mottola S., Keller H.U., Barucci M.A., Davidsson B., Feller C., Deshapriva J.D.P., Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., and 43 coauthors.* Rosetta's comet 67P/Churyumov-Gerasimenko sheds its dusty mantle

to reveal its icy nature // Science. 2016. V. 354. Iss. 6319. P. 1566–1570.

*Fray N., Bardyn A., Cottin H., Altwegg K., Baklouti D., Briois C., Colangeli L., Engrand C., Fischer H., Glasmachers A., and 15 coauthors.* High-molecular-weight organic matter in the particles of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Nature. 2016. V. 538. P. 72–74.

*Fray N., Bardyn A., Cottin H., Baklouti D., Briois C., Engrand C., Fischer H., Hornung K., IsnardR., Langevin Y., and 19 coauthors.* Nitrogen-to-carbon atomic ratio measured by COSIMA in the particles of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. Suppl. 2. S506–S516.

*Fulle M., Della Corte V., Rotundi A., Green S.F., Ferrari M., Ivanovski S., Sordini R., Zakharov V.* The dust-to-ices ratio in comets and Kuiper belt objects // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. P. S45–S49.

*Fulle M., Bertini I., Della Corte V., Güttler C., Ivanovski S., La Forgia F., Lasue J., Levasseur-RegourdA. C., MarzariF., MorenoF., and 37 coauthors.* The phase function and density of the dust observed at comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2018. V. 476. P. 2835–2839.

*Fulle M., Blum J., Green S.F., Gundlach B., Herique A., Moreno F., Mottola S., Rotundi A., Snodgrass C.* The refractory-to-ice mass ratio in comets // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 482. P. 3326–3340.

*Gasc S., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Bieler A., Calmonte U., Fiethe B., Fuselier S., Galli A., Gombosi T., and 11 coauthors.* Change of outgassing pattern of 67P/Churyumov–Gerasimenko during the March 2016 equinox as seen by ROSINA // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. S108–S117.

*Geiss J., Gloeckler G.* Isotopic Composition of H, HE and NE in the Protosolar Cloud // Space Sci. Rev. 2003. V. 106. Iss. 1. P. 3–18.

*Goesmann F., Rosenbauer H., Bredehöft J.H.,Cabane M., Ehrenfreund P., Gautier T., Giri C., Krüger H., Le Roy L., MacDermott A.J., and 11 coauthors.* Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry // Science. 2015. V. 349. Iss. 6247, aab0689-1.

*Gonfiantini R.* Standards for stable isotope measurements in natural compounds // Nature. 1978. V. 271. P. 534–536.

*Greenberg J.M.* Making a comet nucleus // Astron. and Astrophys. 1998. V. 330. P. 375–380.

*Greenberg J.M.* From comets to meteors // Earth, Moon, and Planets. 2000. V. 82. P. 313–324.

*Guzman V. V., Oberg K. I., Loomis R., Qi C.* Cyanide Photochemistry and Nitrogen Fractionation in the MWC 480 Disk // Astrophys. J. 2015. V. 814. Iss.1. Id. 53.7 pp.

*Halliday A.N.* The origins of volatiles in the terrestrial planets // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2013. V. 105. P. 146–171.

*Harker D.E., Woodward C.E., Kelley M.S.P., Wooden D.H.* Hyperactivity and Dust Composition of Comet 103P/Hartley 2 During the EPOXI Encounter // Astron. J. 2018. V. 155. Iss. 5. Article id. 199. 12 pp.

*Hartogh P., Lis D.C., Bockelée-Morvan D., de Val-Borro M., Biver N., Küppers M., Emprechtinger M., Bergin E.A., Crovisier J., Rengel M.*, and *3 coauthors.* Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2 // Nature. 2011. V. 478(7368). P. 218-220.

*Hässig M., Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Berthelier J.J., Bieler A., Bochsler P., Briois C., CalmonteU., CombiM., and 26 coauthors.* Time variability and heterogeneity in the coma of 67P/Churyumov-Gerasimenko // Science. 2015. V. 347. Iss. 6220. article id. aaa0276

*Herny C., Mousis O., Marshall R., Thomas N., Rubin M., Wright I.P., the MiARD team.* New constraints on the chemical composition and outgassing of 67P/Churyumov-Gerasimenko // 49th Lunar and Planet. Sci. Conf. 19–23 March, 2018, held at The Woodlands, Texas. 2018. LPI Contribution No. 2083, id.2197

*Hilchenbach M., Kissel J., Langevin Y., Briois C., von Hoerner H., Koch A., Schulz R., Silén J., Altwegg K., Colangeli L., and 10 coauthors.* Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: close-up on dust particle fragments // Astrophys. J. Lett. 2016. V. 816. Iss. 2. Id. L32. 6 p.

*Hallis L.J., Huss G.R., Nagashima K., Taylor G.J., Halldórsson S.A., Hilton D.R., Mottl M.J., Meech K.J.* Evidence for primordial water in Earth's deep mantle // Science. 2015. V. 350. Iss. 6262. P. 795–797.

*Hoang M., Altwegg K., Balsiger H., Beth A., Bieler A., Calmonte U., Combi M.R., De Keyser J., FietheB., Fougere N., and 18 coauthors.* The heterogeneous coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by ROSINA: $H_2O$, $CO_2$, and CO from September 2014 to February 2016 // Astron. and Astrophys. 2017. V. 600. Id. A77. 13 pp.

*Hughes A.L., Armitage P.J.* Particle transport in evolving protoplanetary disks: implications for results from STARDUST // Astrophysical J. 2010. V. 719. P. 1633–1653.

*Ip W.-H., Lai I.-L., Lee J.-C., Cheng Y.-C., Li Y., Lin Z.-Y., Vincent J.-B., Besse S., Sierks H., BarbieriC., and 46 coauthors.* Physical properties and dynamical relation of the circular depressions on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2016. V. 591. A132

*Jessberger E.K., Christoforidis A., Kissel J.*Aspects of the major element composition of Halley's dust // Nature. 1988. V. 332. P. 691–695.

*Jorda L., Gaskell R., Capanna C., Hviid S., Lamy P., Ďurech J., Faury G., Groussin O., Gutiérrez P., Jackman C., and 38 coauthors.* The global shape, density and rotation of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from preperihelion Rosetta/OSIRIS observations // Icarus. 2016. V. 277. P. 257–278

*Joswiak D.J., Nakashima D., Brownlee D.E., Matrajt G., Ushikubo T., Kita N.T., Messenger S., Ito M.* Terminal particle from Stardust track 130: Probable Al-richchondrule fragment from comet Wild 2 // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2014. V. 144. P. 277–298.

*Joswiak D.J., Brownlee D.E., Nguyen A.N., Messenger S.* Refractory materials in comet samples // Meteorit. and Planet. Sci. 2017. V. 52. Iss. 8. P. 1612–1648.

*Jutzi M., Benz W., Toliou A., Morbidelli A., Brasser R.*How primordial is the structure of comet 67P? Combined collisional and dynamical models suggest a late formation // Astron. and Astrophys. 2017. V. 597. id. A61. 13 p.

*Keeney B.A., Stern S.A., Feldman P.D., A'Hearn M.F., Bertau J.-L., Feaga L.M., Knight M.M., Medina R.A., Noonan J., Parker J.Wm., and 6 coauthors.* Stellar Occultation by Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko Observed with *Rosetta*'s Alice Far-ultraviolet Spectrograph // Astron. J. 2019. V. 157. № 5. Id. 173. 7 p.

*Keller H.U., Mottola S., Davidsson B., Schröder S.E., Skorov Y., Kührt E., Groussin O., Pajola M., Hviid S.F., Preusker F., and 37 coauthors.* Insolation, erosion, and morphology of comet 67P/ChuryumovGerasimenko // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. Id. A34. 16 pp.

*Keller H.U., Mottola S., Hviid S.F., Agarwal J., Kührt E., Skorov Y., Otto K., Vincent J.-B., Oklay N., Schröder S.E.,*

*and 40 coauthors.* Seasonal Mass Transfer on the Nucleus of Comet 67P/ Chuyumov-Gerasimenko // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. Iss. 2. P. S357–S371.

*Kelley M.S., Lindler D.J., Bodewits D., A'Hearn M.F., Lisse C.M., Kolokolova L., Kissel J., Hermalyn B.* A distribution of large particles in the coma of Comet 103P/Hartley 2 // Icarus. 2013. V. 222. Iss. 2. P. 634–652.

*Kemper F., Vriend W.J., Tielens A.G.G.M.* The absence of crystalline silicates in the diffuse interstellar medium // Astrophys. J. 2004. V. 609. P. 826–837.

*Kemper F., Vriend W.J., Tielens A.G.G.M.* Erratum: 'The absence of crystalline silicates in the diffuse interstellar medium' (ApJ, 609, 826 [2004]) // Astrophys. J. 2005. V. 633. P. 534.

*Kissel J., Krueger F.R.* Organic dust in comet Halley // Nature. 1987. V. 328. Iss. 6126. P. 117.

*Knollenberg J., Lin Z.Y., Hviid S.F., Oklay N., Vincent J.-B., Bodewits D., Mottola S., Pajola M., Sierks H., Barbieri C.*, and *33 coauthors.* A mini outburst from the nightside of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko observed by the OSIRIS camera on Rosetta // Astron.and Astrophys. 2016. V. 596. id. A89. 10 pp.

*Kofman W., Herique A., Barbin Y., Barriot J.-P., Ciarletti V., Clifford S., Edenhofer P., Elachi C., Eyraud C., Goutail J.-P., and 16 coauthors.* Properties of the 67P/Churyumov–Gerasimenko interior revealed by CONSERT radar // Science. 2015. V. 349. Issue 6247.

*Lai I.-L., Ip W.-H., Su C.-C., Wu J.-S., Lee J.-C., Lin Z.-Y., Liao Y., Thomas N., Sierks H., Barbieri C., and 39 coauthors.* Gas outflow and dust transport of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. S533–S546.

*Lamy P.L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A.* The Sizes, Shapes, Albedos, and Colors of Cometary Nuclei // Comets II / Eds Festou M.C., Keller H.U., and Weaver H.A. 2005. P. 223–264.

*Lecuyer C., Gillet P., Robert F.* The hydrogen isotope composition of sea water and the global water cycle // Chem. Geol. 1998. V. 145. P. 249–261.

*Le Roy L., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Bieler A., Briois C., Calmonte U., Combi M.R., DeKeyser J., Dhooghe F., and 8 coauthors.* Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta/ROSINA // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. Id. A1. 12 pp.

*Levasseur-Regourd A.-C., Agarwal J., Cottin H., Engrand C., Flynn G., Fulle M., Gombosi T., Langevin Y., Lasue J., Mannel T., and 4 coauthors.* Cometary Dust // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. Iss. 3. Article id. 64. 56 pp.

*Li A., Draine B.T.* On ultrasmall silicate grains in the diffuse interstellar medium // Astrophys. J. Lett. 2001. V. 550. L213–L217.
https://doi.org/10.1086/319640

*Lis D.C., Bockelée-Morvan D., Güsten R., Biver N., Stutzki J., Delorme Y., Durán C., Wiesemeyer H., Okada Y.* Terrestrial deuterium-to-hydrogen ratio in water in hyperactive comets // Astron. Astrophys. 2019. V. 625. Id. L5. 8 pp.

*Lisse C.M., Van Cleve J., Adams A.C., A'Hearn M.F., Fernández Y.R., Farnham T.L., Armus L., Grillmair C.J., Ingalls J., Belton M.J.S., and 7 coauthors.* Spitzer spectral observations of the deep impact ejecta // Science. 2006. V. 313. P. 635–640.

*Lodders K.* Solar system abundances of the elements // Principles and Perspectives in Cosmochemistry / Eds Goswami A., Reddy B. E. Astrophys. and Space Science Proc. Berlin–Heidelberg: Springer Verlag, 2010. P. 379–417.

*Luspay-Kuti A., Hässig M., Fuselier S.A., Mandt K.E., Altwegg K., Balsiger H., Gasc S., Jäckel A., Le Roy L., Rubin M., and 8 coauthors.* Composition-dependent outgassing of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from ROSINA/DFMS Implications for nucleus heterogeneity? // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. A4.

*Mandt K.E., Mousis O., Marty B., Cavalié T., Harris W., Hartogh P., Willacy K.* Constraints from Comets on the Formation and Volatile Acquisition of the Planets and Satellites // Space Sci. Rev. 2015. V. 197. Issue 1–4. P. 297–342.

*Maquet L.* The recent dynamical history of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astron. And Astrophys.2015. V. 579. Id. A78. 5 pp.

*Marty B., Zimmermann L., Burnard P.G., Wieler R., Heber V.S., Burnett D.L., Wiens R.C., Bochsler P.* Nitrogen isotopes in the recent solar wind from the analysis of Genesis targets: Evidence for large scale isotope heterogeneity in the early solar system // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2010. V. 74. Iss. 1. P. 340–355.

*Marty B.* The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth // Earth and Planet. Sci. Lett. 2012. V. 313. P. 56–66.

*Marty B., Avice G., Sano Y., Altwegg K., Balsiger H., Hässig M., Morbidelli A., Mousis O., Rubin M.* Origins of volatile elements (H, C, N, noble gases) on Earth and Mars in light of recent results from the ROSETTA cometary mission // Earth and Planet. Sci. Lett. 2016. V. 441. P. 91–102.

*Marty B., Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Bekaert D.V., Berthelier J.-J., Bieler A., Briois C., Calmonte U., Combi M., and 20 coauthors.* Xenon isotopes in 67P/Churyumov-Gerasimenko show that comets contributed to Earth's atmosphere // Science. 2017. V. 356. P. 1069–1072.

*Matzel J.E.P., Ishii H.A., Joswiak D., Hutcheon I.D., Bradley J.P., Brownlee D., Weber P.K., Teslich N., Matrajt G., McKeegan K.D., MacPherson G.J.* Constraints on the formation age of cometary material from the NASA Stardust mission // Science. 2010. V.328. P. 483–486.
https://doi.org/10.1126/science.1184741

*Meech K.J.* Setting the scene: what did we know before Rosetta? // Philos. Trans. Roy. Soc. 2017. A. V. 375. Iss. 2097. id. 20160247.

*Merouane S., Stenzel O., Hilchenbach M., Schulz R., Altobelli N., Fischer H., Hornung K., Kissel J., Langevin Y., Mellado E., and 2 coauthors.* Evolution of the physical properties of dust and cometary dust activity from 67P/Churyumov-Gerasimenko measured in situ by Rosetta/COSIMA // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. Iss. Suppl. 2. P. S459–S474.

*Mikouchi T., Tachikawa O., Hagiya K., Ohsumi K., Suzuki Y., Uesugi K., Takeuchi A., Zolensky M.E.* Mineralogy and crystallography of comet 81P/Wild 2 particles // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXVIII. 2007. Abstract 1946.

*Migliorini A., Piccioni G., Capaccioni F., Filacchione G., Bockelée-Morvan D., Erard S., Leyrat C., Combi M.R., Fougere N., Crovisier J., and 7 coauthors.* Water and carbon dioxide distribution in the 67P/Churyumov-Gerasimenko coma from VIRTIS-M infrared observations // Astron. and Astrophys. 2016. V. 589. id. A45. 12 pp.

*Morbidelli A., Brasser R., Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K.* Evidence from the asteroid belt for a violent past evolution of Jupiter's orbit // Astron. J. 2010. V. 140. P. 1391–1401.

*Morbidelli A., Rickman H.* Comets as collisional fragments of a primordial planetesimal disk // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. id. A43. 12 pp.

*Moreno F., Snodgrass C., Hainaut O., Tubiana C., Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., KoschnyD., RickmanH., and 44 coauthors.* The dust environment of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from Rosetta OSIRIS and VLT observations in the 4.5 to 2.9 AU heliocentric distance range inbound // Astron. and Astrophys. 2016. V. 587. id. A155. 12 p.

*Morse A., Mousis O., Sheridan S., Morgan G., Andrews D., Barber S., Wright I.* Low $CO/CO_2$ ratios of comet 67P measured at the Abydos landing site by the Ptolemy mass spectrometer // Astron. and Astrophys. 2015. V. 583. id. A42. 4 p.

*Mousis O., Lunine J.I., Luspay-Kuti A., Guillot T., Marty B., Ali-Dib M., Wurz P., Altwegg K., BielerA., HässigM., and 3 coauthors.* Protosolar Nebula Origin for the Ices Agglomerated by Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astrophys. J. Lett. 2016a. V. 819. Iss. 2. id. L33. 5 p.

*Mousis O., Ronnet T., Brugger B., Ozgurel O., Pauzat F., Ellinger Y., Maggiolo R., Wurz P., Vernazza P., Lunine J.I., and 6 coauthors.* Origin of Molecular Oxygen in Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astrophys. J. Lett. 2016b. V. 823. Iss. 2. id. L41. 5 p.

*Mumma M.J., Charnley S.B.* The Chemical Composition of Comets–Emerging Taxonomies and Natal Heritage // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 2011. V. 49. Iss. 1. P. 471–524.

*Nixon C.A., Temelso B., Vinatier S., Teanby N.A., Bézard B., Achterberg R.K., Mandt K.E., Sherrill C.D., Irwin P.G.J., Jennings D.E., and 3 coauthors.* Isotopic ratios in Titan's methane: measurements and modeling // Astrophys. J. 2012. V. 749. № 2. Id. 159. 15 p.

*O'Brien D.P., Izidoro A., Jacobson S.A., Raymond S.N., Rubie D.C.* The Delivery of Water During Terrestrial Planet Formation // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. Iss. 1. Id 47. 24 p.

*Olofsson J., Augereau J.-C., van Dishoeck E.F., Merín B., Lahuis F., Kessler-Silacci J., Dullemond C.P., Oliveira I., Blake G.A., Boogert A.C.A., and 6 coauthors.* C2D Spitzer-IRS spectra of disks around T Tauri stars. IV. Crystalline silicates // Astron. and Astrophys. 2009. V. 507. № 1. P. 327–345.

*Oró J.* Comets and the formation of biochemical compounds on the primitive Earth // Nature. 1961. V. 190. P. 389–390.

*Paganini L., Mumma M.J., Gibb E.L., Villanueva G.L.* Ground-based Detection of Deuterated Water in Comet C/2014 Q2 (Lovejoy) at IR Wavelengths // Astrophys. J. Lett. 2017. V. 836. L25. 7 pp.

*Pajola M., Lucchetti A., Fulle M., Mottola S., Hamm M., Da Deppo V., Penasa L., Kovacs G., MassironiM., ShiX., and 46 coauthors.* The pebbles/boulders size distributions on Sais: Rosetta's final landing site on comet 67P // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. Iss. Suppl 2. P. S636–S645.

*Paquette J.A., Engrand C., Stenzel O., Hilchenbach M., Kissel J.* Searching for calcium-aluminum-rich inclusions in cometary particles with Rosetta/COSIMA // Meteorit. and Planet. Sci. 2016. V. 51. Iss. 7. P. 1340–1352.

*Pätzold M., Andert T., Hahn M., Asmar S.W., Barriot J.-P., Bird M.K., Häusler B., Peter K., TellmannS., GrűnE., and 6 coauthors.* A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field // Nature. 2016. V. 530. Iss. 7588. P. 63–65.

*Pätzold M., Andert T.P., Hahn M., Barriot J.-P., Asmar S.W., Häusler B., Bird M.K., Tellmann S., Oschlisniok J., Peter K.* The Nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko – Part I: The global view – nucleus mass, mass-loss, porosity, and implications // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 483. Issue 2. P. 2337–2346

*Petaev M., Wood J.A.*The condensation with partial isolation model of condensation in the solar nebula // Meteorit. and Planet. Sci. 1998. V. 33. № 5. P. 1123–1137.

*Pollack J.B., Hollenbach D., Beckwith S.B., Simonelly D.P.* Composition and radiative properties of grains in molecular clouds and accretion disks // Astrophys. J. 1994. V. 421. P. 615–639.

*Preusker F., Scholten F., Matz K.-D., Roatsch T., Hviid S.F., Mottola S., Knollenberg J., Kürt E., Pajola M., Oklay N.*, and *8 coauthors.* The global meter-level shape model of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2017. V. 607. Id. L1. 5 pp.

*Quirico E., Orthous-Daunay F.-R., Beck P., Bonal L., Brunetto R., Dartois E., Pino T., Montagnac G., Rouzaud J.-N., Engrand C., Duprat J.* Origin of insoluble organic matter in type 1 and 2 chondrites: New clues, new questions // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2014. V. 136. P. 80–99.

*Quirico E., Moroz L.V., Schmitt B., Arnold G., Faure M., Beck P., Bonal L., Ciarniello M., CapaccioniF., FilacchioneG., and 27 coauthors.* Refractory and semi-volatile organics at the surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: Insights from the VIRTIS/Rosetta imaging spectrometer // Icarus. 2016. V. 272. P. 32–47.

*Rawlings J.M.C., Wilson T.G., Williams D.A.* A gas-phase primordial origin of O2 in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2019. V. 486. Iss. 1. P. 10–20.

*Robert F.* Solar system deuterium/hydrogen ratio // Meteorites and the Early Solar System II / Eds Lauretta D.S., McSween H.Y., Jr. Tucson: Univ. Arizona Press, 2006. P. 341–351.

*Rousselot P., Pirali O., Jehin E., Vervloet M., Hutsemékers D., Manfroid J., Cordier D., Martin-Drumel M.-A., Gruet S., Arpigny C., and 2 coauthors.* Toward a Unique Nitrogen Isotopic Ratio in Cometary Ices // Astrophys. J. Lett. 2014. V. 780. Issue 2. Article id. L17. 5 p.

*Rotundi A., Sierks H., Della Corte V., Fulle M., Gutierrez P.J., Lara L., Barbieri C., Lamy P.L., RodrigoR., and 72 coauthors.* Dust measurements in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in bound to the Sun // Science. 2015. V. 347. Iss. 6220. id. aaa3905.

*Rubin M., Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Berthelier J.-J., Bieler A., Bochsler P., Briois C., CalmonteU., Combi M., and 24 coauthors.* Molecular nitrogen in comet 67P/Churyumov–Gerasimenko indicates a low formation temperature // Science. 2015. V. 348(6231). P. 232–235.

*Rubin M., Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Berthelier J.-J., Briois C., Calmonte U., Combi M., De Keyser J., Fiethe B., and 17 coauthors.* Krypton isotopes and noble gas abundances in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // Sci. Adv. 2018. V. 4. № 7. eaar6297. https://doi.org/10.1126/sciadv.aar6297

*Rusol A.V., Dorofeeva V.A.* Thermal Evolution of the Nucleus of the Comet 67P for 120 Years: Numerical Simulations // Open astronomy. 2018. V. 27. Iss. 1. P. 175–182.

*Sagdeev R.Z., Kissel J., Bertaux J.-L., Angarov V.N., Blamont J.E., Büchler K., Evlanov E.N., Fomenkova M.N., von Hoerner H., Khromov V.N., and 5 coauthors.* The element composition of comet Halley dust particles: pre-

liminary results from the Vega PUMA analyzers // Sov. Astron. Lett. 1987. V. 12. № 4. P. 254–256.

*Sandford S.A., Aléon J., Alexander C.M.O.'D., Araki T., Bajt S., Baratta G.A., Borg J., Bradley J.P., Brownlee D.E., Brucato J.R., and 45 coauthors.* Organics Captured from Comet 81P/Wild 2 by the Stardust Spacecraft // Science. 2006. V. 314. Iss. 5806. P. 1720–1724.

*Schulze H., Kissel J., Jessberger E.* Chemistry and mineralogy of Comet Halley's dust // Stardust to Planetesimals / Eds Pendleton Y.J., Tielens A.G.G.M. ASP Conf. Series. 1997. V. 122. P. 397–414.

*Shinnaka Y., Kawakita H., Kobayashi H., Nagashima M., Boice D.C.* $^{14}NH_2/^{15}NH_2$ ratio in Comet C/2012 S1 (ISON) observed during its outburst in 2013 November // Astrophys. J. Lett. 2014. V. 782. Iss. 2. Id. L16. 4 p.

*Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Keller H.U., Agarwal J., A'Hearn M.F., Angrilli F., and 57 coauthors.* On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko // Science. 2015. V. 347 (6220)aaa1044 (2015). https://doi.org/10.1126/science.aaa1044

*Stenzel O.J., Hilchenbach M., Merouane S., Paquette J., Varmuza K., Engrand C., Brandstätter F., Koeberl C., Ferriére L., Filzmoser P., Siljeström S.* Similarities in element content between comet 67P/Churyumov-Gerasimenko coma dust and selected meteorite samples // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 469. S492–S505.

*Stodolna J., Jacob D., Leroux H.* Mineralogy and petrology of Stardust particles encased in the bulb of track 80: TEM investigation of the Wild 2 fine-grained material // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2012. V. 87. P. 35–50.

*Sykes M.V., Walker R.G.* The nature of comet nuclei // Asteroids, Comets, Meteors /Eds Harris A.W., Bowell E. Houston: LPI, 1992. P. 587-591. ISBN 0-942862-07-04.

*Taquet V., Furuya K., Walsh C., van Dishoeck E.F.* A primordial origin for molecular oxygen in comets: a chemical kinetics study of the formation and survival of $O_2$ ice from clouds to discs // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2016. V. 462. S99–S115.

*Taylor G.G.T., Altobelli N., Buratti B.J., Choukroun M.* The Rosetta mission orbiter science overview: The comet phase // Philos. Trans. Roy. Soc. 2017. A 375: 20160262.

*Thomas N., El Maarry M.R., Theologou P., Preusker F., Scholten F., Jorda L., Hviid S.F., Marschall R., Kührt E., Naletto G., and 10 coauthors.* Regional unit definition for the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko on the SHAP7 model // Planet. and Space Sci. 2018. V. 164. p. 19–36.

*Vincent J.-B., Bodewits D., Besse S., Sierks H., Barbieri C., Lamy P., Rodrigo R., Koschny D., RickmanH., Keller H., and 57 coauthors.* Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse // Nature. 2015. V. 523, Iss. 7558. P. 63–66.

*Vincent J.-B., Oklay N., Pajola M., Höfner S., Sierks H., Hu X., Barbieri C., Lamy P. L., Rodrigo R., Koschny D., and 45 coauthors.* Are fractured cliffs the source of cometary dust jets? Insights from OSIRIS/Rosetta at 67P/Churyumov-Gerasimenko // Astron. and Astrophys. 2016a. V. 587. id. A14. 15 p.

*Vincent J.-B., A'Hearn M.F., Lin Z.-Y., El-Maarry M.R., Pajola M., Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D. and 45 coauthors.* Summer fireworkson comet 67P // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2016b. V. 462. S184–S194.

*Waite J.H., Lewis W.S., Magee B.A., Lunine J., McKinnon W.B., Glein C.R., Mousis O., Young D.T., Brockwell T., Weslake J., and 6 coauthors.* Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and $^{40}Ar$ in the plume // Nature. 2009. V. 460(7254). P. 487-490.

*Whipple F.L.* A comet model. I. The acceleration of comet Encke // Astrophys. J. 1950. V. 111. P. 375–394.

*Wooden D.H.* Cometary refractory grains: interstellar and nebular sources // Space Sci. Rev. 2008. V. 138. P. 75–108.

*Wooden D.H., Ishii H.A. Zolensky M.E.* Cometary dust: the diversity of primitive refractory grains// Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2017. V. 375. Iss. 2097. id. 20160260.

*Wooden D.H., Stroud R.* The Diversity of Refractory Organic Material in Comets // 42nd COSPAR Scientific Assembly. 2018. 14-22 July 2018, Pasadena, California, USA. Abstract id. F3.2-11-18.

*Wright I.P., Sheridan S., Barber S.J., Morgan G.H., Andrews D.J., Morse A.D.* CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by Ptolemy // Science. 2015. V. 349. Iss. 6247. aab0673-1.

*Yang L., Ciesla F.J., Alexander C.M.O'D.* The D/H ratio of water in the solar nebula during its Formation and evolution // Icarus. 2013. V. 226(1). P. 256–267.

*Yildiz U.A., Acharyya K., Goldsmith P.F., van Dishoeck E.F., Melnick G., Snell R., Liseau R., Chen J.-H., Pagani L., Bergin E., and 7 coauthors.* Online Data Catalog: NGC 1333-IRAS 4A $C^{18}O$, NO and $O_2$ spectra //Astron. and Astrophys. 2013. V. 558. A58.

*Zolensky M.E., Nakamura-Messenger K., Rietmeijer F.J.M., Leroux H., Mikouchi T., Ohsumi K., Velbel M.* Comparing Wild 2 particles to chondrites and IDPs // Meteorit. and Planet. Sci. 2008. V. 43. P. 261–272.