

УДК 523.64

РОЛЬ РАДИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МАЛЫХ ТЕЛ ВНЕШНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ¹

© 2022 г. В. А. Дорофеева*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ) РАН, Москва, Россия

*E-mail: dorofeeva@geokhi.ru

Поступила в редакцию 30.07.2021 г.

После доработки 11.10.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

В работе обобщены экспериментальные данные об особенностях минерального, химического и изотопного составов малых тел Солнечной системы — астероидов, спутников Сатурна, а также ядер комет различных динамических типов, которые свидетельствуют, что при образовании этих тел значительную роль играло смешение веществ различного генезиса — досолнечного и небулярного, — т.е. вещества, образовавшегося в околосолнечном протопланетном газопылевом аккреционном диске, называемом также небулой. К досолнечному веществу, имеющему межзвездное происхождение, относятся аморфные железо-магниево-силикатные, тугоплавкие органические соединения, летучие органические соединения, аморфный лед воды, а также льды CO₂, NH₃, CH₃OH, CO и ряд других. Небулярное происхождение имеют обогащенные алюминием, кальцием и титаном тугоплавкие включения (CAIs), мелкокристаллические магниево-силикатные, а также кристаллический лед воды, у которого изотопный состав водорода в несколько раз ниже, чем у льда воды протосолнечной небулы. Смешение веществ досолнечного и небулярного происхождения могло быть вызвано существованием в околосолнечном диске на ранних этапах его эволюции, помимо основного аккреционного потока газопылевого вещества через диск на Солнце, потока, двигавшегося в противоположном направлении — от Солнца, из внутренних горячих областей околосолнечного диска наружу в его внешние регионы. Там небулярное вещество смешивалось с протосолнечным веществом, выпадавшим в первый миллион лет эволюции на диск из окружающей его аккреционной оболочки, в основном на его торец. Имеющийся в настоящее время комплекс экспериментальных данных позволяет полагать, что именно смешением вещества из двух зон околосолнечного диска с существенно разными *P-T*-условиями можно объяснить существование во внешнем регионе Солнечной системы химически и изотопно гетерогенных каменно-ледяных тел.

Ключевые слова: Солнечная система, радиальный транспорт вещества, CAIs, кристаллические и аморфные силикаты, малые каменно-ледяные тела, ледяные спутники, кометы, неоднородность химического и изотопного состава, D/H_{H₂O}

DOI: 10.31857/S0320930X22020037

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы благодаря успехам космических миссий ESA и NASA (Cassini-Huygens, Rosetta, New Horizons), а также наблюдениям с космическими (HST—Hubble Space Telescope, Spitzer Space Telescope) и с наземными телескопами (WHT—William Herschel Telescope, Испания; VLT—Very Large Telescope, Чили) была получена новая информация относительно строения, а также химического и изотопного составов многих малых тел внешней Солнечной системы. К ним относятся спутники планет-гигантов, объекты пояса Койпера и ядра комет, сосредоточенные главным образом в рассеянном диске и облаке Оорта. Все эти популяции весьма многочислен-

ны, достаточно сказать, что на сегодняшний день открыто у Юпитера 79 спутников и 82 у Сатурна, а в поясе Койпера, в рассеянном диске и в облаке Оорта суммарно находится ~10¹³–10¹⁴ тел или более того (подробнее см. Кусков и др., 2009; Clark и др., 2019; Vockelée-Morvan и др., 2015; Dello Russo и др., 2016; Meech, 2017; Дорофеева, 2020 и др.).

Все перечисленные объекты (за исключением Ио — ближайшего к Юпитеру его регулярного спутника) содержат в значительных количествах лед воды, но, как показали измерения, изотопный состав водорода в них различен (Clark и др., 2019; Vockelée-Morvan и др., 2015). В некоторых объектах он близок к изотопному составу льда воды межзвездных молекулярных облаков, как, например, у ледяной поверхности Фебы (Clark и

¹ По материалам VII Бредихинских чтений (май 2021 г.).

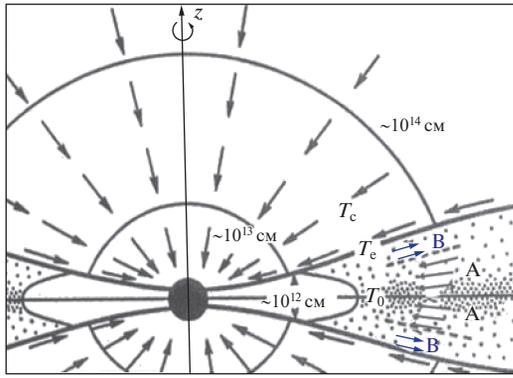


Рис. 1. Схема образования диска с умеренным угловым моментом. Диск и протосолнце, вращающиеся вокруг вертикальной оси “ z ”, погружены в аккреционную оболочку (внешний круговой контур), из которой газопылевое вещество выпадает на протосолнце (стрелки). Внешняя часть оболочки оптически непрозрачна; во внутренней части (внутренний круговой контур) — пыль отсутствует, так как испарилась. T_c , T_e и T_0 — температуры в аккреционной оболочке, на фотосфере и в средней плоскости диска, соответственно. Поток газа и пыли: (А) — аккреционный, из диска и (В) — от Солнца через диск в его внешние регионы. (Модификация рис. П.1 из кн. Дорофеевой, Макалкина, 2004).

др., 2019) — захваченного спутника Сатурна. А в некоторых объектах изотопный состав водорода близок к изотопному составу воды Земли, как, например, в комете 103P/Hartley (Hartogh и др., 2011), и он мог сформироваться только во внутренней теплой области околосолнечной небулы. Кроме того, в составе минеральной компоненты большинства комет, помимо аморфных силикатов досолнечного генезиса, были идентифицированы мелкокристаллические магниевые силикаты, а в некоторых кометах еще и обогащенные алюминием, кальцием и титаном тугоплавкие включения, известные как CAIs. Образование этих минеральных фаз связывается с конденсационными процессами, происходившими в околосолнечном протопланетном диске на самых ранних стадиях его эволюции в областях, близких к Солнцу. Эти экспериментальные данные дают основание полагать, что в состав каменно-ледяных тел внешнего региона Солнечной системы вошло вещество не только досолнечного, но и небулярного происхождения, образовавшееся во внутренних областях протопланетного диска. Поэтому изучение особенностей строения, химического и изотопного составов тел внешней Солнечной системы может пролить свет на динамические и термодинамические условия в околосолнечном газопылевом диске на самых ранних этапах ее эволюции.

В работе обобщены все имеющиеся на сегодняшний день космохимические данные, свидетельствующие, что на самых ранних этапах эволю-

ции в околосолнечном протопланетном газопылевом аккреционном диске помимо аккреционного существовал поток газопылевого вещества, двигавшегося от Солнца, который мог достигать самых внешних регионов. Показано, что вещество, переносимое этим потоком, оказало существенное влияние на химический и изотопный состав каменно-ледяных тел, сформировавшихся во внешней части Солнечной системы.

CAIs В ВЕЩЕСТВЕ ХОНДРИТОВ И ЯДРАХ КОМЕТ КАК ИНДИКАТОР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАННЕЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Реальность существования потока газопылевого вещества, двигавшегося в противофазе к основному аккреционному потоку (потоки А и В на рис. 1), признавалась достаточно давно (Урпин, 1984). Его наличие имело веское неоспоримое доказательство — это обнаружение в 1969 г. в веществе хондритов CAIs (Ca-Al-inclusions) — обогащенных алюминием и кальцием тугоплавких включений. Их сохранность была обусловлена тем, что родительские тела хондритов никогда не подвергались экстремальному нагреву, приводившему к их плавлению и дифференциации. Выдающееся значение этого открытия отметил один из основоположников космохимии Гарольд Юри, сказав, что в 1969 г. произошли два величайших события, во многом изменившие и расширившие наши знания об окружающем мире. Первое — это высадка на Луну астронавтов и доставка на Землю лунного вещества и второе — открытие белых, тугоплавких, обогащенных алюминием и кальцием включений в хондритах. И это действительно было так.

Во-первых, как было показано еще в работе (Larimer, 1967), наиболее тугоплавкие соединения, впоследствии обнаруженные в CAIs (Al_2O_3 , $CaTiO_3$, и др.), могли образоваться только при очень высоких температурах ($T > 1600$ К, общее давление принималось равным 6.6×10^{-3} атм) в результате прямой конденсации из газа солнечного состава (использовались таблицы космических обилий (Cameron, 1963)). Более поздние термодинамические расчеты подтвердили этот вывод (Grossman, 1972; Li и др., 2020 и многие другие работы). Открытие CAIs дало основание окончательно отклонить гипотезу об образовании тел Солнечной системы из холодных осколков, захваченных Солнцем — эта теория в свое время активно развивалась О.Ю. Шмидтом (1957). Существование CAIs доказывало, что газопылевое вещество околосолнечного диска, во всяком случае внутренней его части, там, где формировались планеты земной группы и родительские тела метеоритов, было нагрето, а его пылевая компонента в значительной мере испарилась. При последую-

шем охлаждении из газовой фазы образовывался конденсат, в котором содержание элементов коррелировало с их летучестью и зависело, таким образом, от радиального расстояния от Солнца, на котором этот конденсат образовывался (Palme и др., 1988). Появилось понятие конденсационной дифференциации вещества, ее теория впоследствии активно развивалась в работах (Larimer, 1967; Larimer, Anders, 1967; 1970; Grossman, 1972; Lewis, 1972; Fegley, Lewis, 1980; Saxena, 1981; Petaev, Wood, 1997) и других.

Во-вторых, методами изотопной геохронологии было установлено, что CAIs были первыми конденсатами, являясь самыми древними из известных нам на сегодняшний день объектов Солнечной системы, поэтому их абсолютный возраст был принят за абсолютный возраст Солнечной системы, который сейчас оценивается значением 4567.30 ± 0.16 млн лет (Connolly и др., 2012).

В хондритах содержатся CAIs широкого спектра размеров — от мм до см, но в недавней работе (Larsen и др., 2020) была показана связь между размером CAIs и содержанием летучих, главным образом воды в хондритах различных типов. Считается, что чем больше в хондрите воды (реально она находится в связанном состоянии, в основном в виде гидросиликатов), тем дальше от Солнца его родительское тело образовалось. Можно выстроить ряд $CI > CH > CR > CV$, отражающий уменьшение содержания воды в хондритах разных типов. В статье (Larsen и др., 2020) было установлено, что минимальный размер CAIs в указанном ряду возрастает от мм до см, при этом CAIs максимальных размеров были найдены в наименее окисленных и, видимо, образовавшихся ближе всего к Солнцу (на наименьших радиальных расстояниях) CV-хондритах. Это дало авторам основание предположить, что такая стратификация по размерам была обусловлена тем, что CAIs выносились в зоны образования родительских тел хондритов газовым потоком, имевшим направление, противоположное направлению аккреции, при этом на большие радиальные расстояния, где образовывались тела с большим содержанием воды, выносилась более мелкая пыль, в том числе и более мелкие CAIs.

Относительно недавно были найдены CAIs и в составе пылевой компоненты ядер комет 1P/Halley (Schulze и др., 1997), 81P/Wild 2 (Matzel и др., 2010) и 67P/Churumov-Gerasimenko (Paquette и др., 2016), а также в большом кластере межпланетной пыли U2-20GCP, имеющем, вероятнее всего, кометное происхождение (Joswiak и др., 2014). Размер найденных в кометном веществе CAIs колеблется от ~1 до 15 мкм, что много меньше, чем в хондритах. Очевидно, что тугоплавкие включения, образованные конденсационным путем в близких к Солнцу регионах, могли попасть в зону

образования ядер комет ($r \geq 15-20$ а. е.) только благодаря радиальному транспорту вместе с газом на самых ранних стадиях эволюции околосолнечного диска, на что впервые было указано в (Brownlee и др., 2006).

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ОБОГАЩЕННЫЕ МАГНИЕМ СИЛИКАТЫ НЕБУЛЯРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЯДРАХ КОМЕТ

Еще один аргумент в пользу существования переноса вещества небулы из ближних к Солнцу регионов в зону образования кометных ядер — это присутствие в их минеральной компоненте другой, помимо CAIs, высокотемпературной фазы — мелкокристаллических обогащенных магнием силикатов. Этот факт впервые был отмечен в (Bockelée-Morvan и др., 2002) и впоследствии поддержан во многих работах (см. обзор Wooden и др., 2017).

Основную часть минеральной фракции кометных ядер составляют силикаты. Помимо кристаллических обогащенных магнием силикатов в кометных ядрах были идентифицированы аморфные силикаты, которые отличаются значительно большим содержанием железа, что свидетельствует об их образовании в более окисленных условиях. Аморфные железо-магниево-силикаты, впервые обнаруженные при наземных наблюдениях в ИК-диапазоне долгопериодической кометы C/1995 O1 Hale-Bopp (Crovisier, 1997), вероятнее всего, имеют досолнечное происхождение; подробнее в (Дорофеева, 2020). Следует отметить, что, в отличие от CAIs, идентификация которых требует непосредственного анализа кометного вещества, обнаружение силикатных зерен в кометных комах возможно дистанционно, когда кометы находятся на расстоянии $r = 0.1-3$ а. е. от Солнца. На таком r силикатные зерна с размером менее 1 мкм дают в средней ИК-области спектра широкие полосы, а о присутствии кристаллических силикатов свидетельствуют узкие пики в этом же диапазоне (Wooden и др., 2017 и ссылки в ней).

Кристаллические обогащенные магнием силикаты, представленные главным образом оливинами (Crovisier, 1997), были обнаружены в комах комет разных динамических типов: как *короткопериодических* — 103P/Hartley 2 (Crovisier и др., 2000), 81P/Wild 2 (Defouilloy и др., 2017), 9P/Tempel (Ootsubo и др., 2007), 78P/Gehrels (Ootsubo и др., 2007), 73P/Schwassmann-Wachmann (Harker и др., 2006), так и *долгопериодических* — 1P/Halley (Hanner и др., 1994; Wooden и др., 1999), C/2001Q4 (NEAT) (Wooden и др., 2004) и C/1995 O1 (Hale-Bopp) (Crovisier и др., 1997; Brucato и др., 1999). Размер силикатных зерен составляет ≤ 1 мкм, т.е. того же порядка, что и размеры обнаруженных в комет-

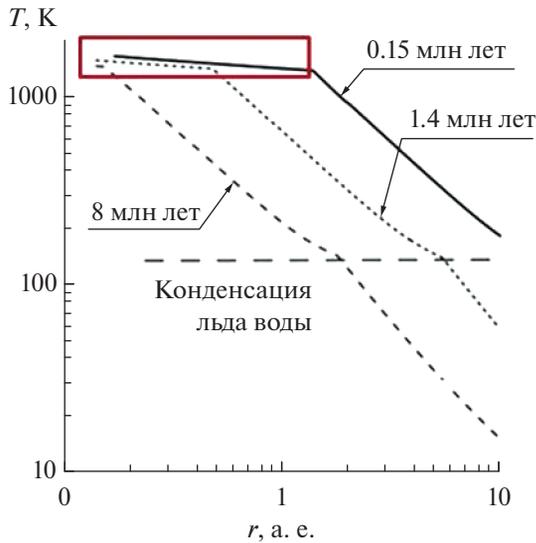


Рис. 2. Радиальное распределение максимальных температур в газопылевом аккреционном диске, существовавшем вокруг Солнца на стадии Т Тельца в разные периоды эволюции диска. Прямоугольником выделены интервалы r и времени, на которых было возможно испарение силикатной пыли (рис. П.10 из кн. Дорофеева, Макалкин, 2004).

ных ядрах CAIs. Массовая доля кристаллических силикатов оценивается как 20–70% от общей массы силикатов в ядрах комет. Их происхождение нельзя приписать досолнечным процессам, поскольку экспериментально доказано, что содержание кристаллических силикатов в межзвездных молекулярных облаках не превышает первых процентов (Li, Draine, 2001; Kempe и др., 2004; 2005). Более подробно в (Дорофеева, 2020).

Существует несколько теорий образования кристаллических магниевых силикатов в околосолнечном газопылевом протопланетном диске и все они связаны с высокотемпературными процессами (Shinnaka и др., 2018).

(1) Нагрев вещества диска до $T \geq 1400$ К при $P \approx 10^{-3} - 10^{-4}$ бар, испарение его пылевой компоненты и последующая конденсация образовавшегося пара “солнечного” состава при остывании диска (Bell и др., 1997; Lodders, 2003; Gail, 2004; Wooden и др., 2004). Это самая ранняя и наиболее популярная на сегодняшний день гипотеза. Столь высокие температуры могли возникнуть только вблизи Солнца, поэтому присутствие кристаллических силикатов в минеральной компоненте кометных ядер с необходимостью требует предположения о существовании в околосолнечном диске переноса газопылевого вещества наружу, на большие гелиоцентрические расстояния (до 15–20 а. е.).

(2) Отжиг аморфных силикатных зерен, требующий $T \sim 800$ К (Gail, 2001). Такой механизм рас-

смотрен в нескольких моделях (Nuth, Johnson, 2006; Wooden и др., 2006; Vorobyov, 2011).

(3) Ударный нагрев и отжиг в спиральном рукаве газопылевого околозвездного диска, но при этом требуется, чтобы диск обладал значительной массой (Harker, Desch, 2002; Scott, Krot, 2005; Wooden и др., 2006).

В отличие от механизма конденсации, механизм отжига происходит при существенно более низких температурах и, как следствие, в случае их локального возникновения, перенос образовавшихся кристаллов силикатов на сверхбольшие расстояния уже не требуется.

Однако механизм (1) и механизмы (2 и 3) дают разную химическую природу образующихся силикатов. Отжиг аморфных силикатных зерен (механизм 2 и 3) не изменит соотношения в них Fe/Mg, сохранив его высокое значение (Wooden и др., 2006). Поэтому из трех рассмотренных механизмов возможного образования кристаллических силикатов, обнаруженных в кометной пыли, конденсационный механизм представляется наиболее соответствующим предполагаемым термодинамическим условиям в диске. Действительно, согласно моделям внутреннего строения диска (Дорофеева, Макалкин, 2004), на ранней стадии его эволюции (до ~ 1 млн лет) в областях, близких к Солнцу ($r \leq 1$ а. е.), максимальные температуры были достаточно высоки ($T > 1500$ К при $P = 10^{-3} - 10^{-4}$ бар), что иллюстрирует рис. 2. В этих P - T -условиях основная масса пыли во внутренней области диска испарилась. На последующей стадии диссипации и связанного с ней остывания диска парциальное давление водорода остается на 3 порядка выше, чем парциальное давление любого другого химически активного компонента, в том числе и p_{O_2} . Как показали термодинамические расчеты, в этих условиях в системе солнечного состава образуются кристаллические магниевые силикаты, преимущественно в форме форстерита и иногда энстатита, а также металл (Fe–Ni), который в дальнейшем при понижении температуры до $T \sim 700 - 600$ К, взаимодействуя с H_2S_{gas} , частично окисляется до сульфида железа (Petaev, Wood, 1998).

Еще одним доказательством конденсационного происхождения “кометных” мелкокристаллических магниевых силикатов, служат результаты сравнения изотопного состава кислорода в них с изотопным составом кислорода в силикатах углистых хондритов, конденсационное происхождение которых не вызывает сомнений. Результаты сравнения соотношения изотопов $\delta^{16}O$, $\delta^{17}O$, и $\delta^{18}O$ в магниевых силикатах, выделенных из минеральной компоненты кометы 81P/Wild 2, и силикатов углистых хондритов показал их близость в особенности для CR-хондритов (Defouilloy и др., 2017).

Дополнительным доказательством небулярного происхождения кристаллических силикатов служат открытия экзосистем с дисками, в которых внутренние области обогащены кристаллическими силикатами, по сравнению с их внешними зонами (Olofsson и др., 2009), например, газопылевой диск вокруг звезды HD 100546 (Bouwman и др., 2003).

МЕХАНИЗМЫ ПЕРЕНОСА ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ

Механизмы переноса пылевой компоненты из внутренних горячих зон диска во внешние холодные регионы были рассмотрены в ряде работ. В частности, в них рассматривался механизм радиального перемешивания, вызванного турбулентной диффузией (Bockelée-Morvan и др., 2002; Gail, 2004), в сочетании со вспышками дискового ветра, возникавшими из-за эпизодического усиления темпов аккреции на молодую звезду (Brownlee и др., 2012; Audard и др., 2014) и крупномасштабных движений, связанных со спиральными рукавами (Boley и др., 2006; Vorobyov, Basu, 2006; 2010; Cha, Nayakshin, 2011; Machida и др., 2011).

Основные выводы, которые можно сделать по результатам указанных работ, состоят в следующем.

1. Значительный радиальный перенос мог происходить только на начальном этапе эволюции диска, поскольку эффективность транспорта со временем быстро падает.

2. Время достижения высокотемпературными фазами региона образования комет составляет $\sim n \times 10^4$ лет (по оценке Bockelée-Morvan и др., 2002).

3. Максимальный размер пылинок, которые могли быть вынесены наружу на большие расстояния в рамках модели одномерного вязкого газопылевого диска благодаря диффузии, не превышает 20 мкм (Hughes, Armitage, 2010).

4. Показано также, что ни одна из моделей не приводит к устойчивому переносу наружу очень крупных частиц, размер которых превышает 1 мм.

5. Важным фактором, который замедляет, а затем и совсем прекращает движение газопылевого вещества от Солнца, является образование Юпитера.

ГЕТЕРОГЕННОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КАМЕННО-ЛЕДЯНЫХ ТЕЛ ВНЕШНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Газопылевое вещество внутренней части околосолнечного диска по химическому и изотопному составу отличалось от вещества внешней зоны диска. Его пылевая компонента содержала продукты высокотемпературной конденсации, а химический и изотопный составы газовой фазы,

благодаря возможности протекания ряда химических реакций и реакций изотопного обмена, значительно отличались от первоначальных, присутствующих в протосолнечной небуле. В процессе миграции небулярного вещества во внешние, более холодные регионы диска происходили конденсация части газов и образование таких льдов, как H_2O , CO_2 , HCN и других. Впоследствии они смешивались с досолнечным веществом, выпадавшим на диск из окружающей его аккреционной оболочки. Такое смешение могло привести к образованию первичных мелких каменно-ледяных тел (pebbles), имевших целый спектр составов минеральной компоненты и льдов, в том числе льда воды, с разными значениями изотопного состава водорода D/H_{H_2O} . Эти тела явились строительным материалом для протоспутниковых и протокометных тел, обусловив экспериментально наблюдаемую их химическую и изотопную гетерогенность. Это предположение можно подтвердить наблюдаемой гетерогенностью химического и изотопного состава малых тел внешней Солнечной системы, из которых наиболее изучены составы ряда спутников Сатурна и кометных ядер.

Известно, что активность кометных ядер имеет локальный характер. Сублимация летучих происходит из так называемых депрессий (pits, holes), неравномерно распределенных по поверхности кометных ядер, их общая площадь составляет лишь $\sim 10\%$ общей площади ядра (Vincent и др., 2015). Подобные депрессии наблюдались на ядрах комет, исследования которых проводились с помощью пролетных космических аппаратов, — 1P/Halley, 19P/Borrelly, 81P/Wild, 9P/Tempel, 103P/Hartley (Meech, 2017). Общее количество депрессий ограничивается весьма небольшим числом. Например, на ядре кометы 67P/Churyumov-Gerasimenko (далее 67P/C-G) было обнаружено около 20-ти депрессий, из которых только 7 оказались активными, остальные либо умеренно активными, либо уже потухшими, причем активные и неактивные депрессии, средний диаметр которых составляет ~ 100 м, могут располагаться на расстоянии всего лишь ~ 100 м друг от друга, как это видно на фотографии, сделанной с борта КА Rosetta (рис. 3). Такое близкое расположение активных и неактивных депрессий свидетельствует о неоднородности состава кометных ядер по летучим компонентам на масштабе в первые сотни метров.

Неоднородность состава кометных ядер на масштабе ~ 100 м подтверждается также наличием на их поверхности вертикальных структур — пинаклов (pinnales) с высотой до 100–200 м и диаметром у основания ~ 75 –100 м, обнаруженных на поверхностях комет 81P/Wild 2 (Brownlee и др., 2004) и 67P/C-G (Basilevsky и др., 2017). Их количество оказалось достаточно велико: так, на по-

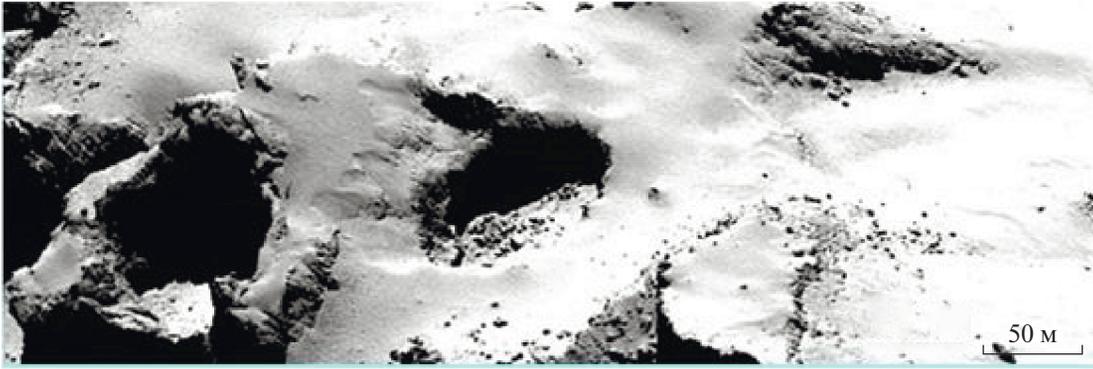


Рис. 3. Относительное расположение активных (слева) и неактивных (справа) депрессий на поверхности ядра кометы 67P/Churumov–Gerasimenko. Фото сделано с борта КА Rosetta. Из архива изображений ESA (Archive Image Browser).

верхности 67P/C-G было найдено 49 пиннаклов в 13 регионах.

Происхождение пиннаклов связывается с фракционным испарением материала комет (льдов), обладающего наибольшей летучестью. Отметим, что мощность эродированных слоев, оцененная в среднем в десятки метров, коррелирует с предположением о крупноразмерной зернистости материала ядра (Davidson и др., 2016). Этот факт может отражать первичную неоднородность материала, из которого образовалось ядро кометы.

Ярким примером неоднородности химического состава кометных ядер могут служить распределения льдов основных летучих компонентов (CO и CO₂) в ядре кометы 67P/C-G. Так во время наблюдения с КА Rosetta было получено два набора значений относительных содержаний указанных газов. Первый был получен в доперигельный период на $r \sim 3$ а. е., когда освещалось северное полушарие, но из-за сложной формы ядра кометы под инсоляцию ненадолго попал участок южного полушария. Его верхний слой, вероятно, был разрушен во время предыдущего прохода перигелия, в результате чего обнажился недегазированный слой ядра. Были получены отношения CO/H₂O \approx 20% и CO₂/H₂O \approx 80% (LeRoy и др., 2015). Столь высокие значения относительных содержаний CO и CO₂ ранее не наблюдались ни у одной из комет, в том числе и у 67P/C-G в дальнейшем тоже. Можно предположить, что инсоляции подвергся фрагмент ядра, образовавшийся в дальнейшем, очень холодном регионе околосолнечного диска и потому обогащенный относительно других фрагментов льдами высоколетучих компонентов.

Второй набор данных был получен в постперигельный период, когда комета удалилась от перигелия ($q = 1.24$ а. е.) на $r = 2-2.7$ а. е.: CO/H₂O = 5.17%, CO₂/H₂O = 36.9% (Gasc и др., 2017). Эти значения вполне сопоставимы с обилиями CO и

CO₂, измеренными в комах других комет (Дорофеева, 2020).

Известны также результаты измерений состава комы гиперактивной кометы 103P/Hartley, когда из торцевой части малой доли наблюдалось интенсивное выделение CO₂ вместе с H₂O_{лед}, а из перешейка происходила сублимация в основном H₂O_{gas} (A’Hearn и др., 2011).

Существуют и иные наблюдения, свидетельствующие о гетерогенности состава летучих в разных фрагментах кометных ядер. Среди них особо отметим результаты наблюдений внесолнечной кометы 2I/Borisov. Оказалось, что у нее изменение скорости выделения окиси углерода, имеющей максимальную летучесть среди всех кометных льдов ($T_{\text{субл}} \leq 25$ К), и изменение скорости сублимации воды ($T_{\text{субл}} \approx 140$ К) никак не связаны. Так, увеличение скорости производства CO началось при приближении к точке перигелия, эта скорость продолжала увеличиваться и в постперигельный период, достигая максимума примерно через месяц (Bodewits и др., 2020; Cordiner и др., 2020). В то же время максимум скорости выделения воды у кометы 2I/Borisov наблюдался вблизи перигелия, а потом произошло ее резкое уменьшение – в 2 раза за 20 дней (Xing и др., 2020). Такой же характер выделения наблюдался и у льдов, обладающих умеренной летучестью ($T_{\text{субл}} \approx 90-70$ К): CN (родительская молекула HCN), легких органических молекул, обозначаемых как C₂ и NH₂ (родительская молекула NH₃). Это, по мнению (Yang и др., 2021), свидетельствует о том, что сублимация льда воды, а также сублимация других умеренно летучих льдов происходила из блоков, образовавшихся ближе к Солнцу, чем расположение “snowline” CO – условной термодинамической границы конденсации/сублимации какого-либо летучего соединения. Эти блоки освещались в период прохождения кометой 2I/Borisov перигелия. В то же время, в постперигельный период освещались блоки, богатые

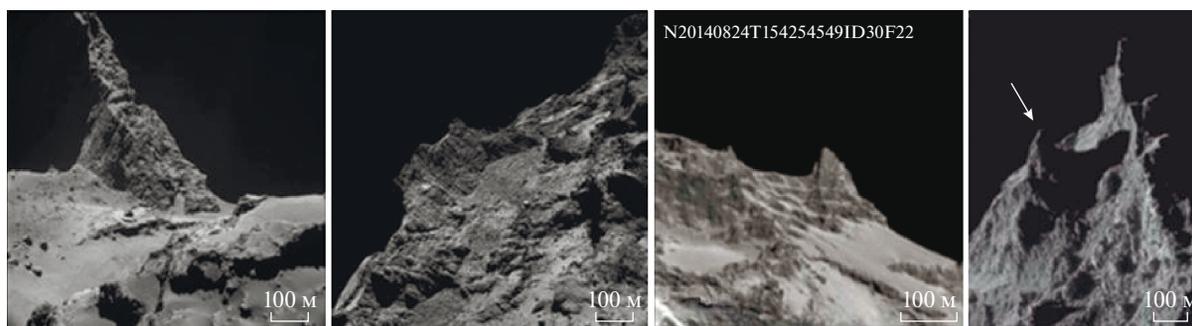


Рис. 4. Пиннаклы на поверхности кометы 67P/Churyumov–Gerasimenko. Фото сделано с борта КА Rosetta. Из архива изображений ESA (Archive Image Browser).

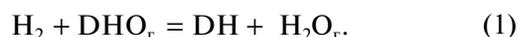
высоколетучим CO, образование этих блоков происходило во внешнем относительно расположения “snowline” CO регионе. Таким образом, можно полагать, что в околозвездном диске, где образовалась комета 2I/Borisov, также происходило эффективное перемешивание вещества, образовавшегося на разных радиальных расстояниях от звезды. Однако отметим, что это перемешивание, возможно, было менее интенсивным, чем в околосолнечном диске, поскольку в пылевой компоненте кометы 2I/Borisov не было обнаружено присутствие значительного количества такой высокотемпературной фазы, как мелкокристаллические магниевые силикаты (Zubko и др., 2019). Более вероятно, что в ней преобладают Mg–Fe силикаты и тугоплавкие органические соединения, образовавшиеся в межзвездной среде (Kochergin и др., 2019).

ИЗОТОПНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ВНЕШНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Смешение газопылевого небулярного потока из внутренних областей околосолнечного диска с веществом его внешних областей могло отразиться не только на химическом, но и на изотопном составе льдов, входящих в состав тел, образовавшихся в этом регионе диска, в частности, на изотопном составе водорода молекулы воды (D/H_{H_2O}).

За последние годы была получена новая экспериментальная информация относительно значений D/H_{H_2O} в малых каменно-ледяных телах внешней части Солнечной системы в основном благодаря результатам космических миссий Cassini-Huygens и Rosetta. Все имеющиеся на сегодняшний день данные по D/H_{H_2O} в телах Солнечной системы представлены на рис. 5 в форме, впервые предложенной в (Hartogh и др., 2011). Интервалы погрешностей на рис. 5, как правило, соответствуют значению 1σ , но в некоторых ра-

ботах, хотя численные значения интервалов и приведены, какому значению σ они соответствуют не указано. На этом рисунке видно, что диапазон значений D/H_{H_2O} в телах Солнечной системы весьма широк. Его нижняя граница соответствует изотопному отношению водорода в океанической воде Земли, стандартом для которого является VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), $D/H_{VSMOW} = 1.56 \times 10^{-4}$, а верхняя граница – значению D/H_{H_2O} ледяной поверхности Фебы – захваченного спутника Сатурна, образовавшегося, вероятнее всего, в транснептуновом регионе, $D/H_{Ph} = (13 \pm 3) \times 10^{-4}$ (Clark и др., 2019). Последнее практически совпадает со средним значением D/H_{H_2O} в межзвездных молекулярных облаках (ММО) и поэтому с известной долей вероятности может считаться оценкой D/H_{H_2O} в начальный момент времени в околосолнечной небуле (Wood и др., 2004). Изменение (понижение) этого значения могло произойти только при испарении $H_2O_{лед}$ и переходе его в газовую фазу, где при достаточно высоких температурах было возможно протекание реакции изотопного обмена



Эта реакция термодинамически была возможна, поскольку, во-первых, в околосолнечной небуле мольная доля H_2 была по меньшей мере на три порядка выше мольной доли H_2O_r и, во-вторых, отношение D/H в молекуле H_2 , как видно из рис. 5, было она порядок ниже, чем в молекуле воды. Для начального момента времени из данных по солнечной короне были получены следующие оценки $D/H_{H_2, t=0}$: $(2 \pm 0.35) \times 10^{-5}$ (Geiss, Gloecker, 2003) и $(1.94 \pm 0.39) \times 10^{-5}$ (Lodders, 2003). Во многих современных работах (Altwegg и др., 2015 и др.) в качестве начального $D/H_{H_2, t=0}$ используется значение $(2.1 \pm 0.5) \times 10^{-5}$, полученное в (Geiss, Gloecker, 1998) и подтвержденное в (Lellouch и др., 2001). Из данных по атмосфере

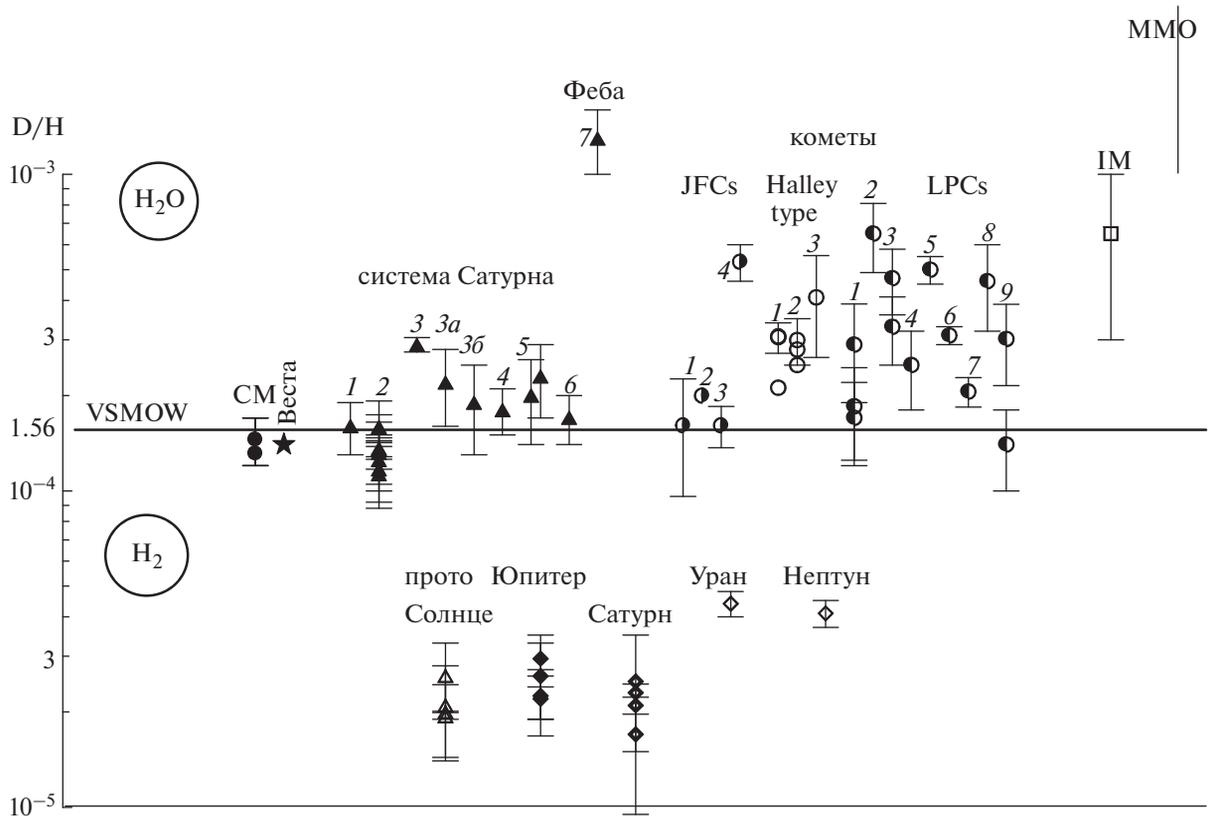


Рис. 5. Значения изотопных отношений водорода в молекулах водорода и воды, а также в объектах внешней Солнечной системы в сравнении с данными для углистых CM-хондритов и Венского стандарта морской воды Земли (VSMOW). Система Сатурна: 1 – кольцо В; регулярные спутники: 2 – D/H_{CH_4} в атмосфере Титана; 3 – водные плюмы Энцелада; 3а – поверхность Энцелада, северное полушарие; 3б – поверхность Энцелада, южное полушарие; 4 – Рея; 5 – Гиперион; 6 – Япет; 7 – Феба (захваченный спутник). JFCs – короткопериодические кометы системы Юпитера: 1 – 103P/Hartley; 2 – 45P/Honda-Mrkos-Pajdušáková; 3 – 67P/Churumov-Gerasimenko; 4 – 246P/Wirtanen. Halleytype – кометы галлеевского типа: 1 – 1P/Halley; 2 – 8P/Tuttle; 3 – 153P/Ikeya-Zang. LPCs – долгопериодические кометы: 1 – C/1996 B2 (Hyakutake); 2 – C/2012 (Lemmon); 3 – C/1995O1 (Hale-Bopp); 4 – C/2002 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). IM – межзвездная среда; ММО – межзвездные молекулярные облака.

Юпитера $D/H_{H_2, t=0}$ оценивается, согласно последним определениям на КА Cassini, как $(2.95 \pm 0.55) \times 10^{-5}$ (Pierel и др., 2017). Таким образом, можно полагать, что в период начала образования Солнечной системы значение $D/H_{H_2, t=0}$ находилось в интервале $(2-3) \times 10^{-5}$. Чтобы количественно охарактеризовать, насколько изотопный обмен с H_2 мог уменьшить начальное значение D/H_{H_2O} во внутренней относительно “snowline” H_2O зоне диска согласно реакции (1) и как это значение менялось по мере диссипации и охлаждения диска, необходимо детальное рассмотрение кинетики этой реакции.

С точки зрения термодинамики, реакция (1) должна была прекращаться на радиальном расстоянии, где происходила конденсация водяного пара и образование льда воды, т.е. на r , отвечающем “snowline” H_2O . Отметим, что положение “snowline” менялось по мере диссипации и остывания

диска. Она постепенно приближалась к Солнцу, дойдя, вероятнее всего, до $r \sim 3$ а. е. Но, возможно, реакция (1) прекращалась на меньших, чем расположение “snowline”, радиальных расстояниях, что могло быть связано с кинетическими ограничениями реакции (1), которые, к сожалению, еще плохо изучены (Lee, Bergin, 2015).

Экспериментально кинетика реакции (1), точнее константа скорости обратной реакции, была изучена в (Lécluse, Robert, 1994) при P - T -условиях, близких к условиям во внутреннем регионе околосолнечного диска. Применение этих констант к P - T -модели диска показало, что при $T \geq 600$ К, а $P \sim 10^{-3}-10^{-4}$ бар, равновесие (1) устанавливалось за несколько сотен лет (Yang и др., 2013). При $T \sim 300$ К и $P \sim 10^{-7}$ бар время достижения равновесия возрастало на 3 и более порядка. Поэтому с увеличением радиального расстояния скорость реакции (1) падала вплоть до нуля на

границе “snowline”, где происходило образование конденсированной фазы мелкокристаллического льда воды, D/H которого существенно ниже первоначального значения. Двигаясь наружу вместе с газом, этот лед смешивался с аморфным льдом в разных пропорциях, в зависимости от радиального расстояния, на котором это смешение происходило. Далее он входил в состав сначала мелких тел (pebbles), а затем в состав малых тел (планетезималей) внешнего региона диска.

Это предположение может быть подкреплено экспериментальными данными определений D/H_{H₂O} в различных объектах Солнечной системы, представленных на рис. 5. Из него видно, что изотопная гетерогенность наблюдается у всех тел внешней Солнечной системы. Мы видим ее и у регулярных спутников Сатурна, и у комет, относящихся к одному динамическому типу.

Так по результатам космической миссии Cassini-Huygens были получены данные для каменно-ледяных объектов системы Сатурна, среди которых кольцо В, регулярные спутники – Титан, Энцелад, Рея, Гиперион, Япет и уже упоминавшийся захваченный спутник Феба (Clarke др., 2019). Регулярные спутники образовались одновременно с планетами, к системе которых они принадлежат, поэтому их состав может охарактеризовать условия в регионе образования планеты, в данном случае Сатурна (Макалкин, Дорофеева, 2014).

Титан. Крупнейший спутник Сатурна, единственный в Солнечной системе, обладающий плотной устойчивой атмосферой и единственное космическое тело, кроме Земли, на поверхности которого присутствует жидкая фаза (метан и этан с растворенным в них молекулярным азотом). В состав Титана входит значительное количество H₂O (плотность вещества спутника 1.88×10^3 кг/м³), как в форме льда, так и в жидком состоянии – существование на Титане субповерхностного океана в настоящее время можно считать доказанным фактом (Кусков и др., 2009). Однако в атмосфере Титана водяной пар отсутствует, а его ледяная поверхность покрыта слоем органических соединений, поэтому с помощью приборов, установленных на зонде Huygens, возможно было измерить значение D/H в молекуле CH₄, а также в молекуле H₂, образующейся в результате фотодиссоциации метана. Из многочисленных измерений, проведенных на разной высоте, получено среднее значение $D/H_{CH_4} = 1.36_{-0.08}^{+0.07} \times 10^{-4}$ (Nixon и др., 2012), близкое к VSMOW. Полагая существование генетической связи атмосферного метана на Титане с водой его субповерхностного океана (Дорофеева, 2016), полученное значение D/H_{CH₄} отождествляем со значением D/H_{H₂O} этого крупнейшего спутника Сатурна. Возможно, именно оно и характе-

ризовало изотопный состав воды в околосолнечном диске на радиальных расстояниях $r \sim 10$ а. е. в первые миллионы лет с начала образования Солнечной системы. Этому предположению не противоречат данные по D/H_{H₂O} поверхностей трех других регулярных каменно-ледяных спутников – Реи, Япета и Гипериона, – которые в пределах погрешности совпадают со значением для Титана (4, 5, 6 на рис. 5) и близки VSMOW.

Энцелад – уникальный спутник в системе Сатурна, на котором впервые было открыто явление криовулканизма. Его диаметр на порядок меньше, чем у Титана, но средняя плотность, существенно уточненная измерениями с КА Cassini (1.61×10^3 кг/м³), значительно выше, чем у всех остальных регулярных спутников Сатурна, за исключением Титана. Значения D/H_{H₂O} для Энцелада были получены не только для поверхности северного (3а на рис. 5) и южного полушарий (3б), но, что особенно важно, и непосредственно для его водных плюмов, бьющих из южного полюса (Waite и др., 2009). Из представленных на рис. 5 данных видно, что значение D/H_{H₂O} водных плюмов, измеренное многократно, имеет минимальную погрешность и превосходит VSMOW вдвое. Это может означать, что Энцелад образовался на значительно больших радиальных расстояниях от Сатурна, чем его нынешнее положение, а возможно, и позже других спутников. Такой сценарий рассматривался ранее в ряде работ, не связанных с изотопными исследованиями. В них предполагалось многократное разрушение этого спутника и последующая аккумуляция осколков, что сопровождалось последовательным уменьшением радиуса орбиты и приближением Энцелада к Сатурну. Теперь эти предположения имеют под собой экспериментальное подтверждение, в особенности в сравнении с данными по D/H для компонентов атмосферы Титана. Однако остается непонятным, почему D/H_{H₂O} поверхности южного полюса Энцелада (3б) столь разительно отличается от D/H_{H₂O} водных плюмов, которые эту ледяную поверхность и образуют. Возможно, это какие-то вторичные процессы, снижающие количество дейтерия в воде на поверхности ледяных спутников, а возможно, что состав спутника имеет гетерогенный характер в силу особенностей его образования.

Кольцо В Сатурна. Также близким к земному оказалось значение D/H_{H₂O} кольца В Сатурна, равное $(1.6 \pm 0.3) \times 10^{-4}$. Это наиболее массивное кольцо с массой $\approx (4-7) \times 10^{22}$ г (Robbins и др., 2010). Оно, как и другое, внешнее кольцо А с несколько меньшей массой $\approx (0.5-0.7) \times 10^{22}$ г, состоит из множества частиц почти чистого (95–98%) кристаллического водяного льда с размерами от 10 см до 10 м (Nicholson и др., 2008). Очевидно,

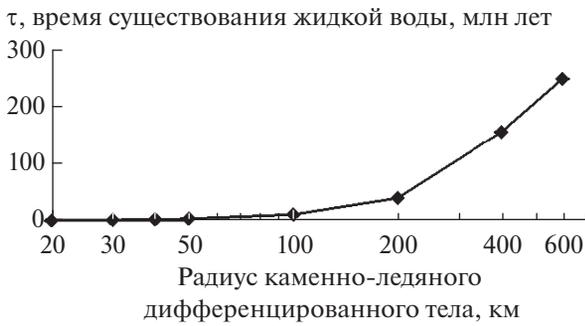


Рис. 6. Время существования жидкой водной фазы в каменно-ледяных планетезималиях различного радиуса с момента их образования. Плавление происходило за счет выделения тепла радиоактивного распада ^{26}Al с начальным содержанием 1×10^{-5} , что соответствует времени аккреции тела ~ 1.6 млн лет после образования CAIs (модель Русол, Дорофеева, 2012).

что эти ледяные частицы не могли образоваться путем конденсации из газовой фазы. Их источником, вероятнее всего, была ледяная мантия крупного дифференцированного каменно-ледяного тела (или нескольких тел), разрушенного в результате приливного воздействия Сатурна. В пользу такого предположения свидетельствует также отсутствие пылевой компоненты в составе этих ледяных частиц. При оценке массы и радиуса исходного тела нужно иметь в виду, что начальная масса вещества кольца была по меньшей мере на два порядка больше современной. Этот тезис основан на том факте, что поверхность ледяных частиц, образующих кольцо, имеет очень высокий коэффициент отражения (близкий к единице) несмотря на окружающую их постоянно космическую пыль. Единственное объяснение, которое в настоящее время существует для этого феномена, — интенсивные импактные процессы, происходящие в кольцах А и В Сатурна, которые приводят к дроблению ледяных частиц и постоянному обновлению их поверхности. Однако образующаяся в процессе дробления наряду с крупными фрагментами ледяная пыль рассеивается, что приводит к постепенной потере ледяного вещества колец. К сожалению, нет никаких экспериментальных данных, позволяющих оценить время образования колец. Из общих теоретических соображений ясно только одно, что образование ледяных колец Сатурна происходило позднее, чем образование спутниковой системы, а их начальная масса могла быть на два порядка больше, чем современная, т.е. $\sim 10^{24}$ г, а возможно, и еще выше.

Если предположить, что источником ледяного вещества была мантия одного каменно-ледяного тела, то, согласно модельным оценкам (Русол, Дорофеева, 2012), его радиус достигал значений $R \sim 600$ км, а масса $\sim 10^{23}$ – 10^{24} г. Тело должно было образоваться в первые 1–2 млн лет эволюции

Солнечной системы, чтобы пройти стадию плавления льда воды за счет радиоактивного тепла ^{26}Al и дифференциации с образованием железо-каменного ядра, состоящего из гидросиликатов, ледяной коры из $\text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}$ и тонкой недифференцированной мантии, служившей теплоизолятором. Основная проблема при этом состоит в том, что каменно-ледяные тела большого размера ($R \geq 500$ км) остывают очень медленно, возможно, более 200 млн лет, как это следует из оценок времени существования жидкой водной фазы в каменно-ледяных планетезималиях, представленных на рис. 6. Это существенно понижает вероятность сохранения целостности такого тела, даже при минимальных импактных взаимодействиях, столь характерных для стадии обломочного (debris) диска. Поэтому представляется более вероятным вариант, в котором источником ледяного вещества внешних колец Сатурна было несколько дифференцированных каменно-ледяных тел с $R \sim 200$ – 300 км, образовавшихся в ранней Солнечной системе вблизи орбиты Сатурна.

Таким образом, можно объяснить близость значений $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ для Титана и кольца В.

Рея, Япет, Гиперион — крупные регулярные каменно-ледяные спутники Сатурна, диаметр первых двух ~ 1500 км, Гипериона — вдвое меньше. Значение $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ на их поверхностях ближе к значению для ледяных колец и поверхности Энцелада, т.е. VSMOW.

Феба. Наибольшее значение $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}} = (13 \pm 3) \times 10^{-4}$ было получено для поверхности захваченного спутника Сатурна Фебы, аккумуляция которого происходила, вероятнее всего, во внешней части транснептунового региона, где формировались тела пояса Койпера. Можно предположить, что в состав Фебы в основном вошло вещество досолнечного происхождения, поскольку значение ее $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ близко значению $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ межзвездных молекулярных облаков, у которых $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}} \geq 10^{-3}$ (Robert и др., 2006; Ceccarelli и др., 2014), из фрагмента одного из них и образовалась наша Солнечная система. Таким образом, согласно текущим экспериментальным данным, значения $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ регулярных каменно-ледяных спутников Сатурна заключены в интервале от 1.36×10^{-4} , т.е. близкого VSMOW, до 2.9×10^{-4} (Waite и др., 2009). Значение, полученное для Фебы ($(13 \pm 3) \times 10^{-4}$) на сегодняшний день максимальное для объектов Солнечной системы.

На рис. 5 представлены также значения $\text{D}/\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ для всех 16 комет различных динамических типов, в которых это отношение в настоящее время определено: для короткопериодических комет семейства Юпитера (JFCs), комет семейства Галлея

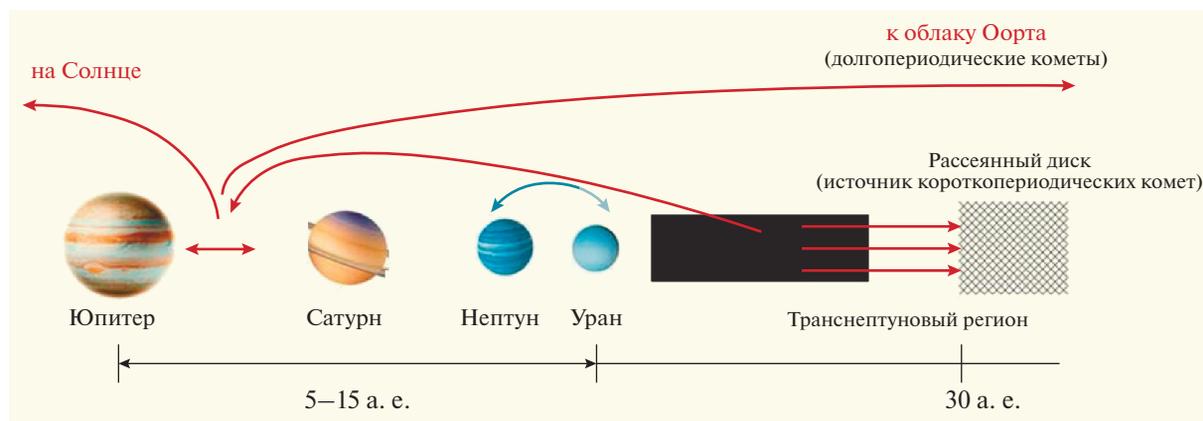


Рис. 7. Традиционная схема образования основных семейств комет Солнечной системы, согласно которой ядра долгопериодических комет образовались во внутренней зоне транснептунового региона, а короткопериодических – во внешней. Подробнее см. (Емельяненко, 2018) и ссылки там же.

(Halley type) и долгопериодических комет (LPCs). Эти значения лежат в интервале от $(1.61 \pm 0.24) \times 10^{-4}$ (JFC 103P/Hartley 2, Hartogh и др., 2011), что близко VSMOW, до $(6.51 \pm 0.16) \times 10^{-4}$ (LPC C/2012 (Lemmon), Viveg и др., 2016), что вчетверо больше этой величины.

Такой разброс данных по D/H_{H_2O} комет различных динамических типов трудно соотносить с регионом их образования, если опираться на традиционные схемы, согласно которым ядра долгопериодических комет образовались на меньших гелиоцентрических расстояниях, нежели ядра короткопериодических комет (рис. 7). Однако, принимая во внимание доказанную химическую гетерогенность ядер комет и присутствие в них высокотемпературных фаз небулярного происхождения, можно говорить о большой роли смешения вещества досолнечного и небулярного происхождения, во многом обусловившего, в том числе, и наблюдаемый разброс данных D/H_{H_2O} в них. Дополнительным доказательством такого смешения может служить тот факт, что до сих пор не было найдено кометы, у которой бы изотопное соотношение водорода в молекуле воды было бы близко к значению, полученному для поверхности Фебы, которое, как мы полагаем, отвечает досолнечному значению. Иными словами, на сегодняшний день в Солнечной системе не найдено такого кометного ядра, или любого другого каменно-ледяного тела, которое бы не содержало льда воды с изотопным составом, сформированным в условиях внутренней зоны небулы.

В заключение хотелось бы отметить, что все данные относительно компонентного и изотопного составов кометных ядер, представленные в статье, подкрепляют предположение о том, что кометы семейства Юпитера, и кометы облака Оорта образовались в едином процессе в транснеп-

туновом регионе Солнечной системы (Emel'yanenko и др., 2007; 2013; Brassier, Morbidelli, 2013).

ВЫВОДЫ

Основной вывод, который можно сделать из приведенного экспериментального материала состоит в следующем. Современные космохимические данные по составу минеральной компоненты астероидов Главного пояса и кометных ядер дают все основания полагать, что в околосолнечном газопылевом протопланетном диске (небуле) на ранних этапах его эволюции наряду с основным аккреционным потоком газопылевого вещества существовал второй, направленный к нему в противофазе. Этот поток выносил из внутренних горячих регионов диска газопылевое вещество, образовавшееся там, во внешние его зоны, где оно смешивалось с веществом протосолнечного происхождения, выпадавшим на диск, в основном на его торец. Экспериментальные данные подтверждают, что размер CAIs и мелкокристаллических магнезиальных силикатов тем меньше, чем на более дальних гелиоцентрических расстояниях они были обнаружены. Тезис о смешении досолнечного и небулярного вещества при образовании тел во внешней Солнечной системе поддерживается и изотопными данными по составу водорода в молекуле воды, как на спутниках Сатурна, так и в ядрах комет. Смешением вещества из двух зон околосолнечного диска с существенно разными $P-T$ -условиями можно объяснить экспериментально наблюдаемое в Солнечной системе существование в ее внешнем регионе химически и изотопно гетерогенных каменно-ледяных тел. Это дает основания полагать, что поток газопылевого вещества в околосолнечном газопылевом диске, направленный противоположно аккреционному, оказал существенное влияние на

химический и изотопный составы каменно-ледяных тел, сформировавшихся во внешней части Солнечной системы.

Разумеется, получение новых данных о фазовом и изотопном составех кометных ядер чрезвычайно важно для проверки данной гипотезы, но наиболее важными в этом отношении, как нам кажется, будут результаты, полученные в ходе планируемой NASA экспедиции к Европе – регулярному спутнику Юпитера, – особенно, если удастся получить данные по D/H_{H_2O} не только с поверхности, но и с некоторой глубины, где влияние солнечного ветра в принципе не могло изменить исходный изотопный состав льда воды.

Работа выполнена в рамках Госзадания ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дорофеева В.А., Макалкин А.Б.* Эволюция ранней солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: Едиториал УРСС, 2004. 264 с.
- Дорофеева В.А.* Генезис летучих регулярных спутников Сатурна. Происхождение атмосферы Титана // Геохимия. 2016. № 1. С. 11–31.
- Дорофеева В.А.* Химический и изотопный состав кометы 67P/Чурюмова–Герасименко (обзор результатов космической миссии “Rosetta–Philae”). Следствия для космогонии и космохимии // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 2. С. 110–134.
(*Dorofeeva V.A.* Chemical and isotope composition of Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko: The Rosetta–Philae mission results reviewed in the context of cosmogony and cosmochemistry // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 2. P. 96–120.)
- 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.* Dynamics and origin of comets: new problems appeared after the Rosetta space mission // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 382–391.)
- Кусков О.Л., Дорофеева В.А., Кронрод В.А., Макалкин А.Б.* Системы Юпитера и Сатурна: формирование, состав и внутреннее строение крупных спутников. М.: ЛКИ, 2009. 574 с.
- Макалкин А.Б., Дорофеева В.А.* Аккреционные диски вокруг Юпитера и Сатурна на стадии образования регулярных спутников // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 1. С. 64–80.
(*Makalkin A.B., Dorofeeva V.A.* Accretion disks around Jupiter and Saturn at the stage of regular satellite formation // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 1. P. 62–78.)
- Русол А.В., Дорофеева В.А.* Динамическая модель тепловой эволюции каменно-ледяных тел – вероятного источника вещества ледяных колец Сатурна // 13-я Международная конференция “Физико-химические и петрографические исследования в науках о Земле”. М.: 1–3, Борок 4 октября 2012 г. Материалы конф. 2012. С. 236–239.
- Уртин В.А.* Гидродинамические движения в аккреционных дисках // Астрон. журн. 1984. Т. 61. № 1. С. 84–90.
- Шмидт О.Ю.* Четыре лекции о теории происхождения Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 137 с.
- A'Hearn M.F., Belton M.J.S., Delamere W.A., Feaga L.M., Hampton D., Kissel J., Klaase K.P., McFadden L.A., Meech K.J., Melosh H.J., Schultz P.H., Sunshine J.M., Thomas P.C., Veverka J., Wellnitz D.D., Yeomans D.K., Besse S., Bodewits D., Bowling T.J., Carcich B.T., Collins S.M., Farnham T.L., Groussin O., Hermalyn B., Kelley M.S., Li J.-Y., Lindler D.J., Lisse C.M., McLaughlin S.A., Merlin F., Protopapa S., Richardson J.E., Williams J.L.* EPOXI at Comet Hartley 2 // Science. 2011. V. 332. P. 1396–1400.
- Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., Bieler A., Bochsler P., Briois C., Calmonte U., Combi M., de Keyser J., Eberhardt P., Fiethe B., Fuselier S., Gasc S., Gombosi T.I., Hansen K.C., Hässig M., Jäckel A., Kopp E., Korth A., LeRoy L., Mall U., Marty B., Mouisis O., Neefs E., Owen T., Rème H., Rubin M., Sémon T., Tzou C.-Y., Waite H., Würz P.* 67P/Churyumov–Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio // Science. 2015. V. 347. № 6220. 1261952–1.
- Audard M., Abraham P., Dunham M.M., Green J.D., Grosso N., Hamaguchi K., Kastner J.H., Kóspál A., Lodato G., Romanova M.M., Skinner S.L., Vorobyov E.I., Zhu Z.* Episodic Accretion in Young Stars // Protostars and Planets VI / Eds Beuther H., Klessen R.S., Dullemond C.P., Henning T. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2014. P. 387–410.
- Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Mall U., Hviidd 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. 2017. V. 140. P. 80–85.
- Bell K.R., Cassen P.M., Klahr H.H., Henning Th.* The structure and appearance of protostellar accretion disks: Limits on disk flaring // Astrophys. J. 1997. V. 486. № 1. P. 372–387.
- Biver N., Moreno R., Bockelée-Morvan D., Sandqvist A., Colom P., Crovisier J., Lis D.C., Boissier J., Debout V., Paubert G., Milam S., Hjalmarsen A., Lundin S., Karlsson T., Battelino M., Frisk U., Murtagh D., 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. id. A78.
- Bockelée-Morvan D., Gautier D., Hersant F., Hurè 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., Calmonte U., Charnley S., Duprat J., Engrand C., Gicque A., Hässig M., Jehin E., Kawakita H., Marty B., Milam S., Morse A., Rousselot P., Sheridan S., Wirstrom E.* Cometary isotopic measurements // Space Sci. Rev. 2015. V. 197. P. 47–83.
- Bodewits D., Noonan J.W., Feldman P.D., Bannister M.T., Farnocchia D., Harris W.M., Li J.-Y., Mandt K.E., Parker J.Wm., Xing Z.-X.* The carbon monoxide-rich interstellar comet 2I/Borisov // Nat. Astron. 2020. V. 4. P. 867–871.
- Boley A.C., Mejía A.C., Durisen R.H., Cai K., Pickett M.K., D'Alessio P.* The thermal regulation of gravitational instabilities in protoplanetary disks. III. Simulations with radiative cooling and realistic opacities // Astrophys. J. 2006. V. 651. № 1. P. 517–534.
- 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.

- Brasser R., Morbidelli A.* Oort cloud and scattered disc formation during a late dynamical instability in the Solar System // *Icarus*. 2013. V. 225. P. 40–49.
- Brownlee D.E., Horz F., Newburn R.L., Duxbury T.C., Sandford S., Sekanina Z., Tsou P., Hanner M.S., Clark B.C., Green S.F., Kissel J.* 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., Tsou P., Aleon J., Alexander C. M. O'D., Araki T., Bajt S., Baratta G.A., Bastien R., Bland P., Bleuët P., Borg J., Bradley J.P., Brearley A., Brenker F., Brennan S., Bridges J.C., Browning N.D., Brucato J.R., Bullock E., Burchell M.J., Busemann H., Butterworth A., Chaussidon M., Chevront A., Chi M., Cintala M.J., Clark B.C., Clemett S.J., Cody G., Colangeli L., Cooper G., Cordier P., Daghlian C., Dai Z., D'Hendecourt L., Djouadi Z., Dominguez G., Duxbury T., Dworkin J.P., Ebel D.S., Economou T.E., Fakra S., Fahey S.A.J., Fallon S., Ferrini G., Ferroir T., Fleckenstein H., Floss C., Flynn G., Franchi I. A., Fries M., Gainsforth Z., Gallien J.-P., Genge M., Gilles M.K., Gillet P., Gilmour J., Glavin D.P., Gounelle M., Grady M.M., Graham G.A., Grant P.G., Green S.F., Grossemy F., Grossman L., Grossman J.N., Guan Y., Hagiya K., Harvey R., Heck P., Herzog G.F., Hoppe P., Horz F., Hut J., Hutcheon I.D., Ignatyev K., Ishii H., Ito M., Jacob D., Jacobsen C., Jacobsen S., Jones S., Joswiak D., Jurewicz A., Kearsley A.T., Keller L.P., Khodja H., Kilcoyne A.L.D., Kissel J., Krot A., Langenhorst F., Lanzirotti A., Le L., Leshin L.A., Leitner J., Lemelle L., Leroux H., Liu M.-C., Luening K., Lyon I., MacPherson G., Marcus M.A., Marhas K., Marty B., Matrajt G., McKeegan K., Meibom A., Mennella V., Messenger K., Messenger S., Mikouchi T., Mostefaoui S., Nakamura T., Nakano T., Newville M., Nittler L.R., Ohnishi I., Ohsumi K., Okudaira K., Papanastassiou D.A., Palma R., Palumbo M.E., Pepin R.O., Perkins D., Perronnet M., Pianetta P., Rao W., Rietmeijer F.J.M., Robert F., Rost D., Rotundi A., Ryan R., Sandford S.A., Schwandt C.S., See T.H., Schlutter D., Sheffield-Parker J., Simionovici A., Simon S., Sittitsky I., Snead C.J., Spencer M.K., Stadermann F.J., Steele A., Stephan T., Stroud R., Susini J., Sutton S.R., Suzuki Y., Taheri M., Taylor S., Teslich N., Tomeoka K., Tomioka N., Toppani A., Trigo-Rodríguez J.M., Troadec D., Tsuchiyama A., Tuzolino A.J., Tylliszczak T., Uesugi K., Velbel M., Vellenga J., Vicenzi E., Vincze L., Warren J., Weber I., Weisberg M., Westphal A.J., Wirick S., Wooden D., Wopenka B., Wozniakiewicz P., Wright I., Yabuta H., Yano H., Young E.D., Zare R.N., Zega T., Ziegler K., Zimmerman L., Zinner E., Zolensky M.* Comet 81P/Wild 2 under a microscope // *Science*. 2006. V. 314. P. 1711–1716.
- Brownlee D., Joswiak D., Matrajt G.* Overview of the rocky component of Wild 2 comet samples: Insight into the early solar system, relationship with meteoritic materials and the differences between comets and asteroids // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2012. V. 47. № 4. P. 453–470.
- Brucato J.R., Colangeli L., Mennella V., Palumbo P., Bussoletti E.* Silicates in Hale-Bopp: hints from laboratory studies // *Planet. and Space Sci.* 1999. V. 47. № 6–7. P. 773–779.
- Cameron A.G.W.* Formation of the Solar nebula // *Icarus*. 1963. V. 1. P. 13–69.
- Ceccarelli C., Caselli P., Bockelée-Morvan D., Mousis O., Pizzarello S., Robert F., Semenov D.* Deuterium Fractionation: The Ariadne's Thread from the Precollapse Phase to Meteorites and Comets Today // *Protostars and Planets VI* / Eds. Beuther H., Klessen R.S., Dullemond C.P., Henning T. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2014. P. 859–882.
- Cha S.-H., Nayakshin S.* A numerical simulation of a 'Super-Earth' core delivery from ~100 to ~8 AU // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 415. № 4. P. 3319–3334.
- 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.
- Connolly J.N., Bizzarro M., Krot A.N., Nordlund A., Wielandt D., Ivanova M.A.* The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk // *Science*. 2012. V. 338. P. 651–655.
- Cordiner M.A., Milam S.N., Biver N., Bockelée-Morvan D., Roth N.X., Bergin E.A., Jehin E., Remijan A.J., Charney S.B., Mumma M.J., Boissier J., Crovisier J., Paganini L., Kuan Y.-J., Lis D.C.* Unusually high CO abundance of the first active interstellar comet // *Nat. Astron.* 2020. V. 4. P. 861–866.
- Crovisier J., Leech K., Bockelée-Morvan D., Brooke T.Y., Hanner M.S., Altieri B., Keller H.U., Lellouch E.* The spectrum of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) observed with the Infrared Space Observatory at 2.9 astronomical units from the Sun // *Science*. 1997. V. 275. № 5308. P. 1904–1907.
- Crovisier J., Brooke T.Y., Leech K., Bockelée-Morvan D., Lellouch E., Hanner M.S., Altieri B., Keller H.U., Lim T., Encrenaz S., Griffin M., de Graauw T., van Dishoeck E., Knacke R.F.* The thermal infrared spectra of Comets Hale-Bopp and 103P/Hartley 2 observed with the Infrared Space Observatory in thermal emission spectroscopy and analysis of dust, disks, and regoliths // *ASPSCS*. 2000. V. 196. P. 109–117.
- 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., Gutiérrez P.J., Keller H.U., Massironi M., Snodgrass C., Vincent J.-B., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Barucci M.A., Bertaux J.-L., Bertini I., Cremonese G., Da Deppo V., Debei S., De Cecco M., Feller C., Fulle M., Groussin O., Hviid S.F., Höfner S., Ip W.-H., Jorda L., Knollenberg J., Kovacs G., Kramm J.-R., Kürt E., Küppers M., La Forgia F., Lara L.M., Lazzarin M., Lopez-Moreno J.J., Moissl-Fraund R., Mottola S., Naletto G., Oklay N., Thomas N., Tubiana C.* The primordial nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 592. id. A63 (30 p.)
- Defouilloy C., Nakashima D., Joswiak D.J., Brownlee D.E., Tenner T.J., Kita N.T.* Origin of crystalline silicates from comet 81P/Wild 2: combined study on their oxygen isotopes and mineral chemistry // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2017. V. 465. P. 145–154.
- Dello Russo N., Kawakita H., Vervack R.J., Jr, Weaver H.A.* 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.
- Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.* The fundamental role of the Oort cloud in determining the flux of comets through the planetary system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 381. P. 779–789.
- Emel'yanenko V.V., Asher D.J., Bailey M.E.* A model for the common origin of Jupiter family and Halley type comets // *Earth, Moon and Planets*. 2013. V. 110. P. 105–130.
- Fegley B.Jr, Lewis J.S.* Volatile element chemistry in the solar nebula: Na, K, F, Cl, Br, and P // *Icarus*. 1980. V. 41. № 3. P. 439–455.

- Gail H.-P. Radial mixing in protoplanetary accretion disks. I. Stationary disc models with annealing and carbon combustion // *Astron. and Astrophys.* 2001. V. 378. P. 192–213.
- Gail H.-P. Radial mixing in protoplanetary accretion disks. IV. Metamorphosis of the silicate dust complex // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 413. P. 571–591.
- Gasc S., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Bieler A., Calmonte U., Fiethe B., Fuselier S., Galli A., Gombosi T., Hoang M., De Keyser J., Korth A., Le Roy L., Mall U., Rème H., Rubin M., Sémon T., Tzou C.-Y., Waite J.H. 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. Abundances of deuterium and Helium-3 in the protosolar cloud // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 84. P. 239–250.
- Geiss J., Gloeckler G. Isotopic composition of H, He and Ne in the protosolar cloud // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 106. № 1. P. 3–18.
- Grossman L. Condensation in the primitive solar nebula // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1972. V. 36. № 5. P. 597–619.
- Hanner M.S., Lynch D.K., Russel R.W. The 8-13 micron spectra of comets and the composition of silicate grains // *Astrophys. J.* 1994. V. 425. P. 274–285.
- Harker D.E., Woodward C.E., Sitko M.L., Wooden D.H., Russell R.W., Lynch D.K. Mid-IR Gemini-N observations of fragments B and C of comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3 // 2006 Am. Astron. Soc., DPS meeting #38, id.12.04. *Bull. Am. Astron. Soc.* 2006. V. 38. P. 503.
- Harker D.E., Desch S.J. Annealing of Silicate Dust by Nebular Shocks at 10 AU // *Astrophys. J.* 2002. V. 565. № 2. P. L109–L112.
- 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., Moreno R., Sztutowicz S., Blake G.A. Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2 // *Nature.* 2011. V. 478. № 7368. P. 218–220.
- Hughes A.L., Armitage P.J. Particle transport in evolving protoplanetary disks: implications for results from STARDUST // *Astrophys. J.* 2010. V. 719. P. 1633–1653.
- 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-rich chondrule fragment from comet Wild 2 // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 2014. V. 144. P. 277–298.
- Kemper F., Friend W.J., Tielens A.G.G.M. “The Absence of Crystalline Silicates in the Diffuse Interstellar Medium” // *Astrophys. J.* 2004. V. 609. № 2. P. 826–837.
- Kemper F., Friend W.J., Tielens A.G.G.M. Erratum: “The Absence of Crystalline Silicates in the Diffuse Interstellar Medium” // *Astrophys. J.* 2005. V. 633. № 1. P. 534–534.
- Kochergin A., Zubko E., Husárik M., Ivanova O.V., Videen G., Chornaya E., Kim S.S., Zheltobryukhov M., Luk'yanyk I. Velocity of dust ejected from interstellar comet 2I/Borisov // *Res. Notes Am. Astron. Soc.* 2019. V. 3. № 10. id. 152.
- Larimer J.W. Chemical fractionations in meteorites. I. Condensation of the elements // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1967. V. 31. № 8. P. 1215–1238.
- Larimer J.W., Anders E. Chemical fractionations in meteorites. II. Abundance patterns and their interpretation // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1967. V. 31. № 8. P. 1239–1270.
- Larimer J.W., Anders E. Chemical fractionations in meteorites. III. Major element fractionations in chondrites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1970. V. 34. № 3. P. 367–387.
- Larsen K.K., Wielandt D., Schiller M., Krot A.N., Bizzarro M. Episodic formation of refractory inclusions in the Solar System and their presolar heritage // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2020. V. 535. id. 116088.
- Lécluse C., Robert F. Hydrogen isotope exchange reaction rates: Origin of water in the inner solar system // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1994. V. 58. Iss. 13. P. 2927–2939.
- Lee J.-E., Bergin E.A. The D/H ratio of water ice at low temperatures // *Astrophys. J.* 2015. V. 799. P. 104–113.
- Lellouch E., Bézard B., Fouchet T., Feuchtgruber H., Encrénaz T., de Graauw T. The deuterium abundance in Jupiter and Saturn from ISO-SWS observations // *Astron. and Astrophys.* 2001. V. 370. P. 610–622.
- Le Roy L., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Bieler A., Briois C., Calmonte U., Combi M.R., De Keyser J., Dhooghe F., Fiethe B., Fuselier S.A., Gasc S., Gombosi T.I., Hässig M., Jäckel A., Rubin M., Tzou C.-Y. Inventory of the volatiles on comet 67P/Churyumov–Gerasimenko from Rosetta/ROSINA // *Astron. and Astrophys.* 2015. V. 583. id. A1. (12 p.)
- Lewis J.S. Low temperature condensation from the solar nebula // *Icarus.* 1972. V. 16. № 2. P. 241–252.
- Li A., Draine B.T. Do the infrared emission features need UV excitation? The PAH model in UV-poor reflection nebulae // *Astrophys. J.* 2001. V. 554. № 2. P. 778–802.
- Li M., Huang S., Petaev M.I., Zhu Z., Steven J.H. Dust condensation in evolving discs and the composition of planetary building blocks // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 495. № 3. P. 2543–2553.
- Lodders K. Solar system abundances and condensation temperatures of the elements // *Astrophys. J.* 2003. V. 591. P. 1220–1247.
- Machida M.N., Inutsuka S.-I., Matsumoto T. Effect of magnetic braking on circumstellar disk formation in a strongly magnetized cloud // *Publ. Astron. Soc. Jap.* 2011. V. 63. № 3. P. 555–573.
- 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.
- Meech K.J. Setting the scene: what did we know before Rosetta? // *Philos. Trans. Roy. Soc.* 2017. V. 375. № 2097. id.20160247.
- Nicholson P.D., Hedman M.M., Clark R.N., Showalter M.R., Cruikshank D.P., Cuzzi J.N., Filacchione G., Capaccione F., Cerrone P., Hansen G.B., Sicardy B., Drossart P., Brown R.H., Buratti B.J., Baines K.H., Coradini A. A close look at Saturn's rings with Cassini VIMS // *Icarus.* 2008. V. 193. P. 182–212.
- 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., Romani P.N., Coustenis A., Flasar F.M. Isotopic ratios in Titan's methane: measurements and modeling // *Astrophys. J.* 2012. V. 749. № 2. id. 159 (15 p.)
- Nuth J.A., Johnson N.M. Crystalline silicates in comets: How did they form? // *Icarus.* 2006. V. 180. № 1. P. 243–250.

- 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., Brown J.M., Evans N.J. II, Geers V., Knez C., Monin J.-L., Pontoppidan K. C2D Spitzer-IRS spectra of disks around T Tauri stars. IV. Crystalline silicates // *Astron. and Astrophys.* 2009. V. 507. № 1. P. 327–345.
- Ootsubo T., Sugita S., Kadono T., Honda M., Sakon I., Kawakita H., Watanabe J.-I., Subaru/ComicsTeam. Mid-Infrared Observation of the Dust Plume from Comet 9P/Tempell Generated by the Deep Impact Collision Using Subaru/Comics // *Workshop on Dust in Planetary Systems (ESA SP-643)*. September 26–30. 2005, Kauai, Hawaii / Eds Krueger H., Graps A. 2007. P. 45–49.
- Palme H., Larimer J.W., Lipschutz M.E. Moderate volatile elements // *Meteorites and the early Solar System* / Eds Kerridge J.F., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1988. P. 436–461.
- 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. № 7. P. 1340–1352.
- Petaev M.I., Wood J.A. The CWPI (Condensation with Partial Isolation) model: Formation of carbonaceous and enstatite chondrites from the same system // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1997. V. 32. P. A105.
- Petaev M.I., 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.
- Pierel J.D.R., Nixon C.A., Lellouch E., Fletcher L.N., Bjoraker G.L., Achterberg R.K., Bézard B., Hesman B.E., Irwin P.G.J., Flasar F.M. D/H ratios on Saturn and Jupiter from Cassini CIRS // *Astrophys. J.* 2017. V. 154. № 5. id. 178.
- Robert F. Solar System Deuterium/Hydrogen Ratio // *Meteorites and the early Solar system II* / Eds. Lauretta D.S., McSween H.Y., Jr. 2006. P. 341–351.
- Robbins S.J., Stewart G.R., Lewis M.C., Joshua E., Colwell J.E., Sremcevic M. Estimating the masses of Saturn's A and B rings from high-optical depth N-body simulations and stellar occultations // *Icarus*. 2010. V. 206. № 2. P. 431–445.
- Saxena S.K. Planetary phase equilibria: application to formation of Earth, Venus and Mercury // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1981. V. 45. № 6. P. 813–820.
- Scott E.R.D., Krot A.N. Thermal processing of silicate dust in the solar nebula: Clues from primitive chondrite matrices // *Astrophys. J.* 2005. V. 623. № 1. P. 571–578.
- Shinnaka Y., Ootsubo T., Kawakita H., Yamaguchi M., Honda M., Watanabe J. Mid-infrared spectroscopic observations of comet 17P/Holmes immediately after its great outburst in 2007 October // *Astron. J.* 2018. V. 156. № 5. P. 242 (8 p.)
- 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.
- Vincent J.-B., Bodewits D., Besse S., Sierks H., Barbieri C., Lamy P., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Keller H.U., Agarwal J., A'Hearn M.E., Auger A.-T., Barucci M.A., Bertaux J.-L., Bertini I., Capanna C., Cremonese G., de Deppo V., Davidsson B., Debei S., de Cecco M., El-Maarry M.R., Ferri F., Fornasier S., Fulle M., Gaskell R., Giacomini L., Groussin O., Guilbert-Lepoutre A., Gutierrez-Marques P., Gutiérrez P.J., Güttler C., Hoekzema N., Höfner S., Hviid S.F., Ip W.-H., Jorda L., Knollenberg J., Kovacs G., Kramm R., Kührt E., Küppers M., La Forgia F., Lara L.M., Lazzarin M., Lee V., Leyrat C., Lin Z.-Y., Lopez M., Lowry S., Magrin S., Maquet L., Marchi S., Marzari F., Massironi M., Michalik H., Moissl R., Mottola S., Naletto G., Oklay N., Pajola M., Preusker F., Scholten F., Thomas N., Toth I., Tubiana C. Large heterogeneities in comet 67P as revealed by active pits from sinkhole collapse // *Nature*. 2015. V. 523. № 7558. P. 63–66.
- Vorobyov E.I., Basu S. The burst mode of protostellar accretion // *Astrophys. J.* 2006. V. 650. № 2. P. 956–969.
- Vorobyov E.I., Basu S. The burst mode of accretion and disk fragmentation in the early embedded stages of star formation // *Astrophys. J.* 2010. V. 719. № 2. P. 1896–1911.
- Vorobyov E.I. Destruction of massive fragments in protostellar disks and crystalline silicate production // *Astrophys. J. Lett.* 2011. V. 728. № 2. L45.
- Waite J.H., Lewis W.S., Magee B.A., Lunine J., McKinnon W.B., Glein C.R., Mousis O., Young D.T., Brockwell T., Westlake J., Nguyen M.-J., Teolis B.D., Niemann H.B., McNutt R.L., Perry M., Ip W.H. Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and ⁴⁰Ar in the plume // *Nature*. 2009. V. 460 (7254). P. 487–490.
- Wood B.E., Linsky J.L., Hébrard G., Williger G.M., Moos H.W., Blair W.P. Two new low Galactic D/H measurements from the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer // *Astrophys. J.* 2004. V. 609. P. 838–853.
- Wooden D.H., Harker D.E., Woodward C.E., Butner H.M., Koike C., Witteborn F.C., McMurtry C.W. Silicate mineralogy of the dust in the inner coma of comet C/1995 01 (Hale-Bopp) pre- and postperihelion // *Astrophys. J.* 1999. V. 517. № 2. P. 1034–1058.
- Wooden D.H., Woodward C.E., Harker D.E. Discovery of crystalline silicates in comet C/2001 Q4 (NEAT) // *Astrophys. J.* 2004. V. 612. L77–L80.
- Wooden D.H., Desch S., Harker D., Gail H.-P., Keller L. Comet Grains and Implications for Heating and Radial Mixing in the Protoplanetary Disk // *Protostars and Planets V* / Eds Reipurth B., Jewitt D., Keil K. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2006. P. 815–833.
- Wooden D.H., Ishii H.A., Zolensky M.E. Cometary dust: the diversity of primitive refractory grains // *Philos. Trans. Roy. Soc.* 2017. A375. № 2097. id. 21386889.
- Xing Z., Bodewits D., Bannister M.T. Water production rates and activity of interstellar comet 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 893. L48.
- Yang B., Li A., Cordiner M.A., Chang C.-S., Hainaut O.R., Williams J.P., Meech K.J., Keane J.V., Villard E. Compact pebbles and the evolution of volatiles in the interstellar comet 2I/Borisov // *Nat. Astron.* 2021. V. 5. P. 586–593.
- Yang L., Ciesla F.J., Alexander C.M. The D/H ratio of water in the solar nebula during its formation and evolution // *Icarus*. 2013. V. 226. P. 256–267.
- Zubko E., Chornaya E., Videen G., Kim S.S. Clues to understanding the microphysics of dust in the interstellar comet C/2019 Q4 (Borisov) // *Research Notes Am. Astron. Soc.* 2019. V. 3. № 9. id. 138.