

УДК 523.64

КОМЕТА 2I/BORISOV В СРАВНЕНИИ С КОМЕТАМИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

© 2023 г. В. А. Дорофеева^{a, *}, Г. В. Борисов^b, Б. М. Шустов^c

^aИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

^bГосударственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^cИнститут астрономии РАН, Москва, Россия

*e-mail: dorofeeva@geokhi.ru

Поступила в редакцию 26.07.2021 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 16.07.2022 г.

В кратком обзоре обобщены данные по химическому и минеральному составу, а также по физическим свойствам первой внесолнечной кометы 2I/Borisov, полученные по наблюдениям, которые проводились с сентября 2019 г. до конца марта 2020 г. Отмечено, что качественно химический состав летучих и минеральной компоненты кометы 2I/Borisov аналогичен составу комет Солнечной системы, но есть отличия, указывающие на специфические условия формирования ее ядра в околозвездном газопылевом диске. Различные темпы выделения молекул CO и H₂O в окрестности перигелия свидетельствуют о возможной гетерогенности ядра кометы, сформировавшегося из более однородных ледяных блоков, но отличающихся между собой по составу. Эти составляющие блоки могли образоваться в широком интервале радиальных расстояний: от линии льдов H₂O до линии льдов CO. Их аккумуляция в ядро кометы свидетельствует о крупномасштабном перемешивании протокометных тел в околозвездном диске. В составе кометной комы 2I/Borisov не были обнаружены спектры мелкокристаллических магниевых силикатов, что может быть интерпретировано как отсутствие переноса значительного количества газопылевого вещества из внутренних горячих регионов диска наружу, в зону образования протокометных тел.

Ключевые слова: кометы, комета 2I/Borisov, летучие комет, кометная пыль, образование кристаллических и аморфных силикатов

DOI: 10.31857/S0320930X23010024, **EDN:** HCXAGF

ВВЕДЕНИЕ

Первая внесолнечная комета 2I/Borisov была открыта Геннадием Борисовым 30 августа 2019 г. (Борисов, Шустов, 2021). В последующие десять дней было осуществлено 170 определений ее орбиты и установлено, что комета движется по гиперболической орбите, что указывало на то, что тело гравитационно не связано с Солнцем (Guzik и др., 2019). Оцененная скорость на бесконечности оказалась необычайно высокой — 32 км с⁻¹. Таким образом, было однозначно подтверждено внесолнечное происхождение кометы и ей было присвоено имя “2I/Borisov”. В отличие от первого открытого в 2017 г. межзвездного объекта — астероида Oumuamua (Meech и др., 2017), — который, по некоторым наблюдениям, возможно, проявлял (неподтвержденные в дальнейшем) признаки кометной активности, кометная активность у 2I/Borisov была ярко выражена.

Естественно, что огромный интерес вызвали исследования химического состава межзвездной

госты. Спектроскопические наблюдения проводились как с Земли, в том числе с помощью WHT (William Herschel Telescope, Испания) и VLT (Very Large Telescope, Чили), так и с помощью околоземных космических телескопов: HST (Hubble Space Telescope) и UVOT (UltraViolet/Optical Telescope), который установлен на космическом аппарате Swift. В результате в коме кометы были обнаружены линии [OH] (Xing и др., 2020) и линии [O] (McKay и др., 2020), образование которых связывается с фотохимическим разложением воды, радикала CN, родительской молекулой которого считается цианид водорода HCN (Fitzsimmons и др., 2019; Bannister и др., 2020), легких органических соединений, имеющих цепь C—C (Opitom и др., 2020; Kareta и др., 2020; Lin и др., 2020), CO и CO₂, радикала NH₂ — продукта фотохимического разложения аммиака NH₃ (Bannister и др., 2020; Cordiner и др., 2020), а также молекул сероуглерода CS и метилового спирта CH₃OH. Все установленные соединения — это типичные компоненты льдов комет Солнечной системы.

Качественно состав комы был оценен по ее наличию на архивных снимках, сделанных еще в декабре 2018 г., т.е. почти за год до открытия кометы, когда она находилась на расстоянии $r \sim 8-5$ а. е. от Солнца (Ye и др., 2020). Принимая во внимание, что на таком гелиоцентрическом расстоянии температура абсолютно черного тела, которому практически соответствует поверхность кометного ядра, составляет ≈ 100 К, в соответствии с летучестью кометных льдов (см. таблицу), можно предположить, что основными газовыми компонентами комы были CO , CO_2 и NH_3 , переходящие в газообразное состояние либо в результате сублимации соответствующего льда, либо вследствие экзотермической реакции кристаллизации аморфного льда воды и освобождения летучих, заключенных в его порах. Абсолютные содержания компонентов комы были определены, начиная с сентября 2019 г., когда комета 2I/Borisov приблизилась к Солнцу на расстояние ~ 3 а. е. (Bolin и др., 2020; Fitzsimmons и др. 2019; Oritom и др., 2020; deLeón и др., 2020; Kareta и др., 2020). Измерения проводились вплоть до достижения кометой 8 декабря 2019 г. перигелия ($q = 2.00663 \pm 0.00002$ а. е.) (Lin и др., 2020; Bannister и др., 2020) и продолжались некоторое время в постперигельный период (Xing и др., 2020; Guzik, Drahus, 2021; Oritom и др., 2021).

По данным наблюдений было установлено, что внесолнечная комета 2I/Borisov имеет качественный состав летучих компонентов, аналогичный составу комет Солнечной системы, но соотношение основных компонентов отличается рядом особенностей. Остановимся на этом вопросе более подробно, но прежде приведем необходимые оценки температур сублимации основных льдов, входящих в состав кометных ядер, и сопоставим их с гелиоцентрическими расстояниями, на которых эти температуры в Солнечной системе достигаются.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУР СУБЛИМАЦИИ КОМЕТНЫХ ЛЬДОВ

Экспериментальные данные относительно температур сублимации ($T_{\text{субл}}$) льдов, входящих в состав кометных ядер (H_2O , CH_3OH , CO_2 , NH_3 , CH_4 , CO , N_2 , Ar , O_2) в условиях космического пространства в научной литературе отсутствуют в связи с практической невозможностью их получения в условиях вакуума. Даже для $\text{H}_2\text{O}_{\text{лед}}$, температура сублимации которого является самой высокой ($T_{\text{субл}} = 200$ К) для льдов из представленного выше списка, минимальное парциальное давление составляет $p_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-6}$ бар, т.е. слишком высокое, чтобы экстраполировать эти данные на условия космоса.

С известной осторожностью в качестве верхней оценки для $T_{\text{субл}}$ кометных льдов используют

ся равновесные значения $T_{\text{конд}}$ или $T_{\text{субл}}$, полученные в моделях минимальной массы (minimum-mass solar nebula, MMSN) околосолнечного газопылевого протопланетного диска (небулы), в которых $M_{\text{диск}} \sim 0.1 M_{\text{Солнца}}$. Такой выбор можно обосновать тем, что в околосолнечной небуле общее давление ($P_{\text{общ}}$) в области образования $\text{H}_2\text{O}_{\text{лед}}$ составляет менее 10^{-7} бар. На больших радиальных расстояниях, где происходит конденсация других льдов, $P_{\text{общ}}$ ниже как минимум на 1–2 порядка (Дорофеева, Макалкин, 2004). Это давление на 99% обеспечивается смесью $\text{H}_2 + \text{He}$ в мольном соотношении 5 : 1, поэтому парциальные давления всех остальных компонентов газовой фазы диска (p_i), в соответствии с солнечной распространенностью элементов (Lodders, 2010), составляют менее $10^{-3} \times P_{\text{общ}}$.

Одной из первых MMSN была модель (Hayashi, 1981), в которой масса околосолнечной небулы принималась $0.013 M_{\text{Солнца}}$. Это предположение снимало вопрос о завышенных температурах и давлениях, характерных для моделей большой массы (Cameron, Pine, 1973; Cameron, 1978), в которых масса диска предполагалась равной или близкой массе Солнца. Однако, поскольку масса диска в MMSN определялась как сумма масс всех планет Солнечной системы, дополненная водородом и гелием в соответствии с солнечными пропорциями, была определенная трудность обеспечить образование ядер планет-гигантов, в частности Юпитера, масса ядра которого предполагалась равной ~ 15 массам Земли. Поэтому в модели (Hayashi, 1981) было предположено, что в ядро Юпитера вошла вся пылевая компонента диска из региона от $r = 1.55$ а. е. до $r \sim 7.00$, а недостающая масса дополнялась за счет льда воды, который, как предполагалось в модели, конденсировался, начиная с $r = 2.7$ а. е.; этому радиальному расстоянию соответствовала $T = 170$ К, вычисленная как чернотельная температура. Таким образом, в модели (Hayashi, 1981) впервые был рассмотрен вопрос о существовании в околосолнечном газопылевом протопланетном диске условной границы, делящей его на две зоны: внутреннюю, где вода существовала в газообразном состоянии, и внешнюю, где она находилась в фазе льда. На этой границе происходило скачкообразное изменение поверхностной плотности пылевой компоненты диска, обеспечивавшее раннее образование Юпитера; позднее эту границу стали называть “snow line”.

В настоящее время эта оценка по-прежнему достаточно часто используется, например (Martin, Livio, 2012 и др.), но чаще, особенно в космохимической литературе, используется оценка $T_{\text{субл}} \text{H}_2\text{O}_{\text{лед}} = 145$ К полученная в работе (Podolak, Zucker, 2004). В модели диска данных авторов это

значение соответствует положению snow line во внешней части Главного пояса астероидов на $r = 3.7$ а. е. Значения 145 К, или близкие к нему, используются, например, в (Marboeuf и др., 2014; Mandt и др., 2015, Mousis и др., 2016 и др.). Нам также эта оценка кажется более обоснованной, поскольку позволяет объяснить существование в Главном поясе как безводных астероидов, например, Веста, так и тел, в состав которых входит вода, аккумуляция которой была возможна только в форме льда, таких как родительские тела углистых хондритов.

Эти модельные оценки $T_{\text{субл}} \text{H}_2\text{O}_{\text{лед}}$ можно сопоставить с данными наблюдений за изменением состава кометных ком по мере их движения по орбите и появления в них водяного пара. Однако для этого необходимо иметь зависимость температуры поверхности ядра кометы от ее расстояния от Солнца. Известно, что поверхность кометных ядер темная из-за покрывающей ее мелкой пыли и тугоплавких органических веществ, геометрическое альbedo не превышает 0.06 и в первом приближении ее можно принять как абсолютно черное тело (Lodders, Fegley, Jr., 1998; Jewitt, 2015). В этих и других работах рекомендовано рассчитывать изменение равновесной температуры сферического черного тела ($T_{\text{ВВ}}$) в зависимости от гелиоцентрического расстояния r по соотношению, в котором $T_{\text{ВВ}}$ на $r = 1$ а. е. составляет 278 К.

Результаты наблюдений за восьмью кометами разных динамических типов представлены в (Marboeuf, Schmitt, 2014). Из них следует, что выделение $\text{H}_2\text{O}_{\text{газ}}$ с интенсивностью превышающей 1018 мол с 1 м^2 в секунду происходит для ряда комет на $r > 3.5$ а. е., т.е. при $T_{\text{ВВ}} < 160$ К. Максимальная интенсивность выделения $\text{H}_2\text{O}_{\text{газ}}$ в перигелии как минимум на три порядка выше.

Но наиболее информативными, с нашей точки зрения, являются данные по интенсивности сублимации льда воды с поверхности наиболее изученной кометы – короткопериодической кометы 67P/Чурюмова–Герасименко, представленные в (Hansen и др., 2016). В этой работе обобщены результаты, полученные с помощью всех приборов, установленных на КА Rosetta (ROSINA, VIRTIS, RPC/ICA, MIRO), а также данные наземных наблюдений. Последние проводились с помощью 8-м телескопов VLT и Gemini South (Чили).

Первые данные о присутствии в коме кометы паров воды были получены 6–7 июня 2014 г. с помощью микроволнового зонда MIRO, когда комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии 3.9 а. е., а расстояние между КА Rosetta и ядром кометы еще составляло 360000 км (Gulkis и др.,

2015). Интенсивность газовыделения была оценена $\sim 1 \times 10^{25}$ мол $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$. Последующие измерения были проведены 7–9 и 18–19 августа 2014 г., когда комета находилась на гелиоцентрическом расстоянии 3.6 и 3.52 а. е., а расстояние между кометой и КА составляло всего лишь 78 и 107 км соответственно. Согласно данным (Lee, 2015), интенсивность выделения $\text{H}_2\text{O}_{\text{газ}}$ в этот период менялась от 0.1×10^{25} до 3.0×10^{25} мол $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$. По мере приближения к перигелию (1.24 а. е.) скорость выделения $\text{H}_2\text{O}_{\text{газ}}$ возросла более чем на три порядка. Температура черного тела на радиальных расстояниях 3.9, 3.6, 3.52 и 1.24 а. е. составляет 141 К, 147 К, 149 К и 350 К соответственно.

Результаты сопоставления теоретических оценок и наблюдательных данных дают нам возможность с определенной долей уверенности полагать, что $T_{\text{сублимации}} \text{H}_2\text{O}$ в условиях космоса не превышает 140–150 К.

Одной из первых попыток теоретически оценить температуры сублимации ($T_{\text{субл}}$) других чистых льдов протосолнечной небулы в условиях маломассивного околосолнечного диска, описываемого моделью (Hayashi, 1981), была сделана в работе (Yamamoto, 1985). В ней приведены значения температур сублимации 20 основных кометных льдов, которые хорошо согласуются с более поздними оценками. Так температуры сублимации льда воды в (Yamamoto, 1985) определена как 152 К, $T_{\text{субл}}(\text{NH}_3) = 78$ К, $T_{\text{субл}}(\text{CO}_2) = 72$ К, $T_{\text{субл}}(\text{CH}_4) = 31$ К, а $T_{\text{субл}}(\text{CO}) = 25$ К.

В данной работе оценки температур сублимации основных компонент кометных льдов были сделаны, как и во многих современных работах, с использованием полиномиального уравнения, приведенного в работе (Fray, Schmitt, 2009), коэффициенты которого для разных интервалов температур даны, например, в (Marboeuf и др., 2014). Отметим, что в этой работе при $P_{\text{общ}} = 10^{-9}$ получено значение $T_{\text{конд}}$ водяного пара ≈ 137 К. Полученные оценки температур сублимации основных кометных льдов представлены в таблице. В ней также даны гелиоцентрические расстояния, которым отвечают значения температуры, вычисленные в предположении, что они соответствуют температуре абсолютно черного тела ($T_{\text{ВВ}}$). Отметим, что оценки $T_{\text{субл}}$, представленные в табл., весьма близки к полученным в (Yamamoto, 1985). Небольшие различия обусловлены разницей в использованных значениях относительных распространенностей элементов и соединений ($[X]/[\text{H}_2]$) и уточнении их уравнений состояния.

Оценки температур сублимации основных компонент кометных льдов в моделях околосолнечного газопылевого диска малой массы ($P_{\text{общ}} \sim 10^{-9}$ бар) по (Podolak, Zucker, 2004; Fray, Schmidt, 2009; Marboeuf и др., 2014) и гелиоцентрические расстояния в Солнечной системе, на которых эти температуры достигаются для абсолютно черного тела

Лед	$T_{\text{субл}}, \text{K}$	$r, \text{а. е.}$	Лед	$T_{\text{субл}}, \text{K}$	$r, \text{а. е.}$
H ₂ O	145	3.7	CH ₄	30	85.9
CH ₃ OH	100	7.7	CO	25	123.7
HCN	100	7.7	N ₂	22	159.7
CO ₂	80	12.1	Ar	22	159.7
NH ₃	70	15.8	O ₂	22	159.7

Однако следует отметить, что сублимация сверхлетучих льдов с $T_{\text{субл}} < 30 \text{ K}$ зависит главным образом от механизма их аккумуляции, что стало окончательно ясно по результатам космической миссии Rosetta. Так оказалось, что Ar и N₂ сублимируют главным образом не на $r \sim 160 \text{ а. е.}$, где поверхность в результате солнечной инсоляции нагревается до $T \geq 22 \text{ K}$, а только на $r \sim 5 \text{ а. е.}$, и связано это с тем, что указанные газы в условиях протосолнечного газопылевого облака, вероятнее всего, были захвачены в поры аморфного льда воды и вместе с ним попали в состав кометных ядер. Их переход в кометную кому стал возможен только когда аморфный лед начал превращаться в кристаллический. Скорость реакции кристаллизации зависит от температуры. Экспериментально показано, что при $T = 140 \text{ K}$ время кристаллизации аморфного льда воды составляет $\sim 1 \text{ ч}$, а при $T < 77 \text{ K} \sim$ млрд лет (Jewitt и др., 2009).

В то же время высоколетучие CH₄ и CO сублимировали еще позже, поскольку в процессе кристаллизации льда воды образовывались клатратные гидраты метана и окиси углерода — CH₄ · 6H₂O и CO · 6H₂O, — $T_{\text{субл}}$ которых примерно на 30 K выше, чем чистых льдов — 61 и 53 K, согласно оценке (Marboeuf и др., 2014).

Кроме того, процесс сублимации критическим образом зависит от формы кометного ядра, количества осей собственного вращения, степени разрушения верхних слоев ядра при предыдущем проходе перигелия и обнажения свежих слоев и других факторов. Поскольку относительно характеристик ядра кометы 2I/Borisov мы многого не знаем, высказанные далее суждения носят во многом предположительный характер.

СОСТАВ ЛЬДОВ ЯДРА КОМЕТЫ 2I/Borisov

Вода (H₂O)

H₂O — основной лед пылевой компоненты межзвездных молекулярных облаков, поскольку кислород имеет максимальную космическую рас-

пространенность после водорода и гелия (Lodders, 2010).

У кометы 2I/Borisov сублимация льда воды наблюдалась, начиная с $r \approx 2.5 \text{ а. е.}$ Измерения проводились как до, так и после перигелия (Ortoto и др., 2020; Xing и др., 2020). По мере приближения к перигелию (8 декабря 2019 г., $q = 2.00663 \pm 0.00002 \text{ а. е.}$) интенсивность выделения воды у 2I/Borisov увеличивалась с $(6.3 \pm 1.5) \times 10^{26} \text{ мол с}^{-1}$ 11 октября 2019 г. на $r = 2.38 \text{ а. е.}$ (McKau и др., 2020) до $(1.07 \pm 0.12) \times 10^{27} \text{ мол с}^{-1}$ 1 декабря 2019 г. на $r = 2.01 \text{ а. е.}$ (Xing и др., 2020), а протяженность хвоста к этому времени была уже более 160 тыс. км. Достигнув максимума вблизи перигелия, скорость выделения воды стала резко уменьшаться — вдвое за 20 дней, до $(0.49 \pm 0.09) \times 10^{-27} \text{ мол с}^{-1}$ 21 декабря 2019 г. на $r = 2.03 \text{ а. е.}$ (Xing и др., 2020).

По итогам оценок средней скорости сублимации воды, $Q(\text{H}_2\text{O})$, она составила $(0.5-3) \times 10^{27} \text{ мол с}^{-1}$ (Xing и др., 2020). Таким образом, полученное значение $Q(\text{H}_2\text{O})$ оказалось несколько ниже, чем у долгопериодических комет на $r \sim 2 \text{ а. е.}$: для них она составляет $Q(\text{H}_2\text{O}) = 3.6 \times 10^{28} - 2.4 \times 10^{29} \text{ мол с}^{-1}$ (Marshall и др., 2017), но сопоставимо с $Q(\text{H}_2\text{O})$ у короткопериодических комет: так, например, для кометы 67P на $r \sim 2 \text{ а. е.}$ $Q(\text{H}_2\text{O}) = (1.42 \pm 0.51) \times 10^{28} \text{ мол с}^{-1}$ (Marshall и др., 2017). На основании указанных выше результатов измерений, был сделан вывод, что внешние слои областей ядра кометы 2I/Borisov, освещавшихся Солнцем в постперигелийный период, обеднены водой по сравнению с таковыми у долгопериодических комет Солнечной системы.

Цианистый водород (HCN) и радикал цианида CN

Цианистый водород HCN, как и радикал CN, образующийся при его фотодиссоциации — типичные компоненты как диффузных, так и плотных молекулярных облаков — источников вещества протопланетных систем. Лед HCN входит, наряду со льдом H₂O, в состав ядер комет Солнечной системы. $T_{\text{субл HCN}} \approx 100 \text{ K}$ (таблица), в кометных комах его содержание относительно воды, HCN/H₂O, составляет 0.08–0.25% (Vokselé—Morvan, Biver, 2017).

Радикал CN был обнаружен в коме межзвездной кометы 2I/Borisov уже при первых измерениях спектров, начиная с 20 сентября 2019 г., когда комета находилась на $r = 2.7 \text{ а. е.}$ Скорость сублимации HCN_{лед}, $Q(\text{CN})$, в этот период по данным (Fitzsimmons и др., 2019) составляла $(3.7 \pm 0.4) \times 10^{24} \text{ мол с}^{-1}$. На 7 ч позже другая группа авторов (Kareta и др., 2020) получила близкое значение $Q(\text{CN}) = 5.0 \pm 2.0 \times 10^{24} \text{ мол с}^{-1}$. Они же повторили определение $Q(\text{CN})$ 1 октября 2019 г., когда комета приблизилась к Солнцу на $r = 2.5 \text{ а. е.}$, было по-

лучено значение $Q(\text{CN}) = (5.3 \pm 0.7) \times 10^{24}$ мол с^{-1} (Kareta и др., 2020). Отметим и другие измерения $Q(\text{CN})$, результаты которых, приведенные в работах (Opitom и др., 2020, Lin и др., 2020; Bannister и др., 2020), были получены в период 30 сентября – 26 ноября 2019 г. Полученные значения несколько ниже указанных ранее и составляют $\sim 2 \times 10^{24}$ мол с^{-1} . Максимальное относительное содержание HCN в коме 2I/Borisov составило $\text{HCN}/\text{H}_2\text{O} = 0.12\%$. Таким образом, все полученные значения оказались близки к типичным значениям для долгопериодических комет Солнечной системы на таком же расстоянии от Солнца (Fitzsimmons и др., 2019). Особо следует отметить, что все указанные выше измерения проводились в доперигельный период и увеличение $Q(\text{CN})$ шло параллельно с увеличением $Q(\text{H}_2\text{O})$.

Легкие углеводороды, имеющие не более двух атомов углерода (условно обозначаются как C_2)

Измерения темпа газовыделения легких органических соединений, среди которых могут быть такие молекулы, как C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, показали, что комета 2I/Borisov обеднена ими (Opitom и др., 2020; Kareta и др., 2020; Lin и др., 2020). Так в двух различных сериях измерений были получены следующие значения C_2/CN : 0.47 ± 0.11 на $r = 2.5$ а. е. (Kareta и др., 2020) и 0.2 ± 0.1 на $r = 2.145$ а. е. (Lin и др., 2020) – оба измерения проводились в доперигельный период. Типичное значение C_2/CN для комет Солнечной системы 0.6, хотя значения, близкие полученным для 2I/Borisov, были определены в 16 кометах.

Аммиак (NH_3)

Аналогичный характер газовыделения наблюдался и для радикала NH_2 (его родительская молекула NH_3), однако, в то время как 2I/Borisov обеднена легкими органическими соединениями, измерения показали, что она обогащена относительно комет Солнечной системы аммиаком (Xing и др., 2020). В то же время было установлено, что изменение темпа выделения воды и других указанных выше молекул не коррелирует со скоростью выделения одной из наиболее летучих молекул – окиси углерода, CO.

Окись углерода (CO)

CO имеет температуру сублимации $T_{\text{субл CO}} \approx 25$ К (табл. 1), но ее сублимация с поверхности ядра 2I/Borisov началась только на $r \approx 8$ а. е., где $T_{\text{вв}} \approx 98$ К. Существенное увеличение скорости газовыделения CO началось при приближении кометы к перигелию, и эта скорость продолжала увеличиваться и в постперигельный период, достигнув

максимума примерно через месяц (Bodewits и др., 2020; Cordiner и др., 2020). Оказалось, что ядро кометы 2I/Borisov крайне богато окисью углерода. Данные, полученные на орбитальных космических телескопах на ИСЗ HST и с UVOT на ИСЗ Swift, показали рекордно высокое соотношение $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}$ в коме – на уровне 130–155%; в то время, как темпы потери воды ядром кометы быстро снижались после прохождения перигелия, темпы потери CO оставались постоянными или даже возрастали. О повышенном содержании CO говорит и высокое значение отношения CO/HCN . Для большинства солнечных комет $\text{CO}/\text{HCN} = 10$ –20 и лишь для нескольких комет оно превышает 200. У кометы 2I/Borisov значение $\text{CO}/\text{HCN} \approx 630(+200, -340)$ (Cordiner и др., 2020), при этом содержание HCN относительно воды, как отмечалось выше, отвечает содержанию в солнечных кометах (0.08–0.25%). Однако надо отметить, что из 33 солнечных комет, в которых определялось значение CO/HCN , одна, а именно долгопериодическая комета C/2016 R2 (Pan-STARRS), имеет еще более высокое относительное содержание CO: $\text{CO}/\text{HCN} \approx 26400$ (Biver и др., 2018). Отметим также, что в составе вещества этой кометы также обнаружено нетипично высокое содержание другого сверхлетучего элемента – N_2 .

Такое поведение CO, по мнению Yang и др. (2021), свидетельствует о том, что блоки – относительно однородные структурные образования (кометезимали), из которых сформировалось ядро кометы – имели разный состав. В доперигельный период и сразу после прохождения перигелия сублимация льда воды и других умеренно летучих льдов – легких органических молекул и NH_3 – происходила из блоков, образовавшихся относительно близко к центральной звезде, ближе, чем располагалась snow line CO (условная термодинамическая граница конденсации/сублимации CO в моделях околозвездных газопылевых дисков малой массы). Эти блоки, выходящие на поверхность ядра, освещались Солнцем в период прохождения кометой 2I/Borisov перигелия. В то же время, в постперигельный период, возможно, в силу наклона оси собственного вращения, под солнечную инсоляцию попали уже другие блоки, богатые льдом CO. Их образование, вероятно, происходило во внешнем относительно расположения snow line CO регионе. Таким образом, можно полагать, что в околозвездном диске, где образовалась комета 2I/Borisov, так же, как и в околосолнечном диске, происходило эффективное перемешивание конденсированного вещества, образованного на разных радиальных расстояниях от звезды.

Здесь также уместно будет вспомнить, что проведенный после открытия кометы анализ более ранних снимков показал, что кома у нее была уже

на $r \approx 7.8$ а. е. в декабре 2018 г., но на еще более ранних снимках (ноябрь 2018 г., $r = 8.6$ а. е.) она не была видна, хотя температура поверхности в этот период была выше температуры сублимации льдов CO_2 и CH_4 , и тем более, CO . В связи с этим можно предположить, что высоколетучие компоненты, такие как CO , N_2 , Ar , содержатся в ядре кометы не только в виде чистых льдов, но и в дисперсном состоянии, находясь в порах аморфного межзвездного льда воды. Экзотермическая реакция кристаллизации аморфного льда и освобождение заключенных в его порах компонент с летучестью, превышающей летучесть льда воды, теоретически может начаться на $r \sim 16$ а. е., но она зависит от угла падения солнечного света. Наблюдения кентавров показывают, что фазовый переход является эффективным источником выделения газа на 10–12 а. е. (Guilbert–Lepoutre, 2012). Однако, если какая-то часть CO находится в виде льдов, активность кометы может проявиться значительно раньше. Например, недавно открытая крупнейшая комета Облака Оорта 2014 UN271 проявила такую активность уже на $r \sim 20$ а. е., что было подтверждено данными независимых наблюдений с телескопами Sutherland наземной сети LCOGT и SkyGems в Намибии. То, что активность кометы 2I/Borisov, несмотря на обилие в ней CO , началась только на $r < 8$ а. е. может также свидетельствовать о крупномасштабной гетерогенности ее ядра, причем на больших радиальных расстояниях блоки, содержавшие CO либо в порах аморфного льда, либо в виде собственно CO -льда, видимо, не освещались.

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ КОМЕТЫ

Пылевая компонента 2I/Borisov изучалась несколькими коллективами авторов (Zubko и др., 2019; deLeón и др., 2019; 2020; Busarev и др., 2021 и др.). Полученные данные позволяют говорить о близости ее по ряду параметров пылевой компоненты к кометам Солнечной системы. Так, в (deLeón и др., 2020) отмечается, что средняя скорость выделения пыли с поверхности 2I/Borisov составляет в среднем $\sim 50 \text{ kg s}^{-1}$ на гелиоцентрических расстояниях 2.6 а. е., что близко к таковой для солнечных комет. Анализ спектров отражения, полученных для гелиоцентрических расстояний ~ 2.50 – 2.01 а. е., показал, что аналогично солнечным кометам основными компонентами пылевых частиц в коме 2I/Borisov являются Fe-Mg силикаты и толины – тугоплавкие органические соединения сложного состава (Busarev и др., 2021 др.).

Важные данные были получены и по составу микрокомпонент пыли 2I/Borisov. Известно, что в результате многолетних наблюдений за составом кометных ком солнечных комет, которые

проводились с помощью высокоточного спектрографа UVES, установленного на телескопе VLT (Чили), в спектрах ком 19 комет были выявлены эмиссионные линии атомов железа и никеля (Manfroid и др., 2021; Hutsemékers и др., 2021). Наблюдения проводились в интервале гелиоцентрических расстояний от 0.68 до 3.25 а. е. за кометами различных динамических типов. В результате было установлено, что в их комах соотношение газобразных Ni/Fe близко к единице ($\lg \text{Ni/Fe} = -0.06 \pm 0.32$), при том, что их солнечное отношение Ni/Fe ≈ 0.6 ($\lg \text{Ni/Fe} = -1.25 \pm 0.04$). Отметим, что температура абсолютно черного тела (T_{BB}), которому практически соответствует поверхность кометного ядра на указанных радиальных расстояниях, составляет ≈ 340 и ≈ 150 К соответственно.

Подобные измерения были проведены с помощью спектрографа X-shooter, установленного на телескопе VLT, и для кометы 2I/Borisov (Guzik, Drahus, 2021; Opitom и др., 2021). В ее коме на радиальном расстоянии 2.32 а. е. от Солнца (что соответствует $T_{\text{BB}} \approx 180$ К) были обнаружены пары никеля, содержание которого оценивается в 0.002% относительно OH, или 0.3% относительно CN. Были также опубликованы данные о темпах выделения Ni и Fe, полученные в период с 24 по 29 декабря 2019 г., а также 29 января 2020 г. (Opitom и др., 2021): $Q(\text{Ni}) = 21.88 \pm 0.07 \text{ mol s}^{-1}$ и $Q(\text{Fe}) = 21.67 \pm 0.16 \text{ mol s}^{-1}$, что позволило авторам оценить значение $\lg \text{Ni/Fe} = 0.21 \pm 0.18$, что неплохо согласуется с приведенными выше значениями для комет Солнечной системы.

Поскольку для испарения этих металлов нужны очень высокие температуры, было предположено, что они присутствуют в ядрах комет в виде твердых низкотемпературных соединений Ni и Fe, которые, попадая в кому, быстро (в течение первых сотен секунд) разрушаются даже при $T \sim 230$ – 170 К. В качестве таких соединений были предложены металлоорганические (карбонильные) комплексы состава $\text{Fe}(\text{CO})_5$ и $\text{Ni}(\text{CO})_4$ (Manfroid и др., 2021). Это предположение основано на том экспериментальном факте, что была найдена корреляция между выделением Fe, Ni и CO . Оценены температуры и скорости сублимации карбонильных Ni и Fe. Температуры оказались лишь слегка выше, чем у $\text{CO}_{2\text{лед}}$, а скорости сублимации ниже, чем у $\text{CO}_{2\text{лед}}$, но выше, чем у $\text{H}_2\text{O}_{\text{лед}}$. Это дает приемлемый механизм перехода Ni и Fe в газовую фазу даже на больших радиальных расстояниях, исключая необходимость испарения металлов или их сульфидов. Тем не менее авторы отмечают, что предложенный механизм нуждается в проверке и уточнении.

Однако между составом пылевой компоненты солнечных комет и кометы 2I/Borisov есть и существенные различия. Так, анализируя спектры,

полученные в (deLeon и др., 2019), Zubko и др. (2019) пришли к выводу, что пылинки в коме 2I/Borisov не содержат в своем составе значительных количеств льда воды (об этом же свидетельствуют и данные из работ (Busarev и др., 2021) и др.), в них также отсутствуют обогащенные Mg силикаты и/или аморфный углерод. Более вероятно, что в них преобладают Mg-Fe силикаты и тугоплавкие органические соединения (Kochergin и др., 2019; Busarev и др., 2021 и др.), а как известно, и то, и другое имеет внесолнечное происхождение, подробнее в (Дорофеева, 2020). Отметим, что в пылевой компоненте комет Солнечной системы масса обогащенных Mg мелкокристаллических силикатов составляет 30–50% от общей массы силикатов. Их образование могло происходить только в результате конденсации газа солнечного состава в регионах, близких к Солнцу, поэтому присутствие Mg-силикатов свидетельствует о значимой роли радиального транспорта газопылевого вещества из внутренних регионов околосолнечного диска наружу, вплоть до транснептунового региона (Дорофеева, 2022). Полученные результаты для состава пыли межзвездной кометы 2I/Borisov косвенно свидетельствуют, что, хотя радиальное перемешивание протокометных тел, безусловно, происходило в пределах положения snow line H₂O (внутренняя граница) и CO (внешняя граница), но крупномасштабное перемешивание, сопровождавшееся радиальным транспортом вещества из околосолнечного региона наружу в околосолнечном газопылевом диске, где комета 2I/Borisov образовалась, видимо, было незначительным.

РАЗМЕР ЯДРА КОМЕТЫ

Помимо определения химического состава компонентов ядра межзвездной кометы были предприняты большие усилия для определения его размера – важнейшей характеристики комет. Первая оценка возможного интервала значений радиуса ядра 2I/Borisov от 0.7 до 3.3 км, была получена в (Fitzsimmons и др., 2019) на основе спектроскопических измерений $Q(\text{CN})$, проводившихся 20 сентября 2019 г. на ИСЗ ISO (Infrared Space Observatory) и Herschel Space Observatory. Оценка получена при многочисленных допущениях о близости свойств межзвездной кометы и комет Солнечной системы – значения соотношений CN/OH и ice/rock, $Q(\text{H}_2\text{O})$, альbedo и плотности ядра, размера зерен пыли в коме и т.д.

Первые фотометрические измерения были проведены как в доперигельный период в сентябре–октябре 2019 г. на инфракрасном телескопе NASA IRTF (Infrared Telescope Facility) (Bolin и др., 2020) и в конце ноября 2019 г. на оптическом инфракрасном телескопе Gemini South (Lee и др., 2019), так и в постперигельный период в де-

кабре 2019 г. на Северном оптическом телескопе (NOT) (Jewitt, Luu, 2019). Напомним, что $q \approx 2.0$ а. е. был пройден 8 декабря 2019 г. В первых двух работах верхний предел значения радиуса ядра 2I/Borisov определялся как $r_n \approx 3.8$ км, в третьем получена оценка $r_n = 1.5$ км при значении альbedo 0.07, принятом по аналогии с кометой 10P/Tempel 2.

Во всех указанных измерениях комета находилась уже довольно близко к Солнцу – от ≈ 2.7 до ≈ 2 а. е. На таких гелиоцентрических расстояниях солнечная инсоляция вызывает высокий уровень сублимации кометных льдов, причем сублимируют не только летучие (CO, N₂, CH₄) и умеренно летучие льды (CO₂, HCN, NH₃), но и лед воды, содержание которого превышает содержание всех остальных кометных льдов. Вместе с потоком газа с поверхности кометы увлекаются пылевые частицы разного размера, образующие дополнительную поверхность отражения солнечного света, что затрудняет измерение светового потока непосредственно от ядра. Поэтому для измерения его площади и вычисления из полученных данных радиуса ядра кометы используют и косвенные методы. Так, размер ядра может быть рассчитан через оценку доли его активной поверхности. Guzik и др. в работе (2020), используя эмпирическое соотношение, предложенное в (Jorda и др., 2008), получили теоретическую оценку скорости выделения воды в соответствии с указанным выше положением кометы относительно Солнца (от $r \approx 2.7$ а. е. до $r \approx 2$ а. е.): $Q_{\text{H}_2\text{O}} \sim 10^{27}$ мол с⁻¹.

Из сравнения теоретической и наблюдаемой $Q(\text{H}_2\text{O})$, площадь поверхности, с которой происходила сублимация, оценена как ~ 5 км², что соответствует ядру с радиусом ~ 1 км в предположении, что ее активная доля 30%, а вклад ледяных зерен в состав комы незначителен.

Hui и др. (2020) из полученной оценки негравитационного эффекта в движении кометы и в предположении, что плотность кометного ядра составляет 0.5 г см⁻³, оценили, что его радиус, вероятнее всего, составляет 0.4 км, что согласуется с результатами наблюдений, проведенных на ИСЗ HST (Jewitt и др., 2020).

РАЗРУШЕНИЕ (ДЕСТРУКЦИЯ) ЯДРА

Как следует из приведенных выше результатов, полученные оценки радиуса ядра кометы 2I/Borisov имеют достаточно большой разброс, но все они свидетельствуют, что оно весьма невелико и не превышает 1–1.5 км.

Кроме того, прохождение кометы вблизи Солнца еще несколько уменьшило размеры ядра. Так во время сближения с Солнцем ядро кометы 2I/Borisov, согласно оценкам (Xing и др., 2020), потеряло слой вещества от 0.2 до 1.1 м. Эта оценка

получена в предположении, что отношение массы пыли к массе газа в 2I/Borisov близко к четырем, по аналогии с кометой Чурюмова–Герасименко.

Кроме того, после прохождения перигелия в период с 23 по 28 марта 2020 г., когда комета была уже на удалении 3 а. е. от Солнца, наблюдалась яркая вспышка, которая свидетельствовала об отделении от ядра фрагмента размером ~100 м (Bolin и др., 2020).

Подобное явление наблюдалось и у комет Солнечной системы. Так, например, у кометы 17P/Холмса в октябре–ноябре 2007 г. были одновременно зарегистрированы вспышка яркости кометы и деление ее ядра. Комета в это время находилась на гелиоцентрическом расстоянии 2.5 а. е. В обоих случаях в качестве наиболее вероятной причины фрагментации указывается увеличение внутреннего давления за счет испарения легко летучих компонентов (вероятнее всего, CO) в субповерхностных слоях за счет инерции распространения в постперигелийный период тепловой волны от поверхности ядра внутрь, что обусловлено его высокой пористостью (Rusol, Dorofeeva, 2018).

Рассматриваются и другие механизмы разрушения ядер комет. Например, в январе 2016 г. ИСЗ HST в течение трех суток снимал процесс постепенного разрушения ядра короткопериодической кометы 332P/Икея–Мураками (орбитальный период 5.42 года, перигелий $q = 1.573$ а. е.), когда она находилась недалеко за орбитой Марса. Масса обломков составила примерно 4% полной массы ядра кометы, размеры обломков оцениваются в 20–60 м. Снимки, полученные на HST, также показали, что ядро кометы быстро вращалось – один оборот за 2–4 ч. Размеры ядра невелики – всего около 490 м. По всей видимости, приближение к Солнцу вызвало усиление кометной активности, бьющие с поверхности струи газа и пыли, подобно ракетным двигателям, раскрутили ядро и привели его к распаду под действием центробежных сил.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ КОМЕТЫ 2I/Borisov

Несколькими группами исследователей были предприняты попытки выяснить происхождение межзвездной кометы. Так в работе (Dybczyński и др., 2019) в качестве наиболее вероятного кандидата была предложена двойная звездная система Крюгер 60, расположенная на расстоянии 13 световых лет от Солнца и состоящая из двух красных карликов с массами 1/3 и 1/6 солнечной. Однако позже результаты этой работы были дезавуированы. Также безрезультатными оказались попытки выяснить происхождение кометы 2I/Borisov, сле-

данные в (Bailer-Jones и др., 2020) и в (Hallatt, Wiegert, 2020). Видимо, определить возможную звезду, в системе которой образовалась первая межзвездная комета, в настоящее время не представляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, анализируя весь комплекс информации, полученной по межзвездной комете 2I/Borisov, можно заключить, что по составу летучих она похожа на кометы Солнечной системы. Ядро кометы гетерогенно по составу, его составляющие могли образоваться в широком интервале радиальных расстояний: от snow line H₂O до snow line CO. Их аккумуляция свидетельствует о крупномасштабном перемешивании протокометных тел в пределах указанного региона околозвездного газопылевого диска. В то же время не были найдены космохимические признаки переноса значительного количества газопылевого вещества из внутренних горячих регионов диска наружу, в зону образования протокометных тел. Тем не менее полученные данные свидетельствуют о том, что условия, а возможно, и механизмы образования тел в некоторых экзопланетных системах, близки к характерным условиям в ранней Солнечной системе и, следовательно, имеющиеся у нас представления, модели, параметры ранней Солнечной системы, в принципе, могут быть применены к условиям образования некоторых экзопланетных систем.

Авторы благодарят О.И. Кораблева и А.В. Захарова за внимание, проявленное к нашей работе, и замечания, способствовавшие ее существенно улучшению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.)
- Дорофеева В.А.* Роль радиального транспорта при формировании малых тел внешней Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 2022. Т. 56. № 3. С. 183–197. (*Dorofeeva V.A.* The role of radial transport in forming minor bodies of the outer Solar System // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 56. № 3. P. 168–182.)
- Дорофеева В.А., Макалкин А.Б.* Эволюция ранней Солнечной системы. Космохимические и физические аспекты. М.: Едиториал УРСС, 2004. 264 с.
- Bailer-Jones C.A.L., Farnocchia D., Ye Q., Meech K.J., Micheli M.* A search for the origin of the interstellar comet

- 2I/Borisov // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 634. A14. 6 p.
- Bannister M.T., Opitom C., Fitzsimmons A., Moulane Y., Jehin E., Seligman D., Rousselot P., Knight M.M., Marsset M., Schwamb M.E. and 4 co-authors. Interstellar comet 2I/Borisov as seen by MUSE: C₂, NH₂ and red CN detections // <https://arxiv.org/abs/2001.11605>. 2020. Submitted to *Am. Astron. Soc. J.*
- Biver N., Bockelée-Morvan D., Paubert G., Moreno R., Crovisier J., Boissier J., Bertrand E., Boussier H., Kugel F., McKay A., Dello Russo N., DiSanti M.A. The extraordinary composition of the blue comet C/2016 R2 (Pan-STARRS) // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 619. A127. 13 p.
- Bockelée-Morvan D., Biver N. The composition of cometary ices // *Philosophical Transactions of the Royal Society A.* 2017. V. 375. Issue 2097, id.20160252
- Bodewits D., Noonan J.W., Feldman P.D., Bannister M.T., Farnocchia D., Harris W.M., Li J.-Y., Mandt K., Parker J.Wm., Xing Z. The carbon monoxide-rich interstellar comet 2I/Borisov // *Nature Astron.* 2020. V. 4. P. 867–871.
- Bolin B.T., Lisse C.M., Kasliwal M.M., Quimby R., Tan H., Copperwheat C., Fernandez Y., Lin Z.-Y., Morbidelli A., Abe L. and 46 co-authors. Characterization of the nucleus, morphology and activity of interstellar comet 2I/Borisov by optical and near-infrared GROWTH, Apache Point, IRTF, ZTF and Keck observations // *Astrophys. J.* 2020. V. 160. Iss. 1. id. 26. 16 p.
- Busarev V.V., Petrova E.V., Shcherbina M.P., Ikonnikova N.P., Burlak M.A., Belinski A.A. Interstellar comet 2I/Borisov: dust composition from multiband photometry and modelling // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 502. Iss. 2. P. 1882–1894.
- Cameron A.G.W. Physics of the primitive solar accretion disk // *Moon and Planets.* 1978. V. 18. № 1. P. 5–40.
- Cameron A.G.W., Pine M.R. Numerical models of the primitive solar nebula // *Icarus.* 1973. V. 18. Iss. 3. P. 377–406.
- Cordiner M.A., Milam S.N., Biver N., Bockelée-Morvan D., Roth N.X., Bergin E.A., Jehin E., Remijan A.J., Charnley S.B., Mumma M.J. and 5 co-authors. Unusually high CO abundance of the first active interstellar comet // *Nat. Astron.* 2020. V. 4. P. 861–866.
- Dybczyński P.A., Królikowska M., Wysoczańska R. Kruger 60 as a home system for 2I/Borisov - a case study // [arXiv:1909.10952v2](https://arxiv.org/abs/1909.10952v2). 2019. 11 p.
- Fitzsimmons A., Hainaut O., Meech K., Jehin E., Moulane Y., Opitom C., Yang B., Keane J.V., Kleyna J.T., Micheli M., Snodgrass C. Detection of CN gas in interstellar object 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 885. Iss. 1. id. L9. 6 p.
- Fray N., Schmitt B. Sublimation of ices of astrophysical interest: a bibliographic review // *Planet. and Space Sci.* 2009. V. 57(14–15). P. 2053–2080.
- Guilbert-Lepoutre A. Survival of amorphous water ice on Centaurs // *Astron. J.* 2012. V. 144. Iss. 4. id. 97. 7 p.
- Gulkis S., Allen M., von Allmen P., Beaudin G., Biver N., Bockelée-Morvan D., Choukroun M., Crovisier J., Davidsson B. J. R., Encrenaz P. and 14 co-authors. Subsurface properties and early activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Science.* 2015. V. 347. Iss. 6220. aaa 0709. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0709>
- Guzik P., Drahus M., Rusek K., Waniak W., Cannizzaro G., Marazuela I.P. Interstellar Comet gb00234 // *The Astronomer's Telegram.* 2019. № 13100.
- Guzik P., Drahus M., Rusek K., Waniak W., Cannizzaro G., Marazuela I.P. Initial characterization of interstellar comet 2I/Borisov // *Nat. Astron.* 2020. V. 4. P. 53–57.
- Guzik P., Drahus M. Gaseous atomic nickel in the coma of interstellar comet 2I/Borisov // *Nature.* 2021. V. 593. Iss. 7859. P. 375–378.
- Hallan T., Wiegert P. The dynamics of interstellar asteroids and comets within the Galaxy: An assessment of local candidate source regions for 1I/Oumuamua and 2I/Borisov // [arXiv:1911.02473v2](https://arxiv.org/abs/1911.02473v2). 2020. Submitted to the *Astron. J.*
- Hansen K.C., Altwegg K., Berthelier J.-J., Bieler A., Biver N., Bockelée-Morvan D., Calmonte U., Capaccioni F., Combi M.R., de Keyser J., and 16 co-authors, and ROSINA Team. Evolution of water production of 67P/Churyumov-Gerasimenko: An empirical model and a multi-instrument study // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. S491–S506.
- Hayashi C. Structure of the solar nebula, growth and decay of magnetic fields and effects of magnetic and turbulent viscosities on the nebula // *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 1981. № 70. P. 35–53.
- Hui M.-T., Ye Q.-Z., Fohring D., Hung D., Tholen D.J. Physical characterisation of interstellar comet 2I/2019 Q4 (Borisov) // *Astron. J.* 2020. V. 160. Iss. 2. id. 92. 17 p.
- Hutsemékers D., Manfroid J., Jehin E., Opitom C., Moulane Y. Fe and Ni in cometary atmospheres. Connections between the Ni/Fe abundance ratio and chemical characteristics of Jupiter-family and Oort-cloud comets // [arXiv:2107.05932](https://arxiv.org/abs/2107.05932). 2021. Accepted for publication in *Astron. and Astrophys. Lett.*
- Jewitt D. The active centaurus // *Astron. J.* 2009. V. 137. Issue 5. P. 4296–4312,
- Jewitt D. Color systematics of comets and related bodies // *Astron. J.* 2015. V. 150. P. 201–219.
- Jewitt D., Luu J. Initial characterization of interstellar comet 2I/2019 Q4 (Borisov) // *Astrophys. J. Lett.* 2019. V. 886. № 2. id. L29.
- Jewitt D., Hui M.-T., Kim Y., Mutchler M., Weaver H., Agarwa J. The Nucleus of Interstellar Comet 2I/Borisov // *The Astrophysical Journal Letters.* 2020. V. 888. Issue 2. Id L23. 8 p.
- Jorda L., Crovisier J., Green D.W.E. The correlation between visual magnitudes and water production rates // *Proc. Conf. Asteroids, Comets, Meteors.* Baltimore, Maryland, USA: LPI Contribution, 2008. № 1405. Paper 8046
- Kareta Th., Andrews J., Noonan J., Harris W.M., Smith N., O'Brien P., Sharkey B.N.L., Reddy V., Springmann A., Lejoly C. Carbon chain depletion of 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 889. № 2. id. L38. 6 p.
- 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. Iss. 10. id. 152.

- Lee S., von Allmen P., Allen M., Beaudin G., Biver N., Bockelée-Morvan D., Choukroun M., Crovisier J., Encrenaz P., Frerking M., and 16 co-authors. Spatial and diurnal variation of water outgassing on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko observed from Rosetta/MIRO in August 2014 // *Astron. and Astrophys.* 2015. V. 583. id. A5.
- Lee C.-H., Lin H.-W., Chen Y.-T., Yen S.-F. FLAMINGOS-2 infrared photometry of 2I/Borisov // *Res. Notes Am. Astron. Soc.* 2019. V. 3. № 12. id. 184.
- deLeón J., Licandro J., Serra-Ricart M., Cabrera-Lavers A., Font Serra J., Scarpa R., de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R. Interstellar visitors: A physical characterization of comet C/2019 Q4 (Borisov) with OSIRIS at the 10.4m GTC // *Res. Notes Am. Astron. Soc.* 2019. V. 3. № 9. P. 131.
- deLeón J., Licandro J., de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., Lara L.M., Moreno F., Pinilla-Alonso N., Serra-Ricart M., De Prá M., Tozzi G.P., and 8 co-authors. Visible and near-infrared observations of interstellar comet 2I/Borisov with the 10.4-m GTC and the 3.6-m TNG telescopes // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 495. Iss. 2. P. 2053–2062.
- Lin H.W., Lee C.-H., Gerdes D.W., Adams F.C., Becker J., Napier K., Markwardt L. Detection of diatomic carbon in 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 889. Iss. 2. id. L30. 5 p.
- Lodders K. Solar system abundances of the elements // *Principles and Perspectives in Cosmochemistry* / Eds: Goswami A., Reddy B.E. *Astrophys. and Space Sci. Proc.* Berlin–Heidelberg: Springer Verlag, 2010. P. 379–417.
- Lodders K., Fegley B., Jr. *Planetary Scientist's Companion*. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1998. 371 p.
- 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. P. 297–342.
- Manfroid J., Hutsemékers D., Jehin E. Iron and nickel atoms in cometary atmospheres even far from the Sun // *Nature*. 2021. V. 593. P. 372–374.
- Marboeuf U., Thiabaud A., Alibert Y., Cabral N., Benz W. From stellar nebula to planetesimals // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 570. id. A35.
- Marboeuf U., Schmitt B. How to link the relative abundances of gas species in coma of comets to their initial chemical composition? // *Icarus*. 2014. V. 242. P. 225–248.
- Martin R.G., Livio M. On the evolution of the snow line in protoplanetary discs // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2012. V. 425. L6–L9.
- McKay A.J., Cochran A.L., Dello Russo N., DiSanti M.A. Detection of a water tracer in interstellar comet 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 889. Iss. 1. id. L10. 5 p.
- Meech K.J., Weryk R., Micheli M., Kleyna J.T., Hainaut O.R., Jedicke R., Wainscoat R.J., Chambers K.C., Keane J.V., Petric A., and 8 co-authors. A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid // *Nature*. 2017. V. 552. Iss. 7685. P. 378–381.
- Mousis O., Lunine J.I., Luszpay-Kuti A., Guillot T., Marty B., Ali-Dib M., Wurz P., Altwegg K., Bieler A., Hässig M., and 3 co-authors. Protosolar nebula origin for the ices agglomerated by comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 819. Iss. 2. id. L33. 5 p.
- Opitom C., Fitzsimmons A., Jehin E., Moulane Y., Hainaut O., Meech K.J., Yang B., Snodgrass C., Micheli M., Keane J.V., Benkhaldoun Z., Kleyna J.T. 2I/Borisov: A C₂-depleted interstellar comet // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 631. id. L8. 5 p.
- Opitom C., Jehin E., Hutsemékers D., Shinnaka Y., Manfroid J., Rousselot P., Raghuram S., Kawakita H., Fitzsimmons A., Meech K., and 4 co-authors. The similarity of the interstellar comet 2I/Borisov to Solar system comets from high resolution optical spectroscopy // *Astron. and Astrophys.* 2021. V. 650. id. L19. 8 p.
- Podolak M., Zucker S. A note on the snow line in protostellar accretion disks // *Meteoritics and Planet. Sci.* 2004. V. 39. Iss. 11. P. 1859–1868.
- 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. № 1. P. 175–182.
- Xing Z., Bodewits D., Noonan J., Bannister M.T. Water production rates and activity of interstellar comet 2I/Borisov // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 893. Iss. 2. id. L48. 10 p.
- Yamamoto T. Formation environment of cometary nuclei in the primordial solar nebula // *Astron. and Astrophys.* 1985. V. 142. № 1. P. 31–36.
- 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.
- Ye Q., Kelley M.S.P., Bolin B.T., Bodewits D., Farnocchia D., Masci F.J., Meech K.J., Micheli M., Weryk R., Bellm E.C., and 8 co-authors. Pre-discovery activity of new interstellar comet 2I/Borisov beyond 5 AU // *Astron. J.* 2020. V. 159. Iss. 2. id. 77. 9 p.
- Zubko E., Chornaya E., Videen G., Kim S.S. Clues to understanding the microphysics of dust in the interstellar comet C/2019 Q4 (Borisov) // *Res. Notes Am. Astron. Soc.* 2019. V. 3. Iss. 9. id. 138.