

УДК 523.44

ОТКРЫТИЕ ПЕРВОЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ КОМЕТЫ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ПЛОТНОСТЬ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ В СОЛНЕЧНОЙ ОКРЕСТНОСТИ

© 2021 г. Г. В. Борисов^{a, b}, Б. М. Шустов^c

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

^bАстрономический научный центр, Москва, Россия

^cГБУН Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: bshustov@inasan.ru

Поступила в редакцию 05.05.2020 г.

После доработки 10.08.2020 г.

Принята к публикации 26.10.2020 г.

Открытие первой межзвездной кометы 2I/Borisov подтвердило догадку астрономов о том, что пролет через Солнечную систему относительно крупных объектов (астероидов и комет), образовавшихся за ее пределами — обычное явление. Таких объектов может быть немало, однако их открытие — пока что дело редкого случая. Большие профессиональные телескопы и существующие программы наблюдений на этих телескопах имеют ограничения, которые могут быть преодолены с более скромными инструментами. В работе впервые описано как была открыта комета 2I/Borisov на 65 см телескопе конструкции Г.В. Борисова и те особенности программы наблюдений, которые позволили сделать это открытие. Даны рекомендации для построения будущих программ обнаружения таких тел. Оценена пространственная плотность межзвездных объектов (таких как астероид 1I/'Oumuamua или комета 2I/Borisov) в Солнечной окрестности. Согласно полученной нами оценке в Солнечной системе в сфере радиусом 50 а. е. в каждый момент времени может находиться около 50 межзвездных тел размером >50 м. Поскольку скорости возможного сближения с Землей таких объектов могут быть весьма высокими, такие вероятные сближения требуют особого внимания. Обсуждается применение специальных космических проектов для их изучения.

Ключевые слова: комета 2I/Borisov, межзвездные кометы, межзвездные астероиды, астероидно-кометная опасность

DOI: 10.31857/S0320930X2102002X

ВВЕДЕНИЕ

О том, что существует поток межзвездного вещества сквозь Солнечную систему, астрономы догадывались давно. С появлением космических средств были проведены эксперименты по прямому обнаружению такого вещества. В работе (Bertaux и др., 1976) представлены результаты работы фотометра “Лайман-альфа”, установленного на советском зонде “Марс-7”. С помощью абсорбционной водородной ячейки, помещенной в фотометр, было проанализировано Лайман-альфа-излучение H-атомов в Солнечной системе, и показано, что сквозь Солнечную систему идет поток межзвездных атомов нейтрального водорода со скоростью 18–21 км/с. В (Bertaux, Blamont, 1976) рассмотрены особенности движения межзвездных пылевых частиц в Солнечной системе и проведено сравнение модельных предсказаний с данными регистрации датчиками соударений на

космических аппаратах. Исследования межзвездной пыли проводились в ходе ряда космических экспериментов. Частицы межзвездной пыли были идентифицированы с помощью измерений на борту космических аппаратов (КА) Ulysses, Galileo, Cassini и др. (см. обзор Mann, Jessberger, 2010). Межзвездная пыль отличается от пыли Солнечной системы скоростью и направлением удара. Большая продолжительность миссии Ulysses и то обстоятельство, что направление межзвездного ветра (на Ulysses измерялся поток межзвездных атомов HeI) было почти перпендикулярно орбите КА, позволило получить большой объем данных. К сожалению, проект STARDUST, одной из главных целей которого был сбор именно межзвездной пыли, не принес желаемых результатов, что в (Postberg, 2008) объясняется непреодоленными трудностям интерпретации следов высокоско-

ростных столкновений с аэрогелем пылевой лопушки.

Более крупные тела межзвездного происхождения не были обнаружены в Солнечной системе вплоть до открытия на основе данных телескопа Pan-STARRS межзвездного астероида 1I/Oumuamua в октябре 2017 г. (электронный циркуляр Центра малых планет МРЕС 2017-U183: A/2017 U1). Оумуамуа считался кометой, но спустя неделю он был переклассифицирован как астероид (Meesch и др., 2017). Собственно ожидается, что большинство таких межзвездных объектов (МЗО) — это кометоподобные тела (кометезимали, планетезимали), выброшенные с периферии различных планетных систем. Было ясно, что такие тела будут открываться во все большем количестве и Центр Малых Планет (ЦМП) ввел в обозначения новый класс I (interstellar), в который включаются все межзвездные пришельцы — и кометы и астероиды. Следующий объект из этого класса был открыт менее чем через два года.

Первая межзвездная комета 2I/Borisov (предварительное обозначенный C/2019Q4(Borisov)), была открыта в конце августа 2019 г. и сразу привлекла внимание необычными характеристиками ее орбиты. Эксцентриситет орбиты ($e > 3$) намного превышал значения эксцентриситетов более чем 300 т. н. гиперболических комет Солнечной системы ($e > 1$) и даже рекордное до этого момента значение 1.20 у 1I/Oumuamua. Это было так непривычно, что первые две недели шла тщательная проверка и только в сентябре ЦМП опубликовал циркуляр (МРЕС 2019-S72 : 2I/Borisov = C/2019 Q4 (Borisov)), фиксируя свершившийся факт. Современная оценка эксцентриситета орбиты кометы составляет 3.357, перигелийное расстояние 2.006 а. е. Комета прошла перигелий 8 декабря 2019 г. и сейчас уходит в межзвездное пространство. На англоязычной странице Википедии, посвященный комете, постоянно обновляются различные данные о ней. Русскоязычная страница заметно отстает.

В последнее время наблюдается повышенный интерес исследователей к этому пока необычному объекту. По данным информационной системы ADS на момент написания статьи (апрель 2020 г.) опубликовано полсотни работ в научных журналах. Главные вопросы, которые привлекают исследователей в этом объекте: физические и химические свойства кометы, эволюционные изменения характеристик кометы, происхождение кометы. Для полноты изложения приведем некоторые основные данные о комете. Понятно, что в отличие от кинематических характеристик, точность определения физико-химических характеристик намного меньше. В (Jewitt, Luu, 2019) по

наблюдениям на телескопе NOT ($\varnothing 2.56$ м) проведена оценка размера ядра кометы. Методом фотометрии размер ядра был оценен в 3.8 км (принято значение альbedo 0.1), хотя авторы высказали предположение (из статистических соображений), что эта оценка завышена почти на порядок. Нui и др. (2020) наблюдали комету на 2.2-м телескопе Гавайского университета в фильтрах g' , r' и I . Комета (как и по данным других исследователей) имеет красноватый оттенок: $(g - r) = 0.6 + -0.04$, $(r - i) = 0.23 + -0.03$. Используя имеющиеся астрометрические наблюдения, авторы выявили статистически достоверное проявление негравитационного ускорения кометы, подразумевающее, что ядро кометы небольшое (0.4 км). Более прямой путь определения размера ядра по оптическим наблюдениям затруднен. Наблюдения в ближнем ИК, выполненные на 10-м Keck телескопе позволили показать, что размер ядра кометы не превышает 1.4 км (Bolin и др., 2019). По наблюдениям (70 ч) на телескопе HST до и близ момента прохождения перигелия обнаружены небольшие (амплитуда < 0.05 зв. величины) изменения блеска кометы с периодичностью около 11 ч (Bolin и др., 2020). Снимки высокого разрешения позволили оценить размер ядра в 1–2 км (Bolin и др., 2020; Manzini и др., 2020) сообщили о выделении в коме выступа (джета) длиной до 2000–3000 км, который, впрочем, не вносил больших вариаций в изменения блеска кометы. Комета после прохождения перигелия не проявляла признаков высокой активности, однако (Bolin и др., 2020a) по наблюдениям в марте 2020 г. с помощью HST/WFC3 выявили небольшой фрагмент близ ядра (на расстоянии $0.1''$) кометы. Впрочем, наблюдения в апреле 2020 г. на HST (ACS/WFC) показали (Zhang и др., 2020), что фрагмент уже не виден (распался?).

В наблюдениях комет Солнечной системы важное место занимают спектральные наблюдения, позволяющие определить молекулярный состав и структуру ком комет. Уже вскоре после открытия кометы 2I/Borisov начались ее спектральные наблюдения. В первых спектрах были обнаружены только линии молекул CN (см., например, Oritom и др., 2019), и отмечалось отсутствие линий C_2 . Но в более поздних наблюдениях список молекул, чьи линии наблюдались в спектре кометы, расширился. Так (Bannister и др., 2020) получили на спектрографе MUSE (VLT) свидетельства присутствия C_2 и повышенное содержание молекул NH_2 . (Bodewits и др., 2020) по наблюдениям на HST (COS) показали, что кома кометы содержит значительно больше CO, чем молекул H_2O в газовой фазе. Естественно, что одной из главных целей поиска в спектрах комет являются определение со-



Рис. 1. Телескоп HGB-650.

держания воды и оценка скорости ее потери. Для поиска воды использовались инструменты для наблюдений в различных спектральных диапазонах. Авторы работы (Yang и др., 2020) с помощью спектрографа SpeX на 3-м телескопе IRTF и спектрографа GNIRS на 8-м телескопе GEMINI провели поиск признаков излучения (поглощения) водного льда в ближнем инфракрасном участке спектра и не нашли таких признаков. В целом, спектр кометы классифицируется как спектр D-типа со спектральным наклоном около 6% на 1000 Å, который подобен спектру 11/Oumuamua и сравним со спектрами комет Солнечной системы. В (Xing и др., 2000) представлены результаты поиска воды (точнее следов присутствия воды в виде молекул OH), полученные с помощью УФ-телескопа UVOT на КА Swift. Как и по данным наблюдений, на радиотелескопе Аресибо (Ortiz и др., 2020), выброс молекул OH был весьма незначительным при приближении кометы к перигелию и стал заметным (наблюдаемым) лишь в течение примерно месяца пролета в области перигелия и затем он резко снизился. В целом, можно заключить, что комета 2I/Borisov очень похожа по своим физико-химическим свойствам на кометы в Солнечной системе. Это позволяет (может быть, чересчур смело) распространить наши знания о населении комет Солнечной системы, включая и динамические свойства, на другие экзопланетные системы.

Основная цель данной работы — рассказать в профессиональном издании о том, как была открыта комета и какие особенности программы наблюдений позволили сделать это открытие. До

сих пор ни в русскоязычной, ни в англоязычной научной литературе такого описания не было. Здесь этот пробел восполнен (раздел 2). Естественно, и не только для профессионалов, вопросы: “Сколько таких тел сейчас находятся в Солнечной системе? Можем ли мы их обнаруживать не эпизодически (случайно), а отслеживать с достаточной полнотой? Что для этого нужно сделать? Представляют ли эти объекты угрозу в контексте проблемы астероидно-кометной опасности?”. Эти вопросы мы обсуждаем в разделе “Оценки плотности потока межзвездных объектов сквозь Солнечную систему и степень их потенциальной опасности” и в разделе “Обсуждение проблемы поиска и исследования межзвездных объектов в Солнечной системе с помощью наземных и космических инструментов”.

ОТКРЫТИЕ КОМЕТЫ

Первая межзвездная комета была открыта на телескопе HGB-650 (рис. 1). Телескоп был изготовлен Г. Борисовым. Разработка и создание инструмента продолжались более двух лет. В конце 2018 г. был получен “первый свет”, с января 2019 г. начались регулярные наблюдения по индивидуальной программе поиска комет и астероидов. Наблюдения проводятся в Крыму, около поселка Научный. Телескоп HGB 650 входит в число наблюдательных средств обсерватории MARGO — географические координаты: 44°45′ с.ш., 34°20′ в.д., код ЦМП L51 (MARGO — Mobile Astronomical Robotics Genon Observatory — частная обсерватория Г. Борисова).

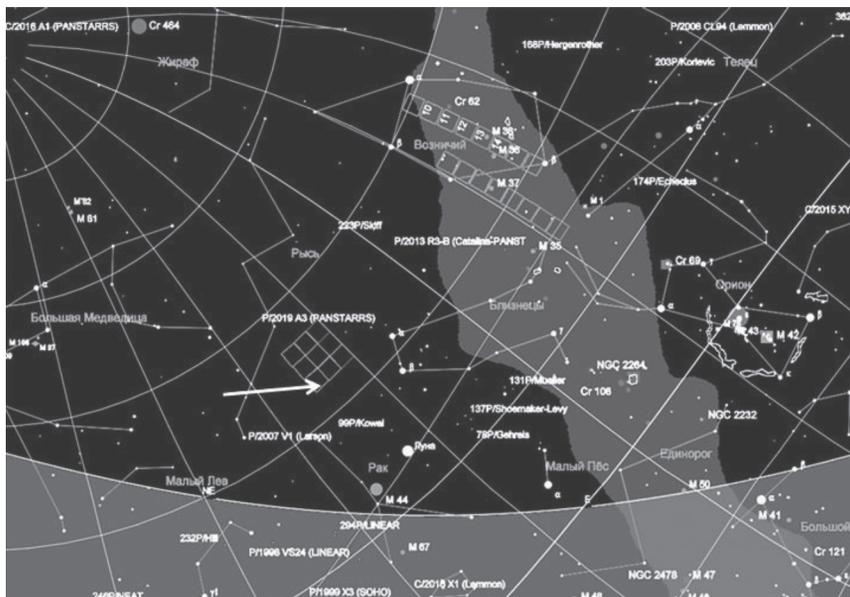


Рис. 2. Площадка небесной сферы, на которой была открыта межзвездная комета 2I/Borisov (указана стрелкой).

Телескоп HGB-650 имеет оптическую схему Гамильтона и обладает высокой светосилой F/1.5, что позволяет обнаруживать слабые диффузные объекты (рис. 1). Он оснащен матрицей FLI ML16803 (4096 × 4096, пиксель 9 микрон), обеспечивающей поле зрения 128 × 128 угл. мин; при бининге 1 × 1 масштаб изображения составляет 1.87 угл. с/пиксель. Для максимального проникновения не используются какие-либо фильтры. FWHM изображений звезд в зените составляет 1.7 пикселя (3.2 угл. с) и несколько ухудшается вблизи горизонта из-за атмосферных искажений. Проникание телескопа при экспозиции 300 с составляет 21 зв. величину.

Наблюдения проводятся в автоматическом режиме. Индивидуальный план наблюдений составляется на каждую ночь. В зависимости от постановки конкретной задачи и планирования участков неба, время экспозиции меняется от 30 до 300 с. Быстрые обзоры проводятся преимущественно в предрассветной зоне с короткими экспозициями по причине ограниченного времени. При глубоком поиске время экспозиции может составлять от 300 с и более. План быстрого обзора состоит из 8–12 площадок, а среднее время такого обзора составляет 30–60 мин. План глубоких обзоров состоит из 4–8 площадок и по времени занимает 1–2 ч. В процессе выполнения плана обзора телескоп проходит площадки последовательно три раза. Поле зрения каждой площадки составляет 4.5 кв. градуса. За наблюдательную ночь снимается до 50 площадок (до 225 кв. градусов).

Обработка полученных данных осуществляется на данный момент в ручном режиме. (Планируется переход на автоматическую обработку.) Запускается анимация трех кадров одной площадки, и визуально ищутся движущиеся объекты, имеющие диффузную форму, а также объекты с необычными скоростями и направлениями движения. При обнаружении подобного объекта делается астрометрия, и объект проверяется по базе данных ЦМП. Если объекта нет в базе, то астрометрия обнаруженного объекта отправляется в ЦМП в соответствии с установленными правилами.

Межзвездная комета 2I/Borisov (C/2019 Q4) была открыта 30 августа 2019 г. в ходе плановых наблюдений. Было отснято 25 площадок (три отдельных обзора). Последний обзор проводился вблизи горизонта недалеко от галактического экватора. Было отснято 9 площадок с экспозицией по 60 с (см. рис. 2).

Общее время обзора составило около 30 мин. При обработке наблюдений на краю последнего кадра был обнаружен диффузный объект, который выглядел как комета (см. рис. 3). Как выяснилось из анализа кадров, сделанных в последующие ночи, его видимое движение отличалось от траектории астероидов Главного пояса (Main Belt).

Астрометрия была отправлена в ЦМП и размещена на странице подтверждения (PCCP – Possible Comet Confirmation Page) под предварительным обозначением gb00234. На следующую ночь объект был подтвержден Борисовым еще раз. В дальнейшем добавились наблюдения других

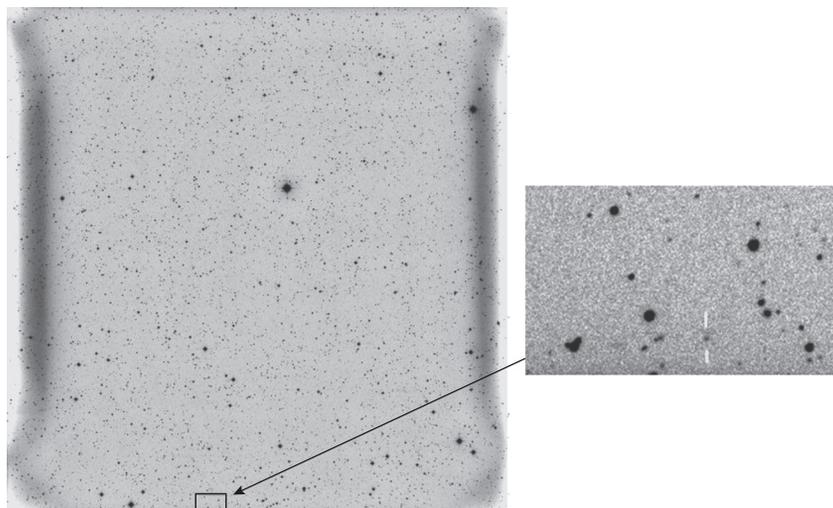


Рис. 3. Кадр, на котором впервые был обнаружен кометообразный объект (2I/Borisov). На площадке справа отмечен белыми штрихами.

обсерваторий. Уже через неделю более 20 обсерваторий наблюдали новый объект. 11 сентября вышел циркуляр ЦМП (MPEC 2019-R-106 : Comet C/2019 Q4 (Borisov)), который зафиксировал открытие новой межзвездной кометы с рекордным эксцентриситетом 3.079! Дальнейшие наблюдения и анализ подтвердил, что объект имеет гиперболическую орбиту и 24 сентября 2019 г. Международный астрономический союз (МАС) присвоил комете C/2019 Q4 (Borisov) постоянное обозначение, принятое для межзвездных объектов, 2I/Borisov (MPEC 2019-S72 : 2I/Borisov = C/2019 Q4 (Borisov)).

В настоящее время большие обзорные проекты просматривают практически все небо. Однако остаются отдельные участки неба, где обзоры большими телескопами проводятся редко, так как поиск в этих зонах имеет ряд сложностей. Это область Млечного Пути и предзвездная зона. В области Млечного Пути очень большая плот-

ность звезд и при автоматической обработке вероятность пропуска объекта весьма велика. В предзвездной зоне (при малых элонгациях) сильно мешают турбулентность, рефракция и поглощение атмосферы. Таким образом, в этих зонах имеется возможность обнаружения новых объектов с применением небольших телескопов и при ручной обработке кадров. В табл. 1 представлена статистика открытых Г. Борисовым комет.

Из девяти открытых комет, семь из них открыты при малой элонгации, две — при большой элонгации, но в Млечном Пути.

О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Согласно моделям формирования и эволюции нашей Солнечной системы, в процессе орбитальной миграции вещества протопланетного диска

Таблица 1. Список комет, открытых на обсерватории MARGO

Комета	Дата	Элонгация	Зв. величина
C/2013 N4 (Borisov)	2013.07.08	30	17
C/2013 V2 (Borisov)	2013.11.06	132	17
C/2014 Q3 (Borisov)	2014.08.22	60	17
C/2014 R1 (Borisov)	2014.09.05	38	16
C/2015 D4 (Borisov)	2015.02.23	37	17
C/2016 R3 (Borisov)	2016.09.11	32	16
C/2017 E1 (Borisov)	2017.03.01	55	17
2I/ (Borisov)	2019.08.30	38	18
C/2019 V1 (Borisov)	2019.11.01	126	19.5

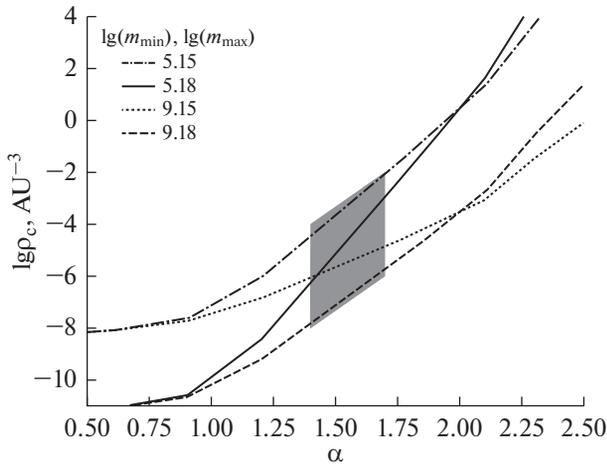


Рис. 4. Зависимость пространственной плотности ρ_c МЗО в межзвездных окрестностях Солнца от значения показателя степени α в функции масс для различных значений m_{\min} и m_{\max} . Серым многоугольником отмечена область наиболее вероятных значений. Диаграмма построена для $M = 30 M_{\oplus}$.

ледяные планеты-гиганты выбросили до 99% исходных планетезималей в межзвездное пространство (см. например, Charnoz, Morbidelli, 2003), так что межзвездное пространство должно быть населено большим количеством кометообразных тел. Согласно результатам моделирования динамики Солнечной системы (Levison и др., 2008) в результате развития динамической неустойчивости, обусловленной взаимодействием планет-гигантов и остатков протопланетного диска в ранней Солнечной системе масса выброшенного в виде кометообразных тел за пределы Солнечной системы вещества составила ~ 30 масс Земли. С обнаружением межзвездных астероидов и комет эти теоретические оценки привлекли возросшее внимание. Во многих работах, посвященных объектам 1I/Oumuamua и 2I/Borisov, проведены оценки концентрации межзвездных объектов в пространстве близ Солнечной системы. (Laughlin, Batygin, 2017) оценили пространственную плотность объектов размером более 160 м (т.е. примерно как у Оумуамуа) в $1/100$ а. е.⁻³, а общее их число в Галактике 10^{26} (размеры Галактики принимались такими: радиус $R = 3 \times 10^4$ пк, толщина $H = 10^3$ пк). В (Engelhardt и др., 2017) сделан вывод, что в 90% доверительном интервале пространственная плотность межзвездных объектов составляет 1.4×10^{-4} а. е.⁻³. Согласно оценке, выполненной в (Gibbs, 2019), в любой данный момент времени около дюжины межзвездных посетителей по меньшей мере такого же размера как Оумуамуа проходят через Солнечную систему. Автор счита-

ет, что когда будут введены в строй большие обзорные телескопы, такие объекты будут обнаруживаться два–три раза в год. Такой разброс в оценках обусловлен и слишком малой статистической открытий и различиями в примененных моделях. Для того, чтобы ориентироваться в вопросе, мы провели модельные оценки.

Прежде всего, определим допущения и параметры задачи. По-видимому, не будет большой ошибкой допустить, что большинство звезд имеет планетные системы, т.е. на ранних стадиях эволюции вокруг этих звезд существовали протопланетные диски. Также можно предположить, что процессы динамической релаксации, протекавшие в ранней Солнечной системе, имели место и в других системах примерно таким же образом, и, следовательно, можно ограничиться рассмотрением только окрестностей Солнечной системы. Размеры окрестностей вполне определяются средней концентрацией звезд; в этой области она составляет $\sim 1/10$ пк⁻³, так что будет приемлемо считать окрестностью Солнца куб со стороной ~ 2 пк. В качестве параметров задачи выбраны: M – масса выброшенного из Солнечной системы вещества в виде кометезималей и более мелких объектов; α – показатель степени в распределении кометезималей по размерам $dN/dm = m^{-\alpha}$, m_{\min} – минимальная масса кометезимали, m_{\max} – максимальная масса кометезимали. Минимальная масса здесь не физически минимальная (которая, естественно, близка к нулю), а некоторая реперная величина, введенная из тех соображений, что по современным представлениям столкновения с телами большей массы представляют потенциальную опасность для населения Земли. Хорошим приближением является масса Тунгусского тела.

Для простых оценок числа тел N в диапазоне масс (m_{\min}, m_{\max}) используем простые формулы:

$$\begin{aligned}
 N(M, m_{\min}, m_{\max}, \alpha) &= \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} C m^{-\alpha} dm = \\
 &= C \frac{m_{\max}^{1-\alpha}}{1-\alpha} \left(1 - \left(\frac{m_{\min}}{m_{\max}} \right)^{1-\alpha} \right) = \\
 &= \frac{M(2-\alpha)}{m_{\max}(1-\alpha)} \left(1 - \left(\frac{m_{\min}}{m_{\max}} \right)^{1-\alpha} \right) \quad (\alpha \neq 1),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где константа C определяется из условия

$$M = C \int_0^{m_{\max}} m \times m^{-\alpha} dm = C \frac{m_{\max}^{2-\alpha}}{2-\alpha} \quad (\alpha \neq 2).$$

Здесь вклад маломассивного “хвоста” распределения (объекты массой $< m_{\min}$) учитывается в общей массе M , но не включается в подсчет коме-

тезимальей. Мы также не приводим формулы для N при $\alpha = 2$ и $\alpha = 1$. Это здесь несущественно. На рис. 4 представлены оценки пространственной плотности ρ_c (измеряемой в штуках на единичный объем 1 а. е.^3), сделанные по формуле (1) при различных значениях показателя α и следующих значениях параметров: $M = 30 M_\oplus$ (результат легко шкалируется для других значений M); $m_{\min} = 10^5$ тонн (примерно масса Тунгусского тела) и 10^9 тонн (примерная масса кометы 2I/Borisov при размере ~ 1 км и плотности $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$); $m_{\max} = 10^{15}$ тонн (примерная масса планетезимали размером 100 км) и 10^{18} тонн (примерная масса планетезимали размером 1000 км). Наибольшее значение m_{\max} более-менее согласуются с оценками масс самых крупных планетезимальей в работах различных авторов, хотя по этим работам разброс наблюдается довольно большой. Мы не будем анализировать все эти оценочные представления, но остановимся на очень важном (как видно из рис. 4) показателе α .

Показатель α в функции масс различных астрономических объектов отражает принципиальные особенности процессов образования и эволюции ансамбля таких объектов и, естественно, привлекает повышенное внимание исследователей. Обсуждение этих аспектов можно найти, например, в (Shustov, Tutukov, 2018), где рассмотрены спектры масс астрофизических объектов и в (Shustov, 2019) — там рассмотрены спектры масс объектов Солнечной системы. Общий вывод из этих обзоров состоит в том, что некоторыми средними значениями показателя α для малых тел Солнечной системы можно считать значения в диапазоне 1.4–1.7, хотя для межпланетной пыли и самых массивных астероидов, значения могут выходить из этого диапазона. Эта область на рис. 4 показана затененным многоугольником. Так что большой разброс оценок значений ρ_c , обсуждавшийся в кратком обзоре в начале этого раздела, вполне объясним. Мы полагаем, что можно придерживаться оценки $\rho_c = 1 \times 10^{-4} \text{ а. е.}^{-3}$. Это означает, что согласно нашей модели в среднем в каждый момент времени в пределах “классической” Солнечной системы (радиус — 50 а. е.) находится около 50 тел, прилетевших из межзвездного пространства.

При разумной вариации параметров, это число может оказаться на порядок больше (например, при понижении m_{\min} до 10^4 т, что соответствует массе Челябинского тела), но население МЗО в любом случае малочисленно.

Несмотря на повышенную кинетическую энергию МЗО, их малое количество не позволяет рассматривать МЗО, как фактор, существенно

увеличивающий уровень астероидно-кометной опасности.

О ПОИСКЕ И ИССЛЕДОВАНИИ МЕЖЗВЕЗДНЫХ ОБЪЕКТОВ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Технологии обнаружения МЗО по существу те же, что и применяемые для поиска объектов, сближающихся с Землей. МЗО хотя и движутся с повышенными скоростями относительно нашей планеты, но эти превышения не критичны, если, например, рассматривать требования по допустимому смазу изображения. Понятно, что малочисленность (в пределах Солнечной системы) населения МЗО означает, что среднее расстояние до наблюдаемого объекта будет относительно большим и требуются обзорные телескопы большой апертуры. Недаром большие надежды возлагаются на LSST. Возможно, что характеристики движения МЗО коррелирует с характеристиками движения звездных потоков. В Eubanks (2019) предложен проект специального глубокого поиска межзвездных астероидов в звездных потоках с использованием 4-метрового оптического телескопа с широким полем зрения. Автор отмечает, что если бы такая камера была направлена на звездный поток Плеяды, астероид 1I/Oumuamua можно было бы обнаружить на 4 месяца раньше.

Открытие МЗО вдохновило ученых и специалистов по космической технике на разработку проектов космических средств, способных достичь эти быстрые цели. В (Seligman, 2018) обсуждается проект перехватчика-импактора. Кинетическая энергия, передаваемая при скоростном ударе ($>40 \text{ км/с}$) при столкновении с МЗО, приведет к выбросу большого количества подповерхностного вещества. Состав этого вещества можно было бы исследовать спектроскопически с помощью космического аппарата-компаньона, что позволило бы лучше оценить исходный состав МЗО. Идея почти такая же, что и в других ударных экспериментах (Deep Impact, Dart + Hera). Проведенный авторами технический анализ показывает, что перехват такого скоростного объекта возможен при условии его заблаговременного обнаружения. В (Hibberd и др., 2019) техническая сторона не просто перехвата, а достижения кометы 2I/Borisov обсуждается с довольно высоким уровнем технической детализации. Обсуждаются возможные сроки запуска КА. Даже запуск в 2030 г. может быть результативным, т.е. обеспечивающим прибытие в 2045 г. малого исследовательского модуля (массой ~ 3 кг). Итак, можно заключить, что применение средств космического ба-

зирования возможно. Нужно только оценить целесообразность.

ВЫВОДЫ

Открытие межзвездных объектов пока что остается делом случая. Нужен системный подход в организации наблюдений. Большие профессиональные телескопы и существующие программы наблюдений на этих телескопах имеют ограничения, которые могут быть преодолены с более скромными инструментами. Сделанное Г.В. Борисовым открытие подтверждает, что астрономия любительского уровня может приносить не только удовольствие энтузиастам, но и вполне реальные и даже важные научные открытия.

Применение средств космического базирования для изучения МЗО возможно, но нужно оценивать целесообразность.

Оценена пространственная плотность межзвездных объектов в окрестности Солнечной системы. Эта величина зависит от массы выброшенного из Солнечной системы вещества в виде кометезималей и более мелких объектов; показателя α степени в распределении кометезималей по размерам ($dN/dm = m^{-\alpha}$), минимальной и максимальной массы кометезимали в этом распределении. Согласно полученной оценке в Солнечной системе, точнее в сфере радиусом 50 а. е., в каждый момент времени может находиться около 50 межзвездных тел размером >50 м. Это согласуется с некоторым средним по работам других авторов (см. раздел “О пространственной плотности...”), хотя в оценках, данных в этих работах, наблюдается значительный разброс.

Хотя скорости возможного сближения с Землей таких объектов могут быть высокими, их относительно малое количество (по нашим оценкам общее число потенциально опасных объектов размером более 140 м в Солнечной системе составляет $\sim 10^4$) не позволяет рассматривать МЗО, как фактор, существенно увеличивающий уровень астероидно-кометной опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bannister M.T., Opatom C., Fitzsimmons A., Moulane Y., Jehin E., Seligman D., Rousselot P., Knight M.M., Marsset M., Schwamb M.E., Guilbert-Lepoutre A., Jorda L., Vernazza P., Benkhaldoun Z.* Interstellar comet 2I/Borisov as seen by MUSE: C2, NH₂ and red CN detections / arXiv e-prints arXiv:2001.11605. 2020.
- Bertaux J.L., Blamont J.E., Tabarie N., Kurt W.G., Bourgin M.C., Smirnov A.S., Dementeva N.N.* Interstellar medium in the vicinity of the sun: a temperature measurement obtained with Mars-7 interplanetary probe // *Astron. and Astrophys.* 1976. V. 46. P. 19–29.
- Bertaux J.L., Blamont J.E.* Possible evidence for penetration of interstellar dust into the Solar System // *Nature* (London). 1976. V. 262. P. 263–266.
- Bodewits D., Noonan J.W., Feldman P.D., Bannister M.T., Farnocchia D., Harris W.M., Li J.Y., Mandt K.E., Parker J.W., Xing Z.* The carbon monoxide-rich interstellar comet 2I/Borisov / arXiv:2004.08972. 2020.
- Bolin B.T., Lisse C.M., Kasliwal M.M., Quimby R., Tan H., Copperwheat C., Lin Z.-Y., Morbidelli A., Abe L., Bendjoya P., Burdge K.B., Coughlin M., Fremling C., Itoh R., Koss M., Masci F.J., Maeno S., Mamajek E.E., Marocco F., Murata K., Rivet J.-P., Sitko M. L., Stern D., Vernet D., Walters R., Yan Lin, Andreoni I., Bhalerao V., Bodewits D., De, Kishalay D., Kunal P., Bellm E.C., Blagorodnova N., Buzasi D., Cenko S.B., Chang Chankao, Chojnowski D., Dekany R., Duev D.A., Graham M., Jurić M., Kulkarni S.R., Kupfer T., Mahabal A., Neill J.D., Ngeow Ch.-Ch., Penprase B., Riddle R., Rodriguez H., Smith R.M., Rosnet P., Sollerman J., Soumagnac M.T.* 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 / arXiv e-prints arXiv:1910.14004. 2019.
- Bolin B.T., Bodewits D., Lisse C.M., Fernandez Y.R., Helou G., Cenko S.B.* Possible fragmentation of interstellar comet 2I/Borisov // *The Astronomer's Telegram*. 2020a. № 13613. P. 1.
- Ceballos O., Howell E.S., Mendez A., Fernandez Y.R., Lovell A.J., Schambeau C.A.* Observing Interstellar Comet 2I/Borisov for Radio OH Lines with the Arecibo Observatory / *Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2020. № 2326. P. 3078.
- Charnoz S., Morbidelli A.* Coupling dynamical and collisional evolution of small bodies: an application to the early ejection of planetesimals from the Jupiter-Saturn region // *Icarus*. 2003. V. 166. P. 141–156.
- Engelhardt T., Jedicke R., Veres P., Fitzsimmons A., Denneau L., Beshore E., Meinke B.* An Observational Upper Limit on the Interstellar Number Density of Asteroids and Comets // *Astron. J.* 2017. V. 153. P. 133–143.
- Eubanks T.M.* Efficient searches for galactic stream interstellar asteroids / *Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2019. № 2132. P. 3262.
- Gibbs W.W.* Alien comets may be common, analysis of 2I/Borisov suggests // *Science*. 2019. V. 366. P. 558.
- Hibberd A., Perakis N., Hein A.M.* Sending a Spacecraft to Interstellar Comet C/2019 Q4 (Borisov) / arXiv e-prints arXiv:1909.06348. 2019. 1909.06348.
- Hui M.-T., Ye Q.-Z., Fohring D., Hung D., Tholen D.J.* Physical Characterisation of Interstellar Comet 2I/2019 Q4 (Borisov) / arXiv e-prints arXiv:2003.14064. 2020.
- Jewitt D., Luu J., Kleyna J.T., Hainaut O.R., Jedicke R., Wainscoat R.J., Chambers K.C., Keane J.V., Petric A., Denneau L., Magnier E., Berge T., Hube M.E., Flewelling Heather, Waters C., Schunova-Lill E., Chastel S.* Initial characterization of interstellar comet 2I/2019 Q4 (Borisov) // *Astrophys. J.* 2019. V. 886. L. 29–35.
- Laughlin G., Batygin K.* On the Consequences of the Detection of an Interstellar Asteroid // *Res. Notes of the American Astron. Soc.* 2017. V. 1. P. 43.
- Levison H.F., Morbidelli A., Laerhoven C. Van, Gomes R., Tsiganis K.* Origin of the structure of the Kuiper belt

- during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune // *Icarus*. 2008. V. 196. P. 258–273.
- Mann I., Jessberger E.K.* The In-Situ Study of Solid Particles in the Solar System / *Astromineralogy*/ Ed. Thomas Henning. Lecture Notes in Physics. 2010. V. 815. P. 233–257.
- Manzini F., Oldani V., Ochner P., Bedin L.R.* Interstellar Comet 2I/Borisov exhibits a structure similar to native Solar System comets / arXiv e-prints arXiv:2004.02033. 2020.
- Meech K.J., Weryk R., Micheli M., Kleya J.T., Hainaut O.R., Jedicke R., Wainscoat R.J., Chambers K.C., Keane J.V., Petric A. et al.* A brief visit from a red and extremely elongated interstellar asteroid // *Nature*. 2017. V. 552. P. 378–381.
- Opitom C., Fitzsimmons A., Jehin E., Moulane Y., Hainaut O., Meech K.J., Yang B., Snodgrass C., Micheli M., Keane J.V., Benkhaldoun Z., Kleya J.T.* 2I/Borisov: A C2-depleted interstellar comet // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 631. L. 8–12.
- Postberg F., Srama R., Hillier J.K., Sestak S., Green S.F., Trielo M., Grün E.* Simulating STARDUST: Reproducing Impacts of Interstellar Dust in the Laboratory / *European Planet. Sci. Congress*. 2008. P. 873.
- Seligman D., Laughlin G.* The Feasibility and Benefits of In Situ Exploration of 'Oumuamua-like objects // *Astron. J.* 2018. V. 155. P. 217–229.
- Shustov B.M., Tutukov A.V.* The initial mass spectra of astronomical objects // *Astron. Reports*. 2018. V. 62. P. 724–732.
- Shustov B.M.* On the mass spectrum of asteroids, meteoroids and space debris // *INASAN Science Reports*. 2019. № 4. P. 356–364.
- Xing Z., Bodewits D., Noonan J., Bannister M.T.* Water production rates and activity of interstellar comet 2I/Borisov / *Lunar and Planet. Sci. Conf.* 2020. №. 2326. P. 2275.
- Yang B., Kelley M.S.P., Meech K.J., Keane J.V., Protopapa S., Bus S.J.* Searching for water ice in the coma of interstellar object 2I/Borisov // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 634. L. 6–10.
- Zhang Q., Ye Q., Kolokolova L.* Interstellar Comet 2I/Borisov is Single Again // *The Astronomer's Telegram*. 2020. № 13618. P. 1.