

УДК 523.53

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ ОБ ОБЪЕКТАХ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

© 2023 г. Г. И. Кохирова^а, *, П. Б. Бабаджанов^а

^аИнститут астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Республика Таджикистан

*e-mail: kokhirova2004@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2023 г.

После доработки 20.04.2023 г.

Принята к публикации 25.04.2023 г.

Излагаются современные представления об объектах, сближающихся с Землей. В эту популяцию входят астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), включая потенциально опасные астероиды, короткопериодические кометы, метеороидные рои, крупные спорадические метеороиды. Даются обзорные сведения о динамических и физических свойствах АСЗ и комет, имеющиеся в настоящее время. Найдено, что среди известных на текущий момент АСЗ почти 5% составляют угасшие ядра комет или их фрагменты. Внешне они не отличаются от истинных астероидов, однако значительно отличаются от них по динамическим и физическим свойствам. Следовательно, для их различения необходимо изучать и динамические, и физические параметры объектов. Показано, что некоторые известные метеороидные рои наряду с бесчисленным множеством мелких метеороидов содержат и крупные “угасшие” фрагменты кометных ядер, выявленные среди астероидов, сближающихся с Землей. Метеороидный рой и такие тела, принадлежащие ему, образуют астероидно-метеороидный комплекс. Приводятся наблюдательные и теоретические сведения, подтверждающие сложившийся современный уровень знаний об околоземных объектах.

Ключевые слова: комета, угасшая комета, астероид, метеороид, метеороидный рой, метеорный поток, околоземный объект, комплекс, орбита, эволюция

DOI: 10.31857/S0320930X23050031, **EDN:** TEXVDZ

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с большими планетами в Солнечной системе движется множество более мелких тел. Популяция малых тел состоит из астероидов, комет и метеороидов, образованных в результате разрушения астероидов и комет. Астероиды представляют собой металлические и каменные тела без атмосферы, вращающиеся вокруг Солнца, имеющие относительно малые размеры, которые не позволили классифицировать их как планеты, и не проявляющие активности в виде выброса газа, пыли и метеороидов (Vorovicka, 2016). Огромное число астероидов располагается в Главном поясе астероидов (ГПА), расположенном между орбитами Марса и Юпитера на гелиоцентрическом расстоянии примерно от 2 до 4 а. е. (от 300 до 600 млн км). Размеры известных астероидов ГПА варьируются от самых больших – 1000 км в диаметре имеет Церера, ныне считающаяся карликовой планетой, – и до 1 м. Большинство астероидов Главного пояса следуют по слегка эллиптическим, устойчивым, низко наклоненным к плоскости эклиптики орбитам, вращаясь в том же направ-

лении, что и Земля, с периодом обращения вокруг Солнца от трех до десяти лет. К настоящему моменту число открытых астероидов составляет 1269092 (<https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>, 2023).

В отличие от астероидов, кометы являются активными малыми телами. Whipple (1950; 1951; 1955) предложил модель ядра кометы как конгломерата замерзших газов (легкоплавких льдов) и пылевых частиц. При приближении комет к Солнцу газы начинают нагреваться, испаряться, потоки сублимирующих газов увлекают за собой пылевые частицы. Этот процесс приводит к образованию комы вокруг ядра и характерных хвостов комет. Данное определение предложено в начале 50-х гг. прошлого века и, хотя с тех пор получено много новых сведений и данных о кометах, модель Whipple в основном не утратила своей достоверности. В некоторой степени данная концепция отражена в спецификации комет, принятой Международным астрономическим союзом (МАС), а также поддержана результатами наземных и космических наблюдений. Согласно современным представлениям МАС утвердил следующее

Таблица 1. Статистика обнаруженных околоземных объектов

Дата	КСЗ	Атиры	Атоны	Аполлоны	Амуры	ПОА (более 1 км)	ПОА	АСЗ (более 1 км)	АСЗ (более 140 м)	АСЗ	ОЗО
21.03.2023	120	31	2467	17776	11249	151	2326	853	10411	31523	31643

определение комет. Твердое тело диаметром свыше 1 м, но менее размера карликовой планеты, двигающееся в межпланетном пространстве или поступающее из него и проявляющее активность в виде выделения газа, пыли или метеороидов, называется кометой (Borovička, 2016). Число открытых комет, включая их фрагменты, составляет 3794 (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, 2022).

Согласно современным представлениям, астероиды и кометы являются реликтами первичного вещества, из которого 4.6 млрд лет назад образовалась Солнечная система. Их состав, внутренняя структура и температура испарения материала говорят о различных источниках их происхождения. Кроме того, имеется предположение, что часть астероидов могут быть телами, претерпевшими геохимическое воздействие, так называемый метаморфизм. Тем не менее вещество и комет, и некоторых астероидов, благодаря сравнительно малым массам объектов, сохранилось практически в первозданном виде и представляет собой первичный материал, из которого формировалась Солнечная система на ранних и последующих стадиях эволюции.

ОКОЛОЗЕМНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Околоземные объекты (ОЗО) – это широкая категория малых тел, траектория которых может проходить в границах до 1.3 а. е. от Солнца (<https://cneos.jpl.nasa.gov/>). Земля имеет гелиоцентрическое расстояние примерно 1 а. е., и такие объекты могут находиться в пределах 0.3 а. е. от Земли. Однако нахождение в категории ОЗО не означает, что объекты действительно близки к Земле в любое конкретное время, это подразумевает только то, что их движение может время от времени приближать их к Солнцу и, возможно, к Земле. Большинство ОЗО можно наблюдать с помощью наземных радио- и оптических телескопов и на этой основе характеризовать их, кроме того, траектории некоторых ОЗО позволяют относительно легко направить к ним космические миссии. Изучение ОЗО обеспечивает репрезентативную выборку вещества Солнечной системы и его эволюцию, поскольку большинство из них переброшены во внутреннюю часть Солнечной системы из других регионов после миллионов лет гравитационного взаимодействия с планетами.

Согласно базам данных, популяцию околоземных объектов образуют астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ) и короткопериодические кометы, сближающиеся с Землей (КСЗ) (см., например, <https://cneos.jpl.nasa.gov>). Между тем, среди АСЗ отождествлено определенное количество угасших короткопериодических кометных ядер. Кроме того, в околоземном пространстве имеются метеороиды, как принадлежащие метеороидным роям, так и спорадические. Мы считаем, что угасшие короткопериодические кометные ядра и метеороидные рои, орбиты которых имеют перигелийные расстояния, удовлетворяющие условию менее 1.3 а. е., а также известные астероидно-метеороидные комплексы, состоящие из родственных роев и АСЗ, также можно рассматривать как неотъемлемую часть популяции ОЗО. Отметим, что у некоторых долгопериодических комет перигелийные расстояния составляют менее 1.3 а. е., однако из-за длительных периодов обращения в популяцию ОЗО они не включены.

К настоящему времени зарегистрировано 31643 околоземных объектов, статистика которых приведена в табл. 1. Статистические данные по обнаружению АСЗ приведены в виде диаграммы на рис. 1 (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, 2023). Как видно, общее число открытых АСЗ 31523, из них с размером свыше 140 м – чуть больше 10 тыс., свыше одного км – 853. Больше всего открыто тел с размерами от 30 до 100 м, затем тел – с диаметрами до 30 м.

АСТЕРОИДЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Астероидом, сближающимся с Землей (АСЗ), называется малая планета, движущаяся по орбите, которая под воздействием вековых возмущений может пересечь орбиту Земли и для нее перигелийное расстояние орбиты $q < 1.3$ а. е. В настоящее время известны четыре основные группы околоземных астероидов, названных в честь самых известных представителей каждой группы: Атира, Атон, Аполлон и Амур. Орбиты астероидов типа Атиры с афелийными расстояниями $Q < 0.983$ а. е. расположены в пределах земной орбиты. Такие малые тела трудно обнаружить, поскольку они могут наблюдаться только в утреннее или вечернее время, на элонгациях от Солнца, не превышающих 90° . С этим связано небольшое число от-

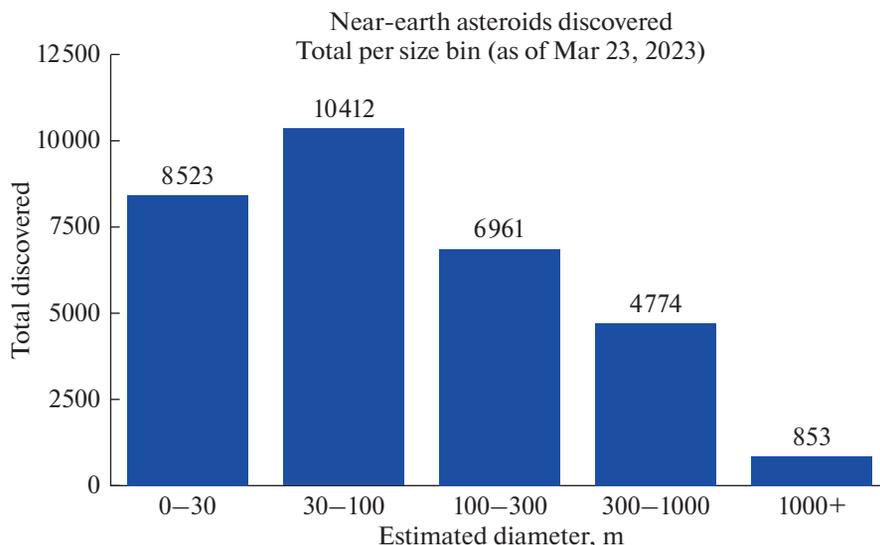


Рис. 1. Распределение числа обнаруженных АСЗ в зависимости от их оценочного размера (взято из: <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, 2023).

крытых астероидов этой группы – 31, типичный представитель – астероид (163693) Атира. Атоны, для которых большая полуось орбиты $a < 1$ а. е. и афелийное расстояние $Q > 0.983$ а. е., пересекают орбиту Земли с периодом менее 1 г., астероид Ра-Шалом – типичный атон. Аполлоны, для которых $a > 1$ а. е. и перигелийное расстояние $q < 1.017$ а. е., пересекают орбиту Земли с периодом более 1 г., астероид Географос – типичный аполлон. Амуры, для которых $a > 1.0$ а. е. и $1.017 < q < 1.3$ а. е., пересекают орбиту Марса, но не вполне достигают орбиты Земли, астероид Эрос, являющейся целью космической миссии NEAR (Near Earth Asteroid Rendezvous), это типичный амур.

Среди АСЗ всех перечисленных групп имеются потенциально опасные астероиды (ПОА) (Potentially Hazardous Asteroids). К ним относят все астероиды, орбиты которых в настоящую эпоху сближаются с орбитой Земли до расстояний, меньших или равных 0.05 а. е. (около 7.5 млн км), и абсолютная звездная величина которых не превышает 22^m . Ограничение межорбитальных расстояний величиной 0.05 а. е. является до некоторой степени условным. Оно диктуется тем обстоятельством, что в таких пределах можно ожидать неточность определения минимального межорбитального расстояния, так называемого параметра MOID (Minimum Orbit Intersection Distance), для вновь открываемого астероида, а также его возможного изменения из-за разного рода возмущений в обозримом будущем. Ограничение по абсолютной звездной величине связано с тем, что при принятом значении альbedo 0.14 тела с абсолютной звездной величиной, превосходящей

22^m , имеют размеры менее 140 м. Столкновение таких тел с Землей в худшем случае способно вызвать лишь локальную катастрофу. На текущий момент открыто 2326 ПОА, среди которых 151 объект имеет размеры порядка 1 км и выше (табл. 1). Одним из самых известных ПОА является астероид группы Атона (99942) Апофиз, тесное сближение которого с Землей на расстоянии 0.00025 а. е. ожидается 13 апреля 2029 г. (<https://ssd.jpl.nasa.gov>, 2022). Группа ПОА потенциально может воздействовать на Землю, поэтому их траектории являются объектом пристального внимания наблюдателей и теоретиков и аккуратного отслеживания изменения их орбит в будущем. Характеристики их размеров, состава и структуры также являются весьма важными научными целями для астрономов.

Для определения размеров астероидов практикуются следующие методы: фотометрический, поляриметрический, радиолокационный, спекл-интерферометрический, транзитный и тепловой радиометрии; размеры избранных астероидов определены с помощью космических миссий. Каждый из имеющихся подходов имеет свои преимущества и недостатки, а также характеризуется соответствующей точностью. В радарных наблюдениях размеры можно оценить из наблюдаемых спектров мощности доплеровского эхо-сигнала; доплеровская полоса пропускания является функцией некоторых параметров, включая проекционный диаметр цели. В радарных наблюдениях сначала определяется диаметр, а затем с использованием найденного размера вычисляется альbedo. Радиолокационные наблюдения и наблюдения покрытия звезд астероидом (транзит-

ный метод) обеспечивают наиболее точные величины диаметров.

Размеры АСЗ (диаметры) по оптическим наблюдениям могут быть получены только приблизительно из расчетной абсолютной величины астероида (H) и предполагаемой отражательной способности, или альbedo. Поэтому, оперируя размерами, необходимо учитывать, что это только их оценки. Абсолютная звездная величина H , являющаяся мерой средней яркости астероида (<https://cneos.jpl.nasa.gov>, 2023), находится из измерений его видимой звездной величины в разное время, когда он наблюдался на разных расстояниях от Солнца и Земли и при разных фазовых углах. Кроме того, поскольку фактическая геометрическая фигура астероида обычно неизвестна, предполагается, что он просто сферический. Как правило, неизвестна и средняя отражательная способность (альbedo) астероидов. Для астероидов ГП Pravec и др. (2012) показали, что между альbedo и таксономическим спектральным классом астероидов существует некоторая (приблизительная) корреляция. Но поскольку таксономический класс большинства АСЗ неизвестен, то для оценки их размеров используется предполагаемое среднее альbedo 14%. При таком предположении сферический АСЗ с размером в 1 км соответствует значению $H = 17.75^m$.

Среди известных к настоящему времени ОЗО 31 523 являются астероидами, сближающимися с Землей (табл. 1). Самый крупный АСЗ (1036) Ганимед имеет диаметр 41 км, у двух других – (433) Эроса и (3552) Дон Кихота – диаметр равен 20 км, размеры большинства астероидов не превышают 1 км. До 2005 г. самым маленьким околоземным астероидом являлся 9-метровый астероид 1991 ВА из группы Аполлона, однако с усовершенствованием наблюдательной техники этот порог пройден, и сегодня открыты АСЗ с гораздо меньшими размерами (до 1 м). Свыше 10 тыс. открытых АСЗ имеют размеры более 140 м. Считается, что в целом существует около 1000 АСЗ с размером более 1 км и примерно 15 тыс. с размером более 140 м. Поскольку уже обнаружено более 90% околоземных объектов с размером более 1 км (табл. 1), проект NASA “NEO Search Program” (https://cneos.jpl.nasa.gov/about/search_program.html, 2022) в настоящее время сосредоточен на обнаружении остальных тел популяции ОЗО с размером более 140 м.

Большинство астероидов имеют неправильную форму. Это связано с их небольшими размерами и малым гравитационным полем, мощности которого достаточно для удерживания материала в целом, но не хватает, чтобы придать объекту круглую форму.

Данные наблюдений показывают, что периоды вращения астероидов зависят от их размеров, в среднем, скорости осевого вращения АСЗ такие же, как и астероидов Главного пояса аналогичных размеров. Приведем больше сведений о периодах вращения астероидов, полученных по оптическим наблюдениям, с использованием кривых блеска.

В работе (Harris, Burns, 1979) показано, что периоды вращения больших астероидов ($D > 30\text{--}40$ км) соответствуют распределению Максвелла. Pravec и Harris (2000) проанализировали выборку из 984 АСЗ и подтвердили, что распределение периодов вращения астероидов с диаметром $D \geq 40$ км является максвелловским с достоверностью 99%, при этом отметив, что эта гипотеза может быть отвергнута с достоверностью 95%.

Для средних ($10 < D \leq 40$ км) и малых ($D < 10$ км) астероидов показано, что распределение их периодов вращения не является максвелловским (Pravec, Harris, 2000). В данном диапазоне размеров показано существование значительных популяций астероидов как медленно, так и быстро вращающихся. Установлено, что избыток медленных астероидов присутствует при скоростях вращения ниже ≈ 0.8 об./сут, а группа быстро вращающихся астероидов занимает диапазон скоростей вращения > 7 об./сут (Pravec, Harris, 2000).

Pravec и др. (2007) также показали, что астероиды размером от нескольких сотен метров до примерно 10 км имеют спиновый предел и их периоды выше ≈ 2.2 ч, только небольшое количество объектов диаметрами менее 100 м вращаются гораздо быстрее, с периодами порядка 10 мин и менее.

Анализируя наблюдательные данные, Kwiatkowski и др. (2010) пришли к заключению, что все объекты диаметром более 1 км имеют периоды более 2.2 ч, в то время как АСЗ размерами менее 150 м демонстрируют гораздо более быстрое вращение с периодами всего несколько минут или даже меньше. Для 79 таких АСЗ получен средний период 0.25 ч (15 мин).

Приведем еще одну интерпретацию наблюдательных данных. Betzler, Borges (2012) пришли к заключению о существовании спинового барьера для астероидов диаметром от сотен метров до 10 км и с периодом вращения около 2.2 ч. Отсутствие значительного количества астероидов с периодами менее 2.2 ч связано с низкой степенью внутреннего сцепления этих объектов.

Вращение АСЗ характеризуется двумя особенностями, которые пока что не обнаружены среди астероидов Главного пояса. Первая – среди АСЗ малых размеров (метры—десятки метров) обнаружены объекты со сверхбыстрым осевым враще-

нием, у которых периоды вращения составляют от одной до 20 мин. Ясно, что такие тела должны быть монолитными фрагментами, а не структурами типа груды камней. Вторая особенность – обнаружено несколько объектов со сложным вращением; они вращаются не вокруг главной оси инерции (т.е. вокруг наиболее короткой оси), сохраняя момент максимальным, а энергию – минимальной, как это имеет место у подавляющего большинства астероидов. Это так называемые “кувыркающиеся” астероиды (Pravec и др., 2005). По-видимому, такие АСЗ претерпели недавние столкновения с другими астероидами.

Радарные наблюдения показывают, что поверхности АСЗ в целом более шероховатые, чем поверхности астероидов Главного пояса (Rozitis и др., 2018). Это вполне естественно, поскольку астероиды Главного пояса гораздо более крупные и их гравитационное поле способно частично сглаживать неровности поверхности. Поверхности большинства АСЗ покрыты слоем реголита – раздробленного вещества с размерами частиц от микрона до сантиметра с низкой теплопроводностью (см., например, Gundlach, Blum, 2013). Об этом, в частности, свидетельствуют данные наземных телескопических наблюдений и прямых снимков поверхностей двух АСЗ – (433) Эроса и (25143) Итокавы – с космических аппаратов NEAR-Shoemaker и Hayabusa (Veverka и др., 2001; Küppers, 2002; Matsumoto и др., 2022; Brisset и др., 2020; Saito и др., 2006). Измерения тепловой эмиссии АСЗ показали, что тепловая инерция их поверхностей в 11 раз больше, чем для лунной поверхности (Gundlach, Blum, 2013). Это означает, что реголит АСЗ более крупнозернистый, чем лунный и, вероятнее всего, более крупнозернистый, чем реголит больших по размерам астероидов Главного пояса (Gundlach, Blum, 2013).

Прямые изображения одного из крупнейших АСЗ (433) Эрос, полученные с космического аппарата NEAR-Shoemaker в 2000–2001 гг., показали, что его поверхность покрыта большим числом кратеров разных размеров и отдельно лежащих камней (Küppers, 2002; Charman и др., 2002). На астероиде (101955) Бенну посредством наблюдений с КА OSIRIS-Rex также обнаружено большое число кратеров (Ballouz и др., 2020a). Наземные радарные наблюдения показывают, что даже небольшие АСЗ с диаметром около 3 км кратерированы так же сильно, как и более крупные астероиды Главного пояса (Ballouz и др., 2020a; Charman и др., 2002). Однако и здесь имеются исключения, почти нет кратеров на астероиде (25143) Итокава, при этом поверхность покрыта множеством больших валунов (Saito и др., 2006), что является од-

ним из доводов в пользу структуры тела типа “кучи щебня” (“rubble-pile”) (Fujiwara и др., 2006).

Население АСЗ является репрезентативным для всех типов астероидов, находящихся в ГПА. Поэтому, для объяснения физических свойств АСЗ, в частности, их минералогии, можно применить имеющиеся сведения в целом для астероидов. Наши знания о составе астероидов получены по трем основным каналам: дистанционные наблюдения с помощью наземных и космических средств; данные, полученные с КА, как осуществивших забор вещества астероидов, так и с помощью приборов, позволяющих исследовать состав астероида на пролетных траекториях; с помощью лабораторных исследований метеоритов и установления связи астероидов с метеоритными аналогами. Астероиды делятся на разные типы в зависимости от их альbedo, состава, полученного из спектральных особенностей в их отраженном солнечном свете, и предполагаемого сходства с известными типами метеоритов. Большинство астероидов попадают в следующие три основных категории (Gradie и др., 1989). С-тип (углеродистый), очень темный с альbedo 0.03–0.09 (как для кометных ядер), включает более 75% известных астероидов. Считается, что относительное содержание тяжелых элементов в этих астероидах близко к солнечному. Астероиды С-типа населяют внешние районы Главного пояса. S-тип (кремнистый), относительно яркий с альbedo 0.10–0.22, составляет около 17% известных астероидов. Астероиды S-типа доминируют во внутреннем регионе ГПА. М-тип (металлический), относительно яркий с альbedo 0.10–0.18, включает многие остальные известные астероиды. Астероиды этого класса состоят из магнезиально-железистых силикатов с включениями никелистого железа. Астероиды М-типа населяют среднюю часть ГПА. Имеющиеся к настоящему моменту таксономические классификации астероидов имеют гораздо больше категорий, позволяющих провести более тонкое разделение наблюдаемой минералогии астероидов, к примеру, классификация Толена (Tholen, 1989), SMASS II классификация (Bus, Binzel, 2002). Однако приведенные здесь три типа являются основополагающими и, в принципе, охватывают все возможные комбинации минералогического состава, установленного из вышеприведенных источников.

В результате лабораторных исследований пыли с АСЗ (25143) Итокава, собранной и доставленной на Землю посредством КА Hayabusa, и в соответствии с распространенной таксономической классификацией, астероид был отнесен к астероидам S-типа. Астероиды этого типа отличаются низким содержанием общего железа, их ме-

Таблица 2. Средние плотности и пористость метеоритных типов

Метеоритный тип	Минералогическая плотность, г/см ³	Средняя объемная плотность, г/см ³	Средняя пористость, %
Обыкновенные хондриты типа H	3.84	3.40	11.5
Обыкновенные хондриты типа L	3.75	3.34	10.8
Обыкновенные хондриты типа LL	3.56	3.19	10.4
Ахондриты	3.20	2.97	7.0
Углистые хондриты CI	2.27	2.12	11.0
Углистые хондриты CM	2.71	2.21	12.0
Углистые хондриты CR	3.11	3.15	6.0
Углистые хондриты CV	3.51	3.10	11.0
Углистые хондриты CO	3.69	3.11	16.0

теоритным аналогом являются обычные хондриты с низким содержанием металлов (Nakamura и др., 2011).

Из исследований метеоритов обнаружено, что самые распространенные из них, известные как обыкновенные хондриты, состоят из мелких зерен породы и, вероятно, не претерпели изменений с периода формирования Солнечной системы. С другой стороны, железо-каменные метеориты, по-видимому, являются остатками более крупных тел, которые когда-то были расплавлены и в них более тяжелые металлы и более легкие породы разделены на разные слои. Ведется научная дискуссия о том, являются ли одни из наиболее распространенных астероидов S-типа источником обыкновенных хондритов. Спектральные данные предполагают, что астероиды S-типа могут быть телами, претерпевшими геохимическое воздействие, так называемый метаморфизм. Если S-тип не связан с обыкновенными хондритами, то должен быть другой их исходный источник. Если они связаны между собой, то нужно объяснить, почему они спектрально не похожи. Связь между астероидами и метеоритами требует дальнейших исследований.

Измерения объемной плотности астероидов вместе с данными по минералогической плотности аналогичных метеоритов могут дать представление о пористости и внутренней структуре астероидов. В последние годы был проведен ряд измерений объемной плотности астероидов посредством космических аппаратов, наземных наблюдений, теоретических моделей и сравнения их с метеоритами. Оказалось, что объемная плотность большинства астероидов существенно ниже минералогической плотности их наиболее вероятных метеоритных аналогов. Это указывает на то, что многие астероиды обладают значительной пористостью (Britt, Consolmagno, 2000). Высокая пористость ослаб-

ляет распространение удара, значительно влияя на характер образования кратеров и сильно увеличивая время жизни пористых астероидов при столкновении. Анализируя плотности астероидов, Britt и Consolmagno (2000) и Britt и др. (2002) предполагают, что астероиды делятся на три основные группы: (1) астероиды, являющиеся существенно твердыми объектами, (2) астероиды с макропористостью ~20%, которые, вероятно, имеют много трещин, и (3) астероиды с макропористостью >30%, которые представляют собой консолидированные рыхлые структуры типа “кучи щебня (гальки)”, содержащие больше пустого пространства, чем твердого материала. К астероидам группы (2) относятся астероиды S-типа (243) Ида и (433) Эрос с объемной плотностью примерно 2.6 г/см³ и астероид C-типа (121) Гермона с плотностью примерно 1.8 г/см³. Наиболее вероятные аналоги метеоритов для этих астероидов указывают на пористость, вероятно, в пределах 25–30%. Также в группу (2) входят крупные астероиды (1) Церера, (2) Паллада и (4) Веста, объемная плотность которых и вероятные аналоги указывают на очень низкую пористость. Объемная плотность астероидов группы (3) существенно ниже минералогической плотности наименее плотных метеоритов. К ним относятся астероиды C-типа (253) Матильда, (45) Евгения, а также M-типа (16) Психея (Britt, Consolmagno, 2000).

Средние оценки объемной и минералогической плотности, а также пористости для метеоритных типов обыкновенных хондритов по данным Britt и др. (2002) приведены в табл. 2.

На рис. 2 приведены объемные плотности измеренных астероидов и астероидоподобных спутников Марса, Фобоса и Деймоса, минералогическая плотность известных типов метеоритов (в виде вертикальных линий) и оценки средней объ-

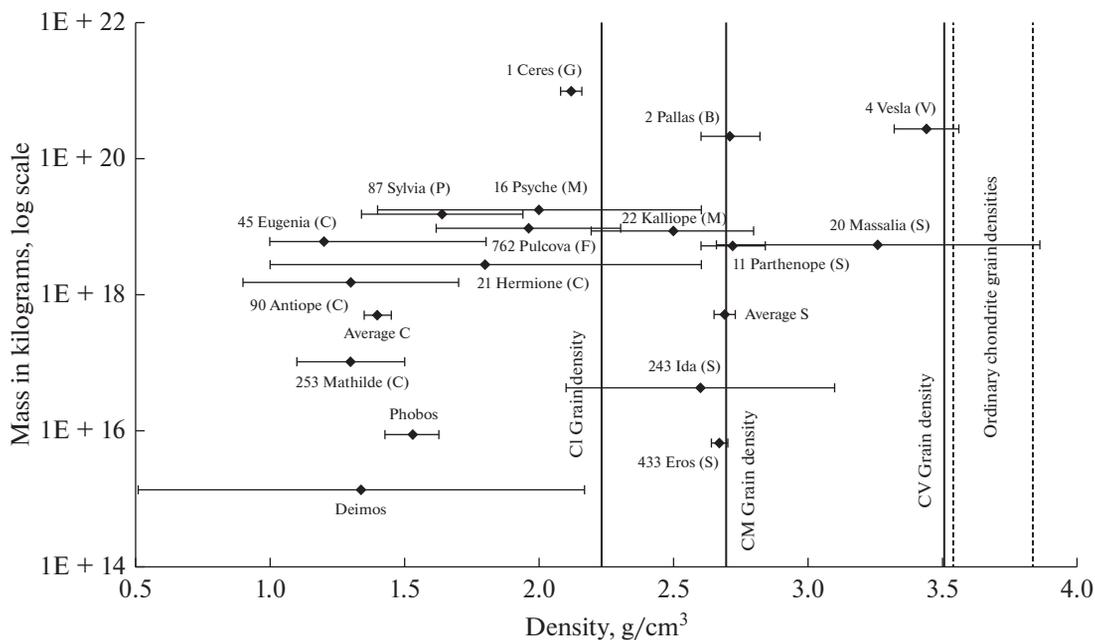


Рис. 2. Объемная плотность измеренных астероидов, минералогическая плотность известных типов метеоритов и оценки средней объемной плотности для астероидов C- и S-типов (взято из: (Britt и др., 2002)).

емной плотности для астероидов C- и S-типов по данным Standish (2001). График заимствован из работы Britt и др. (2002).

Hanus и др. (2017) на основе наблюдений и теоретического моделирования определили объемную плотность 40 астероидов и проанализировали зависимость плотности от различных таксономических классов и диаметров. Выявлена сопоставимость плотностей для астероидов S- и M-типов, только самые маленькие объекты S-типа (<35 км) имеют систематически более низкие объемные плотности, вероятно, из-за большей макропористости. Выявлена тенденция более низкой объемной плотности у примитивных объектов C-типа, чем у астероидов S-типа. Лишь немногие крупные примитивные астероиды C-типа имеют значительно большую объемную плотность по сравнению с остальными астероидами в выборке. Большинство астероидов имеет довольно узкий диапазон значений плотности около ~ 1.5 г/см³ (Hanus и др., 2017). Эти данные подтверждают и результаты Siltala, Granvik (2022), которые посредством комбинации данных из Gaia DR2 и наземной астрометрии оценили объемную плотность астероидов C-типа (52) Европы и (445) Эдны как 1.87 ± 0.31 и 1.06 ± 0.31 г/см³ соответственно.

Приведем данные определения плотности с помощью космической миссии. В результате пролета миссии NEAR-Shoemaker мимо астероида GP (253) Матильда на расстоянии 1200 км

(июнь 1997 г.) оценены: размер $66 \times 48 \times 46$ км, объем 78 тысяч км³ с точностью $\sim 15\%$, масса 10^{17} кг с точностью $\sim 3\%$, плотность 1.34 г/см³ (<https://ns-sdc.gsfc.nasa.gov>, 2022). Такая плотность, слегка превышающая плотность воды, так же, как и в вышеприведенных исследованиях, позволяет предположить, что астероид является не твердым телом, а скорее, уплотненной грудой галечника или его обломков. Измерения AC3 (25143) Итокава на КА Hayabusa показали, что его размер $535 \times 294 \times 209$ м, масса 3.51×10^{10} кг, расчетная объемная плотность 1.9 ± 0.13 г/см³ (Fujiwara и др., 2006). Из-за низкой объемной плотности, высокой пористости, богатого валунами внешнего вида и формы (25143) Итокава также считается телом, состоящим из груды щебня (Fujiwara и др., 2006). Результаты космических миссий подтвердили данные, полученные с другими методами и подходами.

Согласно имеющимся данным, касающимся AC3, они могут происходить или из ГПА, или быть ядрами “угасших” короткопериодических комет. Считается, что большинство AC3 представляют собой астероиды (или их фрагменты), переброшенные из ГПА на околоземные орбиты вследствие столкновений, гравитационных резонансов с планетами, главным образом, с Юпитером, или же комбинации этих процессов. AC3 представляют собой динамично молодую популяцию, орбиты в которой эволюционируют порядка 100 млн лет в результате столкновений и

гравитационных взаимодействий с Солнцем и планетами земной группы. Об этом свидетельствуют как многочисленные теоретические изыскания, так и сведения, полученные с помощью космических миссий. В частности, по данным, собранным миссией OSIRIS-Rex, на АСЗ (101955) Бенну, выявлено, что он, как и астероид ГПА (253) Матильда, представляет собой темную грудку обломков, удерживаемую гравитацией (Dellagustina и др., 2019). Исследование показало, что Бенну является фрагментом астероида, образовавшегося в результате столкновения с более крупным объектом ГП, и что время существования астероида около Земли составляет 1.75 млн лет (Ballouz и др., 2020b).

КОМЕТЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ

В некоторых случаях орбиты короткопериодических комет (период обращения P менее 200 лет) проходят близко от орбиты Земли, а иногда и пересекают ее. Короткопериодические кометы, орбиты которых имеют перигелийные расстояния менее 1.3 а. е., образуют группу комет, сближающихся с Землей (КСЗ) и также входят в популяцию ОЗО. В настоящее время известно 120 околоземных комет (табл. 1). Среди них известные кометы 1P/Галлея, 2P/Энке, 21P/Джакобини–Циннера, 26P, 27P, 45P, 46P, 55P и др. Околоземные кометы, так же, как и АСЗ, представляют собой репрезентативную коллекцию известных комет, включая все короткопериодические кометы. Поэтому, в целом, все установленные динамические и физические свойства комет в полной мере характеризуют околоземные кометы. Однако каждая комета, несомненно, имеет собственные особенности, в связи с чем является объектом отдельного изучения посредством наблюдений и теоретических подходов.

Знание о некоторых динамических и физических характеристиках околоземных комет можно получить из данных, полученных для кометы 67P. Перигелий кометы 1.24 а. е., и она относится к околоземным объектам. Динамические и особенно физические свойства, исследованные с КА Rosetta, являются наиболее достоверными данными, характеризующими короткопериодические кометы. В результате нам известна ее геометрическая фигура, размер ядра $4.1 \times 3.2 \times 1.3$ км (большая часть) и $2.5 \times 2.5 \times 2.0$ км (меньшая часть) (<https://esa.int/rosetta/2014/10/03/measuring-comet-67pc-g/>, 2014). Объемная плотность 0.533 ± 0.006 г/см³, масса 9.982×10^{12} кг (Patzold и др., 2016), диаметр 3.4 ± 0.1 км (Sierks и др., 2015), альbedo 0.06, период вращения 12.4 ч, температура поверхности ядра 205–230 К (<https://esa.int/rosetta/2014/10/03/measuring-comet-67pc-g/>, 2014).

Ядро кометы имеет пористую структуру и 75–85% его объема составляет пустота. Поверхность ядра покрыта пылью, под которой находится твердая кора из спрессованных пыли и льда. В кометном ядре обнаружены молекулы 16 органических соединений, четыре из которых – метилизоцианат, ацетон, пропаналь и ацетамид – ранее на кометах не встречались (Rubin и др., 2019). В коме кометы помимо ожидаемых воды, угарного и углекислого газов, были обнаружены органические соединения, включая формальдегид и аминокислоту глицин (Rubin и др., 2019; Wurz и др., 2017a; 2017b). Также КА Rosetta показал наличие полимерных молекул на поверхности ядра кометы, образовавшихся под действием солнечного излучения. Более сотни образований из льда превращаются в пар с частицами пыли при приближении кометы к Солнцу (Wurz и др., 2017a; 2017b). Этот пар выпадает в виде инея на холодной стороне ядра, после чего процесс повторяется по мере вращения ядра. Возможно также, что вскоре после заката Солнца остаточное тепло освобождает воду из недр ядра, после чего она замерзает на его поверхности (Gicquel и др., 2016). Кроме того, наблюдались внезапные выбросы газа и пыли, связанные с освещением Солнцем недавно оказавшегося на поверхности льда. Другой возможностью является формирование выбросов в момент, когда тепловой импульс доходит до подповерхностных “карманов” со льдом, что приводит к быстрой сублимации и взрывному высвобождению газа (Gicquel и др., 2016; Kramer, Lauter, 2019).

Некоторые динамические и физические характеристики околоземных комет приводятся в следующем разделе.

УГАСШИЕ ЯДРА КОМЕТ

Другую, небольшую часть популяции АСЗ составляют “потухшие” или “спящие” кометные ядра (см., например, Opik, 1963; Weissman и др., 1989; 2002; Bowell и др., 1992; Fernandez и др., 1997; Bottke и др., 2002; Jewitt, 2012; Бабаджанов, Кохинова, 2009; Babadzhanov и др., 2008a; 2008b; 2008c; 2009; 2012; 2013; Kokhirova и др., 2020; 2021). Такие объекты являются конгломератами замерзших газов и твердых частиц и представляют конечное состояние кометных ядер после многократных прохождений через перигелий. В периоды прохождения перигелия происходит интенсивный выброс газов и пыли кометой, при этом некоторые из пылевых частиц не могут покинуть поверхность ядра или возвращаются на нее, и в результате со временем поверхность ядра покрывается толстой тугоплавкой корой. Она

препятствует проникновению тепла вовнутрь и ослабляет интенсивность пыле- и газовыделения, таким образом, предотвращая дальнейшую сублимацию подкорковых льдов. Любой АСЗ, образованный таким образом, содержит значительное количество летучих примесей и, следовательно, имеет очень пористую структуру.

Возможность покрытия ядра кометы тугоплавкой корой показали результаты спектральных наблюдений комет, изучения комет посредством космических аппаратов и лабораторного моделирования кометных явлений. Спектры многих комет показали наличие большого количества молекулярного углерода C_2 , C_3 и положительных ионов этих молекул (Добровольский, 1961; Шулман, 1972; Ellis, Neff, 1992). Исследования кометы Галлея с КА Giotto в непосредственной близости от поверхности ядра показали, что большая часть пылевых частиц состоит преимущественно из элементов Н, С, N, О (Krankowsky и др., 1986; Krasnopolsky и др., 1986). Оптический спектрометр на КА Вега-2 и масс-спектрометр на КА Giotto зарегистрировали большое содержание атомарного и молекулярного углерода, С, C_2 , C_3 и их ионов в непосредственной близости от ядра кометы. Не выяснены источник и возможный физический механизм образования тугоплавких веществ, в частности ионов многоатомного углерода, вблизи ядра на больших гелиоцентрических расстояниях комет. В решении этой задачи большой вклад принадлежит методу лабораторного моделирования кометных явлений (см., например, Хашимов, Шоекубов, 1989; Хашимов и др., 1994). Результаты лабораторного моделирования показывают, что на поверхностном слое формирующегося конкретного ядра, первоначально состоявшего из замороженных легколетучих веществ, могут образоваться более сложные, в том числе тугоплавкие и органические вещества. С течением времени под действием солнечного ветра и космических лучей состав и структура поверхностного слоя ядра изменяются, обогащаясь тугоплавкими веществами. Лабораторные эксперименты показали, что поверхностный слой кометного ядра должен покрываться слоем вещества типа графита (см., например, Хашимов, Шоекубов, 1989). Этот же слой является источником ионов многоатомного углерода (и других сложных молекулярных ионов), наблюдавшихся на КА Giotto и Вега-2 вблизи ядра кометы Галлея (Krankowsky и др., 1986; Krasnopolsky и др., 1986). Наличием темного тугоплавкого графитоподобного слоя на поверхности ядра качественно можно объяснить малую величину альbedo поверхности ядра кометы Галлея, наблюдавшейся на КА Вега-1 и Вега-2 (Sagdeev и др., 1986). Исследования

кометы 67P на КА Rosetta выявили наличие органических и полимерных соединений на комете, а также существование очень темных областей на ее поверхности, очень вероятно, что ядро также подверглось процессу покрытия корой. Отметим, что органические и полимерные соединения присущи и АСЗ, изучение частиц пыли, собранных КА Hayabusa с поверхности астероида (25143) Итокава, показало наличие в ней органического вещества, представленного как нанокристаллическим графитом, так и неупорядоченным полициклическим ароматическим углеродом (Chan и др., 2021).

В работе Weissman и др., (2002) предложены следующие определения для описания существующих объектов кометной природы. Неактивной кометой называют ядро кометы, которая активна в некоторой части своей орбиты, но в настоящее время она находится в той части орбиты, где газопродуктивность незначительна и нет видимой комы. Термином “спящая” комета обозначено ядро кометы, которая когда-то была активной и потом утратила способность генерировать комму, видимую в любой части ее нынешней орбиты. “Спящая” комета может быть реактивирована, когда она перебрасывается вследствие возмущений на меньшее перигелийное расстояние. Или реактивация возможна, если в результате столкновения с другим телом удаляется поверхностная тугоплавкая кора и свежие ледяные субстанции начинают сублимировать с поверхности, увлекая за собой пылевые частицы (Weissman и др., 2002).

Впервые гипотеза о том, что некоторые из астероидов групп Аполлона, Амура и Атона являются “угасшими” кометами, то есть кометами, ядра которых покрыты толстой (до 10 м) пылевой корой или же вообще растерявшие все замерзшие газы, была предложена Opik (1963). В пользу реальности существования угасших ядер комет говорит и тот факт, что, как показали Emel'yanenko и др. (2013), средняя продолжительность активной фазы всех комет в области $q < 1.5$ а. е. составляет менее 200 оборотов, что значительно короче их динамического времени жизни в околоземном пространстве. Следовательно, можно ожидать, что после завершения активной фазы кометы переходят в фазу астероидоподобных угасших (спящих) кометных ядер, если под действием сильных гравитационных воздействий больших планет или столкновений с другими мелкими телами они не распадутся на отдельные фрагменты и не прекратят свое существование (Weissman и др., 2002). Таким образом, большую часть срока своей жизни комета может провести в “высохшем” состоянии в виде АСЗ. Внешне для наземного наблюдателя угасшие кометные ядра выглядят так же, как

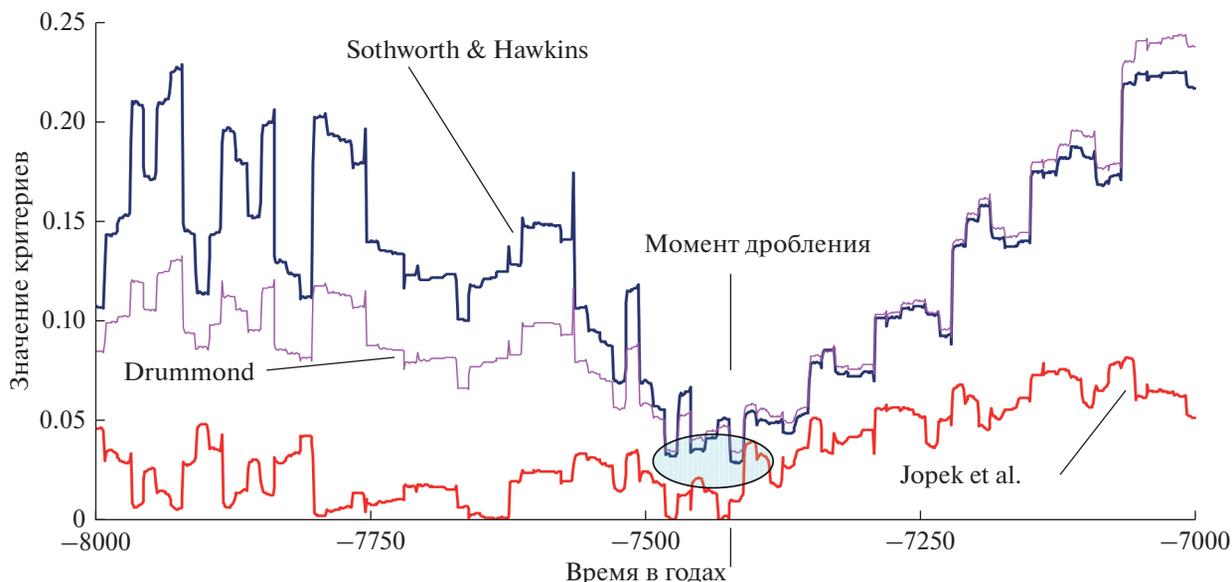


Рис. 3. Критерии близости орбит кометы 96P/Мачхолца 1 и АСЗ 2003 ЕН1 вблизи момента дробления.

астероиды, из-за чего различить их практически невозможно и при обнаружении они каталогизируются как АСЗ.

К настоящему времени имеется множество достоверных фактов, подтверждающих гипотезу Эпика. Существование астероидов, отождествленных с “потухшими” или “спящими” кометами, например, таких, как (2060) Хирон (1977 UB), (4015) Вильсона–Харрингтона (1979 VA), 119P/Паркера–Хартли (1989 E1, 1986 TF), действительно, подтверждает кометное происхождение части астероидов, пересекающих орбиту Земли. Weissman и др. (1989) полагают, что астероиды (3200) Фаэтон, (2101) Адонис, (2201) Олджато, (2212) Гефест, а также (3552) Дон Кихот (1983 SA) и (6063) Ясон (1984 KB) с большой вероятностью имеют кометное происхождение, и что их физические свойства подтверждают это предположение. Согласно McFadden и др. (1993), возмущения в магнитном поле солнечного ветра, связанные с (2201) Олджато (Russell и др., 1984), аномальное радиоэхо от (2101) Адониса (Ostro и др., 1991) и УФ-избыток в спектре отражения (2201) Олджато наводят на мысль, что эти астероиды являются высохшими кометами.

Приведем больше фактов по ядрам угасших комет. Очевидным доказательством реальности таких объектов служит объект 107P/Вильсона–Харрингтона, открытый в 1949 г. как активная комета, затем утерянный и вновь открытый в 1979 г. как астероид, сближающийся с Землей, (4015) 1979 VA. Позже, в 1992 г., было подтверждено, что этот АСЗ в действительности является кометой

107P/Вильсона–Харрингтона, утерявшей какие-либо признаки кометной активности (Bowell и др., 1992; Fernandez и др., 1997). Примером обратного хода событий служит комета 96P/Мачхолца 1, открытая в 1986 г. Специальные поиски этой кометы по вычисленным эфемеридам на пластинках, полученных на телескопах с большим полем зрения и предельной звездной величиной до +19^m до момента открытия кометы, не дали результата (Green и др., 1990). Хотя, по крайней мере три из четырех ее прохождений перигелия были очень благоприятны для наблюдений (Sekanina, 1990). Наиболее логичное объяснение этого факта заключается в предположении, что вплоть до 1986 г. комета находилась в неактивном или “спящем” состоянии (Green и др., 1990; Sekanina, 1990). Дальнейшие исследования динамических свойств показали, что комета 96P/Мачхолца 1 и АСЗ 2003 ЕН1 с большой вероятностью имеют общее происхождение, распад общего родителя на эти два крупных фрагмента произошел почти 9.5 тыс. лет назад, и астероид 2003 ЕН1 в реальности является угасшим фрагментом кометы (Babadzhanov и др., 2017). На рис. 3 приведен график зависимости трех критериев близости орбит кометы 96P/Мачхолца 1 и АСЗ 2003 ЕН1 от времени, из которого видно, что все три критерия имели минимальные величины примерно 9.5 тыс. лет назад, следовательно, на этот момент приходится максимальное совпадение орбит и с высокой вероятностью тогда и произошла фрагментация родительской кометы. В настоящий момент активная комета 96P/Мачхолца 1, околоземный объект (186256) 2003 ЕН1, являющийся угасшим

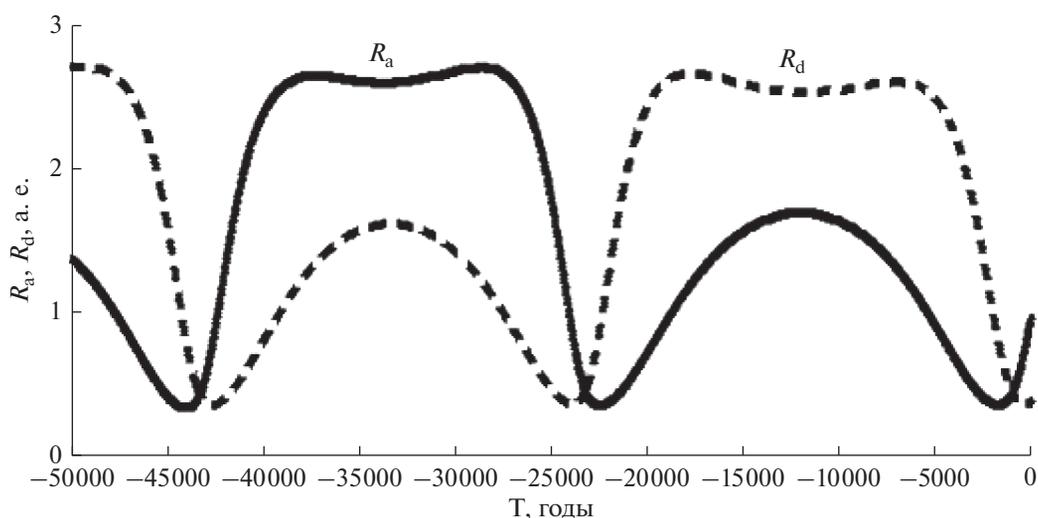


Рис. 4. Долгопериодические изменения радиус-векторов восходящего R_a и нисходящего R_d узлов орбиты астероида 2015 ТВ145 на интервале 50 тыс. лет в прошлое (взято из: (Kokhirova и др., 2017)).

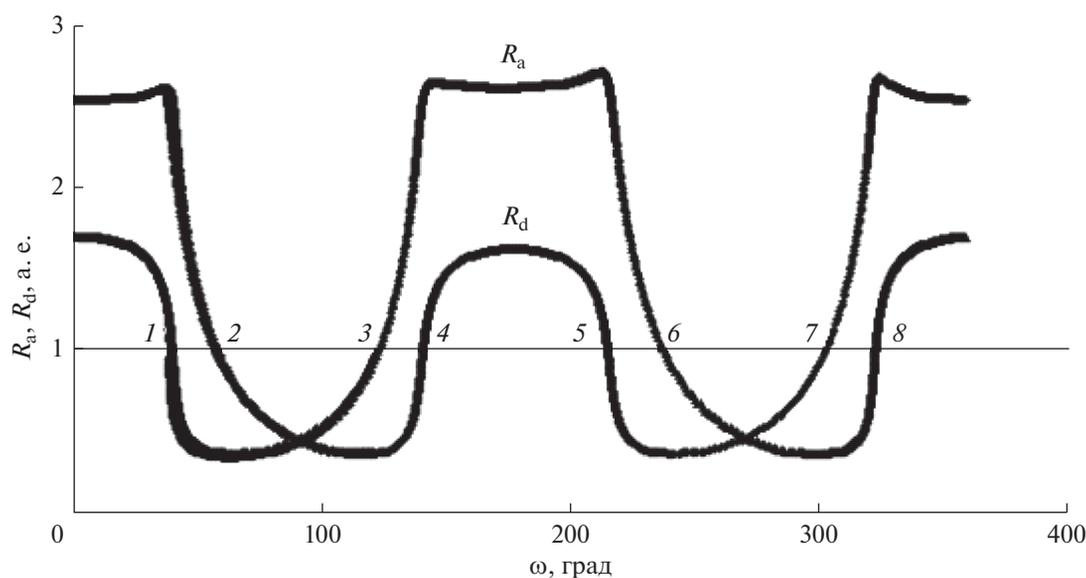


Рис. 5. Изменения радиус-векторов восходящего R_a и нисходящего R_d узлов орбиты астероида 2015 ТВ145 в зависимости от аргумента перигелия ω . Положения пересечений с орбитой Земли указаны цифрами 1–8 (взято из: (Kokhirova и др., 2017)).

фрагментом ядра прародительской кометы, и метеороидный рой Квадрантид с его восемью метеорными потоками образуют астероидно-метеороидный комплекс Квадрантид (Jenniskens, 2004; Williams и др., 2004; Babadzhanov и др., 2008b; Jenniskens, Mardsen, 2003; Kanuchova, Neslusan, 2007; Neslusan и др., 2013a; 2013b; Wiegert, Brown, 2005; Babadzhanov и др., 2017).

Другой случай угасшего ядра кометы связан с потенциально опасным околоземным астероидом 2015 ТВ145. Объект был открыт 10 октября

2015 г., а уже 31 октября он сблизился с Землей на минимальном расстоянии. В период сближения в обсерватории Аресибо (США) получены первые радиолокационные изображения астероида, выполнены и оптические наблюдения астероида, включая наблюдения в инфракрасном диапазоне излучения. Найдено, что размер объекта действительно составляет 600 м, что он имеет почти сферическую фигуру и совершает полный оборот вокруг своей оси за 5 ч. Темные участки в центре астероида, выявленные по радионаблюдениям,

могут быть следами ударного кратера. Установлено, что астероид отражает только 6% солнечного света, т.е. является достаточно темным объектом. На основе этого факта и кометоподобной орбиты астероида было предположено, что на самом деле этот объект является ядром угасшей кометы. Нами исследована эволюция орбиты АСЗ 2015 ТВ145 на интервале времени 100 тыс. лет под действием планетных возмущений. Показано, что астероид за один цикл изменения аргумента перигелия его орбиты (это примерно 40 тыс. лет) пересекает орбиту Земли восемь раз (рис. 4, 5). Следовательно, если объект имеет кометную природу, то он может иметь родственный метеороидный рой, порождающий восемь метеорных потоков, наблюдаемых на Земле. Вычислены параметры теоретических потоков, связанных с 2015 ТВ145, и во всех опубликованных каталогах проведен поиск наблюдаемых потоков, идентичных теоретически предсказанным потокам. Оказалось, что семь из восьми предсказанных метеорных потоков отождествлены с наблюдаемыми активными потоками. Сделан вывод, что околоземный объект 2015 ТВ145, действительно, с высокой вероятностью является угасшим ядром родительской кометы выявленного роя (Бабаджанов и др., 2016; Kokhirova и др., 2017).

АСЗ (3552) Дон Кихот, включенный в группу активных астероидов (Jewitt, 2012; Jewitt и др., 2015), согласно постоянной Тиссерана $T_j = 2.31$ имеет кометоподобную орбиту. Veeder и др. (1989) определили, что его геометрическое альbedo в полосе V равно 0.02, что типично для кометных ядер (Lamy и др., 2004; Jewitt, 1992). Кометное происхождение астероида было предсказано со 100% вероятностью и на основе динамического моделирования, и это самая высокая вероятность кометного происхождения среди всех известных АСЗ (Bottke и др., 2002). Hsieh и Jewitt (2006) также предположили кометное происхождение астероида (3552) Дон Кихот. Однако на тот момент никаких признаков активности у астероида не было зарегистрировано, поэтому было высказано предположение, что объект является ядром угасшей кометы (Weissman и др., 1989; 2002). Позже, в 2009 г., была зарегистрирована кометная активность в виде выброса газа CO_2 (Mommert и др., 2014), повторившаяся в 2017 г. (Mommert и др., 2018). В 2018 г. впервые выявлена эпизодическая пылевая активность этого объекта, на основании новых исследований сделано заключение, что астероид (3552) Дон Кихот, действительно, является ядром угасшей кометы, которое вновь проявило активность (Mommert и др., 2014; 2018; Kokhirova и др., 2021b).

Таким образом, наблюдательные открытия и теоретические разработки за последние десятилетия привели к общему мнению о том, что по крайней мере некоторые астероиды, в частности, с орбитами, пересекающими орбиту Земли, на самом деле могут быть потухшими ядрами комет или их фрагментами. Угасшие ядра могут напоминать примитивные типы астероидов, такие как С, Р и D. Имеющиеся динамические оценки заключаются в том, что менее половины астероидов групп Аполлона и Атона могут быть угасшими ядрами комет, хотя неопределенность этой оценки довольно велика. Бабаджанов и Кохирова (2009) на основе вычисления эволюции орбит АСЗ и критерия выявления угасших комет по метеорному признаку показали, что среди общего числа АСЗ, открытых до 2005 г., 5% составляют угасшие ядра комет. “Высохшее” кометное ядро при столкновении с Землей произведет явление, подобное Тунгусскому. Таким образом, астероиды, сближающиеся с Землей, как из первого, так и из второго источников представляют опасность для Земли, хотя и по-разному. Совершенно очевидно, что для решения этих проблем и проблемы кометно-астероидной опасности необходимы дальнейшие подробные физические исследования АСЗ и других необычных ОЗО.

АСТЕРОИДНО-МЕТЕОРОИДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

АСЗ кометного происхождения и их родственные метеороидные рои образуют комплексы околоземных объектов (ОЗО), которые имеют очень схожие орбиты и, вероятно, общее родительское тело. Астероидно-метеороидные комплексы являются результатом разрушения большей кометы и, следовательно, эти “астероиды” на самом деле являются угасшими фрагментами кометы. Отметим, что теория образования и эволюции метеороидных роев подробно рассмотрена в работах (Babadzhanov, Obrubov, 1992) и (Бабаджанов, Кохирова, 2009), другие имеющиеся гипотезы образования роев приведены в статьях Бабаджанов и др. (2015a; 2015b).

Как было отмечено, по наземным наблюдениям сложно различить АСЗ различного происхождения. На больших расстояниях от Земли они выглядят внешне одинаково. Поэтому очень важно в дополнение к наблюдениям использовать критерии, которые могут помочь нам надежно определить природу конкретных астероидов. Такие критерии позволят идентифицировать АСЗ как угасшие кометные ядра, найти метеороидные рои и метеорные потоки, связанные с ними, установив таким способом астероидно-метеороидные

Таблица 3. Элементы орбиты околоземных объектов и средние орбиты метеорных потоков в астероидно-метеороидном комплексе Тауриды (равноденствие 2000.0)

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
Северные Тауриды NTA (00017)	0.35	0.83	3	226	59	22	28	—	Porubcan, Kornos (2002)
1984 KB	0.52	0.76	5	226	50	14	26	0.20	Asher и др. (1993a; 1993b); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1988 VP4	0.79	0.65	12	280	70	51	14	0.19	Asher и др. (1993a; 1993b)
1990 HA	0.78	0.70	4	247	50	25	18	0.20	Babadzhanov (2001); Asher и др. (1993a; 1993b); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1991 BA	0.71	0.68	2	299	111	18	18	0.16	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
1998 VD31	0.52	0.80	10	247	70	11	25	0.21	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 VK12	0.50	0.78	10	229	54	8	24	0.16	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 VR6	0.53	0.76	9	232	50	28	23	0.20	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2002 XM35	0.38	0.84	3	252	81	25	28	0.03	Porubcan и др. (2004; 2006); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2003 WP21	0.49	0.79	4	242	66	17	25	0.15	Porubcan и др. (2004; 2006); Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2003 UL3	0.46	0.80	15	91	82	29	26	0.26	Porubcan и др. (2004; 2006); Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2004 TG10	0.32	0.86	4	224	55	22	30	0.06	Porubcan и др. (2004; 2006); Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2005 UY6	0.30	0.87	12	217	52	20	33	0.19	Rudawska и др. (2012b); Кохирова и др. (2022)
2008 NS1	0.48	0.80	14	226	53	26	28	0.19	Кохирова и др. (2022)
2008 XM1	0.45	0.81	4	252	78	28	26	0.16	Madiedo и др. (2013); Кохирова и др. (2022)
2011 UE256	0.51	0.80	12	242	64	27	26	0.20	Кохирова и др. (2022)
2012 UR158	0.32	0.86	3	288	96	21	29	0.05	Кохирова и др. (2022)
2014 NK52	0.35	0.84	3	225	57	22	30	0.02	Кохирова и др. (2022)
2014 XQ7	0.66	0.75	31	239	61	29	27	0.12	Кохирова и др. (2022)
5025 P-L	0.44	0.90	6	226	51	15	29	0.14	Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)

Таблица 3. Продолжение

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
Южные Тауриды STA (00002)	0.35	0.82	5	217	49	13	28	—	Porubcan, Kornos (2002)
1996 SK	0.51	0.80	2	196	16	10	24	0.17	Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 RK45	0.36	0.77	6	—	—	—	—	0.07	Porubcan и др. (2004; 2006)
2003 QC10	0.37	0.74	5	180	16	1.2	24	0.11	Porubcan и др. (2004; 2006)
2003 SF	0.48	0.79	6	—	—	—	—	0.12	Porubcan и др. (2004; 2006)
2005 TF50	0.30	0.87	11	218	52	15	31	0.15	Кохирова и др. (2022)
2005 UR	0.27	0.88	7	216	51	15	32	0.11	Кохирова и др. (2022)
2010 TU149	0.38	0.83	2	214	45	16	29	0.07	Rudawska и др., (2012a); Кохирова и др. (2022)
2011 SB16	0.49	0.80	7	208	32	10	26	0.18	Кохирова и др. (2022)
(4197) 1982 TA	0.52	0.77	12	216	33	25	23	0.25	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)
ζ-Персеиды ZPE (00172)	0.34	0.79	1	79	63	24	27	—	Cook (1973)
16960	0.39	0.86	18	81	65	9	31	0.21	Babadzhanov и др. (2008a); Бабаджанов, Кохирова (2009)
1984 QY1	0.28	0.91	4	60	41	19	32	0.13	Бабаджанов, Кохирова (2009)
1991 GO	0.66	0.66	10	24	19	25	18	0.19	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
1993 KA2	0.50	0.78	3	60	54	16	24	0.16	Babadzhanov (2001); Бабаджанов, Кохирова (2009)
2005 LV30	0.54	0.77	8	66	60	31	23	0.18	Кохирова и др. (2022)
2006 TH7	0.31	0.87	11	78	60	28	31	0.14	Кохирова и др. (2022)
2009 SB	0.39	0.82	6	57	43	22	27	0.10	Кохирова и др. (2022)
2014 LN17	0.50	0.80	7	72	68	14	25	0.17	Кохирова и др. (2022)
2201 Oljato	0.63	0.71	3	77	79	27	20	0.12	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
β-Тауриды BTA (00173)	0.34	0.85	6	97	87	19	30	—	Cook (1973)
1937 UB Hermes	0.62	0.62	6	—	—	—	—	0.25	Asher и др. (1993a; 1993b)
1991 TB2	0.39	0.84	9	—	—	—	—	0.11	Babadzhanov (2001)
2001 HB	0.40	0.69	9	16	6	−8	22	0.21	Porubcan и др. (2004; 2006)
2001 QJ96	0.32	0.80	6	159	357	−6	27	0.10	Porubcan и др. (2004; 2006)
2005 NX39	0.30	0.87	14	92	81	17	30	0.22	Кохирова и др. (2022)
4341 Poseidon	0.59	0.68	12	—	—	—	—	0.20	Asher и др. (1993a; 1993b); Babadzhanov (2001)
5143 Heracles	0.42	0.77	9	—	—	—	—	0.14	Babadzhanov (2001)
(8201) 1994 AH2	0.73	0.71	10	—	—	—	—	0.20	Babadzhanov (2001)

Таблица 4. Элементы орбиты околоземных объектов и средние орбиты метеорных потоков в астероидно-метеороидном комплексе Хи-Скорпииды (равноденствие 2000.0)

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}
χ -Скорпииды	0.71	0.77	6	74	248	-13	21	—
δ -Скорпииды	0.69	0.76	0	70	240	-21	20	—
β -Либриды	0.76	0.53	3	217	224	-9	18	—
σ -Либриды	0.61	0.77	6	237	234	-28	25	—
2003 HP32	0.63	0.76	3	83	258	-19	21	0.14
2006 WX29	0.67	0.71	4	77	251	-15	20	0.09
2007 VH189	0.72	0.72	6	75	245	-11	19	0.09
2007 WT3	0.70	0.70	7	76	248	-11	19	0.07
2007 WY3	0.64	0.77	11	77	254	-8	22	0.13
2008 UM1	0.69	0.72	6	68	241	-10	20	0.12

комплексы и, в конечном итоге, определить долю вымерших комет в популяции астероидов. Одним из возможных критериев является наличие метеороидных роев, образованных угасшими кометными ядрами в период их кометной активности. Поскольку метеорный поток может быть произведен только метеороидным роем, пересекающим орбиту Земли, то поиск угасших комет в популяции АСЗ посредством выявления связанных метеороидных роев и метеорных потоков может быть очень надежным. Данный подход, названный “метеорным” признаком, создан и развит в Институте астрофизики НАН Таджикистана под руководством академика П.Б. Бабаджанова. Детали метода, этапы его реализации и некоторые результаты по определению доли угасших кометных ядер среди АСЗ детально изложены в монографии Бабаджанова и Кохировой (2009). Результаты, полученные на основе применения данного метода, апробированы и опубликованы, их надежность и достоверность не вызывает сомнений.

Применение данного метода позволило выявить ряд астероидно-метеороидных комплексов. Самым известным, достаточно изученным и подтвержденным является астероидно-метеороидный комплекс Таурид. В результате исследований этого комплекса выявлено более 40 астероидов кометной природы с размерами в несколько деkamетров, двигающихся наряду с кометой 2P/Энке по орбитам, находящимся внутри роя Таурид (Asher и др., 1993a; 1993b; Babadzhanov, 2001; Porubcan и др., 2004; 2006; Babadzhanov и др., 2008a; Rudawska и др., 2012a; 2012b; Madiedo и др., 2013; Кохирова и др., 2022). Метеороидный рой Таурид, комета 2P/Энке, являющаяся родительницей роя, и более 40 астероидов, сближающихся с Землей, в действительности являющимися угасшими фрагментами родительской кометы, об-

разуют кометно-астероидно-метеороидный комплекс Таурид. Рой Таурид порождает метеорные потоки и субпотоки, наблюдаемые на Земле ежегодно в периоды октябрь–ноябрь и май–июнь.

За последние 15 лет в научной школе академика П.Б. Бабаджанова были выявлены более 10 астероидно-метеороидных комплексов – Йота-Акварид, Сигма-Каприкорнид, Дельта-Писцид, Хи-Скорпиид, Виргинид, Бета-Либрид, Либрид-Лупид, исследован комплекс Квадрантид, добавлены новые ОЗО в комплекс Таурид (Бабаджанов, Кохирова, 2009; Babadzhanov и др., 2008a; 2008b; 2008c; 2009; 2012; 2013; 2014; 2015a; 2015b; 2017; Кохирова и др., 2020a; 2020б; 2020в; 2020г; 2020д; 2021a; 2022). Нами показано, что некоторые метеороидные рои связаны не с одним, а с несколькими астероидами, сближающимися с Землей, кометного происхождения. Это означает, что в ансамбле данного роя двигаются несколько ОЗО деkamетровых размеров, которые в будущем могут вторгнуться в земную атмосферу и породить ярчайшие болиды. Каждый из этих комплексов состоит из соответствующего метеороидного роя (порождающего метеорные потоки), и нескольких ОЗО кометной природы. Они имеют схожие орбиты и произошли от одной родительской кометы, т.е. от нее остался ее рой и несколько крупных угасших фрагментов.

В табл. 3–5 приведены основные параметры астероидно-метеороидных комплексов Тауриды (Asher и др., 1993a; 1993b; Babadzhanov, 2001; Porubcan и др., 2004; 2006; Babadzhanov и др., 2008a; Rudawska и др., 2012a; 2012b; Madiedo и др., 2013; Кохирова и др., 2022), Хи-Скорпииды (Babadzhanov и др., 2013) и Виргиниды (Jenniskens, 2006; Babadzhanov и др., 2012; 2015b; Кохирова и др., 2020a; 2020г; 2020д; 2021). Отметим,

Таблица 5. Элементы орбиты околоземных объектов и средние орбиты метеорных потоков в астероидно-метеороидном комплексе Виргиниды (равноденствие 2000.0)

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
α -Виргиниды (00021AVB)	0.72	0.72	7	30	203	3	18	—	Jenniskens и др. (2016)
h -Виргиниды (00343 HVI)	0.74	0.73	1	39	204	–12	18	—	
1998 FR11	0.80	0.71	7	51	207	–18	17	0.21	Бабаджанов, Кохирова (2009)
1999 UZ5	0.82	0.68	2	46	206	–6	16	0.16	Бабаджанов, Кохирова (2009)
1998 SH2 (PHA)	0.74	0.72	3	13	184	3	19	0.15	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2009 HS44	0.77	0.70	2	29	193	–11	18	0.11	Кохирова и др. (2020а)
2009 SM98	0.78	0.67	6	35	204	4	17	0.12	Кохирова и др. (2020а)
2010 EK44 (PHA)	0.65	0.77	9	29	208	3	22	0.02	Кохирова и др. (2020а)
2010 FD7	0.81	0.68	6	30	197	9	16	0.19	Кохирова и др. (2020а)
2011 BE38 (PHA)	0.76	0.71	7	19	191	10	18	0.15	Кохирова и др. (2020а)
2011 EF17 (PHA)	0.60	0.74	4	21	199	–2	22	0.02	Кохирова и др. (2020а)
2014 EQ12 (PHA)	0.68	0.74	11	17	195	10	20	0.13	Кохирова и др. (2020а)
2012 SW20 (PHA)	0.82	0.66	9	35	204	11	16	0.12	Кохирова и др. (2020а)
2012 TT256	0.77	0.71	2	36	200	–5	17	0.04	Кохирова и др. (2020а)
2013 TE135 (PHA)	0.62	0.74	5	21	199	–1	22	0.12	Кохирова и др. (2020а)
2014 GN1	0.71	0.73	2	10	183	2	20	0.20	Кохирова и др. (2020а)
Сев. η -Виргиниды (00011EVI)	0.46	0.81	5	357	185	3	26	—	Jenniskens и др. (2016)
Южн. η -Виргиниды (00011EVI),	0.50	0.71	3	350	175	–1	23	—	
Дн.Окт. η -Виргиниды	0.48	0.83	7	190	187	5	27	—	
Дн.Окт. β -Виргиниды	0.48	0.83	5	191	184	–8	27	—	
1995 EK1	0.51	0.78	9	355	201	1	25	0.19	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2003 FB5	0.53	0.79	5	358	184	–8	28	0.12	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2007 CA19 (PHA)	0.48	0.83	10	174	189	6	26	0.10	Babadzhanov и др. (2015b)
2010 CR5	0.55	0.82	6	323	174	6	27	0.13	Кохирова и др. (2020г)
2010 FJ81	0.43	0.88	9	191	188	6	29	0.18	Кохирова и др. (2020г)
2012 VJ134	0.38	0.83	21	144	206	2	30	0.15	Кохирова и др. (2020г)
2014 VC10	0.41	0.82	12	358	185	2	26	0.10	Кохирова и др. (2020г)
Сев. ν -Виргиниды	0.40	0.82	6	335	168	11	27	—	Terentjeva (1989); Babadzhanov и др. (2012)
Южн. ν -Виргиниды	0.39	0.85	0	340	170	4	28	—	
Дн.Окт. η -Виргиниды	0.31	0.80	11	201	187	5	30	—	
Дн.Окт. β -Виргиниды	0.43	0.80	8	192	179	–8	28	—	
2013 TR135	0.42	0.81	2	243	164	6	26	0.11	Кохирова др. (2020д)
2013 CU82	0.56	0.77	11	318	176	16	24	0.19	Кохирова и др. (2020д)
2002 BK25 (PHA)	0.58	0.75	12	156	163	23	23	0.05	Бабаджанов, Кохирова (2009)

Таблица 5. Окончание

Название объектов	q , а. е.	e	i , град	λ , град	α , град	δ , град	V_g , км/с	D_{SH}	Источник
2002 TZ59	0.41	0.84	16	187	172	-12	29	0.13	Бабаджанов, Кохирова (2009)
2004 CK39	0.39	0.83	12	359	163	-6	28	0.05	Babadzhanov и др. (2012)
Сев. μ -Виргиниды (00047DLI)	0.42	0.83	9	39	226	-8	28	-	Porubcan, Gavajdova (1994);
Южн. μ -Виргиниды	0.72	0.70	2	43	210	-16	18	-	Терентьева (1966)
2010 XD11	0.36	0.85	16	20	210	-8	29	0.16	Кохирова и др. (2021a)
2010 GO33	0.72	0.71	10	41	207	-28	20	0.13	Кохирова и др. (2021a)
2011 VG9	0.51	0.77	1	29	209	-9	23	0.15	Кохирова и др. (2021a)
2003 WW26	0.48	0.80	6	58	229	-25	25	0.01	Бабаджанов, Кохирова (2009)

что комплекс Виргинид включает четыре субсемейства АСЗ кометного происхождения и метеороидных роев. В табл. 3–5 для каждого комплекса (субкомплекса) даны названия наблюдаемых метеорных потоков, наименования связанных с ними ОЗО, средние орбиты метеорных потоков и элементы орбит родственных с ними ОЗО: q – перигелийное расстояние, e – эксцентриситет, i – наклон, λ – долгота Солнца, соответствующая активности потока, α_g – прямое восхождение и δ_g – склонение геоцентрического радианта, V_g – геоцентрическая скорость. Здесь также даны значения критерия D_{SH} (Southworth, Hawkins, 1963), который определяет меру сходства орбит метеорного потока и ОЗО. Когда D_{SH} не превышает значения 0.25, то предполагается, что эти два тела имеют общее происхождение. Во всех приведенных случаях были обнаружены ОЗО, которые могут быть родительскими телами наблюдаемых метеорных потоков. Величины критерия D_{SH} удовлетворяют условию $D_{SH} \leq 0.25$, следовательно, исследуемые ОЗО и метеорные потоки имеют схожие орбиты. Близость положений радиантов, скоростей и периодов активности также указывают на возможную связь ОЗО и метеорных потоков и позволяют сделать вывод, что данные комплексы образовались в результате распада гигантских родительских комет. Отметим также, что рассмотренные метеороидные рои содержат крупные фрагменты своих родительских комет.

Некоторые из ОЗО кометной природы являются потенциально опасными телами для Земли, и нами получены теоретические параметры, характеризующие их возможное вторжение в земную атмосферу: экваториальные координаты точки входа (радиант), геоцентрические скорости, даты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные сведения об околоземных объектах, накопленные за последние десятилетия, дают лишь самое общее представление об ОЗО. С учетом значительного числа ОЗО, открытых к настоящему времени, и индивидуальных особенностей каждого из них мы уже имеем мощные базы данных и публикаций, и можно предположить, какой объем информации нам еще предстоит выявить. С развитием наблюдательной техники и средств, теоретических методов исследования и успешных космических экспериментов наши знания об околоземных объектах быстро прогрессируют и расширяются. На смену устаревших подходов и концепций приходят более современные теории и гипотезы, черпающие свои доказательства из новых результатов научных исследований. В будущем можно ожидать новых выдающихся, порой совершенно неожиданных открытий, которые будут основываться на имеющихся современных сведениях об околоземных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И. Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли. Душанбе: Изд-во НАНТ “Дониш”, 2009. 185 с.
- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Обрубов Ю.В. Угасшие кометы и астероидно-метеороидные комплексы // Астрон. вестн. 2015а. Т. 49. С. 182–189. (Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Obrubov Yu.V. Extinct comets and asteroid-meteoroid complexes // Sol. Syst. Res. 2015a. V. 49. P. 165–172.)
- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Обрубов Ю.В. Образование и эволюция метеороидных роев. Астероидно-метеороидные комплексы // Сб. тр. Международной конференции “V Бредихинские чтения” / Ред.: Сачков М.Е., Карташова А.П., Емельяненко В.В. М.: Изд-во Янус-К, 2015б. С. 165–181.

- Бабаджанов П.Б., Кохирова Г.И., Хамроев У.Х.* Объект 2015 ТВ145 — астероид или угасшая комета? // ДАН РТ. 2016. Т. 59. № 1–2. С. 33–40.
- Добровольский О.В.* Нестационарные процессы в кометах и солнечная активность. Душанбе: Изд-во АН ТаджССР, 1961. 194 с.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. I. Астероиды, связанные с метеороидным роём Альфа-Виргиниды // ДАН РТ. 2020а. Т. 63. С. 187–198.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Бета-Либрид // Изв. АН РТ. Отделение ФМХГТН. 2020б. № 3 (180). С. 43–54.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И.* Астероиды, связанные с метеороидным роём Либриды-Луиды // Изв. АН РТ. Отделение ФМХГТН. 2020в. № 4 (181). С. 41–48.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. II. Астероиды, связанные с метеороидным роём Эта-Виргиниды // ДАН РТ. 2020г. Т. 63. С. 591–597.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. III. Астероиды, связанные с метеороидным роём Нью-Виргиниды // ДАН РТ. 2020д. Т. 63. С. 708–714.
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Хамроев У.Х., Джон-мухаммади А.И., Кулаев И.В.* Астероидно-метеороидный комплекс Виргинид. IV. Астероиды, связанные с метеороидным роём Мю-Виргиниды // ДАН РТ. 2021а. Т. 64. С. 57–63.
- Кохирова Г.И., Иванова А.В., Рахматуллаева Ф.Д.* Подтверждение кометной природы астероида Дон Кихот по наблюдениям в обсерватории Санглох // Астрон. вестн. 2021б. Т. 55. С. 74–83 (*Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D.* Evidence of the cometary nature of asteroid Don Quixote provided by observations at the Sanglokh observatory // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. P. 61–70).
- Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б., Латипов М.Н., Джон-мухаммади А.И., Хамроев У.Х.* Новые околоземные объекты в комплексе Таурид // Изв. АН РТ. ОФМХГТН. 2022. № 1 (186). С. 40–61.
- Терентьева А.К.* Малые метеорные рои // Результаты исследований по межд. геофиз. проектам // Исследование метеоров. № 1. М.: Наука. 1966. С. 62–132.
- Хашимов Н.М., Шоекубов Ш.Ш.* Лабораторное моделирование образования ионов молекулярного углерода в кометах // ДАН ТаджССР. 1989. Т. 32. С. 22–25.
- Хашимов Н.М., Ибадинов Х.И., Шоекубов Ш.Ш.* Лабораторное исследование возможности образования тугоплавких веществ в кометах // ДАН ТаджССР. 1994. Т. 37. С. 16–19.
- Шульман Л.М.* Динамика кометных атмосфер. Нейтральный газ. Киев: Изд-во “Наукова думка”, 1972. 242 с.
- Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I.* Asteroids in the Taurid Complex // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1993a. V. 264. P. 93–105.
- Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I.* The Taurid Complex asteroids // Proc. Int. Astron. Symp. “Meteoroids and their parent bodies”, Smolenice, Slovakia, July 6–12, 1992. Bratislava: Astron. Inst., Slovak Acad. Sci. 1993b. P. 93–96.
- Babadzhanov P.B., Obrubov Yu.V.* Evolution of short-period meteoroid streams // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 1992. V. 57. P. 111–127.
- Babadzhanov P.B.* Search for meteor showers associated with near-Earth asteroids. I. Taurid Complex // Astron. and Astrophys. 2001. V. 373. P. 329–335.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth objects in the Taurid complex // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2008a. V. 386. P. 1436–1442.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* The meteor showers associated with 2003 EH1 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2008b. V. 386. P. 2271–2277.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth asteroids among the Piscids meteoroid stream // Astron. and Astrophys. 2008c. V. 479. P. 249–255.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth asteroids among the Iota Aquarids meteoroid stream // Astron. and Astrophys. 2009. V. 507. P. 1067–1072.
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth asteroids among the Scoriids meteoroid complex // Astron. and Astrophys. 2013. V. 556. id. A25 (5 p.).
- Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I.* Near-Earth object 2004 CK39 and its associated meteor showers // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2012. V. 420. P. 2546–2550.
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh.* The Capricornids asteroid-meteoroid complex // Proc. Astron. Conf. “Meteoroids 2013”, A.M. Univ., Poznan, Poland, Aug. 26–30, 2013. Poznan: A.M. Univ. Press, 2014. P. 199–204.
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh.* The Sigma-Capricornids complex of near-Earth objects // Adv. Space Res. 2015a. V. 55. P. 1784–1791.
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Obrubov Yu.V.* The potentially hazardous asteroid 2007 CA19 as the parent of the η -Virginid meteoroid stream // Astron. and Astrophys. 2015b. V. 579. id. A119 (5 p.).
- Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Williams G.I., Obrubov Yu.V.* Investigation into the relationship between comet 96P/Machholz 1 and asteroid 2003 EH1 // Astron. and Astrophys. 2017. V. 598. id. A94 (7 p.).
- Ballouz R., Walsh K., Bottke W., DellaGiustina D.N., Al Asad M.M., Michel P., Avdellidou C., Delbo M., Jawin E.R., Asphaug E. and 10 co-authors.* Craters on (101955) Bennu’s boulders // AAS Division of Planet. Sci. Meeting #52. id. 402.01. Bull. Am. Astron. Soc. 2020a. V. 52. № 6. e-id. 2020n6i402p01.
- Ballouz R.L., Walsh K.J., Barnouin O.S., DellaGiustina D.N., Al Asad M.M., Jawin E.R., Daly M.G., Bottke W.F., Michel P., Avdellidou C. and 15 co-authors.* Bennu’s near-Earth lifetime of 1.75 million years inferred from craters on its boulders // Nature. 2020b. V. 587. P. 205–209.

- Betzler A.S., Borges E.P.* Nonextensive distributions of asteroid rotation periods and diameters // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 539. id. A158.
- Boroviccka J.* About the definition of meteoroid, asteroid, and related terms // *WGN, J. Int. Meteor Organization.* 2016. V. 44. № 2. P. 31–34.
- Bottke W.F., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J.-M., Levison H.F., Michel P., Metcalfe T.S.* Debaised orbital and absolute magnitude distribution of the near-Earth objects // *Icarus.* 2002. V. 156. P. 399–433.
- Bowell E., Buie M.W., Picken H.* (4015) 1979 VA = Comet Wilson-Harrington (1949 III) // *IAU Circ.* 1992. № 5585. #1. 1B.
- Brisset J., Cox C., Anderson S., Hatchitt J., Madison A., Mendonca M., Partida A., Remie D.* Regolith behavior under asteroid-level gravity conditions: Low-velocity impacts into mm- and cm-sized grain targets // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 642. id. A198 (13 pp.).
- Britt D.T., Consolmagno G.J.* Asteroid bulk density // *AAS Division of Planet. Sci. Meeting #32, id.07.02. Bull. Am. Astron. Soc.* 2000. V. 32. P. 999.
- Britt D.T., Yeomans D., Housen K., Consolmagno G.* Asteroid density, porosity, and structure // *Asteroids III* / Eds: Bottke, Jr W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 485–500.
- Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the small Main-Belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 146–177.
- Chan Q.H.S., Stephant A., Franchi I.A., Zhao X., Brunetto R., Kebukawa Y., Noguchi T., Johnson D., Price M.C., Harriss K.H., Zolensky M.E., Grady M.M.* Organic matter and water from asteroid Itokawa // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 5125.
- Chapman C.R., Merline W.J., Thomas P.C., Joseph J., Cheng A.F., Izenberg N.* Impact history of Eros: Craters and boulders // *Icarus.* 2002. V. 155. P. 104–118.
- Cook A.F.* A working list of meteor streams // *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids* / Eds: Hemenway C.L., Millman P.M., Cook A.F. Washington DC: NASA, SP-319, 1973. P. 183–191.
- Dellagiustina D.N., Emery J.P., Golish D.R., Emery J.P., Golish D.R., Rozitis B., Bennett C.A., Burke K.N., Ballou R.-L., Becker K.J., Christensen P.R., Drouet D'Aubigny C.Y. and 46 co-authors.* Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis // *Nature Astron.* 2019. V. 3. P. 341–351.
- Ellis T.A., Neff J.S.* A comparison of modeled and observed intensity profiles for C₂, C₃, CN, and the continuum for P/Halley // *Icarus.* 1992. V. 97. P. 99–110.
- 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.
- Fernandez Y.R., McFadden L.A., Lisse C.M., Helin E.F., Chamberlin A.B.* Analysis of POSS images of comet-asteroid transition object 107P/1949 W1 (Wilson-Harrington) // *Icarus.* 1997. V. 128. P. 114–126.
- Fujiwara A., Kawaguchi J., Yeomans D.K., Abe M., Mukai T., Okada T., Saito J., Yano H., Yoshikawa M., Scheeres D.J. and 12 co-authors.* The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa // *Science.* 2006. V. 312. P. 1330–1334.
- Gicquel A., Vincent J.-B., Agarwal J., A'Hearn M.F., Bertini I., Bodewits D., Sierks H., Lin Z.-Y., Barbieri C., Lamy P.L. and 51 co-authors.* Sublimation of icy aggregates in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko detected with the OSIRIS cameras on board Rosetta // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 462. P. S57–S66.
- Gradie J.C., Chapman C.R., Tedesco E.F.* Distribution of taxonomic classes and the compositional structure of the Asteroid Belt // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 321.
- Green D.W.E., Rickman H., Porter A.C., Meech K.J.* The strange periodic comet Machholz // *Science.* 1990. V. 247. P. 1063–1067.
- Gundlach B., Blum J.* A new method to determine the grain size of planetary regolith // *Icarus.* 2013. V. 223. P. 479–492.
- Hanus J., Viikinkoski M., Marchis F., Ďurech J., Kaasalainen M., Delbo' M., Herald D., Frappa E., Hayamizu T., Kerr S. and 4 co-authors.* Volumes and bulk densities of forty asteroids from ADAM shape modeling // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 601. id. A114.
- Harris A.W., Burns J.A.* Asteroid rotation. I. Tabulation and analysis of rates, pole positions and shapes // *Icarus.* 1979. V. 40. P. 115.
- Hsieh H.H., Jewitt D.* A population of comets in the main asteroid belt // *Science.* 2006. V. 312. P. 561–563.
- Jenniskens P.* 2003 EH₁ is the Quadrantid shower parent comet // *Astron. J.* 2004. V. 127. P. 3018–3022.
- Jenniskens P., Marsden B.G.* 2003 EH1 and the Quadrantids // *IAU Circ.* 2003. № 8252. #2.
- Jenniskens P.* Meteor showers and their parent comets. New-York: Cambridge Univ. Press, 2006. 790 p.
- Jenniskens P., Nenon Q., Albers J., Gural P.S., Haberman B., Holman D., Morales R., Grigsby B.J., Samuels D., Johannink C.* The established meteor showers as observed by CAMS // *Icarus.* 2016. V. 266. P. 331–354.
- Jewitt D.C.* The active asteroids // *Astron. J.* 2012. V. 143. id. 66 (14 p.).
- Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J.* The active of asteroids // *Asteroids IV* / Eds: Michel P., DeMeo F., Bottke W. Tucson: Univ. Arizona Press, 2015. P. 221–241.
- Kanuchova Z., Neslusan L.* The parent bodies of the Quadrantid meteoroid stream // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 470. P. 1123–1136.
- Kokhirova G.I., Babadzhanov P.B., Khamroev U.H.* On a possible cometary origin of the object 2015TB145 // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 143. P. 164–168.
- Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D.* Results of observations of asteroid Don Quixote at the Sanglokh observatory // *INASAN Sci. Rep.* 2020. V. 5 (4). P. 196–200.
- Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.D.* Evidence of the cometary nature of asteroid Don Quixote provided by observations at the Sanglokh observatory // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55. P. 61–70.
- Kramer T., Lauter M.* Outgassing-induced acceleration of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 630. id. A4.

- Krankowsky D., Lammerzähl P., Herrwerth I., Woweries J., Eberhardt P., Dolder U., Herrmann U., Schulte W., Berthelier J.J., Illiano J.M. and 2 co-authors.* In situ gas and ion measurements at comet Halley // *Nature*. 1986. V. 321. P. 326.
- Krasnopolsky V.A., Godoshev M., Moreels G., Moroz V.I., Krysko A.A., Gogosheva Ts., Palazov K., Sargoichev S., Clairemidi J., Vincent M. and 4 co-authors.* Spectroscopic study of comet Halley by the Vega 2 three-channel spectrometer // *Nature*. 1986. V. 321. P. 269–270.
- Küppers M.* The Regolith of Asteroid 433/Eros // Abstracts of EGS XXVII GA, Nice, 21–26 April 2002. 2002. Abstract #4231.
- Kwiatkowski T., Polinska M., Loaring N., Buckley D.A.H., O'Donoghue D., Kniazev A., Romero Colmenero E.* Photometric survey of the very small near-Earth asteroids with the SALT telescope. III. Lightcurves and periods for 12 objects and negative detections // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 511. id. A49.
- Lamy P.L., Toth I., Fernandez Y.R., Weaver H.A.* The sizes, shapes, albedos, and colors of cometary nuclei // *Comets II* / Eds: Festou M.C., Keller H.U., Weaver H.A. Tucson: Univ. Arizona Press, 2004. P. 223–264.
- Madiedo J.M., Trigo-Rodríguez J.M., Williams I.P., Ortiz J.L., Cabrera J.* The Northern χ -Orionid meteoroid stream and possible association with the potentially hazardous asteroid 2008XM1 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 431. P. 2464–2470.
- Matsumoto T., Noguchi T., Miyake A., Igami Y., Haruta M., Saito H., Hata S., Seto Y., Miyahara M., Tomioka N. and 10 co-authors.* Space weathering of anhydrous minerals in regolith samples from the C-type asteroid Ryugu // Abstracts 53rd Lunar and Planet. Sci. Conf. 2022. 1693.pdf
- McFadden L.A., Cochran A.L., Barker E.S., Cruikshank D.P., Hartmann W.K.* The enigmatic object 2201 Oljato: Is it an asteroid or an evolved comet? // *J. Geophys. Res.: Planets*. 1993. V. 98. P. 3031–3041.
- Mommert M., Hora J.L., Harris A.W., Reach W.T., Emery J.P., Thomas C.A., Mueller M., Cruikshank D.P., Trilling D.E., Delbo M., Smith H.A.* The discovery of cometary activity in Near-Earth Asteroid (3552) Don Quixote // *Astrophys. J.* 2014. V. 781. 25M (10 p.).
- Mommert M., Trilling D., Knight M.M., Hora J., Biver N., Womack M., Wierzbos K., Polishook D., Veres P., Gustafsson A. and 6 co-authors.* Systematic characterization and monitoring of potentially active asteroid: The case of Don Quixote // AAS Division of Planet. Sci. Meeting #50. id. 505.05. Am. Astron. Soc. 2018.
- Nakamura T., Noguchi T., Tanaka M., Zolensky M.E., Kimura M., Tsuchiyama A., Nakato A., Ogami T., Ishida H., Uesugi M. and 12 co-authors.* Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites // *Science*. 2011. V. 333. P. 1113–1116.
- Neslusan L., Kanuchova Z., Tomko D.* The meteor-showers complex of 96P/Machholz revised // *Astron. and Astrophys.* 2013a. V. 551. id. A87. (14 p.).
- Neslusan L., Hajdukova M., Jakubik M.* Meteor-showers complex of asteroid 2003EH1 compared with that of comet 96P/Machholz // *Astron. and Astrophys.* 2013b. V. 560. id. A47 (10 p.).
- Ostro S.J., Campbell D.B., Chandler J.F., Shapiro I.I., Hine A.A., Velez R., Jurgens R.F., Rosema K.D., Winkler R., Yeomans D.K.* Asteroid radar astrometry // *Astron. J.* 1991. V. 102. P. 1490–1502.
- Opik E.* The stray bodies in the Solar system. I. Survival time of cometary nuclei // *Adv. Astron. and Astrophys.* 1963. V. 2. P. 219–262.
- Patzold M., Abdert T., Hahn M., Asmar S.W., Barriot J.-P., Bird M.K., Häusler B., Peter K., Tellmann S., Grün E. and 10 co-authors.* A homogeneous nucleus for comet 67P/Churyumov-Gerasimenko from its gravity field // *Nature*. 2016. V. 530. P. 63–65.
- Porubcan V., Gavajdova M.* A search for fireball streams among photographic meteors // *Planet. and Space Sci.* 1994. V. 42. P. 151–155.
- Porubcan V., Kornos L., Williams I.P.* Associations between asteroids and meteoroid streams // *Earth, Moon and Planets*. 2004. V. 95. P. 697–712.
- Porubcan V., Kornos L., Williams I.P.* The Taurid complex meteor showers and asteroids // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*. 2006. V. 36. P. 103–117.
- Porubcan V., Kornos L.* The Taurid meteor shower // *Proc. Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2002*. Int. Conf., 29 July–2 August 2002, Berlin, Germany / Ed.: Warmbein B. ESA SP-500. Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division, 2002. P. 177–180.
- Pravec P., Harris A.W.* Fast and slow rotation of asteroids // *Icarus*. 2000. V. 148. P. 12.
- Pravec P., Harris A.W., Warner B.D.* NEA rotations and binaries // *Near-Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk*, Proc. IAU Symp. 236 / Eds: Valsecchi G.B., D. Vokrouhlický D., Milani A. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. P. 167–176.
- Pravec P., Harris A.W., Kusnirak P., Galád A., Hornoch K.* Absolute magnitudes of asteroids and a revision of asteroid albedo estimates from WISE thermal observations // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 365–387.
- Pravec P., Harris A.W., Scheirich P., Kušnirák P., Šarounová L., Hergenrother C.W., Mottola S., Hicks M.D., Masi G., Krugly Yu.N. and 10 co-authors.* Tumbling asteroids // *Icarus*. 2005. V. 173. P. 108–131.
- Rozitis B., Green S.F., MacLennan E., Emery J.P.* Observing the variation of asteroid thermal inertia with heliocentric distance // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 477. P. 1782–1802.
- Rubin M., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Combi M.R., De Keyser J., Drozdovskaya M., Fiethé B., Fuselier S.A., Gasc S. and 11 co-authors.* Elemental and molecular abundances in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. V. 489. P. 594–607.
- Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2010TU149 in the Taurid complex // *Europ. Planet. Sci. Congress 2012*. Sept. 23–28. 2012. Madrid, Spain. id. espc. 886. 2012a.
- Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2005UW6 – A 'new' object in the Taurid complex? // *Proc. Conf. "Asteroids, Comets, Meteors 2012"*, May 16–20, 2012, Niigata, Japan LPI Contrib. № 1667. id. 6222. 2012b.
- Russell C.T., Aroian R., Arghavani M., Nock K.* Interplanetary magnetic field enhancements and their association

- with the asteroid 2201 Oljato // *Science*. 1984. V. 226. P. 43–45.
- Sagdeev R.Z., Szabo F., Avanesov G.A., Cruvellier P., Szabo L., Szego K., Abergel A., Balazs A., Barinov I.V., Bertaux J.-L. and 28 co-authors. Television observations of comet Halley from Vega spacecraft // *Nature*. 1986. V. 321. P. 262–266.
- Saito J., Miyamoto H., Nakamura R., Ishiguro M., Michikami T., Nakamura A.M., Demura H., Sasaki S., Hirata N., Honda C. and 24 co-authors. Detailed images of asteroid 25143 Itokawa from Hayabusa // *Science*. 2006. V. 312. P. 1341–1344.
- Sekanina Z. Periodic comet Machholz and its idiosyncrasies // *Astron. J.* 1990. V. 99. P. 1268–1278.
- Sierks H., Barbieri C., Lamy P.L., Rodrigo R., Koschny D., Rickman H., Keller H.U., Agarwal J., A'Hearn M.F., Angrilli F. and 56 co-authors. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Science*. 2015. V. 347. id. aaa1044.
- Siltala L., Granvik M. Masses, bulk densities, and macroporosities of asteroids (15) Eunomia, (29) Amphitrite, (52) Europa, and (445) Edna based on Gaia astrometry // *Astron. and Astrophys.* 2022. V. 658. id. A65.
- Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams // *Smith. Contrib. Astrophys.* 1963. V. 7. P. 261–285.
- Standish E.M. JPL Interoffice Memorandum 312.F-01-006.-2001. April 11, 2001.
- Terentjeva A.K. Fireball streams // *Asteroids, Comets, Meteors III* / Eds: Lagerkvist C.I., Rickman H., Lindblad B.A., Lindgren M. Uppsala Univ. Reprocentralen, 1989. P. 579–584.
- Tholen D.J. Asteroid taxonomic classifications // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
- Veeder G.J., Hanner M.S., Matson D.L., Tedesco E.F., Lebofsky L.A., Tokunaga A.T. Radiometry of near-Earth asteroids // *Astron. J.* 1989. V. 97. P. 1211–1219.
- Veverka J., Thomas P.C., Robinson M., Murchie S., Chapman C., Bell M., Harch A., Merline W.J., Bell J.F., Bussey B. and 23 co-authors. Imaging of small-scale features on 433 Eros from NEAR: Evidence for a complex regolith // *Science*. 2001. V. 292. P. 484–488.
- Weissman P.R., A'Hearn M.F., Rickman H., McFadden L.A. Evolution of comets into asteroids // *Asteroids II*; Proc. Conf., Tucson, AZ, Mar. 8-11, 1988 (A90-27001 10-91). Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 880–920.
- Weissman P.R., Bottke Jr W.F., Levison H.F. Evolution of comets into asteroids // *Asteroids III* / Eds: Bottke Jr W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 669–686.
- Whipple F.L. A comet model I. The acceleration of comets // *Astrophys. J.* 1950. V. 111. № 2. P. 375–394.
- Whipple F.L. A comet model II. Physical relation for comets and meteors // *Astrophys. J.* 1951. V. 113. № 3. P. 464–474.
- Whipple F.L. A comet model III. The zodiacal light // *Astrophys. J.* 1955. V. 121. P. 750.
- Wiegert P., Brown P. The Quadrantid meteoroid complex // *Icarus*. 2005. V. 179. P. 139–157.
- Williams I.P., Ryabova G.O., Baturin A.D., Chernetsov A.M. The parent of the Quadrantid meteoroid stream and asteroid 2003 EH1 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2004. V. 355. P. 1171–1181.
- Wurz P., Altwegg K., Balsiger H.R., Berthelier J.J., De Keyser J., Fiethe B., Fuselier S.A., Gasc S., Gombosi T.I., Korth A. and 4 co-authors. Chemical composition of the semi-volatile grains of Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Am. Geophys. Union, Fall Meeting 2017*. 2017a. abstract #P51D-2625.
- Wurz P., Altwegg K., Balsiger H., Berthelier J.-J., Bieler A., Calmonte U., De Keyser J., Fiethe B., Fuselier S., Gasc S. and 8 co-authors. Chemical composition of the semi-volatile grains of comet 67P /Churyumov-Gerasimenko // *Proc. 19th EGU GA, EGU2017 Conf.*, 23-28 April, 2017, Vienna, Austria. 2017b. P. 5587.
- <https://minorplanetcenter.net/mpc/summary>, дата обращения 23 марта 2023 г.
- <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>, дата обращения 23 марта 2023 г.
- <https://ssd.jpl.nasa.gov/>, дата обращения 23 марта 2023 г.
- https://cneos.jpl.nasa.gov/about/search_program.html, 2022.
- https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=apophis&view=OPC, дата обращения 1 апреля 2022 г.
- <https://cneos.jpl.nasa.gov>, Chamberlin A., 2007 JPL/Caltech, 2022.
- <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacescraft/display.action?id=1996-008A>, дата обращения 2022.
- <https://esa.int/rosetta/2014/10/03/measuring-comet-67pc-g/>, 2014.