

УДК 523.44

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: ПРОЕКТ ОДИССЕЯ-АСТЕРОИДЫ

© 2023 г. Е. Н. Слюта^а *, А. Е. Шаханов^б, Р. В. Ельников^с

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

^бАкционерное общество “Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина”,
Московская область, Химки, Россия

^сНаучно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

*e-mail: slyuta@geokhi.ru

Поступила в редакцию 11.05.2023 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 13.06.2023 г.

В работе рассмотрены приоритетные научные задачи изучения малых тел Солнечной системы, выбраны наиболее перспективные объекты для исследования с борта космического аппарата с пролетной траектории и доставки грунта на Землю и разработаны предложения по предварительному составу научной аппаратуры для дистанционных методов исследования астероидов. Предложена долговременная и поэтапная российская научная программа исследования малых тел Солнечной системы с помощью космических аппаратов с электроракетным двигателем. Проект задуман таким образом, чтобы с использованием меньшего числа аппаратов исследовать наибольшее число интересных с научной точки зрения астероидов. Разработан проектный облик малого космического аппарата для исследования приближающихся к Земле астероидов с пролетной траектории и основного космического аппарата для исследования с пролетной траектории металлических астероидов Главного пояса и для доставки грунта. Представлен баллистический анализ пролета пяти приближающихся к Земле астероидов и трех металлических астероидов в Главном поясе, а также баллистический анализ миссии по доставке грунта с астероида Главного пояса. Рассматривается вариант доставки грунта и с применением ядерного буксира Зевс.

Ключевые слова: космический аппарат, электроракетный двигатель, малые тела Солнечной системы, астероиды, околоземные астероиды, металлические астероиды, пролетная траектория, возврат грунта, ядерный буксир Зевс

DOI: 10.31857/S0320930X23060075, EDN: BXMKRX

ВВЕДЕНИЕ

Астероид – малое тело Солнечной системы, находящееся на гелиоцентрической орбите, преимущественно между орбитами Марса и Юпитера (Главный пояс астероидов). Главный пояс включает большинство астероидов и располагается в области околосолнечного пространства от 2.1 до 4.3 а. е.

Размеры астероидов – от десятков метров (условно) до ~1000 км. Известно около тысячи астероидов с размерами более 30 км, из них около 250 имеют размеры более 100 км. С поперечником меньше 30 км обнаружены далеко не все астероиды, так как по подсчетам около 1 млн объектов должны иметь диаметр 1 км и более. К настоящему времени в каталоге IAUMPC (Международный астрономический союз, Центр малых планет – International Astronomical Union, Minor Planet Center) только в Главном поясе астероидов зарегистриро-

вано около 1181000 объектов (IAUMPC, 2023). В каталоге IAUMPC обозначение астероидов с уже известными параметрами орбит состоит из порядкового номера его открытия и названия, предложенного первооткрывателем. Обозначение же остальных астероидов с пока еще не полными орбитальными характеристиками состоит из года открытия и двух букв, указывающих дату первого наблюдения. На основе современных представлений об орбитах в Главном поясе выделяются группы астероидов Афины (Athene) и Гильды (Hilda); расположенные в точках Лагранжа L4 и L5 Юпитера группы астероидов Греки (Greek) и Троянцы (Trojan); приближающиеся к Земле группы астероидов (NEAs) Атиры (Atiras), Атоны (Atens), Аполлоны (Apollos) и Амуры (Amors).

По спектральным характеристикам астероиды подразделяются на несколько основных оптических классов или типов. Спектральным аналогом в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне

астероидов S-класса являются обыкновенные хондриты (Chapman, 1996; Burbine, 2000; Burbine, Binzel, 2002; Burbine и др., 2002). Частицы реголита, доставленные космическим аппаратом (КА) *Науабуса* с астероида S-типа 25143 Итокава (Itokawa), по составу относятся к обыкновенным хондритам LL-типа (Nakamura и др., 2011). Наличие нанофазы восстановленного металлического железа в продуктах ударного плавления на поверхности минералов преобразовывает спектр обыкновенных хондритов в классический спектр астероидов класса S (Chapman, 1996; Noguchi и др., 2011). Средняя плотность S-астероидов с известной массой соответствует 2.92 г/м^3 (Слюта, 2014).

Спектральным аналогом астероидов C-класса в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах преимущественно являются углистые хондриты (Burbine, 2000; Burbine, Binzel, 2002; Burbine и др., 2002). Средняя плотность C-астероидов с известной массой составляет 1.79 г/см^3 (Слюта, 2014).

Наблюдаемый по спектральным и альбедным данным состав подавляющего большинства астероидов M-типа, которые характеризуются присутствием на поверхности металлов со следами различных силикатов, достаточно хорошо согласуется с составом железных метеоритов, палласитов и энстатитовых хондритов (Lupishko, Belskaya, 1989; Fornasier и др., 2011). Содержание металлической компоненты в астероидах M-типа может варьировать от 25 до 100% (Shepard и др., 2010). Металлические астероиды M-типа были сгруппированы в классе X с астероидами с похожими спектрами, но без данных по альбедо (Tholen, 1989; Tholen, Varucci, 1989; Belskaya, Lagerkvist, 1996).

Среди астероидов диаметром больше 13 км астероиды X-типа составляют 24%, S-типа – 20% и C-типа – 56% (Mothe-Diniz и др., 2003). Классы S и X по своим спектральным характеристикам отчетливо разделяются на отдельные группы. А классы X и C такого отчетливого разделения между собой не имеют (Bus, Binzel, 2002) и лишь использование альбедо в качестве дополнительной характеристики позволяет их различать. Астероиды класса C, как правило, характеризуются только темным (низким) альбедо, тогда как альбедо астероидов класса X характеризуется широким диапазоном значений. Классы C и X также характеризуются похожим пространственным распределением в Главном поясе, их количество возрастает в сторону внешней области пояса (Chauvineau и др., 1991). Напротив, распределение астероидов S-типа характеризуется противоположной тенденцией, их количество во внешней области Главного пояса сокращается.

По своему валовому составу астероиды подразделяются на каменные (силикатные), металлические и, возможно, ледяные. Каменные астероиды состоят из хондритов, углистых хондритов,

энстатитовых хондритов, ахондритов, эвкритов, говардитов и т.д. Ледяные астероиды, которые могут иметь кометную природу, тоже могут различаться по своему химическому составу, например, состоять преимущественно из водяного льда, либо со значительной добавкой экзотических льдов (CO , CO_2 , CH_3OH , CH_4 , H_2CO и др.).

Исследование астероидов с борта КА началось с запуска зонда *Galileo* (NASA, США). КА впервые пролетел рядом с астероидом 951 Гаспра (*Gaspra*) в 1991 г. (Belton и др., 1992). Были получены первые изображения астероида, определенные фотометрические свойства поверхности, подтверждающие сходство с каменными астероидами S-типа, изучены структурные особенности астероида и возраст его образования, оценена мощность рыхлого слоя реголита в десятки метров. В 1993 г. КА *Galileo* с пролетной траектории исследовал S-астероид 243 Ида (*Ida*), впервые обнаружив у астероида спутник, который получил имя *Дактиль* (*Dactyl*) (Belton и др., 1994; 1996). Спектральные характеристики поверхности астероида и его спутника оказались схожи, но не идентичны. Толщина реголита на поверхности астероида Ида оценивается в 20–100 м с неоднородным распределением по поверхности, а возраст астероида в 2 млрд лет (Belton и др., 1996).

В 1997 г. КА *NEAR Shoemaker* (NASA, США) с пролетной траектории впервые получил детальные изображения астероида C-типа 253 *Матильда* (*Matilde*) (Veverka и др., 1997), состоящего из углистых хондритов с характерной высокой (около 40%) пористостью и низкой плотностью (Britt, Consolmagno, 2000). В 2000–2001 гг. КА *NEAR Shoemaker* также впервые исследовал приближающийся к Земле S-астероид 433 *Эрос* (*Eros*), на который была осуществлена изначально не запланированная первая мягкая посадка (Veverka и др., 1999; 2001). С помощью лазерного высотомера была создана трехмерная модель фигуры астероида (Zuber и др., 2000), уточнены его орбитальные и физические характеристики, а с помощью рентгеновского и гамма-спектрометров определен химический состав поверхности астероида (Trombka и др., 2000).

В 1999 г. КА *DeepSpace 1* (NASA, США) пролетел на расстоянии 25 км от астероида Q-типа 9969 *Брайль* (*Braille*), который обладает высокой плотностью и состоит в основном из оливина и пироксена (Soderblom и др., 1999). К сожалению, в момент сближения с астероидом неверно сработала система определения направления на астероид и изображения астероида были получены лишь на расстоянии около 14000 км. В 2000 г. КА *Cassini-Huygens* (NASA-ESA, США-Европейский союз) с пролетной траектории на расстоянии 1.6 млн км получил первые изображения астероида S-типа 2685 *Мазурский* (*Masursky*) и оценил его диаметр в 15–20 км (Hayes-Gehrke и др., 2023).

В 2002 г. зонд Stardust-NexT (NASA, США) сблизился на расстоянии около 3000 км с небольшим астероидом S-типа 5535 Аннафранк (Annefrank) в Главном поясе, получив более 70 фотоснимков поверхности этого небесного тела (Hillier и др., 2011). Снимки позволили уточнить форму и размер астероида ($6.6 \times 5.0 \times 3.4$ км), альбедо (0.18–0.24) и др. характеристики.

Стартовавший в 2004 г. КА Rosetta (ESA, Европейский союз) совершил пролет астероидов 2857 Штейнс (Steins) и 21 Лютеция (Lutetia). Астероид Штейнс стал первым астероидом E-типа, исследованным с борта КА. Скорость КА относительно астероида составляла 8.6 км/с. В результате пролета на расстоянии около 800 км были определены орбитальные и физические характеристики астероида Штейнс и его спектральные характеристики, получены изображения сильно кратерированной поверхности (Jorda и др., 2012). А при пролете астероида Лютеция впервые был исследован с борта КА астероид спектрального класса M, к которому принадлежат и металлические астероиды, но исследованные химический и минеральный составы поверхности астероида оказались преимущественно энстатит-хондритовыми (Coradini и др., 2011).

В 2011–2012 гг. американский КА Dawn (NASA, США) исследовал самый яркий наблюдаемый с Земли астероид 4 Веста (Vesta). Данные миссии позволили выделить такие детали рельефа, как кратеры, купола, борозды, равнины, уступы, гряды (Russell и др., 2012). По результатам исследований построена топографическая карта поверхности, минералогическая карта, карты распределения водорода, гидратированных минералов, ударных кратеров и др. (Roatsch и др., 2012; 2013).

В марте 2016 г. КА Dawn вышел на орбиту вокруг самого крупного астероида в Солнечной системе 1 Церера (Ceres) и обнаружил на карликовой планете действующий криовулканизм (Russell и др., 2016). Следует отметить, что еще в работах (Слюта, Воропаев, 1993; Slyuta, Voropaev, 1997) было показано, что Церера обладает характерной для планетного тела равновесной фигурой, но при этом характеризуется очень низкими значениями девиаторных напряжений, ответственных за гравитационную деформацию астероида, что указывает на валовый состав с очень низким пределом прочности и текучести, находящимся между значениями для водяного льда и углистых хондритов. Эти выводы согласуются с данными, полученными КА Dawn (Marchi и др., 2019). По результатам экспедиции Dawn была составлена полная геологическая карта Цереры (Williams и др., 2018).

В 2005 г. КА Hayabusa (JAXA, Япония) достиг астероида Итокава S-типа, который принадлежит к группе приближающихся к Земле астероидов

(Fujiwara и др., 2006; Nakamura и др., 2011). Это первый КА, который доставил на Землю образцы грунта астероида и шестой автоматический КА после Луны-16, Луны-20, Луны-24, Genesis и Stardust-NEXT, доставивший внеземное вещество на Землю. Также это был первый в истории мягкий контакт с поверхностью астероида. Впервые появилась возможность сравнить состав метеоритов и вещества, доставленного на Землю с астероида. Кроме научных исследований было проведено тестирование новейших технологий в области ионных двигателей, автономной и оптической навигации, космической связи и перемещения по объектам с низкой гравитацией.

В 2012 г. китайский зонд Chang'e2 успешно выполнил пролет и съемку астероида 4179 Тутаис (Toutatis), входящего в группу Аполлонов. КА прошел от цели на расстоянии 3.2 км с относительной скоростью 10.73 км/с (Zheng и др., 2016). Были сделаны снимки поверхности астероида с разрешением от 5 до 83 м.

КА Hayabusa 2 прибыл к приближающемуся к Земле астероиду S-типа 162173 Рюгу (Ryugu) в 2018 г. По результатам дистанционных исследований было определено относительно ровное и безопасное место забора грунта в экваториальной области (Watanabe и др., 2019). В феврале 2019 г. КА опустился на поверхность астероида, произвел забор грунта (Morota и др., 2020) и в декабре 2022 г. успешно доставил ценные образцы грунта на Землю (Tachibana и др., 2014; Yokoyama и др., 2023). В том же 2018 г. 31 декабря другой КА OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security—Regolith Explorer) (NASA, США) прибыл к еще одному приближающемуся к Земле астероиду V-типа 101955 Бенну (Bennu) с задачей отобрать около 60 г грунта и доставить на Землю (Lauretta и др., 2019). Дистанционные исследования астероида с борта КА показали, что поверхностный материал Бенну был изменен под воздействием космического выветривания, содержит большое количество органического материала и имеет признаки воздействия жидкой воды в прошлом (Simon и др., 2020). Также, как и астероид Рюгу, Бенну образовался из обломков, выброшенных в результате столкновения с более крупным родительским астероидом, и имеет рыхлую структуру (rubble pile). 20 октября 2020 г. КА OSIRIS-REx успешно отобрал образцы грунта астероида и 10 мая 2021 г. отправился к Земле. Капсула с грунтом должна приземлиться в США в пустыне штата Юта 24 сентября 2023 г. Это первая миссия США по возвращению образца астероида на Землю.

Таким образом, за 32 года 11 КА США, Японии, ESA и Китая исследовали 15 астероидов S, C, E, V и M-типа, и с трех из этих астероидов (S-, C- и V-типа) был осуществлен возврат грунта на

Землю. И каждая миссия была первой: первый исследованный астероид, первый исследованный астероид данного типа, первая посадка на астероид, первый возврат образцов грунта, первые образцы грунта с астероида данного типа и т.д.

К сожалению, среди отечественных космических проектов с советских времен полностью отсутствуют программы исследования малых тел Солнечной системы — комет и астероидов. В рамках данной работы была поставлена задача разработать проект долговременного, систематического и постепенно наращиваемого исследования малых тел Солнечной системы с учетом современного состояния отечественных фундаментальных космических исследований.

ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ И РАННЕЙ ЭВОЛЮЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АСТЕРОИДОВ

Астероиды, в большинстве своем, представляют допланетную стадию развития вещества Солнечной системы и углубление понимания этой фазы развития — это главная научная мотивация продолжения и расширения их исследований и наиболее приоритетная задача. Например, проблема происхождения и ранней эволюции металлических астероидов является одной из фундаментальных проблем космохимии и планетологии, которая тесно связана с современными представлениями об истории формирования Солнечной системы и последующей эволюции малых и планетных тел.

В настоящее время накопилось достаточно данных, которые противоречат устоявшейся с середины прошлого века парадигме, что железные метеориты являются продуктами фракционной кристаллизации единого расплавленного ядра дифференцированного родительского тела (Lovering, 1957), которое в результате столкновительной эволюции было разрушено и послужило источником всех железных метеоритов. Первое предположение о том, что различные химические системы в железных метеоритах могут быть результатом эволюции не одного дифференцированного планетарного тела, а множества малых тел астероидного размера, было высказано почти сразу же (Fish и др., 1960). Большое разнообразие в железных метеоритах микроструктурных деталей, а также различное содержание Ni, C, P и других элементов, включая редкие, также оказалось невозможно объяснить расплавленным железным ядром одного или даже нескольких родительских тел (Wasson, 1967; 1969; 1970a; 1970b; 1974; Wasson, Kimberlin, 1967; Wasson, Schaudy, 1971).

Железные метеориты подразделяются на 16 химических групп (Scott, Wasson, 1975), но предполагается, что многие химические типы же-

лезных метеоритов не представлены на Земле и их число может достигать более 50 (Scott, 1978). Тем не менее даже изученные химические группы железных метеоритов представляют собой дискретные, т.е. не связанные между собой химические и петрологические системы, а химический состав имеет тесную “генетическую” связь со структурными типами и подтипами и отражает различную химическую и петрологическую историю и условия их образования (Scott, Wasson, 1975). При этом каждая из химических групп также характеризуется разной тепловой историей и скоростью охлаждения (Goldstein, Short, 1967; Markowski и др., 2005).

Также было установлено, что скопления металла в группе железных метеоритов ПЕ образовались не в результате частичного или полного плавления, а в процессе сегрегации частиц металла в силикатной матрице (Wasserburg и др., 1968). Конденсация железных и силикатных частиц и фракционирование металл-силикат происходили на стадии протопланетного облака (Gordon, 1970), или даже на стадии протосолнечного облака (Wasson, 1970a). Предполагается, что во время консолидации агрегатов силикатных и металлических частиц и образования родительских тел метеоритов под воздействием высокой температуры проходила перекристаллизация металлических частиц в твердом, но горячем и пластичном состоянии, которые концентрировались в межзерновом пространстве менее пластичной и более твердой силикатной матрицы, с образованием и постепенным ростом кристаллов при медленном охлаждении. В общих чертах процесс сегрегации металлических частиц напоминает современную технологию спекания порошковых металлических агрегатов и 3D-печать металлических деталей, минуя стадию полного или даже частичного плавления.

Вероятно, родительские тела железных метеоритов могут быть остатками таких планетезималей, которые образовались в зоне планет земного типа, но в результате последующей столкновительной эволюции и пертурбации орбит частично были рассеяны в область Главного пояса, где они являются чужаками (Bottke и др., 2006). По данным изотопного анализа долго- и короткоживущих радионуклидов родительские тела железных метеоритов, т.е. металлические астероиды, образовались на 1–2 млн лет раньше, чем родительские тела обычных хондритов (Kleine и др., 2005; Baker и др., 2005; Bizzarro и др., 2005), что, по-видимому, указывает на их обособленное от силикатных тел образование во времени и, возможно, в пространстве.

Формирование металлического ядра в дифференцированном астероидном теле возможно только в результате гравитационной деформации

(Слюта, Воропаев, 2015). Гравитационная деформация сопровождается объемным сжатием и уплотнением вещества, закрытием пор и трещин, и развитием характерных структур пластической деформации и статических двойников. Наблюдаемая высокая пористость в железных метеоритах, достигающая 5% (Кринов, 1955), а также полное отсутствие структурных признаков статической деформации указывают на то, что родительские тела этих метеоритов никогда не подвергались гравитационной деформации (Слюта, 2013).

Очевидно, что смена парадигмы происхождения металлических астероидов может привести к пересмотру многих устоявшихся представлений, и прежде всего, условий и процессов конденсации и формирования первичных металлических и силикатных планетезималей, которые могли быть обособлены в пределах протопланетного облака и в пространстве, и во времени. В свою очередь, это может привести и к пересмотру стартовых условий формирования планетных тел земного типа.

Решение этой фундаментальной научной проблемы напрямую связано с детальным исследованием металлических астероидов космическими аппаратами, включая доставку на Землю и исследование химического, минерального и изотопного состава комплексных образцов металлических астероидов. Под комплексными образцами подразумевается керн, содержащий коренные породы астероида и вышележающую стратифицированную колонку реголита. Одной из особенностей безатмосферных малых тел является наличие на поверхности рыхлого слоя реголита, сформированного в результате метеоритной бомбардировки и столкновений на протяжении почти всей геологической истории этих тел, т.е. с момента образования самого астероида. Рыхлый слой реголита имеет собственную стратиграфическую и геохимическую историю, которая отражает столкновительную эволюцию не только данного астероида, но и всего семейства, к которому принадлежит этот астероид. Следует также учитывать, что микрометеоритная бомбардировка и космическое выветривание изменяют спектральные свойства частиц реголита на поверхности, что создает определенные проблемы при идентификации типов метеоритов к тому или иному оптическому классу астероидов. Основным методом опробования основных типов астероидов предполагает колонковое бурение на глубину в первые метры и возврат отобранной колонки реголита и пород астероида на Землю. Для опробования следует выбирать места, где мощность реголита не превышает нескольких десятков сантиметров или одного–двух метров. В таких местах возможен отбор стратифицированной колонки реголита на всю его мощность, включая керн подстилающих первичных пород астероида, что позволит получить информацию о его полной геологической и

столкновительной истории. Исследование химического и изотопного состава чужого вещества в реголите, а также распределение космогенных элементов и изотопов в различных слоях реголита позволят проследить историю предполагаемой миграции этих тел из одной зоны аккреции в другую.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ К ЗЕМЛЕ АСТЕРОИДОВ

В отличие от астероидов Главного пояса, приближающиеся к Земле астероиды (Near-Earth asteroids) составляют отдельную популяцию астероидов с орбитами, пересекающимися с орбитой Земли. В зависимости от параметров орбит выделяется группа астероида 163693 Атир (Atira) с большими полуосями $a < 1.0$ а. е. и перигелием $Q < 0.983$ а. е., группа астероида 2062 Атон (Aton) с $a < 1.0$ а. е. и $Q < 0.983$ а. е., группа астероида 1862 Аполлон (Apollo) с $a > 1.0$ а. е. и $q < 1.017$ а. е., и группа астероида 1221 Амур (Amor) с $a > 1.0$ а. е. и $1.017 < q < 1.3$ а. е. Среди этих групп выделяются также потенциально опасные астероиды (Potentially Hazardous Asteroids, PHAs) с минимальным расстоянием пересечения земной орбиты, равным или меньше 0.05 а. е., размером меньше 140 м и звездной величиной (H), равной или больше 22 по данным каталога JPL Center for Near Earth Objects (CNEOS JPL NEO Groups, 2023).

По данным каталога IAUMPC (IAUMPC, 2023) на настоящий момент известно почти 32000 приближающихся к Земле астероидов (рис. 1), из них группа Амура составляет около 32%, группа Аполлона около 62%, группа Атона около 6% и группа Атиры около 2% (Morbidelli и др., 2002). Самым крупным является астероид 1036 Ганимед (Ganymed) с диаметром 38.5 км. Астероиды Эрос и 3552 Дон Кихот (DonQuijote) имеют размеры около 20 км, а все остальные меньше 10 км.

Приближающиеся к Земле астероиды являются наиболее близкими и относительно легко достижимыми мишенями для КА. Исследование с КА этой популяции астероидов преследует решение двух основных научных проблем. Первая проблема связана с оценкой астероидной опасности для Земли и разработкой сценариев и технологий заблаговременного устранения этой опасности, например, изменением орбиты астероида. С этой целью 26 сентября 2022 г. был проведен первый успешный кинетический ударный эксперимент DART по изменению орбиты спутника Диморфос (Dimorphos) диаметром 151 м, вращающегося вокруг астероида 65803 Дидимос (Didymos) диаметром 780 м (Daly и др., 2023). Система астероида со спутником была выбрана для того, чтобы наземные телескопы могли количественно оценить отклонение астероида, вызванное кинетическим ударом КА. Космический аппарат ударил астеро-

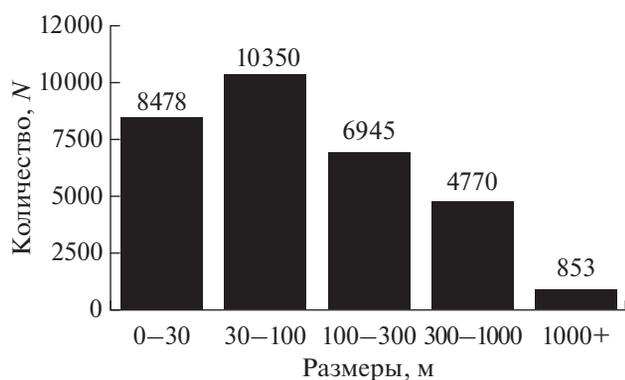


Рис. 1. Гистограмма распределения приближающихся к Земле астероидов по размерам по данным (CNEOS JPL Discovery Statistics, 2023).

ид со скоростью 6.14 км/с. После столкновения образовался выброс материала с массой около 1000 т, который сформировал протяженный на десятки тысяч км хвост из обломков и пыли. Большое количество выброшенного материала объясняется рыхлой внутренней структурой (rubble pile) астероида (рис. 2). Из-за отдачи этого выброса Диморфос получил дополнительный импульс почти в 4 раза больше, чем от удара КА (Cheng и др., 2023). Орбитальный период обращения спутника Диморфос после удара увеличился не на 7 мин, как планировалось, а на 33 мин (Thomas и др., 2023).

Для оценки планируемого изменения орбиты астероида в результате кинетического удара очень важно знать точные параметры орбиты объекта, его размеры, форму, массу, состав, строение и физические свойства, которые можно исследовать с пролетной траектории КА. По своему строению или внутренней структуре малые тела подразделяются на три основных типа – монолитные или когерентные (coherent), бинарные (contact binaries), состоящие из двух или нескольких обломков, и рыхлые (rubble pile) (Слюта, 2014). Эксперимент DART показал, что в зависимости от разного строения астероидов следует ожидать значительную разницу в количестве и массе выбросов и, соответственно, разную величину дополнительного реактивного импульса отдачи. Предполагается, что при кинетическом ударе по когерентному объекту, аналогичному по строению астероиду Эрос или Гаспра (рис. 3), масса и объем выброса будет значительно меньше, чем у объекта с рыхлой структурой. Соответственно, эффект возмущения кинетического удара КА при прочих равных параметрах также должен быть значительно меньше.

Вторая научная задача исследования приближающихся к Земле астероидов также, как и при изучении любых малых тел Солнечной системы, включая астероиды Главного пояса, связана с изучением состава примитивного и первичного вещества на допланетной стадии развития Солнечной системы, из которого формировались планеты. В последнее время изучение органиче-

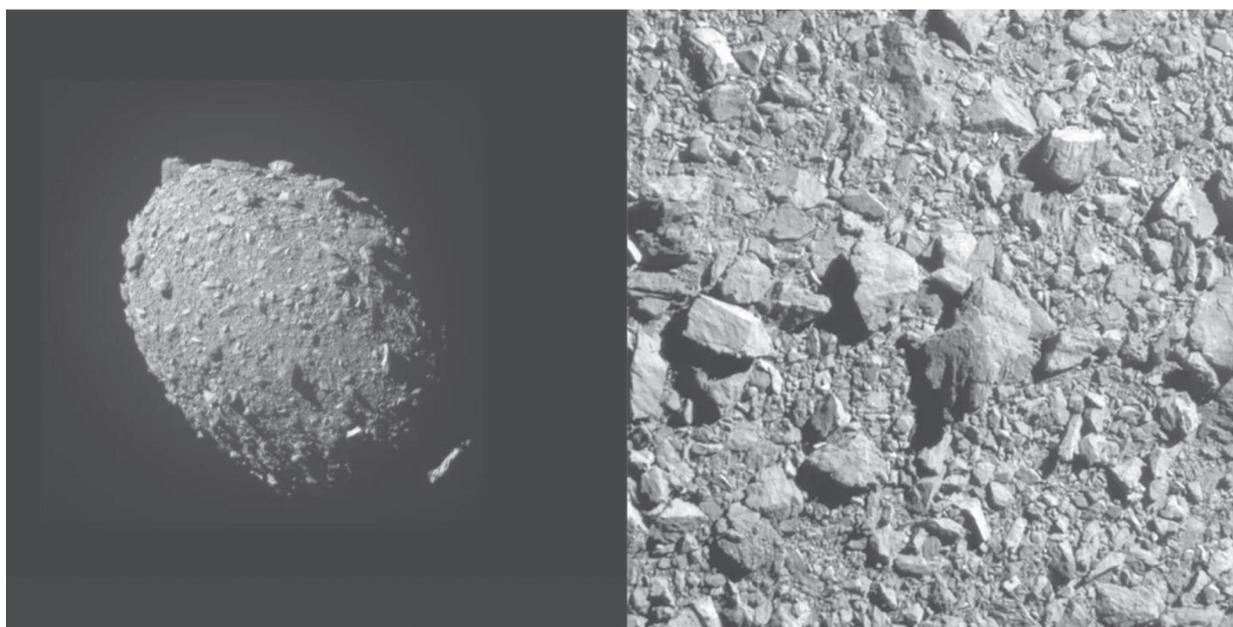


Рис. 2. Фото спутника Диморфос (Dimorphos) астероида Дидимос (Didymos) с характерной рыхлой структурой (слева) и изображение поверхности спутника, сделанное камерой КА DART за 1.8 с до столкновения (справа). NASA/Johns-HopkinsAPL.

ских соединений в неизменном первичном веществе малых тел также тесно связано с исследованием происхождения жизни. В декабре 2022 г. японский КА Hayabusa 2 доставил на Землю 5.4 г вещества с приближающегося к Земле С-астероида Рюгу диаметром около 1 км (Tachibana и др., 2014; Yokoyma и др., 2022). Состав образцов оказался аналогичен углистому хондриту типа CI, прототипом которого является метеорит Ивуна (Ivuna) (Yokoyma и др., 2022), упавший в 1938 г. в Танзании. Это очень редкий тип метеоритного вещества, которое имеет состав фотосферы Солнца и считается самым примитивным и малоизмененным веществом Солнечной системы. Метеоритное вещество подверглось нагреву и разрушению в верхних слоях атмосферы Земли, а после падения — геохимическому и биохимическому выветриванию и разрушению первичного вещества и минералов на поверхности Земли в течение многих лет, пока метеориты не были найдены. В отличие от измененного вещества метеоритов, доставленные образцы по химическому разнообразию первозданного вещества, конечно, отличаются значительно.

Материал Рюгу содержит около 3% углерода по весу, и этот углерод распределен в десятках тысяч различных органических соединений, химическое разнообразие которых намного больше, чем в биологических образцах. Многие из этих соединений характеризуются аномальными отношениями Н/Д и изотопов азота, которые образовались еще в результате фракционирования в холодных межзвездных облаках до формирования Солнечной системы (Yabuta и др., 2023). Большинство органических соединений сформировалось в условиях жидкой воды в родительском теле, в котором примерно через 3 млн лет после его формирования, вероятно, в результате распада короткоживущих радионуклидов внутренняя температура повысилась примерно до $(37 \pm 10)^\circ\text{C}$ (Yokoyma и др., 2022), расплавила частицы водяного льда и охладилась только через несколько млн лет. В углистом материале в обилии присутствуют ароматические углеводороды, гетероциклические ароматические соединения, алифатические амины и др. (Nagaoka и др., 2023). Среди аминокислот присутствуют также встречающиеся в земной биологии глицин, аланин и валин, но все в виде рацемических смесей (в равном количестве с правым и левым вращением — хиральностью), что указывает на их абиогенное происхождение (Nagaoka и др., 2023). Обнаружен также урацил — один из четырех азотистых оснований, составляющих РНК, а также витамин В3 (никотиновая кислота), играющий важную роль в обмене веществ (Oba и др., 2023). Много карбоновых кислот (таких, как уксусная кислота), большое количество менее растворимых макромолекулярных органических веществ, включая разнообраз-

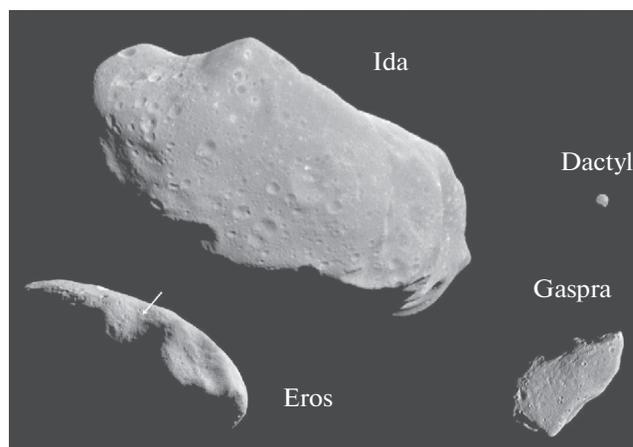


Рис. 3. Фото с КА Galileo и NEAR (NASA) S-астероидов: Ида (диаметр $59.8 \times 25.4 \times 18.6$ км) со спутником Дактиль (диаметр $1.6 \times 1.4 \times 1.2$ км), Эрос (диаметр $35.1 \times 11.3 \times 7.0$ км) и Гаспра (диаметр $18.2 \times 10.5 \times 8.9$ км). Астероиды показаны в едином масштабе. Стрелкой на астероиде Эрос показано место посадки КА NEAR.

ную смесь полициклических ароматических соединений, и т.д., и т.д. Таким образом, огромное разнообразие органических соединений, являющихся необходимым фундаментом для пребиотиков и зарождения жизни, формировалось на астероидах С-типа и разносилось по всей Солнечной системе, включая и Землю. Пожалуй, впервые получены надежные данные, подтверждающие гипотезу панспермии. И основным инструментом в этих исследованиях происхождения жизни является доставка космическими аппаратами образцов вещества с астероидов и комет и изучение их в лабораторных условиях.

ВЫБОР МИШЕНЕЙ ИЗ ГЛАВНОГО ПОЯСА АСТЕРОИДОВ

Приоритетные объекты для исследования с борта КА на основе рассмотренных в разделах “Проблема происхождения...” и “Научные проблемы...” научных проблем исследования малых тел выбраны из трех основных классов астероидов: наиболее приоритетными для исследования в данном проекте являются металлические астероиды (табл. 1), следующие по приоритетности С-астероиды (преимущественно углистые хондриты) (табл. 2) и менее приоритетные S-астероиды (обыкновенные хондриты) (табл. 3). Списки объектов в таблицах расставлены по приоритетности — наиболее интересные объекты для исследования в табл. 1, 2 и 3 расставлены по порядковому номеру. Жирным шрифтом выделена группа наиболее приоритетных для исследования объектов в каждом списке (табл. 1, 2, 3). В группе металлических астероидов (табл. 1) это астероиды, ме-

Таблица 1. Список приоритетности металлических астероидов, состав которых был подтвержден радарными данными (№ 1–10) (Слюта, 2013) и предполагаемые по спектральным и альбедным характеристикам металлические и металл-силикатные астероиды (№ 11–24)

№ п/п	Астероид	Диаметр, км	Средний диаметр, км	b/a	c/a	Плотность, г/см ³
1	16 Psyche	279 × 232 × 189	226 ± 23	0.77	0.60	4.5 ± 1.4
2	55 Pandora	–	66.7	0.83	0.69	–
3	69 Hesperia	135 × 106 × 98	110	0.79	0.70	–
4	129 Antigone	152 × 109 × 95	113 ± 17	0.72	0.63	–
5	216 Kleopatra	217 × 94 × 81	135 ± 5.8	0.43	0.37	6.92(3.6 ± 0.4)
6	347 Pariana	–	51 ± 5	0.74	0.57	–
7	758 Mancunia	–	85 ± 7	–	–	–
8	779 Nina	–	77 ± 2	–	–	–
9	785 Zwetana	57 × 46 × 45	49	0.80	0.79	–
10	872 Holda	–	30	–	–	–
11	22 Kalliope	–	162 ± 3	–	–	3.35
12	77 Frigga	–	69	–	–	–
13	97 Klotho	–	83 ± 5	–	–	–
14	92 Undina	–	126	–	–	–
15	110 Lydia	–	89 ± 9	–	–	–
16	184 Dejoepa	–	66	–	–	–
17	337 Devosa	–	59	–	–	–
18	417 Suevia	–	40	–	–	–
19	741 Botolphia	–	29	–	–	–
20	1122 Nieth	–	12	–	–	–
21	1124 Stroobantia	–	25	–	–	–
22	1146 Biarmia	–	31	–	–	–
23	1355 Magoeba	–	13	–	–	–
24	3447 Burhalter	–	16	–	–	–

таллический состав которых был подтвержден методом радиолокационного зондирования (Слюта, 2013). В группах C- и S-астероидов жирным шрифтом выделены преимущественно объекты (табл. 2, 3), которые характеризуются наибольшим количеством известных параметров по данным дистанционных исследований (орбитальные характеристики, размеры, форма, состав, плотность (масса)) (Слюта, 2014). По мере выбывания приоритетного объекта из-за недоступности по баллистическим параметрам на дату старта, в качестве мишени выбирается следующий объект по списку приоритетности с доступными орбитальными параметрами на заданный момент времени.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТУ

В основу разрабатываемого проекта закладывалось долговременное, систематическое и постепенно наращиваемое исследование малых тел Солнечной системы отечественными КА. Конеч-

но, учитывалось и современное непростое состояние фундаментальных отечественных космических исследований, которое пока не позволяет начинать разработку миссий сразу с флагманских проектов, например, по доставке грунта с малых тел. Постоянное изменение даты стартов КА в текущей Федеральной космической программе (ФКП) также пока не позволяет разработку проектов по исследованию короткопериодических комет (с периодом обращения менее 200 лет) по понятным баллистическим причинам, когда смещение даты старта сразу обнуляет весь проект и затраты. В отличие от комет, список приоритетности взаимозаменяемых мишеней при исследовании астероидов такой вариант полностью исключает. Проект разбит на три этапа и задуман таким образом, чтобы с использованием меньшего числа аппаратов исследовать наибольшее число интересных с научной точки зрения астероидов.

1. Облет и исследование нескольких околоземных астероидов с помощью малого КА, выводив-

Таблица 2. Список приоритетности астероидов С-типа (Слюта, 2014)

№ п/п	Астероид	Средний радиус, км	b/a	c/a	Плотность, г/см ³
1	10 Hygiea	214.5	0.78	0.76	2.19 ± 0.42
2	511 Davida	168.5	0.90	0.81	2.43 ± 0.79
3	52 Europa	156	0.91	0.87	1.52 ± 0.39
4	31 Euphrosyne	140	0.91	0.57	1.18 ± 0.61
5	104 Klymene	133	0.63	0.63	
6	107 Camilla	118.5	0.75	0.74	2.28 ± 0.29
7	324 Bamberga	115	0.93	0.93	1.52 ± 0.20
8	451 Patientia	115	0.98	0.95	1.60 ± 0.80
9	13 Egeria	114	0.89	0.89	1.70 ± 0.86
10	19 Fortuna	110	0.86	0.82	1.85 ± 0.35
11	423 Diotima	108.5	0.93	0.92	1.39 ± 0.50
12	45 Eugenia	107	0.91	0.74	1.34 ± 0.29
13	88 Thisbe	100	0.96	0.81	3.44 ± 0.84
14	36 Atalante	52	0.78	0.78	
15	38 Leda	58	0.86	0.86	
16	41 Daphne	91	0.83	0.68	2.03 ± 0.32
17	50 Virginia	50	0.87	0.87	
18	53 Kalypso	57.5	0.83	0.83	
19	54 Alexandra	85.5	0.87	0.79	3.50 ± 2.11
20	66 Maja	35	0.60	0.50	
21	85 Io	78.5	0.98	0.94	1.31 ± 0.77
22	90 Antiope A	43.9	0.94	0.89	1.28 ± 0.04
23	90 Antiope B	41.9	0.93	0.89	1.28 ± 0.04
24	93 Minerva	73	0.99	0.96	1.83 ± 1.10
25	94 Aurora	82	0.90	0.90	
26	102 Miriam	39.5	0.75	0.75	
27	109 Felicitas	45	0.95	0.95	
28	111 Ate	68	0.91	0.91	1.15 ± 0.32
29	121 Hermione	93.5	0.63	0.63	1.4 + 0.5/–0.2
30	127 Johanna	59	0.85	0.85	3.75 ± 1.68
31	128 Nemesis	94	0.91	0.91	1.82 ± 0.79
32	130 Elektra	94.5	0.85	0.77	1.84 ± 0.22
33	137 Meliboea	72	0.84	0.76	
34	145 Adeona	76	0.92	0.92	1.18 ± 0.34
35	165 Loreley	80	0.98	0.89	
36	173 Ino	79.5	0.96	0.87	2.23 ± 1.47
37	175 Andromache	53.5	0.83	0.83	
38	194 Prokne	76	0.88	0.88	1.03 ± 0.16
39	211 Isolda	72	0.92	0.92	2.54 ± 1.41
40	266 Aline	55	0.91	0.91	
41	313 Chaldaea	48	0.80	0.80	
42	360 Carlova	58	0.66	0.44	
43	372 Palma	97.5	0.96	0.88	1.40 ± 0.18

Таблица 2. Окончание

№ п/п	Астероид	Средний радиус, км	b/a	c/a	Плотность, г/см ³
44	405 Thia	63	0.87	0.87	1.44 ± 0.30
45	444 Gypsis	82	0.87	0.72	
46	488 Kreusa	75	0.83	0.83	1.10 ± 0.54
47	490 Veritas	65.5	0.78	0.78	
48	505 Cava	53	0.82	0.68	
49	554 Peraga	51	0.82	0.82	1.40 ± 0.15
50	654 Zelinda	64	0.77	0.77	1.23 ± 0.19
51	690 Wratislavia	70	0.89	0.62	
52	694 Ekard	46	0.89	0.78	
53	776 Berbericia	76	0.89	0.88	1.18 ± 1.46
54	804 Hispania	61	0.80	0.80	2.93 ± 1.06
55	914 Palisana	39	0.85	0.85	
56	1963 Bezovec	23	0.57	0.57	

мого в околоземное космическое пространство, как попутная полезная нагрузка. Исследование изучаемых околоземных астероидов осуществляется с пролетных траекторий (без выхода КА на орбиту сопровождения астероида).

2. Задача облета и исследования трех крупных металлических астероидов из состава Главного астероидного пояса. Изучение астероидов осуществляется с пролетных орбит без выравнивания гелиоцентрических скоростей астероида и КА. В рамках данной миссии предполагается, что КА выводится в космическое пространство как основная (целевая) полезная нагрузка.

3. Задача доставки образцов вещества с поверхности одного или нескольких астероидов Главного пояса на Землю. В данном случае рассматривается задача замкнутого перелета Земля–астероид–Земля. КА выводится в космическое пространство как основная полезная нагрузка.

МАЛЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ (МКА)

Учитывая, что транспортные операции в дальнем космосе являются очень энергозатратными с точки зрения необходимых запасов топлива на борту КА, в проекте впервые рассматривается применение для дальних перелетов электроракетных двигателей (ЭРД) на базе стационарных плазменных двигателей СПД-100ВУ производства ОКБ “Факел” Госкорпорации “Роскосмос”. ЭРД имеют высокий удельный импульс тяги и позволяют существенно сократить величину необходимых запасов топлива (рабочего тела) на борту КА для дальних перелетов. Такие двигатели впервые были применены еще полвека назад в

СССР и до сих пор широко используются в отечественных КА в составе корректирующих двигательных установок, но в качестве маршевых двигателей широкого применения пока не нашли.

Для облета нескольких околоземных астероидов на первом этапе проекта разработан проектный облик МКА с маршевой ЭРДУ (МКА-ЭРДУ), который состоит из космической платформы с модульно-блочной структурой и комплекса научной аппаратуры (КНА). Основным конструктивно-силовым элементом платформы является негерметичный приборный контейнер – прямоугольный параллелепипед, бескаркасно собранный из отдельных модулей, представляющих собой трехслойные сотопанели, состоящие из углепластиковых обшивок повышенной теплопроводности и алюминиевого сотозаполнителя, с предусмотренными посадочными местами для установки целевой или служебной аппаратуры. К панелям по оси $+X$ и $-X$ крепится силовая композитная ферма, предназначенная для размещения баков хранения ксенона и топливного бака для хранения гидразина (рис. 4).

Внутренние стороны панелей $\pm Z$, $\pm Y$ использованы для размещения приборов служебной аппаратуры. Нижняя грань панели $-X$ служит для установки переходного адаптера с системой отделения, на эту же грань производится установка модуля ориентации двигателя СПД-100ВУ, верхняя грань этой панели обеспечивает установку блока хранения ксенона и блока управления и подачи ксенона. Верхняя и нижняя грани панели $+X$ предполагают размещение комплекса научной аппаратуры (рис. 5). На панели $+Z$ установлены остронаправленная антенна (ОНА) и приводы

Таблица 3. Список приоритетности астероидов S-типа (Слюта, 2014)

№ п/п	Астероид	Средний радиус, км	<i>b/a</i>	<i>c/a</i>	Плотность, г/см ³
1	675 Ludmilla	175	0.96	0.78	
2	15 Eunomia	130	0.71	0.59	3.54 ± 0.20
3	3 Juno	122	0.83	0.61	2.13 ± 0.62
4	29 Amphitrite	109.5	0.93	0.93	2.38 ± 0.51
5	7 Iris	104	0.90	0.76	2.66 + 2.55/–0.87
6	532 Herculina	102	0.91	0.76	2.12 ± 0.53
7	6 Hebe	96	0.95	0.89	3.81 ± 0.50
8	9 Metis	85	0.79	0.59	3.60 ± 0.87
9	39 Laetitia	79.5	0.78	0.67	2.47 ± 0.63
10	20 Massalia	75.5	0.86	0.64	3.71 ± 1.05
11	349 Dembowska	71.5	0.82	0.62	2.23 ± 1.01
12	8 Flora	70.5	0.94	0.84	
13	12 Victoria	58.5	0.82	0.71	2.45 ± 0.67
14	17 Thetis	46.5	0.81	0.79	4.48 ± 1.48
15	18 Melpomene	74	0.85	0.77	2.15 ± 0.88
16	23 Thalia	53	0.90	0.69	3.07 ± 0.31
17	25 Phocaea	38	0.85	0.53	2.21 ± 0.44
18	28 Bellona	55	0.79	0.66	3.95 ± 1.28
19	32 Pomona	41	0.78	0.71	
20	37 Fides	55	0.91	0.87	
21	42 Isis	53.5	0.93	0.86	2.78 ± 0.93
22	43 Ariadne	32.5	0.66	0.50	
23	60 Echo	30	0.85	0.85	2.78 ± 0.33
24	63 Ausonia	54	0.60	0.58	3.46 ± 0.86
25	79 Eurynome	34	0.93	0.90	
26	101 Helena	33	0.89	0.89	
27	115 Thyra	41.5	0.93	0.81	
28	158 Koronis	19.5	0.75	0.51	
29	167 Urda	21	0.84	0.78	
30	182 Elsa	22	0.52	0.52	
31	192 Nausikaa	47	0.77	0.70	
32	196 Philomela	73	0.98	0.98	2.48 ± 1.02
33	198 Ampella	26.5	0.82	0.82	
34	208 Lacrimosa	22	0.85	0.65	
35	218 Bianca	31	0.60	0.39	
36	230 Athamantis	56.5	0.90	0.88	2.69 ± 0.43
37	264 Libussa	25	0.82	0.82	
38	270 Anahita	24	0.81	0.61	
39	277 Elvira	14.5	0.69	0.63	
40	306 Unitas	24.5	0.81	0.71	
41	311 Claudia	13.5	0.55	0.48	
42	321 Florentina	15.5	0.72	0.55	
43	354 Eleonora	83	0.83	0.76	3.73 ± 1.39
44	376 Geometria	18.5	0.94	0.91	
45	534 Nassovia	18.5	0.81	0.58	

Таблица 3. Окончание

№ п/п	Астероид	Средний радиус, км	b/a	c/a	Плотность, г/см ³
46	584 Semiramis	28	0.93	0.65	2.74 ± 0.56
47	622 Esther	15	0.60	0.60	
48	674 Rachele	45	0.91	0.91	
49	720 Bohlinia	18.5	0.76	0.55	
50	1036 Ganymed	20.5	0.99	0.83	

солнечных батарей (СБ), которые обеспечивают их вращение вокруг оси, коллинеарной оси Y базовой строительной системы координат аппарата (рис. 6). Каждая панель солнечных батарей состоит из четырех створок и представляет собой трехслойные сотопанели с установленными на них фотопреобразователями. Масса полезной нагрузки (КНА) составляет 39 кг, масса рабочего тела (ксенон) – 280 кг, масса топлива (гидразин) и газа наддува – 20 кг, общая масса заправленного МКА – 709.18 кг (табл. 4).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ СОСТАВ КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ (КНА) ДЛЯ ПРОЛЕТНОГО МКА

Предложение по предварительному составу КНА включает следующие научные приборы:

1. Оптическая мультиспектральная ТВ-камера.
2. Спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов.
3. Пылеударный масс-спектрометр.

4. Радиолокационный комплекс.

5. Трехосевой феррозондовый магнитометр.

Основной задачей оптической мультиспектральной ТВ-камеры является панорамная ТВ-съемка поверхности астероида и съемка с высоким разрешением в различных диапазонах видимого спектра. В качестве наиболее совершенного прототипа с известными габаритно-весовыми характеристиками могут рассматриваться две дублирующие оптические камеры (Framing Camera), успешно отработавшие при исследовании астероидов Веста и Церера с борта КА Dawn (Sierks и др., 2011). Камеры представляют собой отдельно размещенные две черно-белые ПЗС-матрицы (1024 × 1024 пикселя) с двумя объективами – короткофокусным ($D = 19$ мм) для панорамной съемки и длиннофокусным ($F = 150$ мм) для съемки с высоким разрешением. Каждая ПЗС-камера имела набор из семи узкополосных цветных фильтров + пустое поле. Поле зрения у каждой камеры $5.5^\circ \times 5.5^\circ$, выдержки от 0.001 с до 3.5 ч. Общий вес камер составляет 11 кг (5.5 кг каждая), размеры – 422 × 196 × 215 мм. Камеры использовались для съемки поверхности астероидов, а также для ориентирования вблизи них.

Научной задачей спектрометра в видимом и инфракрасном диапазонах является изучение и картирование минерального состава поверхности астероида в виде распределения главных породообразующих минералов, а также наличие связанной, гидратной или в свободном состоянии воды и гидроксильной группы OH^- на поверхности частиц реголита астероида. В качестве прототипа может быть рассмотрен также успешно отработавший спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов (VIR – Visible and Infrared Mapping Spectrometer) на борту КА Dawn (De Sanctis и др., 2011). Инструмент является модификацией спектрометров, применявшихся на космических зондах Rosetta (ESA, NASA) и VenusExpress (ESA). Его вес составляет 2.4 кг, а размеры 200 × 221 мм. Инструмент регистрирует интенсивность освещения каждого пикселя матрицы для 400 различных длин волн в видимом и инфракрасном диапазонах. Состоит из телескопа Шафера и спектрометра Оффнера. Последний имеет два сенсора: видимого излучения и инфракрасный. Первый

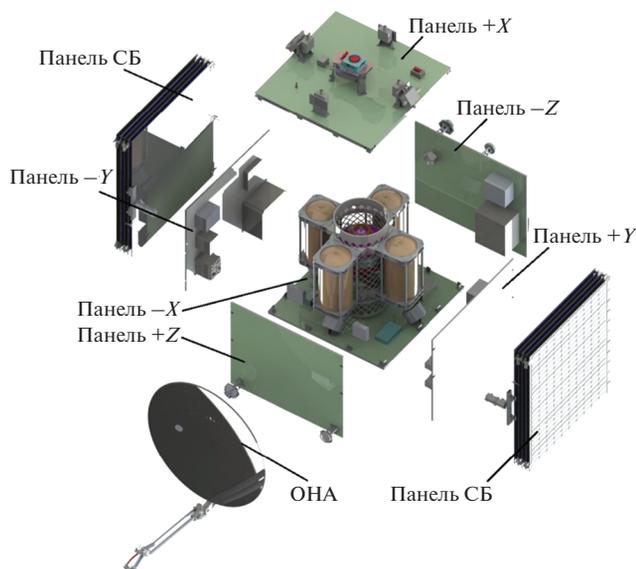


Рис. 4. Схема расположения панелей МКА-ЭРДУ по осям $\pm X$, $\pm Y$, $\pm Z$. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

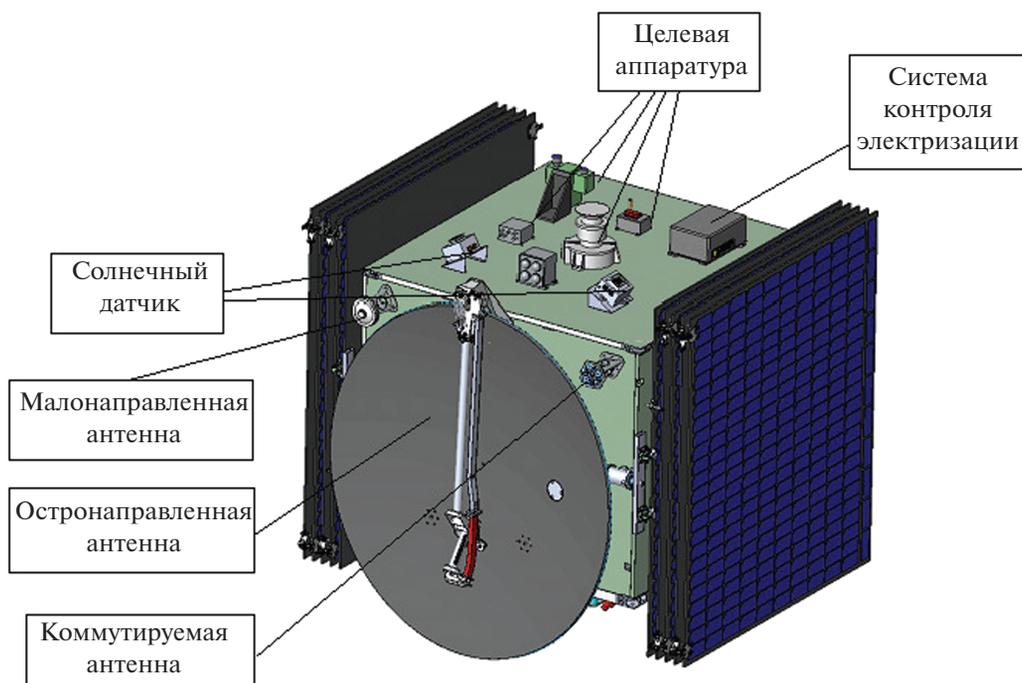


Рис. 5. Транспортное положение МКА-ЭРДУ (общий вид). Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

чувствителен к длинам волн 0.25–1 мкм, второй – 1–5 мкм (De Sanctis и др., 2011).

Основной задачей пылеударного масс-спектрометра (ПМС) является измерение скорости, массы, химического и минерального состава и траектории (т.е. орбитальных характеристик) микрометеороидов (космической пыли), которые окружают и сопровождают астероиды и когда-то были частью этого тела, но в результате метеоритной бомбардировки были выбиты с его поверхности, что также успешно продемонстрировал эксперимент DART (Graykowski и др., 2023). Данные по химическому и минеральному составу пыли в дополнение к спектральной съемке поверхности тела с помощью ТВ- и ИК-спектрометров позволяют получить более полную информацию о химическом и минеральном составе самого астероида во время его пролета без посадки на его поверхность. Еще одной важной задачей, которая также может быть решена с помощью этого прибора, является исследование пылевой структуры Солнечной системы (орбитальные характеристики пылевых поясов, их химический и минеральный состав) во время перелета КА в пояс астероидов. Проект пылеударного масс-спектрометра разрабатывается в ГЕОХИ РАН на основе детектора космической пыли ионизационного типа МЕТЕОР-Л для КА Луна-26, предназначенного для изучения распределения метеорных тел по массе, скорости и эволюции пылевой компоненты вокруг Луны (Слюта и др., 2021). Масса прибора ПМС не превышает 5 кг.

Научной задачей радиолокационного комплекса являются исследование внутренней и подповерхностной структуры астероида и оценка электромагнитных свойств грунта, локализация мест с высокой проводимостью, изучение крупномасштабных нарушений поверхности и регистрация электромагнитной радиации в астероидном пространстве. В качестве прототипа рассматривается радиолокационный комплекс РЛК-Л, который разрабатывается ИРЭ РАН для орбитального лунного КА Луна-26. Прибор состоит из двух подповерхностных зондирующих радаров – Радар-20 и Радар-200 (Юшкова и др., 2018). Радар-20, зондируя астероид в диапазоне от 17.5 до 22.5 МГц, позволит определить структуру астероида до глубин в несколько сотен метров и первых километров с вертикальным разрешением не хуже 25 м. Отраженный сигнал на этих частотах не зависит от температуры на поверхности. Радаром-200, ра-



Рис. 6. Рабочее положение МКА-ЭРДУ (общий вид). Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

Таблица 4. Сводка масс элементов МКА-ЭРДУ

№ п/п	Наименование	Масса, кг
1	Комплекс научной аппаратуры	39.00
2	Бортовой комплекс управления	40.20
3	Бортовой радиокомплекс и антенно-фидерная система	17.58
4	Система электроснабжения	102.00
5	Электроракетная двигательная установка с рабочим телом	363.60
6	Двигательная установка системы ориентации и стабилизации	62.00
7	СОТР (датчики, нагреватели, ЭВТИ, угловые тепловые трубы)	7.00
8	Бортовая кабельная сеть	11.00
9	Конструкция	55.00
10	Кронштейны, мелкие детали, стандарты	5.00
11	Резерв	6.80
ИТОГО	Масса заправленного КА	709.18
	Масса не заправленного КА	409.18

ботающим в диапазоне 175–225 МГц в моностабильном режиме, предполагается исследование свойств поверхности и вертикального распределения физических характеристик в верхних слоях до десяти метров глубиной с вертикальным разрешением около 1 м (Юшкова и др., 2018). Параметры отраженного радиолокационного сигнала зависят от расстояния от КА до поверхности астероида, типа сигнала, его длительности и частотного диапазона, от электромагнитных свойств облучаемого грунта на поверхности и в неоднородном отражающем слое.

Трехосевой феррозондовый магнитометр предназначен для измерения магнитного поля астероида и межпланетного магнитного поля на этапе перелета КА. Датчик прибора устанавливается на выносной штанге, а электроника – в другой части аппарата. Например, магнитометр на борту КА NEAR включал датчик, установленный на конструкции облучателя антенны с высоким коэффициентом усиления, и позволял использовать восемь выбираемых уровней чувствительности в диапазоне от 4 до 65536 нТл (Lohg и др., 1997).

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИССИИ ПО ОБЛЕТУ ПРИБЛИЖАЮЩИХСЯ К ЗЕМЛЕ АСТЕРОИДОВ

В отличие от выбора мишеней Главного пояса астероидов согласно спискам приоритетности (табл. 1–3), выбор мишеней среди приближающихся к Земле астероидов осуществляется на дату запланированного старта в соответствии с основным баллистическим принципом – пролет и исследование как можно большего количества приближающихся к Земле астероидов в течение одной миссии.

Рассматриваемая схема полета предполагает, что МКА с помощью ракеты-носителя (РН) и химического разгонного блока (ХРБ) вместе с основной полезной нагрузкой выводится на некоторую околоземную орбиту искусственного спутника Земли (ОИСЗ). На данной орбите происходит разделение ХРБ, основного (целевого) КА и МКА, предназначенного для исследования астероидов. В некоторой точке стартовой орбиты происходит включение ЭРДУ МКА. Дальнейшее его движение осуществляется под действием силы тяги ЭРДУ. На геоцентрическом участке движения ЭРДУ не выключается (траектория не содержит пассивных участков), вектор тяги ЭРДУ в каждый момент времени направлен по вектору геоцентрической скорости МКА. При этом траектория движения МКА напоминает собой раскручивающуюся спираль. Окончание геоцентрического участка “раскрутки” осуществляется в момент достижения параболической скорости (относительно Земли) (табл. 5).

Анализ гелиоцентрического участка движения можно разделить на два этапа:

1. Выбор околоземных астероидов-целей и последовательности их пролета. Цепочка астероидов выбиралась из условия облета наибольшего числа астероидов за 6 лет.

2. Последовательный анализ серии участков движения МКА: Земля–астероид, астероид–астероид под действием тяги ЭРДУ.

Выбор последовательности облета астероидов осуществлялся следующим образом. Случайным образом генерировался набор шести кеплеровских элементов некоторой гелиоцентрической орбиты (так называемой орбиты фазирования):

- большая полуось (в интервале от 0.85 до 1.15 а. е.);
- эксцентриситет (в интервале от 0 до 0.15);

Таблица 5. Характеристики геоцентрического участка движения МКА

Параметр	Значение
Продолжительность маневра, сут.	271.64674
Характеристическая скорость маневра, км/с	3.54552
Масса МКА в момент набора параболической скорости, кг	526.51279
Планетоцентрическое удаление конечной точки геоцентрического участка, км	1350916.724
Число витков траектории “раскрутки”	172.16551
Остаток рабочего тела на борту МКА в момент набора параболической скорости, кг	133.48721

- наклонение (в интервале от 0° до 3°);
- долгота восходящего узла (в интервале от 0° до 360°);
- аргумент перицентра (в интервале от 0° до 360°);
- время прохождения перицентра (от 59000 до 60000 MJD).

Для каждого набора элементов в интервале времен по MJD от 59945.5 до 63598 определялись моменты времени наименьшего сближения КА, находящегося на орбите фазирования, и каждого из околоземных астероидов из каталога JPL Center for NEO Studies (CNEOS) (CNEOS, 2023), элементы орбит которых определены с достаточной точностью.

В момент наименьшего сближения определялась величина скорости астероида относительно КА. Если наименьшее сближение КА и астероида не превышало 1 млн км и относительная скорость астероида не превышала 8 км/с, то такой пролет предварительно считался близким к КА. Считалось, что данный астероид может быть достигнут КА, двигающимся в окрестности орбиты фазирования под действием силы тяги ЭРДУ. Количество пролетов для каждого варианта орбит фазирования сохранялось. В результате выбиралась орбита фазирования, характеризующаяся наибольшим числом пролетов астероидов.

Далее, в рамках метода грависфер нулевой протяженности рассматривалась совокупность гелиоцентрических участков: Земля – точка выхода на орбиту фазирования, точка выхода на орбиту фазирования – первый астероид, первый астероид – второй астероид и т.д.

На каждом гелиоцентрическом участке предполагалось, что КА может двигаться под действием силы тяги ЭРДУ. Выбираемые законы управления вектором тяги на каждом из участков позволяют обеспечивать точный пролет астероидов и производить их исследования с малых пролетных расстояний.

Выявление законов управления вектором тяги ЭРДУ осуществлялось с использованием принципа максимума Понтрягина (Понтрягин и др., 1976). Управление состоит в нахождении ориен-

тации вектора тяги КА в каждый момент времени, а также в выборе моментов включения и выключения двигателя. Величина тяги ЭРДУ, а также удельный импульс постоянны.

Краевые задачи решались с использованием алгоритма HYBRD (More и др., 1984) при использовании случайного начального приближения по выбираемым параметрам задачи. Дата выхода из грависферы Земли, а также момент выхода на гелиоцентрическую орбиту фазирования оптимизировались, даты пролета астероидов были зафиксированы – они были получены в рамках предыдущего этапа анализа.

Анализ гелиоцентрического движения КА был выполнен для эпохи выхода КА из грависферы Земли в 2026 г. Полет в эпоху 2026 г. позволяет обеспечить пролет пяти околоземных астероидов (табл. 6).

Суммарная длительность полета (вместе с раскруткой у Земли) составила 2180.6 сут (5.97 года). Суммарные затраты рабочего тела ЭРДУ – 247.547 кг. Суммарное моторное время ЭРДУ – 12090.277 ч.

КА ДЛЯ ОБЛЕТА АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА

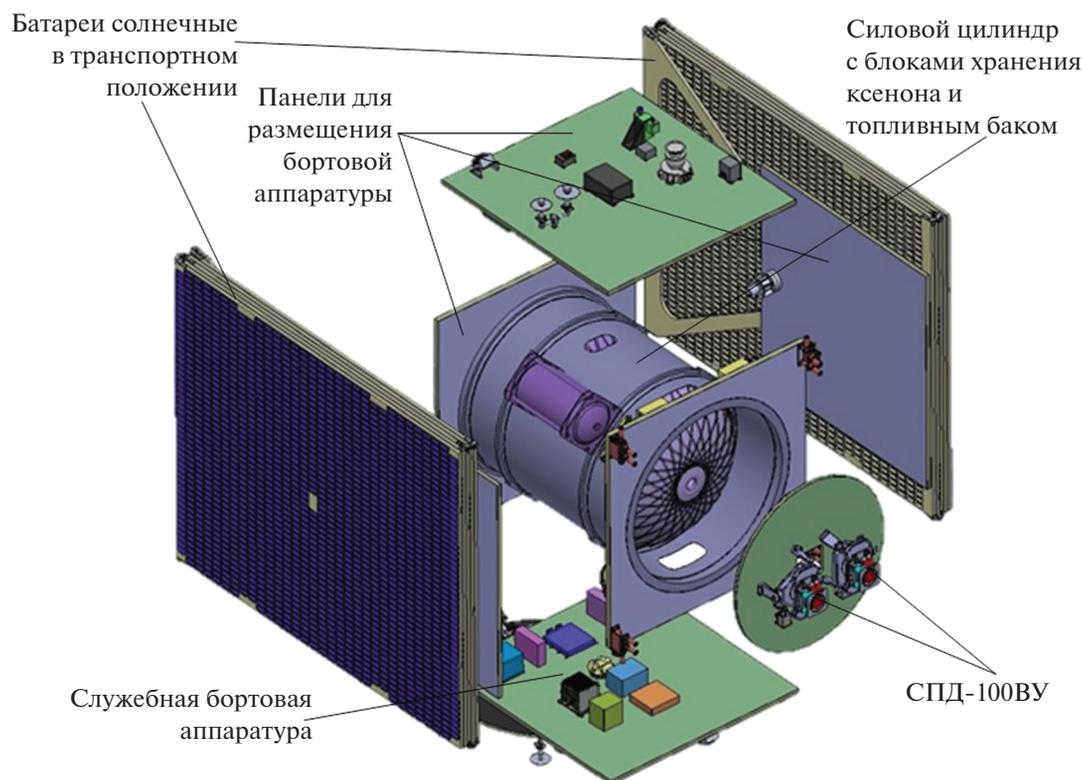
Для облета астероидов Главного пояса на втором этапе проекта разработан проектный облик КА с маршевой ЭРДУ (КА-ЭРДУ), который выводится в космическое пространство как основная (целевая) полезная нагрузка. В составе космической транспортной системы для выведения КА на отлетную гиперболическую траекторию используются РН Союз-2 этапа модернизации 1Б и ХРБ Фрегат-МТ. КА-ЭРДУ также состоит из космической платформы и КНА. Основным конструктивно-силовым элементом КА-ЭРДУ является центральный силовой цилиндр и негерметичный приборный контейнер для размещения бортовой аппаратуры (рис. 7). На силовом цилиндре размещаются блоки хранения ксенона, топливный бак ЖРДУ и шар-баллоны с газом наддува, в нижней части к силовому цилиндру крепится панель ЭРДУ с размещенными на ней двумя СПД-100ВУ. Панели приборного контейнера со-

Таблица 6. Основные характеристики гелиоцентрического участка движения МКА для эпохи 2026 г.

Событие	Дата	Масса КА, кг	Остаток рабочего тела на борту КА, кг	Скорость пролета относительно астероида, км/с
Выход из грависферы Земли	11.01.2026	526.51279	133.487	—
Выход на гелиоцентрическую орбиту фазирования	02.12.2026	481.527	101.527	—
Пролет 2007 VV6	22.01.2028	477.230	97.230	5.431
Пролет 2007 UY1	19.02.2029	471.656	91.656	6.391
Пролет 2011 YD29	03.05.2029	465.918	85.918	7.130
Пролет 2005 YR3	05.06.2030	461.255	81.255	7.386
Пролет 2007 RT12	04.04.2031	412.452	32.452	7.289

ставляют единую конструктивно силовую схему с центральным силовым цилиндром и представляют собой трехслойные сотопанели, состоящие из углепластиковых обшивок повышенной теплопроводности и алюминиевого сотозаполнителя, с предусмотренными посадочными местами для бортовой аппаратуры. Каждая панель солнечных батарей состоит из пяти створок и представляет собой трехслойные сотопанели с установленными

ми на них фотопреобразователями (рис. 8, 9). Масса рабочего тела (ксенона) — 770 кг, масса топлива (гидразин) с газом наддува — 50 кг, общая масса заправленного КА — 1848 кг (табл. 7). Масса полезной нагрузки (КНА) составляет до 200 кг, поэтому КНА, рассмотренный в разделе “Предварительный состав комплекса...”, может быть существенно расширен.

**Рис. 7.** Схема конструкции КА-ЭРДУ. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

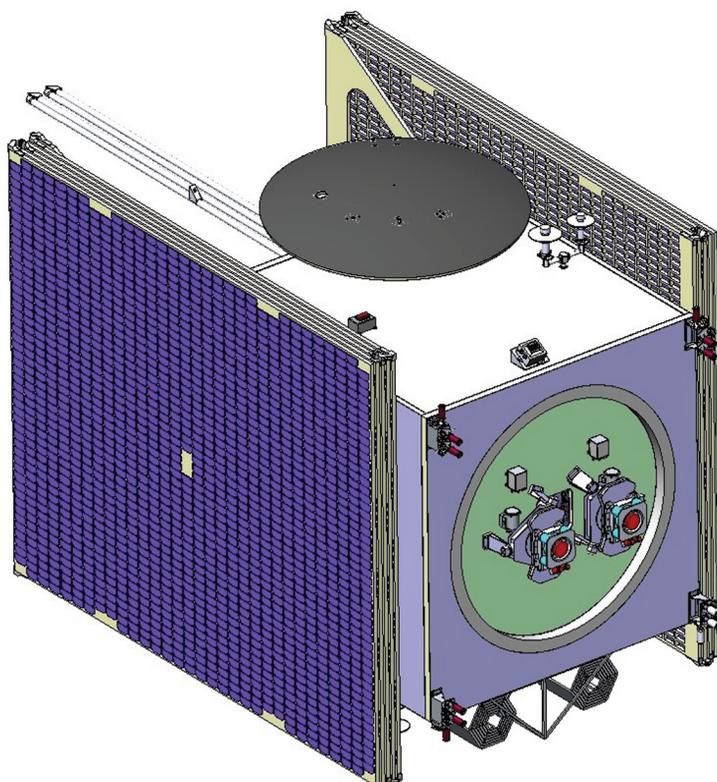


Рис. 8. КА-ЭРДУ в транспортном положении. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИССИИ ПО ОБЛЕТУ АСТЕРОИДОВ ГЛАВНОГО ПОЯСА

КА выводится в космическое пространство как основная (целевая) полезная нагрузка. Для выведения КА на отлетную гиперболическую траекторию используются РН Союз-2 этапа модернизации 1б и ХРБ Фрегат-МТ. Масса головного блока на низкой опорной околоземной орбите в качестве исходных данных принята равной 8240 кг. Опорная орбита — эллиптическая с высотой апогея 240 км и высотой перигея 200 км, отсчитываемые от поверхности сферической Земли радиусом 6371 км. Наклонение опорной орбиты — 51.7° . Масса переходного адаптера РБ-КА 49 кг.

В состав головного блока входит ХРБ Фрегат-МТ, переходный адаптер полезной нагрузки (ПН) и собственно полезная нагрузка — исследовательский КА. Конечная масса ХРБ с учетом невырабатываемых остатков топлива и газов составляет 1030 кг. Масса переходного адаптера — 49 кг. Удельный импульс тяги химической двигательной установки РБ принят равным 333.2 с. В состав ЭРДУ КА входят два двигателя СПД-100ВУ, работающих одновременно (табл. 8).

Гелиоцентрический участок движения КА включает в себя один гравитационный маневр у Земли. Были проанализированы различные по-

следовательности облета приоритетных металлических астероидов (табл. 1). Наиболее экономичным вариантом из рассмотренных (с точки зрения затрат рабочего тела), оказался маршрут: Земля—Земля—55 Пандора (Pandora)—16 Психея (Psyche)—69 Гесперия (Hesperia).

На начальном этапе, в рамках метода грависфер нулевой протяженности в рамках методики

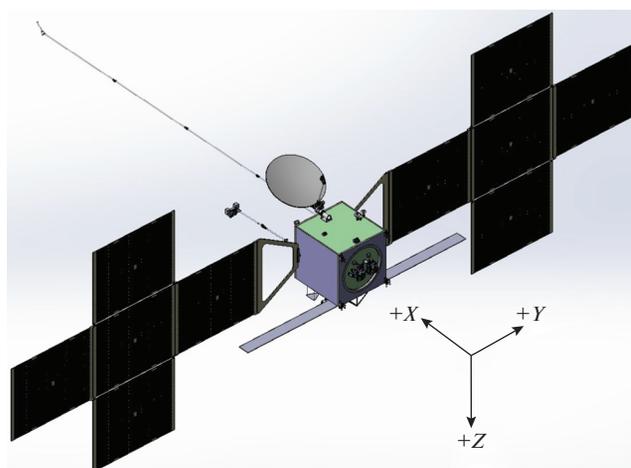


Рис. 9. КА-ЭРДУ в рабочем положении. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

Таблица 7. Сводка масс элементов КА-ЭРДУ

№ п/п	Наименование	Масса, кг
1	Комплекс научной аппаратуры	200.00
2	Бортовой комплекс управления	52.10
3	Бортовой радиокомплекс и антенно-фидерная система	20.00
4	Система электроснабжения	264.00
5	Электроракетная двигательная установка с рабочим телом	908.30
6	Жидкостная двигательная установка	106.50
7	СОТР (датчики, нагреватели, ЭВТИ, угловые тепловые трубы)	7.00
8	Бортовая кабельная сеть	11.00
9	Конструкция	60.00
10	Кронштейны, мелкие детали, стандарты	30.00
11	Резерв	189.00
12	Общая масса заправленного КА	1848.00
13	Общая масса не заправленного КА	1028.00

(Константинов, Мин Тэйн, 2012) был проведен анализ маршрута Земля–Земля–астероид Pandora. В результате этого анализа были получены оценки даты старта от Земли, вектор гиперболического избытка скорости отлета от Земли, определяющий энергетические затраты ХРБ и стартовую массу КА, также была определена дата выполнения гравитационного маневра у Земли и время перелета Земля–Pandora. Также было выявлено, что движение КА на участке Земля–Pandora может быть полностью пассивным (без учета коррекции траектории).

С использованием полученных результатов в качестве начального приближения, был проанализирован участок гелиоцентрического перелета Земля–Земля с малой тягой. Задача нахождения оптимального управления сводилась к решению краевой задачи в рамках принципа максимума Понтрягина (Понтрягин и др., 1976). Дата старта от Земли и величина гиперболического избытка скорости отлета оптимизировалась, дата вторичного подлета к Земле для гравитационного маневра была зафиксирована. Вектор гелиоцентрической скорости КА в момент подлета к Земле

Таблица 8. Основные характеристики СПД-100ВУ

Характеристика	Значение
Тяга, мН	89.24
Потребляемая электрическая мощность, кВт	1.35
Удельный импульс, с	1600
Тяговый КПД, %	52
Ресурс, ч	Более 1500
Масса, кг	5

был найден в рамках предыдущего этапа с использованием методики (Константинов, Мин Тэйн, 2012). Постановка задачи оптимального управления соответствует той, что дана в разделе "Баллистический анализ миссии по облету приближающихся...". Отличие заключается лишь в краевых условиях задачи. Основные результаты анализа геоцентрического участка приведены в табл. 9.

Последовательно были проанализированы участки движения: Пандора–Психея и Психея–Гесперия. Как и в предыдущем случае, рассматривалась задача оптимального управления в рамках принципа максимума. Начальные условия движения для каждого последующего участка (радиус-вектор КА, вектор его гелиоцентрической скорости, масса КА, момент времени начала участка) получались из анализа предыдущего участка.

Внешним оптимизируемым параметром задачи являлось время перелета на участках: Пандора–Психея и Психея–Гесперия. Основные результаты анализа гелиоцентрических участков движения для КА с ЭРДУ на базе СПД-100ВУ представлены в табл. 10 (рис. 10). Суммарные затраты рабочего тела ЭРДУ для данного перелета составили 715.740 кг. Моторное время ЭРДУ – 17478.488 ч, суммарная длительность полета – 3115.136 сут (8.53 года).

БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИССИИ ПО ДОСТАВКЕ ВЕЩЕСТВА АСТЕРОИДОВ НА ЗЕМЛЮ

В качестве примера цели космической миссии рассматривается доставка вещества с астероида С-типа 10 Hygiea (табл. 2). Рассматривается задача замкнутого перелета Земля–астероид–Земля.

Таблица 9. Основные результаты анализа геоцентрического участка движения для КА с ЭРДУ на базе СПД-100ВУ

Характеристика	Значение
Величина гиперболического избытка скорости отлета от Земли, км/с	1.236
Импульс скорости ХРБ (при условии старта из апогея опорной орбиты), км/с	3.297
Гравитационные потери и потери на управление (2.5% от величины импульса), км/с	0.082
Масса головного блока после выдачи отлетного импульса, кг	2928.928
Масса рабочего топлива РБ, кг	5311.072
Масса КА на гиперболической отлетной траектории (стартовая масса КА), кг	1849.928

Таблица 10. Основные характеристики гелиоцентрических участков движения КА с ЭРДУ на базе СПД-100ВУ

Событие	Дата (Юлианская дата)	Масса КА, кг
Выход из грависферы Земли	21 декабря 2025 04:28:10.970 UTC (2461030.68623808)	1849.928
Гравитационный маневр у Земли	3 апреля 2027 10:29:49.690 UTC (2461498.93738067)	1606.152
Пролет 55 Pandora	22 мая 2028 20:39:09.305 UTC (2461914.36052436)	1606.152
Пролет 16 Psyche	3 марта 2030 23:24:45.523 UTC (2462564.47552689)	1296.480
Пролет 69 Hesperia	2 июля 2034 07:43:48.541 UTC (2464145.82208959)	1134.188

КА выводится в космическое пространство как основная полезная нагрузка. В составе космической транспортной системы для выведения КА на отлетную гиперболическую траекторию используется РН Союз-2 этапа модернизации 1б и ХРБ Фрегат-МТ. В состав ЭРДУ КА входят два двигателя СПД-100Д, работающих одновременно (табл. 11).

Основные исходные данные, использовавшиеся для анализа данного варианта космической миссии, аналогичны исходным данным, принятым для анализа по облету астероидов Главного пояса (см. раздел “Баллистический анализ миссии по облету астероидов...”). Рассматривалась следующая схема гелиоцентрического перелета: старт от Земли; выполнение гравитационного маневра у Марса, целью которого является повышение перигелия гелиоцентрической орбиты КА;

подлет к астероиду с выравниванием гелиоцентрических скоростей астероида и КА; далее следует участок работы КА в окрестности астероида (движение КА по орбите астероида) и последний этап – перелет от астероида к Земле.

Так же, как и в предыдущем случае, сначала был выполнен приближенный анализ гелиоцентрического перелета Земля–Марс–астероид в соответствии с методикой (Константинов, Мин Тэйн, 2012). При этом было выявлено, что начальный этап гелиоцентрического перелета (Земля–Марс) является полностью пассивным (ДУ КА может быть включена лишь для коррекции перелетной траектории к Марсу). Гиперболический избыток скорости отлета от Земли к Марсу составил 3.116 км/с. Зная эту величину, удалось получить основные характеристики геоцентриче-

Таблица 11. Основные характеристики СПД-100Д

Характеристика	Значение
Тяга, мН	80
Потребляемая электрическая мощность, кВт	2.106
Удельный импульс, с	2660
Тяговый КПД, %	52
Масса, кг	5.6

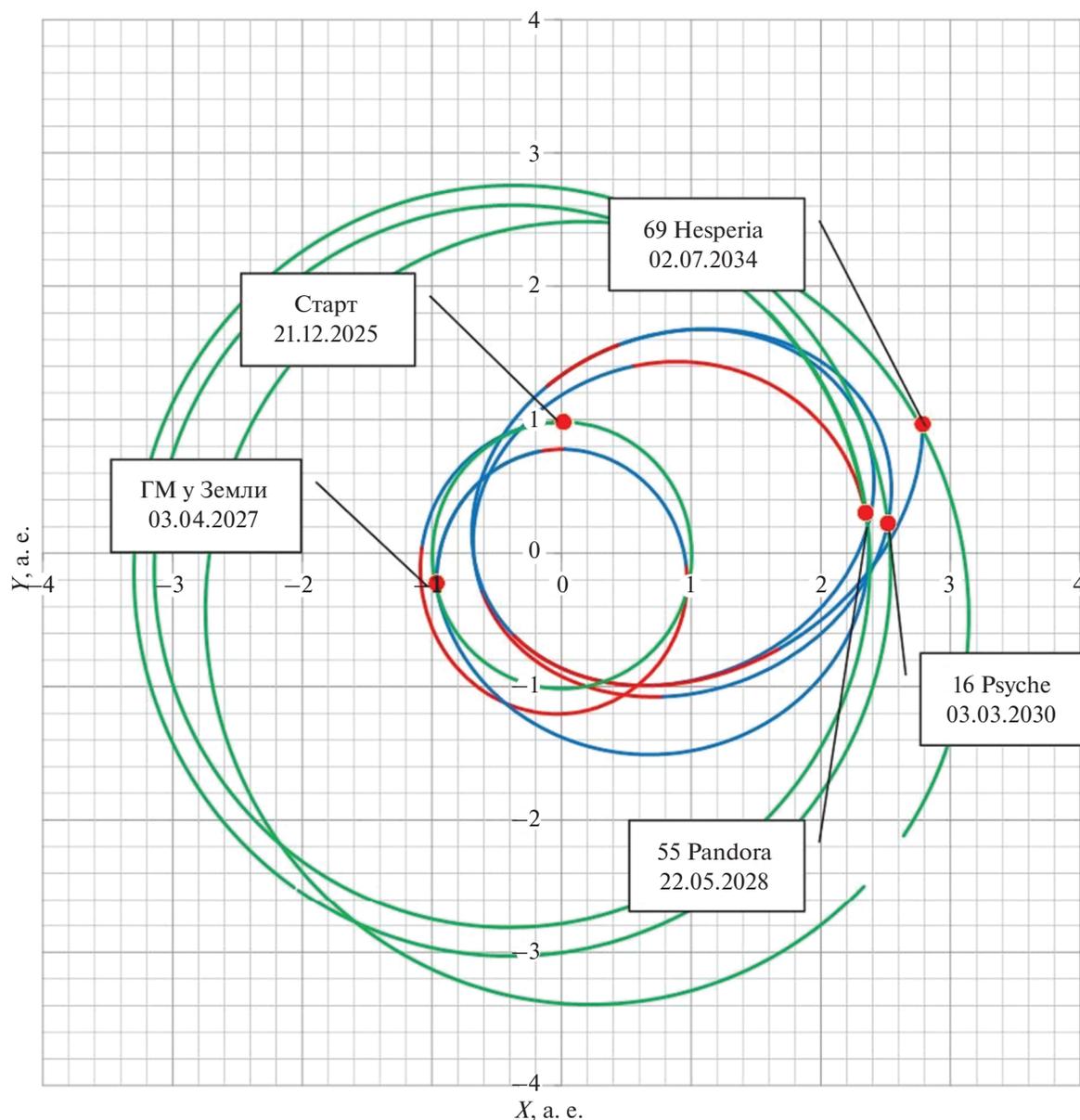


Рис. 10. Проекция гелиоцентрической траектории на плоскость эклиптики для КА с ЭРДУ на базе СПД-100ВУ. Красным цветом отмечены активные участки траектории КА, синим — пассивные, зеленым — орбиты Земли и астероидов. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

ского участка движения и стартовую массу КА (табл. 12).

Траектория движения Марс–астероид содержит три активных участка, разделенные двумя пассивными. Задача нахождения законов управления вектором тяги КА сводилась с использованием принципа максимума для решения краевой задачи. Момент отлета от Марса был получен с использованием методики (Константинов, Мин Тэйн, 2012) и зафиксирован, а длительность перелета к астероиду оптимизировалась как внешний перебираемый параметр задачи. Траектория перелета астероид–Земля также анализировалась с помощью принципа максимума. При этом скоро-

сти КА и Земли не выравниваются, и КА входит в атмосферу Земли с гиперболической скоростью. Дата старта от астероида и время перелета к Земле являются внешними оптимизируемыми параметрами (табл. 13, рис. 11). Суммарные затраты рабочего тела ЭРДУ составляют 551.453 кг, моторное время ЭРДУ – 24974.013 ч, суммарная длительность полета – 4208.302 сут (11.522 года).

ЯДЕРНЫЙ БУКСИР ЗЕВС И ДОСТАВКА ГРУНТА С АСТЕРОИДОВ

Для реализации третьего этапа проекта для доставки грунта астероидов из Главного пояса кро-

Таблица 12. Основные результаты анализа геоцентрического участка движения

Характеристика	Значение
Величина гиперболического избытка скорости отлета от Земли, км/с	3.116
Импульс скорости ХРБ при старте в апоцентре опорной орбиты с учетом гравитационных потерь и потерь на управление, км/с	3.753
Масса рабочего топлива РБ, кг	5627.419
Масса КА на гиперболической отлетной траектории (стартовая масса КА), кг	1533.581

Таблица 13. Основные характеристики гелиоцентрического участка движения КА

Событие	Дата (Юлианская дата)	Масса КА, кг
Старт	1 ноября 2026 г. (2461 346.41912087)	1533.581
Гравитационный маневр у Марса	12 октября 2027 г. (2461 690.84337418)	1533.581
Подлет к астероиду 10 Hygiea	27 августа 2032 г. (2463 471.70181934)	1188.651
Старт от астероида 10 Hygiea к Земле	25 февраля 2034 г. (2464 018.78095151)	1188.651
Вход в атмосферу Земли	11 мая 2038 г. (2465 554.720941478)	982.128

ме КА-ЭРДУ (см. раздел “КА для облета...”) также рассматривается транспортно-энергетический модуль (ТЭМ), он же ядерный буксир Зевс, первый орбитальный образец которого будет готов после 2030 г. В ТЭМ маршевая двигательная установка (МДУ) состоит из блока ЭРДУ мощностью до нескольких десятков киловатт и с удельным импульсом 7000 с (Афанасьев, 2022). Энергетическим сердцем ТЭМ является ядерный реактор мощностью от 0.5 МВт, который обеспечивает электроэнергией ЭРДУ, служебную аппаратуру и полезную нагрузку.

Ядерная силовая установка с электрической мощностью 1 МВт позволит обеспечить тягу ЭРДУ до 20 Н и необходимое ускорение многотонного буксира для полета в пояс астероидов в течение нескольких месяцев. В качестве полезной нагрузки ТЭМ рассматривается несколько (пять или более) автономных взлетно-посадочных (ВП) КА-ЭРДУ с грунтозаборным (буровым) устройством и КНА для исследования с орбиты и на поверхности астероида. После достижения ядерным буксиром объекта-мишени в расчетной точке

траектории полета ВП КА отстыковывается и в автономном режиме производит коррекцию траектории, посадку на поверхность астероида, бурение и забор грунта, взлет и доставку капсулы с грунтом на Землю. Возможен и комбинированный вариант, когда ВП КА после забора грунта и старта с объекта в расчетной точке траектории полета стыкуется с ядерным буксиром, который на орбите ожидания собирает все или часть ВП КА с грунтом и доставляет их на околоземную или окололунную орбиту, откуда капсулы с грунтом доставляются на Землю. В другом сценарии после доставки ВП КА в пояс астероидов ядерный буксир может продолжить полет и доставить ВП КА для исследования и забора грунта в группе троянских астероидов Юпитера, а потом осуществить доставку КА для исследования галилеевых спутников Юпитера (Ио, Европы, Ганимеда или Каллисто). Очевидно, что разработка ядерного буксира Зевс выведет исследование и освоение Солнечной системы и дальнего космоса на новый уровень, который недоступен для современных транспортных космических систем.

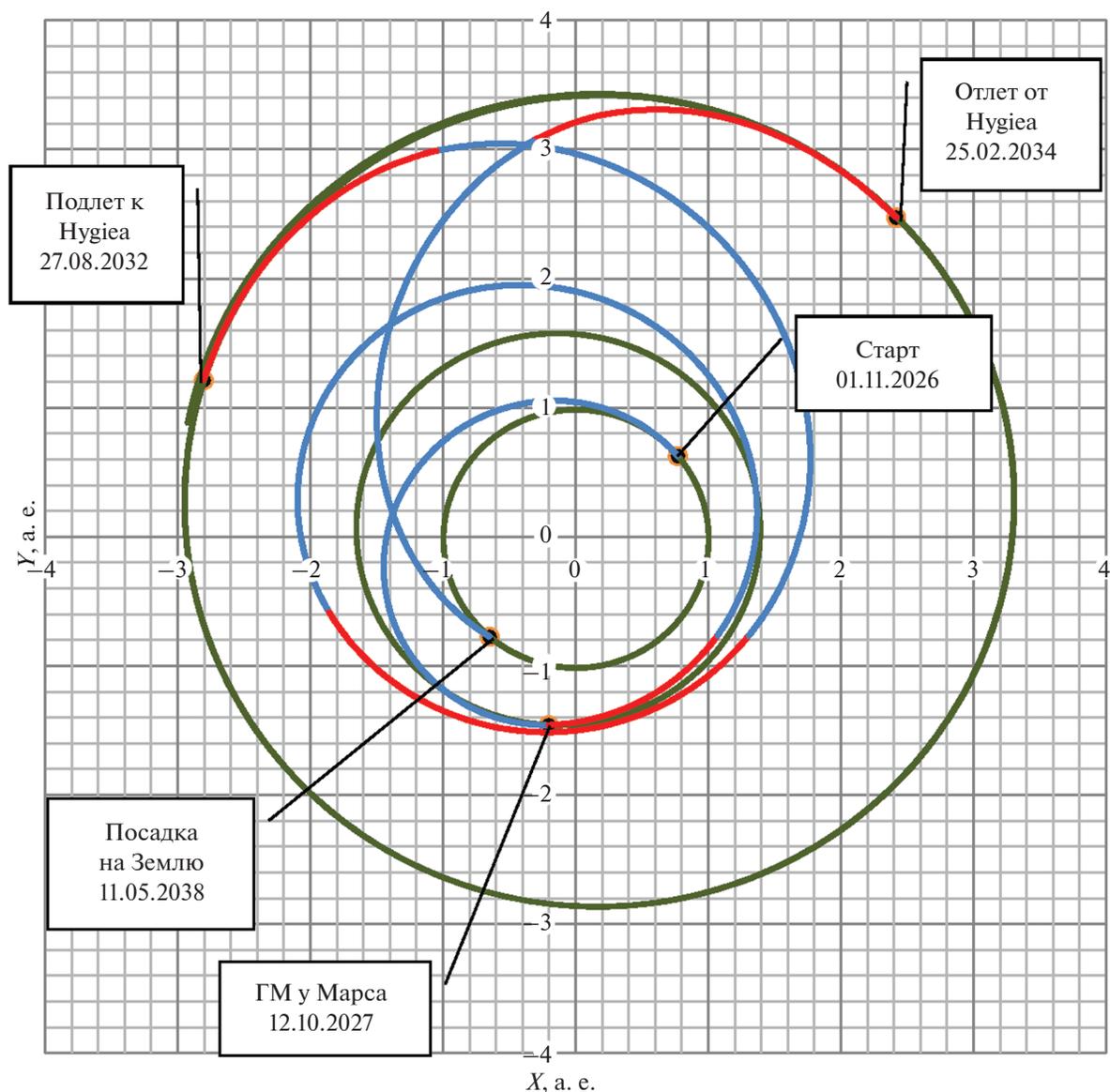


Рис. 11. Общий вид гелиоцентрической траектории КА с доставкой вещества астероида на Землю. Красным цветом отмечены активные участки траектории КА, синим — пассивные, зеленым — орбиты Земли, Марса и астероида. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с приоритетными научными задачами исследования малых тел Солнечной системы на современном этапе сформирован приоритетный список астероидов Главного пояса, который позволяет в зависимости от даты старта КА производить замену мишеней.

На первом этапе планируется облет и исследование нескольких околоземных астероидов, во втором этапе облет и исследование трех крупных металлических астероидов Главного пояса, и на третьем этапе планируется доставка на Землю образцов вещества с поверхности астероидов Главного пояса.

Для первого этапа разработан проектный облик малого космического аппарата массой до одной тонны, который за одну миссию смог бы исследовать с пролетной траектории несколько (5–6) выбранных околоземных астероидов. Запуск МКА планируется осуществить в качестве попутной нагрузки с другим космическим аппаратом, например, — системы Глонасс. Для второго этапа разработан проектный облик более тяжелого КА массой две тонны, который планируется запустить ракетой Союз-2.1б и разгонным блоком Фрегат-МТ к металлическим астероидам Главного пояса для их исследования с пролетной траектории. Окончательно на этом этапе цели из приоритет-

ного списка могут быть выбраны непосредственно перед запуском, исходя из баллистических условий. К примеру, среди них может быть астероид Пандора диаметром 66 км, или Гесперия диаметром 110 км, или др.

В ходе третьего этапа программы планируется запуск ракетой Союз КА-ЭРДУ к выбранному астероиду в Главном поясе, посадка на него, бурение и доставка грунта через несколько лет обратно на Землю. На третьем этапе для доставки грунта с нескольких астероидов также рассматривается ядерный буксир Зевс. Ядерный буксир может нести в качестве полезной нагрузки сразу несколько автономных взлетно-посадочных аппаратов с грунтозаборным устройством. Для оценки различных сценариев доставки грунта с поверхности астероидов на третьем этапе и выбора оптимальных проектов с учетом габаритно-весовых и баллистических характеристик, а также для разработки предложений по комплексу научной аппаратуры и грунтозаборных устройств для посадочных аппаратов в зависимости от полезной нагрузки потребуется проведение дальнейших исследований.

Отличительной чертой всех планируемых миссий станет использование в них электроракетных двигателей СПД-100ВУ производства ОКБ “Факел” (Роскосмос) в качестве главной силовой установки, или разрабатываемых и испытываемых в настоящее время более перспективных ЭРДУ, которые в исследовании дальнего космоса гораздо более эффективны и экономичны, чем химические ракетные двигатели.

При создании космических аппаратов планируется широкое использование приборов, блоков и технических решений, имеющих летную квалификацию и находящихся на завершающих стадиях наземной отработки. При создании бортовых систем будет частично применена аппаратура, разрабатываемая в настоящее время в рамках лунной программы, для обеспечения работы электроракетных двигателей планируется использовать приборы (блоки), хорошо зарекомендовавшие себя на отечественных геостационарных спутниках связи. Каждый последующий КА будет создаваться с учетом опыта изготовления и отработки предыдущего.

На заседании подсекции “Планеты и малые тела Солнечной системы” Совета РАН по космосу 19.05.2022 г., где присутствовали представители институтов РАН, АО “НПО Лавочкина” и АО “ЦНИИмаш”, этот проект был отобран и рекомендован в качестве ведущего проекта для рассмотрения на бюро Совета РАН по космосу для внесения его в Федеральную космическую программу (ФКП) на 2026–2036 гг. Если проект Одиссея-Астероиды будет внесен в новую Федеральную космическую программу на 2026–2036 гг.,

первый этап планируется реализовать в период с 2026 по 2030 гг., а второй и третий этапы с 2030 по 2036 гг. Это новый космический проект на следующее десятилетие. Оценочная стоимость в ценах 2022 г. первого этапа (эскизный проект, разработка рабочей документации, испытания макетов и опытных изделий) составляет 6.5 млрд рублей, второго этапа — 10 млрд рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев И.* Буксир ложится на курс // Русский космос. 2022. № 4. С. 10–15.
- Константинов М.С., Мин Тейн.* Анализ сложных схем полета к Сатурну с использованием гравитационных маневров и импульсов скорости в глубоком космосе // Электронный журнал “Тр. МАИ”. 2012. № 52. <http://trudymai.ru/published.php?ID=29458>
- Кринов Е.Л.* Основы метеоритики. 1955. М.: Гос. издат. технико-теоретической лит. 392 с.
- Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976. 392 с.
- Слюта Е.Н., Воропаев С.А.* Малые и планетные тела Солнечной системы. Критическая масса ледяных тел // Астрон. вестн. 1993. Т. 27. № 1. С. 71–82. (*Slyuta E.N., Voropaev S.A.* Small and planetary bodies of the Solar system: The critical mass for icy bodies // Sol. Syst. Res. 1993. V. 27. № 1. P. 55–64.)
- Слюта Е.Н.* Физико-механические свойства и гравитационная деформация металлических астероидов // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 2. С. 122–140. (*Slyuta E.N.* Physicomechanical Properties and Gravitational Deformation of Metallic Asteroids // Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 2. P. 109–126.)
- Слюта Е.Н.* Форма малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2014. Т. 48. № 3. С. 234–256. (*Slyuta E.N.* Shape of small Solar system bodies // Sol. Syst. Res. 2014. V. 48. № 3. P. 217–238.)
- Слюта Е.Н., Воропаев С.А.* История проблемы и аналитическое решение для гравитационной деформации малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2015. Т. 49. № 2. С. 131–147. (*Slyuta E.N., Voropaev S.A.* Gravitational deformation of small bodies of the Solar system: History of the problem and its analytical solution // Sol. Syst. Res. 2015. V. 49. № 2. P. 123–138.)
- Слюта Е.Н., Высоккин В.В., Иванов В.В., Маковчук В.Ю., Назаров А.И., Погонин В.И., Роскина Е.Г., Сафронов В.В., Тацкий Л.П.* Прибор МЕТЕОР-Л на лунном орбитальном аппарате Луна-26: детектор космической пыли // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 5. С. 444–453. (*Slyuta E.N., Vysochkin V.V., Ivanov V.V., Makovchuk V.Yu., Nazarov A.I., Pogonin V.I., Roskina E.A., Safronov V.V., Tatsiy L.P.* METEOR-L device on the lunar orbital vehicle Luna-26: Space dust detector // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 5. P. 437–445.)
- Юшкова О.В., Гаврик А.Л., Марчук В.Н., Юшков В.В., Смирнов В.М., Лаптев М.А., Чернышев Б.В., Дутышев И.Н., Лебедев В.П., Медведев А.В., Петрукович А.А.* Бистатическая радиолокация в проекте Луна-Ресурс // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 4.

- C. 291–304. (Yushkova O.V., Gavrik A.L., Marchuk V.N., Yushkov V.V., Smirnov V.M., Laptev M.A., Chernyshev B.V., Dutsyhev I.N., Lebedev V.P., Medvedev A.V., Petrukovich A.A. Bistatic radar detection in the Luna-Resurs mission // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 4. P. 287–300.)
- Belton M.J.S., Veverka J., Thomas P., Hefenstein P., Simonelli D., Chapman C., Davies M.E., Greeley R., Greenberg R., Head J., Murchie S., Klaasen K., Johnson T.V., McEwen A., Morrison D., Neukum G., Fanale F., Anger C., Carr M., Pilcher C. Galileo encounter with 951 Gaspra: First pictures of an asteroid // *Science*. 1992. V. 257. P. 1647–1652.
- Belton M.J.S., Chapman C.R., Veverka J., Klaasen K.P., Harch A., Greeley R., Greenberg R., Head III J.W., McEwen A., Morrison D., Thomas P.C., Davies M.E., Carr M.H., Neukum G., Fanale F.P., Davis D.R., Anger C., Gierasch P.J., Ingersoll A.P., Pilcher C.B. First images of asteroid 243 Ida // *Science*. 1994. V. 265. P. 1543–1547.
- Baker J., Bizzarro M., Wittig N., Connelly J., Haack H. Early planetesimal melting from an age of 4.5662 Gyr for differentiated meteorites // *Nature*. 2005. V. 436. P. 1127–1131.
- Belskaya I.N., Lagerkvist C.I. Physical properties of M class asteroids // *Planet. and Space Sci.* 1996. V. 44. P. 783–794.
- Belton M.J.S., Veverka J., Thomas P., Hefenstein P., Simonelli D., Chapman C., Davies M.E., Greeley R., Greenberg R., Head J., Murchie S., Klaasen K., Johnson T.V., McEwen A., Morrison D., Neukum G., Fanale F., Anger C., Carr M., Pilcher C. Galileo encounter with 951 Gaspra: First pictures of an asteroid // *Science*. 1992. V. 257. P. 1647–1652.
- Belton M.J.S., Chapman C.R., Veverka J., Klaasen K.P., Harch A., Greeley R., Greenberg R., Head III J.W., McEwen A., Morrison D., Thomas P.C., Davies M.E., Carr M.H., Neukum G., Fanale F.P., Davis D.R., Anger C., Gierasch P.J., Ingersoll A.P., Pilcher C.B. First images of asteroid 243 Ida // *Science*. 1994. V. 265. P. 1543–1547.
- Belton M.J.S., Chapman C.R., Klaasen K.P., Harch A.P., Thomas P.C., Veverka J., McEwen A.S., Pappalardo R.T. Galileo's encounter with 243 Ida: An overview of the imaging experiment // *Icarus*. 1996. V. 120. P. 1–19.
- Bizzarro M., Baker J.A., Haack H., Lundgaard K.L. Rapid timescales for accretion and melting of differentiated planetesimals inferred from 26Al–26Mg chronometry // *Astrophys. J.* 2005. V. 632. P. L41–L44.
- Bottke W.F., Nesvorný D., Grimm R.E., Morbidelli A., O'Brien D.P. Iron meteorites as remnants of planetesimals formed in the terrestrial planet region // *Nature*. 2006. V. 439. P. 821–824.
- Britt D.T., Consolmagno G.J. The porosity of dark meteorites and the structure of low-albedo asteroids // *Icarus*. 2000. V. 146. P. 213–219.
- Burbine T.H. Forging Asteroid-Meteorite Relationships through Reflectance Spectroscopy // PhD Dissertation. Massachusetts Institute of Technology. 2000. 303 p.
- Burbine T.H., Binzel R.P. Small main-belt asteroid spectroscopic survey in the near-infrared // *Icarus*. 2002. V. 159. P. 468–499.
- Burbine T.H., McCoy T.J., Meibom A., Gladman B., Keil K. Meteoritic parent bodies: Their number and identification // *Asteroids III* / Eds: Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R. Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 653–667.
- 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.
- Chapman C.R. S-type asteroids, ordinary chondrites, and space weathering: The evidence from Galileo's flybys of Gaspra and Ida // *Meteoritics*. 1996. V. 31. P. 699–725.
- Chauvineau B., Mignard F., Farinella P. The lifetime of binary asteroids vs gravitational encounters and collisions // *Icarus*. 1991. V. 94. P. 299–310.
- Cheng A.F., Agrusa H.F., Barbee B.W., Meyer A.J., Farnham T.L., Raducan S.D., Richardson D.C., Dotto E., Zinzi A., Corte V.D., Statler T.S., Chesley S., Naidu S.P., Hirabayashi M., Li J.-Y., Egg S., and 69 co-authors. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos // *Nature*. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05878-z>
- CNEOS <https://cneos.jpl.nasa.gov/about/cneos.html>.
- CNEOS JPL Discovery Statistics. 2023. <https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/size.html>.
- CNEOS JPL NEO Groups. 2023. https://cneos.jpl.nasa.gov/about/neo_groups.html.
- Coradini A., Capaccioni F., Erard S., Arnold G., De Sanctis M.C., Filacchione G., Tosi F., Barucci M.A., Capria M.T., Ammannito E., and 39 co-authors. The surface composition and temperature of asteroid 21 Lutetia as observed by ROSETTA/VIRTIS // *Science*. 2011. V. 334(6055). P. 492–494.
- Daly R.T., Ernst C.M., Barnouin O.S., Chabot N.L., Rivkin A.S., Cheng A.F., Adams E.Y., Agrusa H.F., Abel E.D., Alford A.L., and 91 co-authors. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defense // *Nature*. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05810-5>
- De Sanctis M.C., Coradini A., Ammannito E., Filacchione G., Capria M.T., Fonte S., Magni G., Barbis A., Bini A., Dami M., Fikai-Veltroni I., Preti G., and VIR Team. The VIR spectrometer // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 163. P. 329–369.
- Fish R.A., Goles G.G., Anders E. The record in the meteorites. III. On the development of meteorites in asteroidal bodies // *Astrophys. J.* 1960. V. 132. P. 243–258.
- Fornasier S., Clark B.E., Dotto E. Spectroscopic survey of X-type asteroids // *Icarus*. 2011. V. 214. P. 131–146.
- Fujiwara A., Kawaguchi J., Yeomans D.K., Abe M., Mukai T., Okada T., Saito J., Yano H., Yoshikawa M., Scheeres D.J., Barnouin-Jha O., Cheng A.F., Demura H., Gaskell R.W., Hirata N., Ikeda H., Kominato T., Miyamoto H., Nakamura A.M., Nakamura R., Sasaki S., Uesugi K. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa // *Science*. 2006. V. 312. P. 1330–1334.
- Goldstein J.I., Short J.M. The iron meteorites, their thermal history and parent bodies // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1967. V. 31. P. 1733–1770.
- Gordon R.B. Mechanical properties of iron meteorites and the structure of their parent planets // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75. P. 439–447.

- Graykowski A., Lambert R.A., Marchis F. Cazeneuve D., Dalba P.A., Esposito T.M., Peluso D.C., Sgro L.A., Blaclard G., Borot A., Malvache A., Marfisi L., Powell T.M. and 31 co-authors. Light curves and colors of the ejecta from Dimorphos after the DART impact // *Nature*. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05852-9>
- Hayes-Gehrke M., Khan Raiden, Shijia Liao, Siegel Tucker, Vincent Jorin, DeBoy Stephen, Guenterberg Evan, Hamilton Drew, Hopkins Brain, Katz Ilan, Sargent Robert, Storey Cameron, Zhang Gary, Brincat Stephen M., Mifsud Martin. Lightcurve analysis of asteroid 2685 Masursky // *Minor Planet Bull.* 2023. V. 50. № 1. P. 11.
- Hillier J.K., Bauer J.M., Buratti B.J. Photometric modeling of asteroid 5535 Anfrank from Stardust observations // *Icarus*. 2011. V. 211. P. 546–552.
- IAU Minor Planet Center. 2023. <https://www.minorplanet-center.net/>
- Jorda L., Lamy P.L., Gaskell R.W., Kaasalainen M., Groussin O., Besse S., Fauray G. Asteroid (2867) Steins: Shape, topography and global physical properties from OSIRIS observations // *Icarus*. 2012. V. 221. P. 1089–1100.
- Kleine T., Mezger K., Palme H., Scherer E. Tungsten isotopes provide evidence that core formation in some asteroids predates the accretion of chondrite parent bodies // 36th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston. 2005. Abstract #1431.
- Lauretta D.S., Della Giustina D.N., Bennett C.A., Golish D.R., Becker K.J., Balram-Knutson S.S., Barnouin O.S., Becker T.L., Bottke W.F., Boynton W.V., Campins H., Clark B.E., Connolly H.C. Jr, Drouot d'Aubigny C.Y., Dworkin J.P., Emery J.P., Enos H.L., Hamilton V.E., Hergenrother C.W., Howell E.S., Izawa M.R.M., Kaplan H.H., Nolan M.C., Rizk B., Roper H.L., Scheeres D.J., Smith P.H., Walsh K.J., Wolner C.W.V., and The OSIRIS-REx Team. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu // *Nature*. 2019. V. 568. P. 55–60.
- Lohr D.A., Zanetti L.J., Anderson B.J., Potemra T.A., Hayes J.R., Gold R.E., Henshaw R.M., Mobley F.F., Holland D.B., Acuña M.H., Scheifele J.L. NEAR Magnetic Field Investigation, Instrumentation, Spacecraft Magnetism and Data Access // *Space Sci. Rev.* 1997. V. 82. P. 255–281.
- Lovering J.F. Differentiation in the iron-nickel core of a parent meteorite body // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1957. V. 12. P. 238–252.
- Lupishko D.F., Belskaya I.N. On the surface composition of the M-type asteroids // *Icarus*. 1989. V. 78. P. 395–401.
- Marchi S., Raponi A., Prettyman T.H., De Sanctis M.C., Castillo-Rogez J., Raymond C.A., Ammannito E., Bowling T., Ciarniello M., Kaplan H., Palomba E., Russell C.T., Vinogradoff V., Yamashita N. An aqueously altered carbon-rich Ceres // *Nature Astron.* 2019. V. 3. P. 140–145.
- Markowski A., Quitté G., Kleine T., Halliday A.N. Tungsten isotopic constraints on the formation and evolution of iron meteorite parent bodies // 36th Lunar and Planet. Sci. Conf., Houston, 2005. Abstract #1308.
- Morbidelli A., Bottke Jr W.F., Froeschlé Ch., Michel P. Origin and evolution of Near-Earth Objects // *Asteroids III* / Eds: Bottke W.F., Jr.). Tucson: Univ. Arizona Press, 2002. P. 409–422.
- More J.J., Sorensen D.C., Hillstro K.E., Garbow B.S. The MINPACK project // *Sources Dev. Math. Softw.* 1984. P. 88–111.
- Morota T., Sugita S., Cho Y., Kanamaru M., Tatsumi E., Sakatani N., Honda R., Hirata N., Kikuchi H., Yamada M. and 85 co-authors. Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution // *Science*. 2020. V. 368. P. 654–659.
- Mothe-Diniz T., Carvano J.M., Lazzaro D. Distribution of taxonomic classes in the main belt of asteroids // *Icarus*. 2003. V. 162. P. 10–21.
- Nakamura T., Noguchi T., Tanaka M., Zolensky M.E., Kimura M., Tsuchiyama A., Nakato A., Ogami T., Ishida H., Uesugi M., Yada T., Shirai K., Fujimura A., Okazaki R., Sandford S.A., Ishibashi Y., Abe M., Okada T., Ueno M., Mukai T., Yoshikawa M., Kawaguchi J. Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites // *Science*. 2011. V. 333. P. 1113–1116.
- Naraoka H., Takano Y., Dworkin J.P. Oba Y., Hamase K., Furusho A., Ogawa N.O., Hashiguchi M., Fukushima K., Aoki D., and 105 co-authors. Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu // *Science*. 2023. V. 379(6634). <https://doi.org/10.1126/science.abn9033>
- Noguchi T., Nakamura T., Kimura M., Zolensky M.E., Tanaka M., Hashimoto T., Konno M., Nakato A., Ogami T., Fujimura A., Abe M., Yada T., Mukai T., Ueno M., Okada T., Shirai K., Ishibashi Y., Okazaki R. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles // *Science*. 2011. V. 333. P. 1121–1125.
- Oba Y., Koga T., Takano Y. Ogawa N. O., Ohkouchi N., Sasaki K., Sato H., Glavin D. P., Dworkin J. P., Naraoka H., and 22 co-authors and Hayabusa2-initial analysis SOM team. Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu // *Nature Commun.* 2023. V. 14. P. 1292. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36904-3>
- Russell C.T., Raymond C.A., Coradini A., McSween H.Y., Zuber M.T., Nathues A., De Sanctis M.C., Jaumann R., Konopliv A.S., Preusker F., Asmar S.W., Park R.S., Gaskell R., Keller H.U., Mottola S., Roatsch T., Scully J.E.C., Smith D.E., Tricarico P., Toplis M.J., Christensen U.R., Feldman W.C., Lawrence D.J., McCoy T.J., Prettyman T.H., Reedy R.C., Sykes M.E., Titus T.N. Dawn at Vesta testing the protoplanetary paradigm // *Science*. 2012. V. 336. P. 684–686.
- Russell C.T., Raymond C.A., Ammannito E., Buczkowski D.L., De Sanctis M.C., Hiesinger H., Jaumann R., Konopliv A.S., McSween H.Y., Nathues A., Park R.S., Pieters C.M., Prettyman T.H., McCord T.B., McFadden L.A., Mottola S., Zuber M.T., Joy S.P., Polanskey C., Rayman M.D., Castillo-Rogez J.C., Chi P.J., Combe J.P., Ermakov A., Fu R.R., Hoffmann M., Jia Y.D., King S.D., Lawrence D.J., Li J.Y., Marchi S., Preusker F., Roatsch T., Ruesch O., Schenk P., Villarreal M.N., Yamashita N. Dawn arrives at Ceres: Exploration of a small volatile-rich world // *Science*. 2016. V. 353. P. 1008–1010.
- Roatsch Th., Kersten E., Matz K.-D., Preusker F., Scholten F., Jaumann R., Raymond C.A., Russell C.T. High resolution Vesta High Altitude Mapping Orbit (HAMO) atlas derived from Dawn framing camera images // *Planet. and Space Sci.* 2012. V. 73. P. 283–286.

- Roatsch Th., Kersten E., Matz K.-D., Preusker F., Jaumann R., Raymond C.A., Russell C.T.* High-resolution Vesta Low Altitude Mapping Orbit atlas derived from Dawn framing camera images // *Planet. and Space Sci.* 2013. V. 85. P. 293–298.
- Scott E.R.D., Wasson J.T.* Classification and properties of iron meteorites // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1975. V. 13. P. 527–546.
- Scott E.R.D.* Primary fractionation of elements among iron meteorites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1978. V. 42. P. 1447–1458.
- Shepard M.K., Clark B.E., Ockert-Bell M., Nolan M.C., Howell E.S., Magri C., Giorgini J.D., Benner L.A.M., Ostro S.J., Harris A.W., Warner B.D., Stephens R.D., Mueller M.* A radar survey of M- and X-class asteroids. II. Summary and synthesis // *Icarus.* 2010. V. 208. P. 221–237.
- Sierks H., Keller H.-U., Jaumann R., Michalik H., Behnke T, Bubenhausen F., Büttner I., Carsenty U., Christensen U., Enge R., Fiethe B., Gutierrez Marques P., Hartwig H., Krüger H., Kühne W., Maue T., Mottola S., Nathues A., Reiche K.-U., Richards M.L., Roatsch T., Schröder S.E., Szemeréy I., Tschentscher M.* The Dawn Framing Camera // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 163. P. 263–327.
- Simon A.A., Kaplan H.H., Hamilton V.E., Lauretta D.S., Campins H., Emery J.P., Barucci M.A., DellaGiustina D.N., Reuter D.C., Sandford S.A., Golish D.R., Lim L.F., Ryan A., Rozitis B., Bennett C.A.* Widespread carbon-bearing materials on near-Earth asteroid (101955) Bennu // *Science.* 2020. V. 370(6517). P. 1–8.
- Slyuta E.N., Voropaev S.A.* Gravitational deformation in shaping asteroids and small satellites // *Icarus.* 1997. V. 129. P. 401–414.
- Soderblom L.A., Boice D.C., Britt D., Brown R.H., Buratti B.J., Hicks J., Hillier M., Lee R., Meier R., Nelson J., Oberst T., Owen A., Rivkin W., Sandel A., Stern N., Thomas R., Yelle V.R.* Deep Space 1 MICAS observations of 9969 Braille // *Bull. Astron. Soc.* 1999. V. 31. № 4. P. 1127. id. 34.03.
- Tachibana S., Abe M., Arakawa M., Fujimoto M., Iijima Y., Ishiguro M., Kitazato K., Kobayashi N., Namiki N., Okada T., Okazaki R., Sawada H., Sugita S., Takano Y., Tanaka S., Watanabe S., Yoshikawa M., Kuninaka H.* The Hayabusa2 Project team. Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU3 // *Geochem. J.* 2014. V. 48(6). P. 571–587.
- 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.
- Tholen D.J., Barucci M.A.* Asteroids taxonomy // *Asteroids II* / Eds: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 298–315.
- Thomas C.A., Naidu S.P., Scheirich P., Moskovitz N. A., Pravec P., Chesley S. R., Rivkin A. S., Osip D. J., Lister T. A., Benner L.A.M., Brožović M., and 38 co-authors.* Orbital period change of Dimorphos due to the DART kinetic impact // *Nature.* 2023. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05805-2>
- Trombka J.I., Squyres S.W., Brückner J., Boynton W.V., Reedy R.C., McCoy T.J., Gorenstein P., Evans L.G., Arnold J.R., Starr R.D., Nittler L.R., Murphy M.E., Mikheeva I., McNutt R.L., McClanahan T.P., McCartney E., Goldsten J.O., Gold R.E., Floyd S.R., Clark P.E., Burbine T.H., Bhangoo J.S., Bailey S.H., Petaev M.* The elemental composition of Asteroid 433 Eros: Results of the NEAR-Shoemaker X-ray spectrometer // *Science.* 2000. V. 289. P. 2101–2105.
- Veverka J., Thomas P., Harch A., Clark B., Bell III J.F., Carcich B., Joseph J., Chapman C., Merline W., Robinson M., Malin M., McFadden L.A., Murchie S., Hawkins III S.E., Farquhar R., Izenberg N., Cheng A.* NEAR's flyby of 253 Mathilde: Images of a C asteroid // *Science.* 1997. V. 278. P. 2109–2114.
- Veverka J., Thomas P.C., Bell III J.F., Bell M., Carcich B., Clark B., Harch A., Joseph J., Martin P., Robinson M., Murchie S., Izenberg N., Hawkins E., Warren J., Farquhar R., Cheng A., Dunham D., Chapman C., Merline W.J., McFadden L., Wellnitz D., Malin M., Owen W.M., Jr., Miller J.K., Williams B.G., Yeomans D.K.* Imaging of asteroid 433 Eros during NEAR's flyby reconnaissance // *Science.* 1999. V. 285. P. 562–564.
- Veverka J., Farquhar B., Robinson M., Thomas P., Murchie S., Harch A., Antreasian P.G., Chesley S.R., Miller J.K., Owen W.M., Jr., Williams B.G., Yeomans D., Dunham D., Heyler G., Holdridge M., Nelson R.L., Whittenburg K.E., Ray J.C., Carcich B., Cheng A., Chapman C., Bell III J.F., Bell M., Bussey B., Clark B., Domingue D., Gaffey M.J., Hawkins E., Izenberg N., Joseph J., Kirk R., Lucey P., Malin M., McFadden L., Merlinek W.J., Peterson C., Prockter L., Warren J., Wellnitz D.* The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros // *Nature.* 2001. V. 413. P. 390–393.
- Wasserburg G.J., Sanz H.G., Bence A.E.* Potassium-feldspar phenocrysts in the surface of Colomera, an iron meteorite // *Science.* 1968. V. 161. P. 684–687.
- Wasson J.T.* The chemical classification of iron meteorites. 1. A study of iron meteorites with low concentrations of gallium and germanium // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1967. V. 31. P. 161–175.
- Wasson J.T., Kimberlin J.* The chemical classification of iron meteorites. 2. Irons and pallasites with germanium concentrations between 8 and 100 ppm // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1967. V. 31. P. 2065–2077.
- Wasson J.T.* The chemical classification of iron meteorites. 3. Hexahedrites and other irons with germanium concentrations between 80 and 200 ppm // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1969. V. 55. P. 859–874.
- Wasson J.T.* The chemical classification of iron meteorites. 4. Irons with Ge concentrations greater than 190 ppm and other meteorites associated with group I // *Icarus.* 1970a. V. 12. P. 407–423.
- Wasson J.T.* Ni, Ga, Ge and Ir in the metal of iron meteorites with silicate inclusions // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1970b. V. 34. P. 957–969.
- Wasson J.T., Schaudy R.* The chemical classification of iron meteorites. 5. Groups IIIc and III d and other irons with germanium concentrations between 1 and 25 ppm // *Icarus.* 1971. V. 14. P. 59–70.
- Wasson J.T.* Meteorites: Classification and properties // *Minerals and Rocks* V. 10. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1974. 327 p.
- Watanabe S., Hirabayashi M., Hirata N., Hirata Na., Noguchi R., Shimaki Y., Ikeda H., Tatsumi E., Yoshikawa M.,*

- Kikuchi S., and 78 co-authors.* Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu – A spinning top-shaped rubble pile // *Science*. 2019. V. 364. P. 268–272.
- Williams D.A., Buczkowski D.L., Mest S.C., Scully J.E.C., Platz T., Kneissl T.* Introduction: The geologic mapping of Ceres // *Icarus*. 2018. V. 316. P. 1–13.
- Yabuta H., Cody G.D., Engrand C., Kebukawa Y., De Gregorio B., Bona L., Remusat L., Stroud R., Quirico E., Nittler L., and 120 co-authors.* Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) Ryugu // *Science*. 2023. V. 379(6634). <https://doi.org/10.1126/science.abn9057>
- Yokoyama T., Nagashima K., Nakai I. Young E. D., Abe Y., Aléon J., Alexander C. M. O'D., Amari S., Amelin Y., Bajor K., and 139 co-authors.* Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites // *Science*. 2023. V. 379(6634). <https://doi.org/10.1126/science.abn7850>
- Zheng C., Ping J., Wang M.* Hierarchical classification for the topography analysis of asteroid (4179) Toutatis from the Chang'E-2 images // *Icarus*. 2016. V. 278. P. 119–127.
- Zuber M.T., Smith D.E., Cheng A.F., Garvin J.B., Aharonson O., Cole T.D., Dunn P.J., Guo Y., Lemoine F.G., Neumann G.A., Rowlands D.D., Torrence M.H.* The shape of 433 Eros from the NEAR-Shoemaker laser rangefinder // *Science*. 2000. V. 289. P. 2097–2101.