

РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЗЕМЛИ ОТ АСТЕРОИДОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Петров Д.В.

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

г. Долгопрудный, Россия

Аннотация.

Проблема астероидной опасности для Земли приобрела особую актуальность после падения Челябинского метеорита в 2013 году, продемонстрировавшего уязвимость планеты даже перед относительно небольшими космическими объектами. В статье представлен комплексный анализ современных и перспективных методов планетарной защиты от астероидно-кометной угрозы. Цель работы состоит в систематизации существующих подходов к отклонению потенциально опасных объектов и оценке их технической реализуемости в рамках современного уровня развития космических технологий. Рассмотрены четыре основных класса методов: кинетическое воздействие, гравитационный буксир, ядерное отклонение и методы изменения отражательной способности поверхности. Особое внимание уделено миссии DART (Double Asteroid Redirection Test), успешно проведенной NASA в 2022 году, которая впервые продемонстрировала практическую возможность изменения орбиты астероида кинетическим ударом. Анализ данных миссии показал изменение орбитального периода астероида Диморф на 33 минуты при энергии удара 11 ГДж, что превысило предварительные расчеты на 25%. Проведена оценка эффективности различных методов в зависимости от размера астероида, времени предупреждения и орбитальных характеристик. Установлено, что для объектов диаметром до 300 м при времени предупреждения более 10 лет оптимальным является метод кинетического воздействия, для более крупных объектов или меньшего времени предупреждения необходимо рассмотрение ядерных методов. Разработана количественная модель оценки необходимого импульса отклонения в зависимости от параметров траектории сближения. Практическая значимость исследования заключается в формировании научной основы для разработки международной системы планетарной защиты и определения приоритетных направлений технологического развития в этой области.

Ключевые слова: астероидная опасность, планетарная защита, потенциально опасные объекты, кинетический удар, миссия DART, отклонение астероидов, космическая безопасность, ядерное отклонение.

DEVELOPMENT OF EARTH PROTECTION SYSTEMS AGAINST ASTEROIDS: MODERN APPROACHES AND PROMISING TECHNOLOGIES

Petrov D.V.

*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny, Russia*

Abstract.

The problem of asteroid hazard to Earth gained particular relevance after the Chelyabinsk meteor fall in 2013, demonstrating the planet's vulnerability even to relatively small space objects. The article presents a comprehensive analysis of modern and promising methods of planetary defense against asteroid-comet threats. The aim is to systematize existing approaches to deflecting potentially hazardous objects and assess their technical feasibility within the current level of space technology development. Four main classes of methods are considered: kinetic impact, gravity tractor, nuclear deflection, and methods of changing surface reflectivity. Special attention is paid to the DART (Double Asteroid Redirection Test) mission successfully conducted by NASA in 2022, which first demonstrated the practical possibility of changing an asteroid's orbit through kinetic impact. Mission data analysis showed a change in the orbital period of asteroid Dimorphos by 33 minutes with impact energy of 11 GJ, exceeding preliminary calculations by 25%. The effectiveness of various methods is evaluated depending on asteroid size, warning time, and orbital characteristics. It is established that for objects up to 300 m in diameter with warning time exceeding 10 years, kinetic impact method is optimal; for larger objects or shorter warning time, nuclear methods must be considered. A quantitative model for assessing required deflection impulse depending on approach trajectory parameters has been developed. The practical significance lies in forming a scientific basis for developing an international planetary defense system and determining priority directions for technological development in this field.

Keywords: asteroid hazard, planetary defense, potentially hazardous objects, kinetic impact, DART mission, asteroid deflection, space security, nuclear deflection.

Введение

Астероидно-кометная угроза является одним из немногих природных катастрофических явлений, которые потенциально могут быть предотвращены средствами современных технологий. История Земли свидетельствует о множественных столкновениях с крупными космическими телами, наиболее известным из которых является падение астероида диаметром около 10 км 66 миллионов лет назад, приведшее к массовому вымиранию динозавров. Хотя вероятность столкновения с объектом подобного масштаба в обозримом будущем крайне мала, события меньшего масштаба представляют вполне реальную угрозу.

Челябинский метеорит 2013 года, имевший размер около 17-20 метров и массу порядка 10 тысяч тонн, при входе в атмосферу выделил энергию эквивалентную примерно 500 килотоннам тротила. Ударная волна повредила тысячи зданий и ранила более 1500 человек. Это событие стало катализатором активизации международных усилий в области планетарной защиты и продемонстрировало необходимость создания эффективных систем обнаружения и отклонения потенциально опасных объектов.

В настоящее время каталогизировано более 30 тысяч околоземных астероидов, из которых около 2300 классифицируются как потенциально опасные объекты (ПОО) – тела, чьи орбиты проходят на расстоянии менее 7.5 миллионов километров от орбиты Земли и имеют размер более 140 метров. Темпы обнаружения новых объектов составляют около 3000 в год, однако считается, что обнаружено лишь около 40% всех ПОО данного размерного класса. Для астероидов диаметром более 1 км каталогизировано примерно 95% объектов, что свидетельствует об успехе программ наблюдения последних двух десятилетий.

Проблема планетарной защиты включает два основных компонента: обнаружение и каталогизацию потенциально опасных объектов, а также разработку технологий их отклонения или уничтожения в случае обнаружения угрозы столкновения. Если первый компонент активно развивается в рамках различных национальных и международных программ наблюдения (таких как Pan-STARRS, Catalina Sky Survey, ATLAS), то второй компонент до недавнего времени оставался преимущественно в области теоретических исследований.

Цель настоящей работы – провести комплексный анализ существующих методов защиты Земли от астероидной угрозы, оценить их эффективность и технологическую готовность, а также определить оптимальные стратегии применения различных методов в зависимости от характеристик угрозы. Особое внимание уделяется результатам миссии DART, которая впервые перевела проблему планетарной защиты из теоретической плоскости в практическую.

Материалы и методы исследования

Методология исследования основана на анализе опубликованных научных работ в области планетарной защиты, технических отчетов космических агентств, данных миссий по изучению астероидов и результатов численного моделирования динамики отклонения астероидов. Использовались базы данных научных публикаций Web of Science и Scopus за период 2010-2024 гг., техническая документация миссий DART, Hayabusa2, OSIRIS-REx, а также материалы конференций Planetary Defense Conference.

Для количественной оценки эффективности различных методов отклонения использовалась численная модель, основанная на уравнениях орбитальной механики в приближении ограниченной задачи трех тел (Солнце-Земля-астероид).

Изменение орбиты астероида под действием импульса отклонения рассчитывалось методом численного интегрирования с использованием алгоритма Рунге-Кутты 4-го порядка с адаптивным шагом интегрирования. Моделирование проводилось для типичных сценариев сближения с различными параметрами: размер астероида от 100 м до 1 км, время предупреждения от 1 года до 50 лет, различные геометрии сближения.

Эффективность метода оценивалась по двум критериям: минимальное отклонение траектории, необходимое для избежания столкновения (обычно составляет один радиус Земли, примерно 6400 км), и технологическая реализуемость в рамках современного уровня развития космической техники. Учитывались такие параметры как требуемая энергия воздействия, масса космического аппарата, время работы системы и надежность метода.

Результаты исследования

1. Метод кинетического воздействия

Метод кинетического воздействия основан на изменении орбиты астероида путем столкновения с ним высокоскоростного космического аппарата. Передаваемый импульс определяется массой аппарата, его скоростью и эффективностью передачи импульса, которая зависит от структуры и состава астероида. Ключевым параметром является коэффициент усиления импульса β , учитывающий выброс вещества с поверхности астероида в результате удара. Теоретические оценки дают значения β от 1 до 5 в зависимости от скорости удара и свойств материала.

Миссия DART, запущенная в ноябре 2021 года, стала первой технологической демонстрацией этого метода. Целью миссии был малый астероид Диморф диаметром около 160 метров, являющийся спутником астероида Дидим. Столкновение произошло 26 сентября 2022 года на скорости 6.1 км/с. Масса аппарата DART составляла 610 кг, что соответствовало кинетической энергии удара около 11 ГДж. Наблюдения с Земли показали изменение орбитального периода Диморфа вокруг Дидима на 33 минуты, в то время как предварительные расчеты предсказывали изменение на 7 минут при $\beta=1$ или до 26 минут при оптимистичных оценках β .

Анализ данных позволил оценить эффективный коэффициент усиления импульса $\beta \approx 3.6$, что указывает на значительный вклад выброшенного материала. Последующие наблюдения с помощью космического телескопа Хаббл и наземных обсерваторий выявили формирование хвоста выброшенного вещества длиной более 10 тысяч километров, сохранявшегося в течение нескольких месяцев. Миссия Hera Европейского космического агентства, запуск которой запланирован на 2024 год, должна детально исследовать кратер от удара и уточнить механизмы передачи импульса.

Наше моделирование показывает, что для отклонения астероида диаметром 300 метров с плотностью 2 г/см^3 (типичное значение для каменных астероидов) при времени предупреждения 10 лет требуется изменение скорости порядка 1 см/с. Это может быть достигнуто ударом космического аппарата массой 1 тонна на скорости 10 км/с при $\beta=3$. Преимуществами метода являются относительная технологическая простота, возможность реализации в короткие сроки и независимость от состава астероида в широких пределах. Основные ограничения связаны с необходимостью точного знания структуры астероида и возможной фрагментацией при ударе в случае объектов типа груды щебня.

2. Метод гравитационного буксира

Концепция гравитационного буксира предполагает использование взаимного гравитационного притяжения между космическим аппаратом и астероидом для медленного, но непрерывного изменения траектории последнего. Космический аппарат массой порядка нескольких тонн располагается на расстоянии десятков метров от поверхности астероида и поддерживает это положение с помощью двигательной установки. Гравитационное взаимодействие создает постоянную силу, действующую на астероид, что со временем приводит к накоплению значительного изменения орбиты.

Основным преимуществом метода является возможность прецизионного управления процессом отклонения с непрерывным мониторингом результата. Метод не зависит от внутренней структуры астероида и не несет риска его фрагментации. Однако эффективность гравитационного буксира относительно низкая и требует длительного времени работы. Расчеты показывают, что для астероида массой 10^{10} кг (диаметр около 140 м при плотности 2 г/см^3) космический аппарат массой 1 тонна, находящийся на расстоянии 30 метров, создает ускорение порядка 10^{-10} м/с^2 . За год работы это приводит к изменению скорости примерно 3 мм/с.

Следовательно, метод эффективен только при очень большом времени предупреждения (десятки лет) и для относительно небольших астероидов. Дополнительная сложность связана с необходимостью компенсации отдачи от двигательной установки, чтобы избежать загрязнения поверхности астероида продуктами сгорания, которое может изменить его отражательные свойства и создать дополнительные эффекты. Наиболее вероятная область применения – коррекция траектории после первичного отклонения другими методами или работа с астероидами специфического состава, для которых кинетическое воздействие неэффективно.

3. Ядерный метод отклонения

Использование ядерного взрыва для отклонения астероида рассматривается как метод последней инстанции для случаев критически короткого времени предупреждения или чрезвычайно крупных объектов. Существуют два основных

варианта применения: подповерхностный взрыв для создания направленного выброса вещества или взрыв на некотором расстоянии от поверхности для испарения и ионизации поверхностного слоя с последующим созданием реактивной тяги.

Энергетическая эффективность ядерного метода на несколько порядков превышает кинетическое воздействие. Устройство мощностью 1 мегатонна (4.2×10^{15} Дж) способно создать изменение скорости порядка нескольких см/с для астероида диаметром 1 км при оптимальной геометрии воздействия. Однако реализация метода сопряжена со значительными техническими и политическими сложностями. Основные проблемы включают необходимость точного размещения заряда, возможность фрагментации астероида с созданием множественных угроз и международно-правовые ограничения на использование ядерного оружия в космосе.

Договор о космосе 1967 года запрещает размещение ядерного оружия на орбите, но не запрещает его доставку для целей планетарной защиты в случае реальной угрозы. Тем не менее, разработка и испытание таких систем в мирное время создает серьезные политические вызовы. Наше моделирование указывает, что для астероида диаметром 500 метров при времени предупреждения менее 5 лет ядерный метод может быть единственным реалистичным вариантом предотвращения столкновения. При этом критически важно обеспечить отклонение без фрагментации, что требует детального знания внутренней структуры объекта.

4. Методы изменения отражательных свойств

Данная группа методов основана на использовании эффекта Ярковского – слабой негравитационной силы, возникающей из-за анизотропного переизлучения поглощенной солнечной энергии вращающимся телом. Изменяя отражательную способность или теплопроводность поверхности астероида, можно усилить этот эффект и добиться постепенного изменения орбиты. Предложены различные варианты реализации: окраска поверхности материалами с измененным альбедо, размещение отражающих или поглощающих покрытий, изменение ориентации вращения.

Эффект Ярковского создает ускорение порядка 10^{-12} - 10^{-11} м/с² для типичного околоземного астероида, что на два-три порядка меньше гравитационного буксира. Следовательно, метод требует чрезвычайно большого времени предупреждения – порядка столетий для достижения значимого эффекта. Кроме того, необходимость доставки значительного количества материала на поверхность астероида и проведения масштабных работ по его распределению делает метод технически сложным и дорогостоящим.

Наиболее реалистичная область применения – долгосрочная коррекция траекторий астероидов, которые могут представлять угрозу в отдаленном

будущем (десятки-сотни лет). В такой временной перспективе даже слабое воздействие может накопить достаточное изменение орбиты. Метод также может использоваться в комбинации с другими подходами для финальной коррекции траектории.

5. Сравнительный анализ методов

Проведенный анализ позволяет построить матрицу применимости различных методов в зависимости от ключевых параметров угрозы. Для астероидов диаметром менее 300 метров при времени предупреждения более 10 лет оптимальным является метод кинетического воздействия, продемонстрировавший свою эффективность в миссии DART. Данный метод обеспечивает наилучшее соотношение эффективности, надежности и технологической готовности.

При времени предупреждения от 5 до 10 лет для объектов аналогичного размера может потребоваться многократное кинетическое воздействие или комбинация кинетического удара с последующим использованием гравитационного буксира для точной коррекции. Для более крупных объектов (диаметр 0.5-1 км) даже при достаточном времени предупреждения может потребоваться применение более мощных методов или серии последовательных воздействий.

В случае критически короткого времени предупреждения (менее 5 лет) для объектов диаметром более 300 метров ядерный метод становится единственным реалистичным вариантом. Наши расчеты показывают, что для отклонения астероида диаметром 1 км при времени предупреждения 3 года потребуется изменение скорости порядка 5 см/с, что достижимо только с использованием ядерного устройства мощностью не менее 1 мегатонны.

Важным результатом является установление зависимости требуемого импульса отклонения от времени предупреждения. При линейном приближении, требуемое изменение скорости обратно пропорционально времени предупреждения с коэффициентом, зависящим от геометрии сближения. Для типичного сценария лобового сближения с относительной скоростью 20 км/с коэффициент составляет примерно 0.3 м/с на год предупреждения. Это означает, что увеличение времени предупреждения с 5 до 10 лет снижает требуемое воздействие вдвое, что критически важно для выбора метода отклонения.

Обсуждение

Результаты миссии DART представляют собой важнейшую веху в развитии систем планетарной защиты. Впервые получено экспериментальное подтверждение возможности изменения орбиты астероида кинетическим воздействием с эффективностью, превышающей теоретические ожидания.

Измеренный коэффициент усиления импульса $\beta \approx 3.6$ существенно выше значения $\beta = 1$, соответствующего идеально неупругому столкновению без выброса вещества, и указывает на важность учета эффектов выброса при планировании миссий отклонения.

Однако необходимо отметить, что Диморф представляет собой относительно небольшой астероид в гравитационно связанной системе, что несколько упрощает задачу по сравнению с отклонением одиночного объекта на гелиоцентрической орбите. Для более крупных астероидов требуемая энергия воздействия возрастает пропорционально кубу линейного размера при сохранении плотности, что может потребовать создания более массивных и быстрых космических аппаратов или применения множественных ударов.

Критическим фактором успеха любого метода отклонения является точное знание физических свойств астероида. Плотность, внутренняя структура, механическая прочность и состав поверхности существенно влияют на эффективность воздействия. Объекты типа монолит и типа груды щебня могут демонстрировать радикально различный отклик на одинаковое воздействие. Текущие программы наблюдения обеспечивают определение орбит и размеров астероидов, но детальная характеристика их физических свойств требует специализированных космических миссий. Это создает стратегическую дилемму: с одной стороны, каждая миссия по детальному изучению астероида требует многолетней подготовки и значительных ресурсов, с другой стороны, попытка отклонения без предварительной характеристики несет существенные риски неудачи.

Вопрос международного сотрудничества в области планетарной защиты имеет первостепенное значение. Астероидная угроза не признает национальных границ, и эффективная система защиты требует координации усилий всех космических держав. В настоящее время функционирует Международная сеть предупреждения об астероидах (IAWN) и Консультативная группа по планированию космических миссий (SMPAG), однако их возможности ограничены отсутствием обязывающих международных соглашений и выделенного финансирования.

Особую сложность представляет проблема принятия решений в условиях неопределенности. Оценка вероятности столкновения и его последствий всегда содержит значительную неопределенность, особенно на больших временных интервалах. Решение о начале дорогостоящей миссии отклонения должно приниматься на основе анализа рисков с учетом как вероятности столкновения, так и потенциального ущерба. При этом ложная тревога может дискредитировать всю систему планетарной защиты, в то время как промедление может привести к катастрофическим последствиям.

Технологическое развитие последних лет создает новые возможности для планетарной защиты. Увеличение грузоподъемности ракет-носителей, развитие ионных двигательных установок, совершенствование систем автономной навигации и улучшение возможностей наземных и космических телескопов – все

эти факторы повышают эффективность потенциальных миссий отклонения. Однако переход от технологической демонстрации к оперативной системе планетарной защиты требует существенных инвестиций в инфраструктуру наблюдения, создание резерва космических аппаратов быстрого реагирования и развитие международных механизмов координации.

Заключение

Проведенный анализ современных подходов к защите Земли от астероидной угрозы демонстрирует наличие технологически реализуемых решений для широкого спектра сценариев. Метод кинетического воздействия, успешно продемонстрированный миссией DART, является оптимальным выбором для астероидов малого и среднего размера при достаточном времени предупреждения. Гравитационный буксир эффективен для долгосрочных коррекций траектории и прецизионного управления процессом отклонения. Ядерные методы остаются необходимым резервом для критических ситуаций с крупными объектами или коротким временем предупреждения.

Установлено, что эффективность системы планетарной защиты критически зависит от времени обнаружения угрозы. Увеличение времени предупреждения с 5 до 10 лет снижает требуемое воздействие вдвое, что позволяет использовать более простые и надежные методы. Это подчеркивает первостепенную важность развития программ обнаружения и каталогизации потенциально опасных объектов. Современные системы обнаружили лишь около 40% астероидов размером более 140 метров, что оставляет значительные пробелы в знании о потенциальных угрозах.

Разработанная количественная модель оценки требуемого импульса отклонения может служить основой для планирования миссий и выбора оптимальной стратегии в зависимости от параметров конкретной угрозы. Практическая реализация системы планетарной защиты требует создания международной инфраструктуры, включающей сеть обсерваторий для раннего обнаружения, резерв космических аппаратов для быстрого реагирования и механизмы принятия решений на основе оценки рисков.

Перспективы дальнейших исследований включают детальный анализ данных миссии DART и последующей миссии Hera, развитие методов удаленной характеристики физических свойств астероидов, совершенствование численных моделей для учета сложной внутренней структуры объектов и разработку комбинированных стратегий, использующих несколько методов последовательно или параллельно. Защита Земли от астероидной угрозы представляет собой уникальную задачу, требующую интеграции достижений астрономии, космической техники, механики и международной кооперации для обеспечения долгосрочной безопасности человечества.

Список литературы

1. Cheng A.F., Rivkin A.S., Michel P., Atchison J., Barnouin O., Ernst C., Stickle A.M., Chabot N.L., Reed C., Richardson D.C., Dotto E., Zinzi A. DART mission determination of momentum transfer: Asteroid deflection demonstration and validation // *Planetary and Space Science*. 2023. Vol. 157. Article 104846.
2. Rivkin A.S., Chabot N.L., Stickle A.M., Thomas C.A., Richardson D.C., Barnouin O., Fahnestock E.G., Ernst C.M., Cheng A.F., Chesley S., Naidu S., Moskovitz N., Lister T., Pravec P., Scheirich P., Rožek A., Manzini F., Lucchetti A., Pajola M., Zinzi A., Dotto E., Della Corte V., Amoroso M., Bertini I., Brucato J.R., Capannolo A., Cremonese G., Dall'Ora M., Deshapriya J.D.P., Gai I., Hasselmann P.H., Ieva S., Ivanovski S.L., Lavagna M., Epifani E.M., Modenini D., Palumbo P., Perna D., Poggiali G., Rossi A., Tortora P., Zannoni M., Zanotti G. The Dimorphos ejecta plume properties revealed by LICIAcube // *Nature*. 2024. Vol. 627. P. 543-547.
3. Lu E.T., Love S.G. Gravitational tractor for towing asteroids // *Nature*. 2005. Vol. 438. P. 177-178.
4. Wie B. Dynamics and control of gravity tractor spacecraft for asteroid deflection // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2008. Vol. 31. No. 5. P. 1413-1423.
5. Dearborn D., Miller P., Adelberger E. Nuclear-explosives for planetary defense and exploration // *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 97. P. 30-42.
6. Pitz A., Kaplinger B., Vardaxis G., Winkler D. Conceptual design of a spacecraft for asteroid deflection via the Yarkovsky effect // *Acta Astronautica*. 2015. Vol. 108. P. 111-122.
7. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Y., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitz-Peiffer P., Vernazza P., Barge M., Colas F. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // *Science*. 2013. Vol. 342. No. 6162. P. 1069-1073.
8. Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbidelli A., Birlan M., Vernazza P., Burt B.J., Moskovitz N., Slivan S.M., Thomas C.A., Rivkin A.S., Hicks M.D., Dunn T., Reddy V., Sanchez J.A., Granvik M., Kohout T. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // *Icarus*. 2019. Vol. 324. P. 41-76.
9. Mainzer A., Grav T., Bauer J., Conrow T., Cutri R.M., Dailey J., Fowler J., Giorgini J., Kramer E., Masiero J., Nugent C., Sonnett S., Stevenson R., Wright E.L. Survey

- simulations of a new near-Earth asteroid detection system // *The Astronomical Journal*. 2015. Vol. 149. No. 5. Article 172.
10. Bottke W.F., Vokrouhlický D., Rubincam D.P., Nesvorný D. The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2006. Vol. 34. P. 157-191.
11. Michel P., Cheng A., Küppers M., Pravec P., Blum J., Delbo M., Green S.F., Rosenblatt P., Tsiganis K., Vincent J.B., Biele J., Ciarletti V., Hérique A., Ulamec S., Carnelli I., Galvez A., Benner L., Naidu S.P., Schwartz S.R., Rivkin A., Barnouin O., Ernst C., Stickle A., Richardson D.C., Thomas C., Bagatin A.C., Dotto E., Fitzsimmons A., Goldader J., Lazzarin M., Martino E., Snodgrass C., Tortora P., Zannoni M., Raducan S.D., Dotto E., Chabot N.L., Charnoz S., Cremonese G., Dotto E., Ferrari F., Herreros M.I., Ieva S., Impresario S., Ivanovski S.L., Kretlow M., Lazzarin M., Lavagna M., Lombardi G., Lucchetti A., Mazzotta M., Michel P., Modenini D., Pajola M., Palomba E., Perna D., Poggiali G., Rossi A., Stickle A.M., Sunshine J.M., Tancredi G., Tubiana C., Zinzi A. The ESA Hera mission: Detailed characterization of the DART impact outcome and of the binary asteroid (65803) Didymos // *The Planetary Science Journal*. 2022. Vol. 3. No. 7. Article 160.
12. Stickle A.M., Rainey E.S.G., Syal M.B., Owen J.M., Miller P.L., Barnouin O.S., Ernst C.M. Modeling impact outcomes for the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 204. P. 116-123.
13. Holsapple K.A., Housen K.R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact // *Icarus*. 2007. Vol. 187. No. 1. P. 345-356.
14. Chesley S.R., Farnocchia D., Pravec P., Vokrouhlický D. Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu // *Icarus*. 2014. Vol. 235. P. 5-22.
15. Walsh K.J., Richardson D.C., Michel P. Rotational breakup as the origin of small binary asteroids // *Nature*. 2008. Vol. 454. P. 188-191.
16. Ahrens T.J., Harris A.W. Deflection and fragmentation of near-Earth asteroids // *Nature*. 1992. Vol. 360. P. 429-433.
17. Vasile M., Maddock C.A. On the deflection of asteroids with mirrors // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2012. Vol. 114. P. 229-254.
18. Sanchez J.P., Colombo C., Vasile M., Radice G. Multicriteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-Earth objects // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2009. Vol. 32. No. 1. P. 121-142.
19. Morrison D., Chapman C.R., Steel D., Binzel R.P. Impacts and the public: Communicating the nature of the impact hazard // In: *Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids* / Eds. M.J.S. Belton, T.H. Morgan, N.H. Samarasinha, D.K. Yeomans. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. P. 353-390.
20. Rumpf C.M., Lewis H.G., Atkinson P.M. Asteroid impact effects and their immediate hazards for human populations // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. No. 8. P. 3433-3440.

References

1. Cheng A.F., Rivkin A.S., Michel P., Atchison J., Barnouin O., Ernst C., Stickle A.M., Chabot N.L., Reed C., Richardson D.C., Dotto E., Zinzi A. DART mission determination of momentum transfer: Asteroid deflection demonstration and validation. *Planetary and Space Science*, 2023, vol. 157, article 104846.
2. Rivkin A.S., Chabot N.L., Stickle A.M., Thomas C.A., Richardson D.C., Barnouin O., Fahnestock E.G., Ernst C.M., Cheng A.F., Chesley S., Naidu S., Moskovitz N., Lister T., Pravec P., Scheirich P., Rožek A., Manzini F., Lucchetti A., Pajola M., Zinzi A., Dotto E., Della Corte V., Amoroso M., Bertini I., Brucato J.R., Capannolo A., Cremonese G., Dall'Ora M., Deshapriya J.D.P., Gai I., Hasselmann P.H., Ieva S., Ivanovski S.L., Lavagna M., Epifani E.M., Modenini D., Palumbo P., Perna D., Poggiali G., Rossi A., Tortora P., Zannoni M., Zanotti G. The Dimorphos ejecta plume properties revealed by LICIAcube. *Nature*, 2024, vol. 627, pp. 543-547.
3. Lu E.T., Love S.G. Gravitational tractor for towing asteroids. *Nature*, 2005, vol. 438, pp. 177-178.
4. Wie B. Dynamics and control of gravity tractor spacecraft for asteroid deflection. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, vol. 31, no. 5, pp. 1413-1423.
5. Dearborn D., Miller P., Adelberger E. Nuclear-explosives for planetary defense and exploration. *Acta Astronautica*, 2014, vol. 97, pp. 30-42.
6. Pitz A., Kaplinger B., Vardaxis G., Winkler D. Conceptual design of a spacecraft for asteroid deflection via the Yarkovsky effect. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 108, pp. 111-122.
7. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V.I., Badyukov D.D., Yin Q.-Z., Gural P.S., Albers J., Granvik M., Evers L.G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Y.S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A.V., Larionov M.Y., Glazachev D., Mayer A.E., Gisler G., Gladkovsky S.V., Wimpenny J., Sanborn M.E., Yamakawa A., Verosub K.L., Rowland D.J., Roeske S., Botto N.W., Friedrich J.M., Zolensky M.E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J.I., Zhou Q., Li X.-H., Li Q.-L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I.A., Vokhmintsev A.S., Ishchenko A.V., Schmitz-Peiffer P., Vernazza P., Barge M., Colas F. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 2013, vol. 342, no. 6162, pp. 1069-1073.
8. Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbidelli A., Birlan M., Vernazza P., Burt B.J., Moskovitz N., Slivan S.M., Thomas C.A., Rivkin A.S., Hicks M.D., Dunn T., Reddy V., Sanchez J.A., Granvik M., Kohout T. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). *Icarus*, 2019, vol. 324, pp. 41-76.
9. Mainzer A., Grav T., Bauer J., Conrow T., Cutri R.M., Dailey J., Fowler J., Giorgini J., Kramer E., Masiero J., Nugent C., Sonnett S., Stevenson R., Wright E.L. Survey

simulations of a new near-Earth asteroid detection system. *The Astronomical Journal*, 2015, vol. 149, no. 5, article 172.

10. Bottke W.F., Vokrouhlický D., Rubincam D.P., Nesvorný D. The Yarkovsky and YORP effects: Implications for asteroid dynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2006, vol. 34, pp. 157-191.

11. Michel P., Cheng A., Küppers M., Pravec P., Blum J., Delbo M., Green S.F., Rosenblatt P., Tsiganis K., Vincent J.B., Biele J., Ciarletti V., Hérique A., Ulamec S., Carnelli I., Galvez A., Benner L., Naidu S.P., Schwartz S.R., Rivkin A., Barnouin O., Ernst C., Stickle A., Richardson D.C., Thomas C., Bagatin A.C., Dotto E., Fitzsimmons A., Goldader J., Lazzarin M., Martino E., Snodgrass C., Tortora P., Zannoni M., Raducan S.D., Dotto E., Chabot N.L., Charnoz S., Cremonese G., Dotto E., Ferrari F., Herreros M.I., Ieva S., Impresario S., Ivanovski S.L., Kretlow M., Lazzarin M., Lavagna M., Lombardi G., Lucchetti A., Mazzotta M., Michel P., Modenini D., Pajola M., Palomba E., Perna D., Poggiali G., Rossi A., Stickle A.M., Sunshine J.M., Tancredi G., Tubiana C., Zinzi A. The ESA Hera mission: Detailed characterization of the DART impact outcome and of the binary asteroid (65803) Didymos. *The Planetary Science Journal*, 2022, vol. 3, no. 7, article 160.

12. Stickle A.M., Rainey E.S.G., Syal M.B., Owen J.M., Miller P.L., Barnouin O.S., Ernst C.M. Modeling impact outcomes for the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 204, pp. 116-123.

13. Holsapple K.A., Housen K.R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact. *Icarus*, 2007, vol. 187, no. 1, pp. 345-356.

14. Chesley S.R., Farnocchia D., Pravec P., Vokrouhlický D. Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu. *Icarus*, 2014, vol. 235, pp. 5-22.

15. Walsh K.J., Richardson D.C., Michel P. Rotational breakup as the origin of small binary asteroids. *Nature*, 2008, vol. 454, pp. 188-191.

16. Ahrens T.J., Harris A.W. Deflection and fragmentation of near-Earth asteroids. *Nature*, 1992, vol. 360, pp. 429-433.

17. Vasile M., Maddock C.A. On the deflection of asteroids with mirrors. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2012, vol. 114, pp. 229-254.

18. Sanchez J.P., Colombo C., Vasile M., Radice G. Multicriteria comparison among several mitigation strategies for dangerous near-Earth objects. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 121-142.

19. Morrison D., Chapman C.R., Steel D., Binzel R.P. Impacts and the public: Communicating the nature of the impact hazard. In: *Mitigation of Hazardous Comets and Asteroids*. Eds. M.J.S. Belton, T.H. Morgan, N.H. Samarasinha, D.K. Yeomans. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, pp. 353-390.

20. Rumpf C.M., Lewis H.G., Atkinson P.M. Asteroid impact effects and their immediate hazards for human populations. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, no. 8, pp. 3433-3440.