

УДК 523

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ЗАЩИТЕ ЗЕМЛИ ОТ КОСМИЧЕСКИХ УГРОЗ

А. В. Волков, В. А. Острейковский

*Сургутский государственный университет,
volkov@1creator.ru*

В статье рассмотрены глобальная проблема астероидно-кометной опасности и поэтапная защита Земли от космических угроз. Приведен краткий обзор развития технологий обнаружения опасных небесных тел; описаны проекты, по итогам реализации которых достигнуты важные результаты; а также обозначены ключевые страны и организации, занимающиеся проблемой защиты Земли.

Отдельно рассматриваются концепции технологий обнаружения и отражения астероидно-кометной опасности, предложенные учеными разных стран. Выполнена классификация существующих концепций по эшелону применения и способу отклонения опасного небесного тела от траектории столкновения с Землей.

Ключевые слова: космическая угроза, опасное небесное тело, защита Земли, астероидно-кометная опасность, система поражения астероидов.

REVIEW OF MODERN APPROACHES TO EARTH PROTECTION FROM SPACE THREATS

A. V. Volkov, V. A. Ostreikovsky

*Surgut State University,
volkov@1creator.ru*

The article considers the global problem of asteroid–comet hazard and graded protection of the Earth from space threats. A brief review of the development of technologies for detecting dangerous celestial bodies is given; projects, the implementation of which achieved important results are described, as well as major countries and organizations involved in the protection of the Earth are pointed out.

The concepts of technologies for the detection and elimination of asteroid–comet hazard, proposed by scientists from different countries, are considered separately. The classification of existing concepts by the level of application and the method of deviation of a dangerous celestial body from the trajectory of collision with the Earth is done.

Keywords: space threat, dangerous celestial body, Earth protection, asteroid–comet hazard, asteroid destruction system.

Введение. Нельзя возразить тому факту, что защита Земли от космических угроз является одной из самых важных проблем человечества. Падение на Землю астероида диаметром больше 1 км приведет к глобальной катастрофе, а астероиды меньшего диаметра могут вызвать локальные и региональные катастрофы.

На сегодняшний день насчитывается свыше 11 тысяч космических объектов, сближающихся с Землей. Из них 863 астероида имеют диаметр свыше 1 км [1]. При этом есть вероятность существования меньших астероидов, обнаружить которые значительно труднее, так как телескопы Земли спроектированы для обнаружения больших астероидов.

В истории насчитывается не так много случаев, когда астероид получилось обнаружить до падения на Землю. Например, 7 октября 2008 г. был обнаружен астероид (идентификатор – 2008 TC₃) диаметром 4 м всего за 19 ч до столкновения с Землей. Еще одним случа-

ем обнаружения астероида (2014 AA) является событие 2 января 2014 г. [2], когда астероид диаметром 2–4 м обнаружили примерно за 21 ч до входа в атмосферу. А в июне 2018 г. космический объект (2018 LA) диаметром 2 м был обнаружен всего за несколько часов до попадания в атмосферу Земли.

Все три случая не вызвали больших повреждений и последствий, так как метеориты имели малый диаметр. Хотя, например, в г. Челябинске в 2013 году, когда астероид диаметром около 17 м, не обнаруженный до момента входа в атмосферу, достиг Земли, пострадали более полутора тысяч человек [3]. По оценкам национального управления по авиации и исследованию космического пространства NASA США, это самое большое из известных небесных тел, падавших на Землю после Тунгусского метеорита в 1908 г. [4].

Следует учитывать, что астероиды даже малого диаметра способны причинить колоссальный ущерб в том случае, если место падения астероида придется на критически важный объект. Так, падение небольшого астероида на ядерный или биологически-опасный объект будет являться уже не локальной, а глобальной катастрофой. А поражение зданий аппаратов высших органов государственной власти и управления может на время парализовать управление страной.

По словам директора корпорации «Роскосмос» А. Н. Иванова, на 2016 г. у человечества не существовало технологий, позволяющих отражать астероиды [5]. Основное число разработок в этой области было направлено на своевременное обнаружение крупных космических объектов.

В XXI веке проводилось большое количество научно-исследовательских работ, направленных на изучение вопроса обнаружения опасных небесных тел (далее – ОНТ) и систем защиты Земли от космических угроз (далее – СЗЗКУ). Исследователи многих стран выдвинули свои концепции СЗЗКУ, но на сегодняшний день в России не существует утвержденного к реализации проекта (по открытым данным), вероятно, из-за неоднозначного преимущества той или иной системы и огромных экономических затрат. Целью настоящей статьи является краткий обзор упомянутых работ и выделение ключевых преимуществ и недостатков каждой из них.

Этапы защиты Земли от опасных небесных тел. Процесс защиты Земли от космических угроз (далее – КУ) можно описать следующими этапами:

1. Обнаружение опасных объектов, сближающихся с Землей (далее – ОСЗ).
2. Расчёт траектории и вероятности столкновения с Землей.
3. Оценка последствий и минимизация рисков.
4. Противодействие ОСЗ (в случае риска для населения).

Обнаружение объектов, сближающихся с Землей. Своевременное обнаружение ОСЗ является первым шагом для успешного отражения космической угрозы (далее – КУ). Член-корреспондент РАН В. В. Лебедев в своей работе [6] описал обсерватории, с помощью которых обнаруживается и каталогизируется большая часть ОНТ. На территории России, например, еще со времен СССР располагается широкая сеть, состоящая примерно из 70 телескопов, предназначенных для обнаружения ОНТ. Ввиду того, что в течение времени эти телескопы не модернизировались, Россия на сегодняшний день отстает в области обнаружения ОНТ от других стран. К примеру, в России самый крупный оптический телескоп – «большой телескоп азимутальный» (начал работать в 1975 г.) диаметром всего 6 м, в то время как в других странах используются телескопы диаметром 10–12 м.

Организация «Центр малых планет» при содействии Международного астрономического союза собирает и систематизирует данные наблюдений малых тел Солнечной системы, в том числе комет, вычисляет их орбиты и публикует эту информацию в циркуляре малых планет. На сегодняшний день в реестре потенциально опасных объектов (далее – ПОО) содержится 1972 объекта [7]. Как видно из рис. 1, их обнаружение получило широкое развитие в 1995 году, что связано с открытием лаборатории LINEAR – совместного проекта ВВС США, NASA и лаборатории Линкольна Массачусетского технологического института.

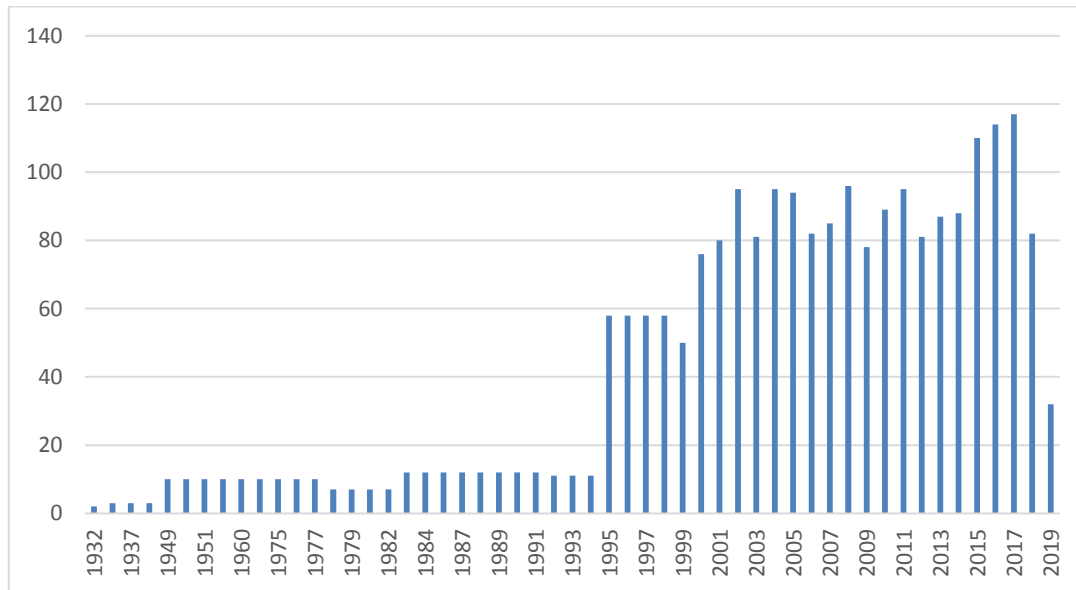


Рис. 1. Количество обнаруженных ПОО в разные годы

Помимо LINEAR хорошими результатами обнаружения ПОО отличаются следующие проекты:

1. Catalina – обсерватория Steward Аризонского университета.
2. NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking) – проект Лаборатории реактивного движения NASA по поиску околоземных объектов.
3. Spacewatch – проект университета Аризоны, целью которого является поиск и открытие малых тел Солнечной Системы.
4. LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth-Object Search) – проект обсерватории Лоуэлла по поиску околоземных астероидов и комет.
5. Pan-STARRS (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System) – проект Гавайского университета.

Обнаружение ОНТ производится как с помощью наземных телескопов, так и с помощью космических аппаратов (далее – КА), расположенных на орбите Земли. Современные телескопы, расположенные на КА, позволяют обнаружить более удаленные от Земли ОНТ, чем их наземные аналоги.

В 2016 г. в России утверждена концепция космической системы обнаружения ОНТ, приближающихся к Земле с дневного неба, – система обнаружения дневных астероидов «СОДА», разработанная Институтом астрономии Российской академии наук [8].

На рис. 2 представлена концепция системы «СОДА». Согласно этой концепции предлагается разместить несколько КА в точке Лагранжа L1 между Солнцем и Землей – на расстоянии примерно 1,5 млн километров от Земли. Данные КА будут сканировать космическое пространство и обнаруживать ОНТ примерно за сутки до их возможного столкновения с Землей. За 10 ч до падения точность определения точки входа в атмосферу составит 100 км, за 4 ч до столкновения – 10 км. Проект «СОДА» будет способен обнаружить до 60 % всех тел размером от 10 м, приближающихся к Земле [8].

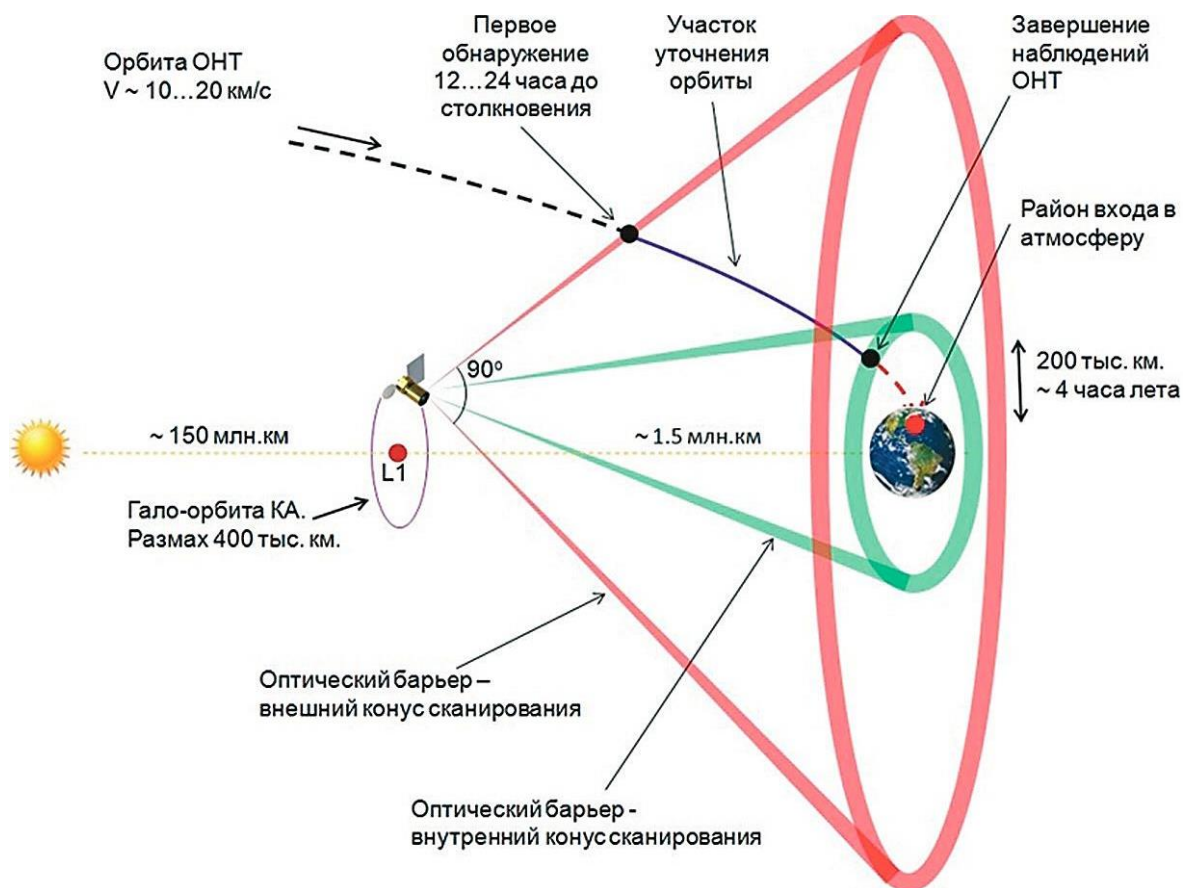


Рис. 2. Концепция системы «СОДА»

Согласно результатам моделирования [8], в ходе работы системы «СОДА» в течение 5 лет будет обнаружено 3 000 ОНТ размером более 10 м, сближающихся с Землей со стороны Солнца. По прогнозам, за 5–10 лет работы будут обнаружены одно-два тела на столкновительных орбитах, для которых будет заблаговременно (4–10 ч) с точностью 10–50 км определена точка входа в атмосферу Земли. За срок активного существования КА «СОДА» сработает по прямому назначению как минимум один раз. Хотя событий, требующих внимания, таких как пролет тел вблизи Земли, будет существенно больше.

Можно сделать вывод, что успешная реализация проекта «СОДА» приблизит Россию к успехам обнаружения ОНТ в других странах. Концепция не предполагает разработки новых технологий – ее выполнение возможно с использованием существующих космических телескопов и КА. Реализацию проекта планируется осуществить в течение 10 лет. Предполагаемый бюджет – около 50 млрд рублей.

Похожая концепция была выдвинута в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша. Концепция «космического патруля», так же направленная на раннее обнаружение ОНТ (представлена в работе [9]), предполагает расстановку на орбите Земли некоторого числа (от 4) космических аппаратов с телескопами. С помощью данной системы за относительно короткое время (5–10 лет) возможно обнаружить и каталогизировать большинство небесных тел диаметром от нескольких сотен метров.

Расчет траекторий ОНТ выполняется известными способами (например, метод Монте-Карло) и сводится к итерационному уменьшению области неопределенности (эллипсоид ошибок) астероида (рис. 3). На каждой итерации, при появлении новых данных об астероиде, область неопределенности уменьшается в размерах. Это может привести к тому, что если изначально в области находилась Земля, то при уменьшении области, планета может оказаться снаружи. Это будет означать отмену угрозы столкновения объекта с Землей.



Рис. 3. Эллипсоид ошибок траектории астероида

Минимизация рисков. После расчета траектории следует этап минимизации рисков для населения и принятия решения об отражении угрозы. Во многих случаях удастся локализовать место столкновения астероида с Землей. К примеру, можно рассмотреть случай астероида 2008ТС₃, когда его удалось обнаружить за 20 ч до столкновения, а место падения (Нубийская пустыня) удалось вычислить за 13 ч до столкновения. Была произведена эвакуация населения из опасной зоны и тем самым минимизированы риски. Благодаря раннему обнаружению и большому количеству наблюдающих обсерваторий, разница между фактическими и расчетными параметрами столкновения была незначительной.

Системы и способы противодействия ОСЗ. В случае, если существуют большие риски поражения населения и объектов Земли, имеет смысл разработка систем защиты от опасности. Институтом прикладной астрономии РАН и Государственным ракетным центром им. академика В. П. Макеева предложено несколько вариантов эшелонов противодействия КУ [10, 11]:

1. Дальний эшелон – противодействия на больших расстояниях с временем до столкновения от года до нескольких десятилетий. Включает в себя защиту как от хорошо известных объектов (ОСЗ), так и от объектов с плохо определенными орбитами (ненумерованные ОСЗ, короткопериодические кометы).

2. Средний эшелон – противодействие с временем до столкновения не более года. Обеспечивается защита от «объектов непосредственной угрозы» (недавно открытые малые планеты, долгопериодические кометы).

3. Ближний эшелон – противодействие в непосредственной близости от Земли или даже в ее атмосфере. Защита от «объектов неотвратимой угрозы» (неизвестные ОСЗ, долгопериодические кометы, метеороиды типа Тунгусского).

Для каждого из трех эшелонов возможно использование своего способа **противодействия КУ**. В табл. 1 представлена краткая сводка вариантов противодействия КУ, предложенных исследователями разных стран:

Таблица 1

Виды противодействия КУ

Способ	Отражение ОНТ	Разрушение ОНТ	Эшелон
Ядерный взрыв	+	+	Дальний
Передача импульса от КА к ОНТ с помощью кинетического удара	+	+	Средний, ближний
Направленное лазерное излучение	+	+	Дальний
Гравитационный буксир	-	+	Средний
Ракетные ускорители на поверхности ОНТ	-	+	Средний
Покрытие астероида специальными материалами для увеличения солнечного давления	-	+	Дальний
Торможение астероида облаками частиц	-	+	Дальний

Ядерный взрыв может применяться как для разрушения, так и для отклонения ОНТ. При этом его применение целесообразно только на дальних дистанциях, так как на ближнем эшелоне существует вероятность поражения Земли осколками ОНТ или нарушения озонового слоя Земли. В [12] и ряде других работ приведены расчеты мощности заряда для разрушения ОНТ различных размеров. Результаты этих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Мощность заряда для разрушения ОНТ [12]

Диаметр ОНТ, м	Мощность заряда, Мт	Масса заряда, кг
30	0.003	50
300	3.38	1127
700	20	6000
1000	100	20 000
1500	421	140 330
10 000	125 000	42 000 000

Отклонение ОНТ происходит за счет придания импульса скорости, возникающего вследствие реактивных сил. Результаты расчетов, представленные в работах, показывают, что контактные подрывы ядерных устройств мощностью 10–20 Мт на ОНТ до 2,5 км могут создать приращение скорости 1–2 м/с. При этом контактный подрыв оказывается эффективнее неконтактного. Его эффективность может быть существенно увеличена путем заглубленного подрыва ядерного устройства. По оценкам, проведенным в РФЯЦ – ВНИИТФ, заглубление ядерного устройства на 1–2 м увеличивает приращение скорости в 2 раза, а заглубление на 10–15 м – в 7 раз [12].

Замечено, что раннее обнаружение и отражение ОНТ потребует меньшей энергии взрыва и при этом вызовет большее отклонение ОНТ (рис. 13). Согласно расчетам воздействие на ОНТ заряда 0.1 Мт за 16.6 лет до столкновения аналогично применению заряда 1 Мт за 1.6 лет. Помимо использования меньшего количества взрывчатого вещества, снижается вероятность поражения Земли осколками разорвавшегося астероида и исключается вероятность повреждения озонового слоя Земли.

Учитывая то, что полная масса КА обычно не превышает 2 000 кг, становится очевидно, что доставка заряда на ОНТ является главным ограничением данного подхода противодействия крупным ОНТ.

Для противодействия мелким ОНТ (до 300 метров) допустимо использовать малоэнергетичный ядерный взрыв на ближнем эшелоне. Е. П. Минаков и Б. В. Соколов [14] исследовали варианты размещения и применения моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов и предложили варианты размещения систем поражения астероидов наземного базирования (СПА НБ), обеспечивающих практически равную единице вероятность защиты Земли от астероидов и метеоритов.

Большинство ученых России считают, что для защиты Земли от ОНТ вариант ядерного взрыва вблизи поверхности ОНТ является наиболее эффективным средством [11–19]. При этом можно добиться двух основных типов последствий:

- раздробить космический объект на фрагменты такого размера ($< 10\text{--}30$ м) и придать им такие скорости ($> 0.1\text{--}1$ м/с), что вблизи Земли фрагменты эти окажутся на достаточном расстоянии друг от друга и сгорят в верхних слоях атмосферы, не оказав разрушительного воздействия на ее поверхность;

- придать космическому объекту, не разрушая его, такой импульс, который приведет к изменению его орбиты и обеспечит пролет на безопасном расстоянии от Земли [16].

Так, в работе [19] выделяются два типа ракетно-космических комплексов перехвата (далее – РККП) опасных небесных тел (РККП ОНТ):

1) РККП дальнего перехвата – предназначается для решения задачи перехвата наиболее крупных ОНТ (до 3–4.5 км в диаметре) и оснащается ядерным взрывным устрой-

ством мощностью 10–20 Мт. РККП может быть выполнен с разгонным блоком на основе традиционных двигательных установок или электроракетных двигателей с ядерным источником энергии при ресурсе нахождения на траектории движения к ОНТ до 2–3 лет. Суммарный вес комплекса перехвата (далее – КП) и разгонного блока до 51–65 т позволяет производить запуск КП ракетой-носителем «Энергия»;

2) РККП ближнего перехвата – предназначается для решения задачи разрушения на безопасные фрагменты ОНТ размером до 100–150 м (в перспективе до 500 м), наиболее часто встречающихся с Землей. РККП ближнего перехвата оснащается комплектом кинетического звездообразного проникателя (далее – КЗП) суммарным весом до 10 т и может быть выполнен на основе отработанной двигательной установки традиционного типа, выполняющей функции разгонного блока и двигателя коррекции КП. Суммарный вес КП ближнего перехвата и комплекта КЗП до 21 т позволяет производить запуск КП ракетой-носителем типа «Протон», «Ариан-5», «Ангара» и другими ракетами аналогичной или большей грузоподъемности.

Для безопасного отклонения ОНТ авторы работы [9] предлагают использовать **космический аппарат-перехватчик**, расположенный на окололунном рубеже поражения астероидов. В этом случае, во-первых, возможно поражать астероиды на большом расстоянии ($\approx 384\,400$ км) от Земли; во-вторых, обеспечивать с высокой вероятностью поражение астероидов, движущихся в плоскостях, близких к плоскости экватора (плоскости орбиты) Земли.

Способ отклонения ОНТ с помощью **передачи импульса от КА к ОНТ с помощью кинетического удара** уже принят к тестированию в NASA. Проект AIDA (The Asteroid Impact & Deflection Assessment) – совместный проект ESA-NASA, который включает в себя КА AIM (Asteroid Impact Mission) и КА DART (Double Asteroid Redirection Test) [10].

Оба проекта AIM и DART были одобрены для фазы исследования с начала 2015 года. В 2019 г. аппарат отправится к астероиду Дидим (NEA 65803), которого достигнет в 2022 г. Дидим в этот момент приблизится к Земле на расстояние примерно 11 млн км. Астероид двойной – вокруг него на расстоянии 1.1 км вращается спутник диаметром в 150 м. В этот спутник и должен врезаться на скорости около 6.5 км/с зонд DART массой 300 кг, что, согласно расчетам, приведет к отклонению орбиты спутника.

Ракетные ускорители на поверхности ОНТ, **тормозное облако** и **покрытие ОНТ специальным материалом** для увеличения солнечного давления также сообщают ему дополнительную кинетическую энергию, с той лишь разницей, что передача импульса производится не кратковременно, а в течение продолжительного времени. А значит, применение данного способа недопустимо для обнаруженных ОНТ с прогнозируемым сроком столкновения с Землей менее 2 лет.

Направленное лазерное излучение применяется в концепции DE-STAR, разрабатываемой в Калифорнийском университете. Идея проекта заключается в использовании комплекса последовательно расположенных в космосе лазеров, фокусирующих солнечную энергию на удаленном ОНТ. Система способна одновременно испарять астероид и при этом придавать ему приращение скорости за счет выброса испаряемого вещества. Комплекс лазеров диаметром в 10 км получит достаточно энергии, чтобы всего за год полностью испарить астероид диаметром в 500 м. Небольшие тела DE-STAR сможет уничтожить за считанные дни или даже часы.

Астронавты Эдвард Лу и Стэнли Лав из Космического центра им. Л. Джонсона (NASA) предложили метод **гравитационной буксировки** [12]. Этот метод предусматривает вывод специального аппарата на низкую астероидоцентрическую орбиту вокруг астероида, подлежащего уводу. Такой КА должен быть оснащен реактивными двигателями малой тяги. Идея буксировки использует неподвижное зависание КА над астероидом за счет тяги своих реактивных двигателей (рис. 4).

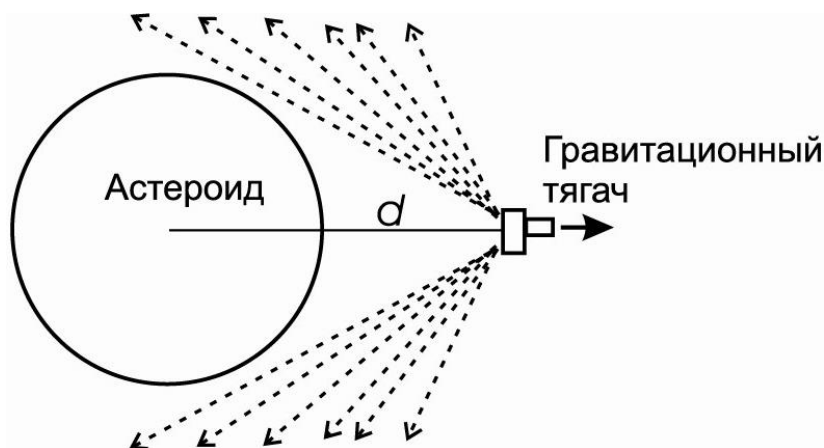


Рис. 4. Гравитационный буксир

Данный способ хоть и требует длительного воздействия и точного поддержания заданной конфигурации, но в то же время обладает рядом преимуществ:

- 1) точный контроль силы и направления воздействия с помощью регулирования положения КА;
- 2) нет необходимости останавливать вращение астероида;
- 3) нет необходимости изучать состав астероида;
- 4) отсутствие какого-либо астероида деления на фрагменты, как в случае с ядерным взрывом;
- 5) возможность реализации проекта существующими технологиями.

В соответствии с прогнозом научно-технологического развития России до 2025 года конечная цель технологического развития оборонно-промышленного комплекса на период до 2025 г. – обеспечение оснащения Вооруженных Сил и других силовых структур новыми образцами, типами и видами вооружения, военной и специальной техники (ВСТ) в требуемых количествах в заданные сроки, а также сохранение за Россией статуса одного из мировых лидеров в области военно-технического сотрудничества. Разработка СЗЗКУ имеет мировое значение и усиливает статус России в оборонно-промышленной и ракетно-космической областях.

Заключение. На сегодняшний день в мире не существует готовых к эксплуатации систем для защиты Земли от ОНТ. Невозможно отрицать тот факт, что до тех пор, пока такая система не начнет функционировать, Земля находится в опасности.

1. В разных странах ведутся научно-исследовательские работы по разработке систем отклонения траектории движения ОНТ от Земли или безопасного разрушения ОНТ. Большинство ученых России для защиты Земли от космической угрозы склоняются к варианту ядерного взрыва вблизи поверхности ОНТ.

2. Обнаружение астероидов как один из этапов защиты Земли от космических угроз на данный момент развито гораздо в большей степени, чем противодействие. Так, например, уже обнаружено большинство астероидов диаметром больше 1 км. Астероиды меньшего диаметра, особенно приближающиеся к Земле со стороны Солнца, труднее обнаружить существующими системами. По этой причине в России разработан и утвержден проект «СОДА», предназначенный для обнаружения небесных тел диаметром от 10 м, приближающихся со стороны Солнца.

3. Уже на предпроектной стадии создания систем защиты Земли (далее – СЗЗ) необходимо, кроме оценки экономической эффективности, разрабатывать меры эксплуатационного характера, например, определение и обеспечение долговечности СЗЗ как одного из самых важных параметров любой системы.

Литература

1. Галушина Т. Ю. Популяция астероидов, сближающихся с Землей // Вестн. СибГАУ. 2014. № 4. С. 33–40.
2. Пятиметровый астероид упал на Землю. URL: <https://ria.ru/20140102/987728057.html> (дата обращения: 15.11.2019).
3. Челябинцы, пострадавшие от метеорита, получают компенсации от региона. URL: <https://ria.ru/society/20130305/925931198.html> (дата обращения: 15.11.2019).
4. Clark S. Streaking meteor unleashed biggest blast in a century. URL: <https://spaceflightnow.com/news/n1302/15meteor/> (дата обращения: 15.11.2019).
5. Роскосмос: в РФ пока нет технологий, позволяющих поражать астероиды. URL: <https://ria.ru/space/20160120/1362270936.html> (дата обращения: 15.11.2019).
6. Лебедев В. В. Готовность России к защите от астероидной опасности // Берегиня. 777. Сова: Общество. Политика. Экономика. 2013. № 3 (18), С. 134–141.
7. The International Astronomical Union Minor Planet Center (MPC) // List of Potentially Hazardous Asteroids (PHAs) URL: <https://minorplanetcenter.net/iau/lists/PHAs.html> (дата обращения: 07.11.2019).
8. Зверева М. А., Нароенков С. А., Шугаров А. С., Шустов Б. М. Космическая система обнаружения опасных небесных тел, приближающихся к Земле с дневного неба («СОДА») // Космич. исслед. 2018. № 56. С. 300–310.
9. Энеев Т. М., Ахметшин Р. З., Ефимов Г. Б. К вопросу об астероидной опасности // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2011. № 35. 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-35> (дата обращения: 15.11.2019).
10. Железнов Н. Б. Астероидно-кометная опасность. URL: http://iaaras.ru/media/practice/zheleznov_ach_2018.pdf (дата обращения: 07.11.2019).
11. Калашников С. Т. Возможности ракетно-космических комплексов для уменьшения угрозы астероидно-кометной опасности : доклад. URL: <http://www.niini.ru/upload/iblock/6a9/6a95b7527bc08bf863e8ef0158494d75.pdf> (дата обращения: 15.11.2019).
12. Артемьева Н. А., Баканас Е. С., Барабанов С. И., Витязев А. В., Волков В. А. [и др.] Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра : моногр. М. : Физико-математ. лит., 2010. 384 с.
13. Сазонов В. С. Взрыв как средство отклонения от земли опасных небесных тел при их раннем и позднем обнаружении // Эколог. вестн. науч. центров Черномор. экономич. сотрудничества. 2013. № 4. С. 118–122.
14. Минаков Е. П., Соколов Б. В. Исследования характеристик размещения и вариантов применения моноблочных стационарных наземных средств поражения астероидов // Тр. СПИИРАН. 2016. № 5. С. 182–197.
15. Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность, проблема и решения. URL: <http://www.sai.msu.su/EAAS/coll/shustov.pdf> (дата обращения: 11.10.2019).
16. Минаков Е. П., Соколов Б. В., Шалдаев С. Е. Исследование характеристик и вариантов применения околунной системы поражения астероидов // Тр. СПИИРАН. 2017. № 5, С. 106–129.
17. Кошкин Р. П. Потенциальные угрозы из космоса и планы по его освоению. Применение сверхтяжелых ракет-носителей // Аналит. материалы. Вып. 4. М. : Стратегич. приоритеты, 2014. 40 с.
18. Нечай В. З., Ногин В. Н., Петров Д. В., Симоненко В. А., Шубин О. Н. Ядерный взрыв вблизи поверхности астероидов и комет // Космическая защита Земли. Изв. Челябинск. науч. центра. Спец. вып. 1997. С. 179–182.
19. Алексеев А. С., Величко И. И., Волков В. А., Ведерников Ю. А. Ракетная концепция противометеоритной защиты земли // Космич. защита Земли. Изв. Челябинск. науч. центра. Спец. вып. 1997. С. 55–77.