

ЯДЕРНАЯ ЗАЩИТА ОТ КИЛОМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ

© 2022 г. А. С. Байгашов¹, М. А. Никитин^{1, *}, А. С. Тепляков¹

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

*manikitin@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.2020 г.

После доработки 13.10.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

Сделаны оценки возможности коррекции траектории километровых астероидов из хондрита, угрожающих Земле, с помощью ядерных взрывов в околоземном и отдаленном космическом пространстве. Показано, что для вывода подобных астероидов на безопасную траекторию необходимы ядерные взрывы мощностью более 100 Мт на расстояниях более 100 млн км от Земли. Также показано, что при найденных мощностях сохранение целостности километровых астероидов невозможно из-за их фрагментации. Последнее обстоятельство делает задачу коррекции траекторий подобных астероидов с помощью ядерных взрывов труднодостижимой из-за сложности предсказания траекторий образовавшихся фрагментов.

DOI: 10.31857/S0023420622040021

ВВЕДЕНИЕ

Тема астероидной угрозы постоянно находится в центре внимания специалистов, занятых этой проблемой. Значительное внимание уделено ей и в отечественной научной литературе [1–10]. В недавних работах [1, 2] по лазерному моделированию эффектов ядерных взрывов были проведены оценки энергии ядерного взрыва, необходимой для разрушения астероидов диаметром 100–200 м. Основной вывод этих работ хорошо согласуется с данными наземных испытаний [10, 11], дающих эмпирические зависимости между диаметрами кратеров и мощностью ядерных устройств. Это служит дополнительным аргументом в пользу метода лазерного моделирования эффекта ядерного воздействия на астероиды. Несомненный интерес представляют дальнейшие эксперименты по моделированию лазерного и ударного разрушения астероидов диаметром в километр и более, так как именно они представляют наибольшую опасность для человечества. Эти данные должны помочь в разработке эффективных методов коррекции траекторий крупных астероидов с помощью ядерных взрывов. Данной теме, в частности, посвящены работы [3–9], в которых рассматривались вопросы взрывного воздействия на астероиды в ближнем околоземном пространстве. Вне рассмотрения в них остались вопросы коррекции траекторий астероидов на больших межпланетных расстояниях. Это побудило авторов провести оценки траекторных эффектов от ядерных взрывов на крупных астероидах на рас-

стояниях в десятки и сотни миллионов километров от Земли.

ИСХОДНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Определим вначале исходные постановочные ограничения, которые позволят сделать полезные выводы, не прибегая к точным и сложным физико-математическим траекторным расчетам. Первое ограничение связано с выбором минимального расстояния, на котором астероид может безопасно пролететь мимо Земли с учетом возможных неопределенностей коррекции траектории с помощью ядерных взрывов. В идеале это расстояние должно быть как можно большим. Но из-за большого собственного импульса километровых астероидов и малости ожидаемых эффектов ядерной коррекции отклонение траектории на расстояние большее, чем 50 000 км является труднодостижимой задачей. По этой причине $d = 50\,000$ км выбрано в качестве допустимого минимального расстояния сближения астероида с Землей. Второе ограничение связано с выбором траектории движения астероида. Представленные далее оценки сделаны в предположении, что астероид первоначально движется по исходной эллиптической траектории, которая пересекается в некоторой точке с орбитой Земли (предполагается, что Земля в момент пересечения там и находится). В момент подрыва ядерного заряда происходит локальное изменение полной энергии и момента импульса астероида, и он выходит на новую безопасную орбиту. Третье ограничение связано с

предположением, что после подрыва ядерного устройства астероид не распадается на фрагменты, а его масса уменьшается только на величину выброшенного из астероида вещества. Четвертое предположение связано с пренебрежением действия гравитационного поля Земли на траекторные параметры астероида.

Оценим погрешность, которую вносит последнее приближение в последующие расчеты. Запишем уравнения сохранения энергии и импульса для астероида, предполагая, что уже на расстоянии $l_0 = 500000$ км от Земли его прицельный параметр равен допустимому минимальному расстоянию сближения $d = 50000$ км:

$$\begin{aligned} mV_0d &= mvr \\ \text{и } mV_0^2/2 - GmM/l_0 &= mv^2/2 - GmM/r, \end{aligned} \quad (1)$$

где G – постоянная тяготения, m – масса астероида, M – масса Земли и r – минимальное расстояние от центра Земли до астероида. Разрешая эти уравнения, получим явное выражение для $r \approx d - RV_1^2/V_0^2$, здесь v_1 – первая космическая скорость, R – радиус Земли. Второе слагаемое в этой формуле значительно меньше первого, что указывает на обоснованность данного приближения для астероидов, которые движутся относительно Земли со скоростью V_0 порядка 20 км/с и больше.

Для модельных расчетов выберем астероид из хондрита в форме шара радиусом в 1000 м и орбитальными параметрами, совпадающими с параметрами астероида Таутатис (этот астероид рассматривался как потенциально опасный, но затем был переведен в класс безопасных [10]). В соответствии с данными по Таутатису радиус перигелия и афелия модельного астероида равны: $r_{\min} = 1.4 \cdot 10^{11}$ м и $r_{\max} = 6.2 \cdot 10^{11}$ м. Его эллиптическая траектория определяется соотношением:

$$r = p/(1 + e \cos \varphi), \quad (2)$$

где r – гелиоцентрическое расстояние, φ – полярный угол, параметр орбиты $p = 2r_{\max} \times r_{\min}/(r_{\max} + r_{\min}) = 2.28 \cdot 10^8$ км, эксцентриситет $e = (r_{\max} - r_{\min})/(r_{\max} + r_{\min}) = 0.63$.

Полный момент импульса L_0 и полная механическая энергия E_0 модельного астероида, в свою очередь, равны: $L_0 = \sqrt{pGMm^2}$ и $E_0 = -G^2m^2M^2(1 - e^2)/2L_0^2$, где G – постоянная тяготения, M – масса Солнца, m – масса астероида.

После ядерной коррекции параметры орбиты модельного астероида меняются, и его новая траектория определяется соотношением:

$$\rho = p_\rho/(1 + e_\rho \cos \varphi_\rho), \quad (3)$$

где $p_\rho = L_\rho^2/GMm_\rho^2$ и $e_\rho = \sqrt{1 + \frac{2L_\rho^2 E_\rho}{G^2 m_\rho^3 M^2}}$. Пара-

метры L_ρ , E_ρ и m_ρ зависят, как от исходных характеристик астероида в момент его подрыва, так и характеристик ядерного взрыва: мощности и направления реактивного импульса ядерного взрыва. Параметр $\varphi_\rho = \varphi_1 + \Delta$ учитывает сдвиг перигелия Δ астероида после подрыва.

Для определения параметров орбиты модельного астероида после подрыва в расчетах использовалось следующее выражение для импульса астероида:

$$\mathbf{P}_1 = m_\rho \mathbf{P}_0/m + \mathbf{p}_\rho,$$

где \mathbf{P}_0 и \mathbf{P}_1 – импульсы астероида до и после подрыва, \mathbf{p}_ρ – реактивный импульс ядерного взрыва. С учетом этого соотношения полная механическая энергия астероида после ядерного взрыва равна:

$$E_\rho = -Gm_\rho M/r_1 + T_\rho, \quad (4)$$

$$\text{где } T_\rho = m_\rho V_0^2/2 + V_0 p_\rho \cos \alpha + p_\rho^2/2,$$

здесь r_1 – гелиоцентрическое расстояние, на котором происходит подрыв астероида, α – угол между направлением скорости астероида и реактивным импульсом ядерного взрыва.

Момент импульса астероида после подрыва равен: $\mathbf{L}_\rho = m_\rho \mathbf{L}_0/m + (\mathbf{r}_1 \times \mathbf{p}_\rho)$.

В частных случаях, когда реактивный ядерный импульс направлен вдоль или поперек скорости V_0 , момент импульса астероида равен:

$$\begin{aligned} L_\rho &= m_\rho L_0/m \pm r_1 p_\rho \sin \psi \\ \text{и } L_\rho &= m_\rho L_0/m \pm r_1 p_\rho \cos \psi, \end{aligned} \quad (5)$$

здесь ψ это угол между вектором скорости V_0 и направлением на Солнце.

Для нахождения смещения перигелия Δ астероида используется соотношение:

$$\cos(\varphi_1 + \Delta) = (p_\rho(1 + e \cos \varphi_1) - p)/pe_\rho.$$

Предваряя результаты расчетов, отметим, что смещение перигелия оказалось мизерным даже для очень мощных взрывов ($\sim 0.1^\circ$ для 1000 Мт).

Приступим теперь к оценочному заданию реактивного импульса, создаваемого ядерным взрывом на поверхности астероида, и массы вещества, выброшенной в результате взрыва. Отсутствие точных данных на этот счет вынуждает использовать качественные оценки, основанные на общих физических принципах, а также данные взрывов термоядерных устройств большой мощностью на твердой поверхности. Для мощных термоядерных взрывов имеются эмпирические данные о диаметрах кратеров поверхностных взрывов и выбросах массы, полученные в ходе испытаний на Земле. Эти данные могут служить

важными реперами при проведении оценок массовых и импульсных характеристик ядерных поверхностных взрывов на астероиде. Для таких оценок выберем простейшую модель ядерного взрыва, в которой одновременно происходят процессы испарения и ионизации вещества астероида и разогрева образовавшейся плазмы за счет энергии синтеза ядер.

При таком подходе можно грубо оценить массу образовавшейся плазмы и результирующий импульс, переданный ей. Начнем с массы, превращенной в плазму. Будем считать, что для формирования одного моля вещества плазмы при заглубленном взрыве требуется E_0 джоулей энергии. В E_0 входят удельные энергии, требуемые для плавления, испарения и ионизации одного моля вещества. Используя E_0 , найдем количество молей вещества, перешедшей в плазму:

$$N = E/E_0. \quad (6)$$

Масса образовавшейся плазмы будет равна:

$$M = \mu N = \mu E/E_0, \quad (7)$$

здесь μ – молярная масса вещества астероида. Для дальнейших оценок полезно оценить объем вещества, выброшенного в результате взрыва. Сделаем эти оценки в предположении, что кратер от взрыва представляет собой шаровой сегмент с радиусом r и толщиной h . Для задания r и h обратимся к данным по характеристикам кратеров наземных поверхностных взрывов. По данным [11, 12] глубина кратера приблизительно в 2.5 раза меньше радиуса. В такой же пропорции соотнесем толщину и радиус сегмента. С приемлемым приближением объем выброса будет равен $V \approx 0.5r^3$, здесь r – радиус кратера. Откуда следует, что $r \approx \sqrt[3]{V}$ и

$$r = \sqrt[3]{M/\rho} \approx \sqrt[3]{\mu E/E_0\rho}, \quad (8)$$

здесь ρ – плотность вещества астероида.

Перейдем теперь к оценке импульса, переданного ядерным взрывом астероиду. Для этого предположим, что доля β энергии ядерного взрыва переходит в кинетическую энергию астероида. При таком предположении импульс астероида будет равен:

$$P = E\sqrt{2\beta\mu/E_0}. \quad (9)$$

В формуле (9) фигурирует два неопределенных параметра β и E_0 . Воспользуемся эмпирическими данными по диаметрам кратеров, полученных в ходе наземных испытаний. По данным [11, 12] радиус кратера от поверхностного взрыва энергией в 3 Мт составляет порядка 100 м. Подставляя это значение в (8), найдем, что параметр $E_0 \approx 1.5 \cdot 10^5$ Дж/моль. С

учетом данного значения E_0 выражение для P примет вид:

$$p_{я} \approx 8.0 \cdot 10^{13} E\sqrt{\beta} \text{ кгм/с}, \quad (10)$$

здесь E – тротиловый эквивалент в мегатоннах. Масса астероида, в свою очередь, будет равна $m_p \approx 4\pi r^3\rho/3 = 1.0 \cdot 10^9 E$. Для нахождения параметра β воспользуемся данными работ [5, 13, 14], в которых приведены значения ядерных импульсов, полученные на основе экспериментальных данных по мощным взрывам. В [5] представлены оценочные выражения для $p_{я}$ с учетом глубины подрыва ядерного устройства мощностью 1 Мт. По данным этой работы для заглублений больших 10 метров ядерный импульс может составить $(3-6) \cdot 10^{11}$ кг · м/с. Выберем для последующих оценок значение $p_{я} \approx 4.0 \cdot 10^{11}$ кг · м/с вблизи нижней границы указанного диапазона, полагая, что ядерное устройство может проникнуть в астероид на глубину большую 10 м. В соответствии с выбранным значением $p_{я}$, параметр β равняется $2.5 \cdot 10^{-5}$.

В выражении (11) фигурирует линейная зависимость импульса от энергии взрыва E . В [5, 13] зависимость степенная с показателем степени 7/6. Это означает, что оценки кинематических эффектов ядерных взрывов, представленных ниже, следует рассматривать как оценки снизу, так как расчетные радиальные отклонения траектории будут меньшими.

РАСЧЕТЫ ВЛИЯНИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА ОРБИТУ АСТЕРОИДА

Как отмечалось выше, для проведения оценочных расчетов был выбран астероид из хондрита радиусом в 1 км, движущийся к Земле с относительной скоростью около 30 км/с. Кинетический импульс такого астероида равен $P \approx 1.0 \cdot 10^{18}$ кгм/с. Импульс, который может быть создан при подрыве ядерного устройства мощностью в 1 Мт, как показано выше, может равняться $P \approx 4.0 \cdot 10^{11}$ кгм/с. Даже при выборе большего значения β он остается более, чем на шесть порядков меньше импульса километрового астероида. Ситуацию не сильно меняют и ядерные устройства мощностью в 1000 Мт. Это указывает на необходимость подрыва таких астероидов на значительных расстояниях от Земли, чтобы небольшое изменение импульса астероида привело к сколь-нибудь заметному отклонению от исходной орбиты на больших подлетных расстояниях. Таким образом, речь идет о подрыве мощных ядерных устройств на расстояниях десятки и сотни миллионов километров от Земли.

Обратимся к результатам расчетов изменения орбиты астероида при подрыве его мощными ядерными зарядами на больших расстояниях от

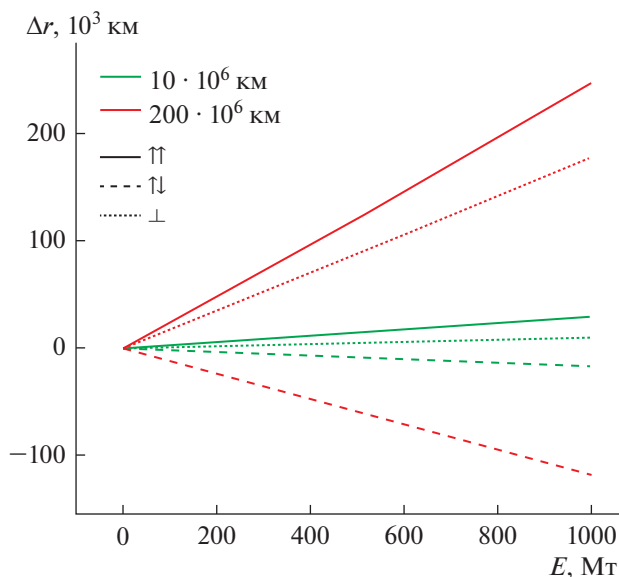


Рис. 1. Зависимость отклонения астероида в момент максимального сближения с Землей для расстояний подрыва в 10 и 200 млн км и различных ориентаций импульсов астероида и ядерного взрыва.

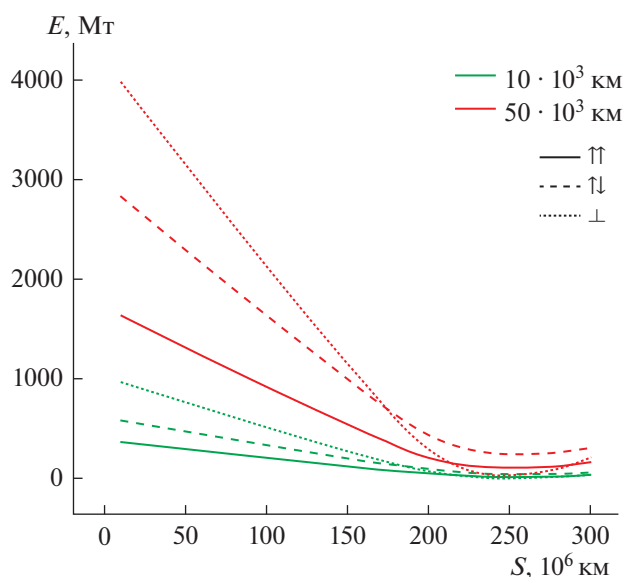


Рис. 2. Зависимость мощности ядерного взрыва от расстояния до точки подрыва для двух отклонений в 10000 и 50000 км и различной ориентации импульсов астероида и ядерного взрыва.

Земли, представленных на рис. 1 и 2. В качестве меры отклонения на этих рисунках выбрано радиальное отклонение Δr траектории астероида в момент максимального сближения с Землей (в предположении, что исходная траектория пересекается с орбитой Земли). В расчетах варьировались мощность ядерного заряда в мегатоннах,

расстояние от Земли до места подрыва на исходной орбите, а также взаимные ориентации импульса астероида и ядерного взрыва. Как видно из этих рисунков перевод астероида на сравнительно безопасные траектории, проходящие на расстояниях больших 50000 км от центра Земли, возможен только при использовании ядерных взрывов мощностью больших 200 Мт и подрыва на расстояниях порядка 200 млн км от места встречи с Землей. Для меньших мощностей и расстояний отклонение астероида оказывается меньше, чем 50000 км, что не отвечает введенному ранее критерию безопасности скорректированной орбиты. Экстраполяция линейной зависимости между мощностью и расстоянием подрыва показывает, что мощность взрывных устройств может быть значительно снижена при расстояниях больших, чем 200 млн км. Техническое обеспечение подобных подрывов представляется маловероятным из-за возрастающих трудностей доставки сверхмощных ядерных фугасов на столь большие расстояния.

Важной особенностью полученных расчетов является сильная зависимость эффектов коррекции орбиты астероидов от направленности импульса ядерного взрыва по отношению к скорости движения астероида. На расстояниях до 200 млн км более эффективным является подрыв в случае сонаправленности и противонаправленности импульсов астероида и ядерного взрыва. Можно ожидать, что этот эффект будет выражен значительно в случае положения точки взрыва внутри сектора перигелия, так угол ψ будет больше.

При проведении расчетов радиус астероида был выбран равным 1 км. Это было сделано для того, чтобы полученные оценки можно было рассматривать, как некий репер для астероидов других размеров. На рис. 3 представлены данные расчетов возможных отклонений для астероида с радиусом 2 км – это размеры Таутатиса. Масса такого астероида и его кинетический импульс почти на порядок превосходят соответствующие параметры астероида с радиусом 1 км. Сравнение данных на рис. 1 и 3 показывают, что эффекты коррекции орбиты также изменились практически на фактор ~ 10 .

Результаты представленных выше расчетов показывают, что требуемая коррекция астероидов с поперечником в 2 км в реально достижимых точках околоземного пространства возможна только при использовании очень мощных ядерных взрывов. Это ставит вопрос о том, насколько подобные астероиды окажутся устойчивыми к действию мощных взрывных нагрузок. Оценим условия фрагментации астероида при таких нагрузках, не прибегая к точным прочностным расчетам. Очень грубо верхнюю границу разрушения астероида можно оценить на основе геометрических соотношений. В [2] на основе лазерного моделирования было показано, что ядерный взрыв

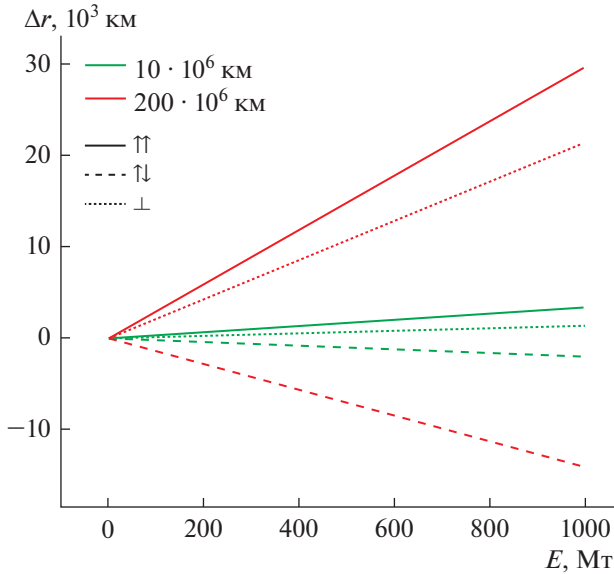


Рис. 3. Зависимость отклонения астероида с радиусом 2 км в момент максимального сближения с Землей для расстояний подрыва в 10 и 200 млн км и различных ориентаций импульсов астероида и ядерного взрыва.

мощность 1 Мт может заведомо разрушить астероид диаметром 200 м из хондрита. Данные наземных взрывов [11, 12] показывают, что при взрыве такого же ядерного заряда образуются воронки с размером 150 м. Отсюда следует, что для гарантированного разрушения астероида необходимо использовать ядерный заряд который производит воронку с диаметром в $200/150 = 1.33$ раза меньше диаметра астероида. Предполагая, что это условие будет иметь силу и для астероида с радиусом 1.0 км, найдем, используя данные формулы (6) и [12], что гарантированная мощность разрушения такого астероида лежит в диапазоне 700 Мт. Это, скорее всего, завышенная верхняя граница предельной мощности ядерного взрыва. Для оценки нижней границы, воспользуемся приближенным соотношением: $P_n / \pi t r^2 \approx \sigma_m$, здесь t – характерная продолжительность взрыва, σ_m – предельное ударное напряжение. С помощью данного соотношения, формулы (8) и предположения о том, что t не сильно меняется для мощных взрывов можно получить простое условие фрагментации астероидов: $E/r^2 = \text{const}$. Неизвестная постоянная в условии фрагментации может быть определена по данным [2], согласно которым астероид с диаметром 200 м гарантировано фрагментируется при ядерном взрыве в 1 Мт. В соответствии с этим выводом астероид с диаметром 2 км должен фрагментироваться при поверхностном ядерном взрыве мощностью в 100 Мт. Полученная величина мощности взрыва в силу определенной при-

вязки к физике разрушения, по-видимому, ближе к реальному значению мощности ядерного взрыва, необходимой для распада астероида радиусом 1.0 км на фрагменты, чем определенная на основании геометрических факторов. Как видно из рис. 2, для расстояний ядерного подрыва астероидов значительно меньших 100 млн км коррекция траектории будет сопровождаться разрушением астероида на фрагменты.

Многочисленный разброс в значениях предельной мощности взрыва, необходимой для разрушения двухкилометрового астероида, полученный двумя разными способами указывает на необходимость полномасштабных численных экспериментов по моделированию процессов разрушения крупных астероидов с помощью ядерных взрывов. Очень важно детально учесть действие таких физических факторов как: динамика ядерного взрыва, взаимодействие радиационного излучения и ядер с веществом, передача энергии и импульса внутри астероида, формирование зон дислокаций и разрушений [1]. Подобные расчеты необходимы для последующего обсчета наиболее вероятных траекторий разлета осколков астероида при различных сценариях подрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценки потенциальных эффектов воздействия на километровые астероиды позволяют сделать следующие выводы:

1. Перевод километровых астероидов на безопасные траектории с использованием поверхностных ядерных взрывов мощностью сотни и тысячи мегатонн возможен только при осуществлении взрывов на расстояниях больших 100 млн км.
2. Перевод километровых астероидов на безопасные траектории с сохранением их целостности при использовании поверхностных ядерных взрывов на расстояниях меньших 100 млн км, скорее всего, невозможен. Необходимые для перевода мощности взрыва в тысячи мегатонн должны приводить к гарантированной фрагментации астероидов. Это делает задачу коррекции траекторий километровых астероидов с помощью ядерных взрывов труднодостижимой из-за сложности предсказания траекторий образовавшихся фрагментов.
3. Нижний предел мощности ядерного взрыва, приводящий к фрагментации астероида из хондрита двухкилометрового диаметра, найденный на основании прочностных оценок, составляет порядка 100 Мт. Геометрический подход, основанный на сравнении размеров астероида и кратеров ядерного взрыва, дает мощности большие 600 Мт.
4. Для получения точных количественных заключений о фрагментации километровых астеори-

дов необходимы численные эксперименты, комплексно учитывающие основные физические факторы взаимодействия радиации сверхмощного ядерного взрыва с веществом астероида.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрущенко В.А., Моисеева Д.С., Моторин А.А., Ступицкий Е.Л. Моделирование физических процессов воздействия мощного ядерного взрыва на астероид // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11. № 5. С. 861–877.
2. Аристова Е.Ю., Аушев А.А., Баранов В.К. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. Вып. 1. С. 157–172.
3. Шаненко А.К., Соколов С.С., Мотлохов В.Н. и др. Численное моделирование воздействия высокого ядерного заряда на астероид // ВАНТ. Теоретическая и прикладная физика. 2017. № 1. С. 8–14.
4. Григал П.В., Любимов А.Г., Пиджаков В.А. и др. Способ заглупления в астероид ядерного устройства // Труды международной научной конференции “Космическая защита Земли”. Известия Челябинского научного центра. Спецвыпуск. Ч. 1. Челябинск, 1997. С. 201–204.
5. Мещеряков С.А., Липницкий Ю.М. Оценки эффективности отклонения опасного космического объекта с помощью взрыва или удара // Журн. технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 1. С. 26–30.
6. Заграфов В.Г., Шаненко А.К. Использование ядерных взрывов для перехвата опасных космических объектов // Атомная энергия. 1996. Т. 80. № 4. С. 21.
7. Ивашкин В.В., Стихно К.А. О предотвращении возможного столкновения астероида Апофис с землей // Астрономический вестник. 2009. Т. 43. № 6. С. 502–516.
8. Кондауров В.И., Ломов И.Н., Фортвов В.Е. О действии мощного взрыва на астероид // Докл. РАН. Т. 348. № 2. С. 184–187.
9. Ступицкий Е.Л., Холодов А.С. Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов. М.: Интеллект, 2019.
10. Ostro S.J., Hudson R.S., Rosema K.D. et al. Asteroid 4179 Toutatis: 1996 Radar observations // Icarus. 1999. V. 137. P. 122–139.
11. Адушкин В.В., Христофоров Б.Д. Воронки наземных крупномасштабных взрывов // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 6. С. 71–76.
12. Brode H.L. A review of nuclear explosion phenomena pertinent to protective construction. Report 425 – PR. 1964.
13. Vortman L.J. Craters from surface explosions and scaling laws // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. № 14. P. 4621–4636.
14. Solem J. Interception of comets and asteroids on collisions course with Earth // J. Space Rockets. 1993. V. 30. № 2. P. 212–228.