

УДК: 523.44; 623.454.838

Моделирование физических процессов воздействия мощного ядерного взрыва на астероид

В. А. Андрущенко^{1,a}, Д. С. Моисеева^{2,b},
А. А. Моторин^{1,c}, Е. Л. Ступицкий^{1,d}

¹ Институт автоматизации проектирования Российской академии наук,
Россия, 123056, г. Москва, 2-ая Брестская ул., д. 19/18

² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9

E-mail: ^a andrusviktor@ya.ru, ^b moiseevads@rambler.ru, ^c vansp91@gmail.com, ^d stup@bk.ru

Получено 02.08.2019, после доработки — 18.08.2019.

Принято к публикации 02.09.2019.

В рамках проблемы предотвращения астероидно-кометной угрозы выполнен физический и теоретический анализ процессов воздействия различных факторов надповерхностного ядерного взрыва достаточной высокой энергии на астероид во внеатмосферных условиях космического пространства. Показано, что в соответствии с энергией и проникающей способностью плазмы продуктов взрыва, рентгеновского и гамма-нейтронного излучения на поверхности астероида, обращенной к взрыву, образуется слоистая структура с разной плотностью энергии, зависящей от угловых координат. Для каждого слоя выяснен временной характер трансформации энергии внутри него и определены роли различных фото- и столкновительных процессов. Воздействие высокоскоростного потока плазмы носит эрозионный характер, при этом импульс плазмы передается астероиду. Показано, что в тонком слое поглощения рентгеновского излучения вещество астероида разогревается до высоких температур, и в результате его расширения формируется импульс отдачи, который не является определяющим из-за малой массы расширяющейся высокотемпературной плазмы. Расчеты показали, что основной импульс, полученный астероидом, связан с уносом разогретого слоя вещества, образованного нейтронным потоком ($7.5 \cdot 10^{14}$ г · см/с). Показано, что астероид с радиусом ~100 м приобретает при этом скорость ≈ 100 см/с. Расчеты выполнены с учетом затрат энергии взрыва на разрушение аморфной структуры вещества астероида (~ 1 эВ/атом = $3.8 \cdot 10^{10}$ эрг/г) и на ионизацию в области высокотемпературного слоя. На основе аналогичного анализа получено приближенное выражение для оценки среднего размера осколков при возможном разрушении астероида ударными волнами, образующимися внутри него под действием импульсов давления. Выполнен физический эксперимент в лабораторных условиях, имитирующий фрагментацию каменного астероида и подтвердивший справедливость полученной зависимости от выбранных значений определенных параметров. В результате численных исследований воздействия взрыва, произведенных на различном расстоянии от поверхности астероида, показано, что учет реальной геометрии отколенного слоя дает оптимальную высоту для формирования максимального импульса астероида примерно в 1.5 раза большую, чем аналогичные оценки по упрощенной модели. Предложена двухэтапная концепция воздействия ядерных взрывов на астероид с использованием радиолокационных средств наведения. Проанализировано возможное влияние возникающих ионизационных помех на радиолокационное слежение за разлетом крупных осколков астероида в условиях пространственно-временной эволюции всех элементов исследуемой динамической системы.

Ключевые слова: астероидно-кометная опасность, ядерный взрыв, фрагментация, надповерхностный взрыв

Работа В. А. Андрущенко, А. А. Моторина и Е. Л. Ступицкого выполнена в рамках государственного задания ИАП РАН.

© 2019 Виктор Анатольевич Андрущенко, Дарья Сергеевна Моисеева,
Андрей Анатольевич Моторин, Евгений Леонидович Ступицкий

Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.

Чтобы получить текст лицензии, посетите веб-сайт <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
или отправьте письмо в Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

UDC: 523.44; 623.454.838

Modeling the physical processes of a powerful nuclear explosion on an asteroid

V. A. Andrushchenko^{1,a}, D. S. Moiseeva^{2,b},
A. A. Motorin^{1,c}, E. L. Stupitsky^{1,d}

¹ Institute of Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences (ICAD RAS),
19/18 2-nd Brestskaya st., Moscow, 123056, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

E-mail: ^a andrusvictor@ya.ru, ^b moiseevads@rambler.ru, ^c vansp91@gmail.com, ^d stup@bk.ru

Received 02.08.2019, after completion — 18.08.2019.

Accepted for publication 02.09.2019.

As part of the paper, a physical and theoretical analysis of the impact processes of various factors of a high-altitude and high-energy nuclear explosion on the asteroid in extra-atmospheric conditions of open space is done. It is shown that, in accordance with the energy and permeability of the plasma of explosion products, X-ray and gamma-neutron radiation, a layered structure with a different energy density depending on angular coordinates is formed on the surface of the asteroid. The temporal patterns of the energy transformation for each layer is clarified and the roles of various photo- and collision processes are determined. The effect of a high-speed plasma flow is erosive in nature, and the plasma pulse is transmitted to the asteroid. The paper presents that in a thin layer of x-ray absorption, the asteroid substance is heated to high temperatures and as a result of its expansion, a recoil impulse is formed, which is not decisive due to the small mass of the expanding high-temperature plasma. Calculations shows that the main impulse received by an asteroid is associated with the entrainment of a heated layer of a substance formed by a neutron flux ($7.5 \cdot 10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm/s}$). It is shown that an asteroid with a radius of $\sim 100 \text{ m}$ acquires a velocity of $\approx 100 \text{ cm/s}$. The calculations were performed taking into account the explosion energy spent on the destruction of the amorphous structure of the asteroid material ($\sim 1 \text{ eV/atom} = 3.8 \cdot 10^{10} \text{ erg/g}$) and ionization in the region of the high-temperature layer. Based on a similar analysis, an approximation is obtained for estimating the average size of fragments in the event of the possible destruction of the asteroid by shock waves generated inside it under the influence of pressure impulses. A physical experiment was conducted in laboratory conditions, simulating the fragmentation of a stone asteroid and confirming the validity of the obtained dependence on the selected values of certain parameters. As a result of numerical studies of the effects of the explosion, carried out at different distances from the surface of the asteroid, it is shown that taking into account the real geometry of the spallation layer gives the optimal height for the formation of the maximum asteroid momentum by a factor of 1.5 greater than similar estimates according to the simplified model. A two-stage concept of the impact of nuclear explosions on an asteroid using radar guidance tools is proposed. The paper analyzes the possible impact of the emerging ionization interference on the radar tracking of the movement of large fragments of the asteroid in the space-time evolution of all elements of the studied dynamic system.

Keywords: asteroid-comet hazard, nuclear explosion, fragmentation, high-altitude nuclear explosion

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 5, pp. 861–877 (Russian).

The work of Viktor A. Andrushchenko, Andrey A. Motorin and Evgeniy L. Stupitsky was completed as part of the state task of ICAD RAS.

© 2019 Viktor A. Andrushchenko, Daria S. Moiseeva, Andrey A. Motorin, Evgeniy L. Stupitsky
This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Unported License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>
or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

1. Введение. Анализ состояния вопроса

В последние десятилетия значительное внимание научной общественности ведущих стран привлекает проблема предотвращения возможности столкновения с Землей крупных космических тел — астероидов и комет. Астрономические наблюдения, геологические данные, информация об эволюции биосферы и результаты космических исследований планет и их спутников убедительно показали, что катастрофические столкновения этих тел с планетами были не только в далеком прошлом, но и вполне вероятны в современную эпоху.

Земная атмосфера в целом полностью защищает нас от ударов тел размером до нескольких метров. Действительную опасность для Земли представляют столкновения с достаточно крупными телами — астероидами и кометами размером в несколько десятков метров. Именно такие столкновения и составляют смысл понятия астероидно-кометная опасность (АКО).

Книга [Астероидно-кометная..., 1996] является, по-видимому, одной из первых в отечественной научной литературе попыткой изложить в виде обзора работ, выполненных к тому времени, по проблеме АКО. Многие из работ по этой тематике были представлены на проведенной в России международной конференции «Проблемы защиты Земли от опасных космических объектов (SPE-94)».

В проблеме АКО можно выделить следующие основные направления исследований [Андрющенко и др., 2007].

1. Получение на основе совершенствования наблюдательной базы достаточно полных представлений о свойствах малых тел Солнечной системы, их эволюции и способах обнаружения и мониторинга. В работе [Астероидно-кометная..., 2010] даны классификация, основные кинематические характеристики метеоров, астероидов и комет, а также краткая качественная картина последствий столкновения с Землей и оценка модельных схем противодействия с помощью ядерного взрыва (ЯВ). В работе [Borovička et al., 2013] проанализированы параметры челябинского астероида.

2. Физические и численные исследования движения метеоров различного размера и состава в атмосфере Земли и их воздействия на ее материковую и океаническую поверхность. Всесторонний анализ этого круга вопросов проведен в монографии [Катастрофические воздействия..., 2005] и в работах [Ceplecha, Revelle, 2005; McInnes, 2004].

3. Анализ возможностей современных ракетно-ядерных средств наведения и воздействия для создания системы защиты Земли от опасных космических объектов (ОКО) дан в работах [Коблов и др., 1997; Родионов и др., 1997; Дегтярь, Волков, 2013]. Следует отметить, что взгляд на этот вопрос существенно изменился за последние двадцать лет исследований проблемы. В работе [Астероидно-кометная..., 1996] сделан вывод о том, что состояние наблюдательной базы не дает возможности осуществить защиту от астероидно-кометной опасности. Однако проанализированные в [Дегтярь, Волков, 2013] результаты выполненных за период с 1996 по 2013 гг. работ свидетельствуют о том, что создание системы защиты Земли на основе современных ракетно-ядерных средств практически исключает риск столкновения с планетой астероидов диаметром до 1 км.

4. Значительное количество работ посвящено важным и интересным физическим и численным исследованиям различных способов воздействия ядерного взрыва на астероид и возникающих при этом эффектов. Ясно, что результат действия ядерного взрыва определяет в итоге всю конкретную схему защиты от ОКО.

Как следует уже из приведенного краткого анализа, рассматриваемая проблема носит комплексный характер. Однако несомненным фактом является то, что единственным реальным средством защиты Земли от астероидно-кометной опасности в настоящее время может служить только ядерный взрыв, который сам по себе и по его воздействию на объект является достаточно сложным явлением [Физика ядерного взрыва, 2009] и требует всестороннего исследования. Но так как исходных данных по самим астероидам еще далеко недостаточно для строго количественного рассмотрения, то значительный интерес представляет качественный физико-

математический подход анализа процессов воздействия ядерного взрыва на астероид, необходимый при формулировке концептуального облика системы защиты Земли от крупных астероидов на большом расстоянии от нее. Данная работа посвящена именно такому исследованию обсуждаемой проблемы.

2. Физика воздействия ядерного взрыва

Очевидно, что возможны два физических механизма активного противодействия космической угрозе с помощью ядерного взрыва:

- уничтожение угрожающего объекта в результате его дробления на фрагменты размером не более нескольких метров, так как в этом случае возможно с большой степенью вероятности их дальнейшее полное разрушение в атмосфере планеты;
- увод тела с опасной орбиты в результате передачи ему импульса от плазменного потока взрыва, проникающих излучений, а также и в результате реактивного действия массы, испаряющейся с поверхности тела.

Характер и результаты воздействия ЯВ на астероид зависят прежде всего от положения центра взрыва по отношению к поверхности астероида. В зависимости от этого взрывы подразделяют на:

- надповерхностный (взрыв происходит на определенном расстоянии от космического тела),
- контактный (на поверхности астероида),
- заглубленный (при проникновении ядерного заряда (ЯЗ) на несколько метров в тело астероида).

В зависимости от физических свойств, структуры вещества астероида и от расположения относительно его поверхности центра взрыва следует, по-видимому, учитывать при анализе как возможность фрагментации и образования осколков, так и образование испаряющегося вещества и частично ионизованной плазмы [Физика ядерного взрыва, 2009]. В настоящее время существуют лишь гипотетические данные о характеристиках вещества астероида [Ghiorso, Nevins et al., 2009; Chopelas, 1990].

Как показывает анализ ряда работ, проведенный в [Дегтярь, Волков, 2013], для разрушения астероида размером более 500 м при одноразовом воздействии требуется взрыв мощностью не менее нескольких десятков Мт, что представляет значительные трудности в ракетно-ядерном обеспечении доставки и наведения ЯЗ на объект, а также из-за отсутствия контроля и страховочной гарантии решения проблемы.

В данной работе предлагается решить поставленную проблему в два этапа с использованием ракеты с двумя несущими ядерными модулями. На первом модуле помещается ЯЗ мощностью $\sim 1\div 5$ Мт, который и производит первое воздействие на астероид, сопровождающееся разрушением его на крупные фрагменты (10–100 м), и вместе с тем создает плазменно-пылевое облако. На втором, многоцелевом модуле размещаются заряды малой мощности (1–10 кт) и радиолокационная система их наведения на крупные фрагменты-осколки астероида, образованные от первого мощного взрыва, применяемая в условиях плазменно-пылевых помех, с целью разрушения образовавшихся осколков.

Как следует из вышеописанной концепции, для ее анализа необходимо хотя бы приближенное рассмотрение следующих физических аспектов проблемы:

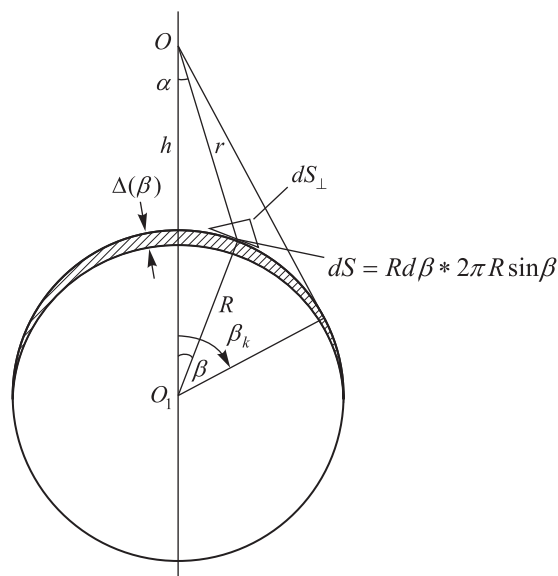
- оценка массы испаренного газоплазменного облака, образовавшегося после первого мощного ЯВ, для оценки его влияния на эффективность наведения ЯЗ малой мощности на осколочные фрагменты астероида;
- приближенная оценка количества и размеров образовавшихся фрагментов.

Расчет испаренной массы необходим также для определения полученного астероидом импульса, который определяет скорость смещения с начальных орбит астероида и его осколков в случае фрагментации.

Следует отметить, что для решения задачи о смещении или дроблении астероида каждый из трех видов мощных взрывов (надповерхностный, контактный или заглубленный) обладает как своими преимуществами, так и недостатками.

В данной работе рассматривается вопрос о воздействии мощного надповерхностного ядерного взрыва на астероид на значительном расстоянии от Земли. На астероид действуют рентгеновское излучение (РИ), γ -излучение, потоки нейтронов и плазмы продуктов взрыва. В результате воздействия этих факторов с возмущенного слоя поверхности астероида, обращенной к взрыву, уносится определенная масса разогретого вещества, и внутрь астероида распространяются ударные волны. В результате астероид получает импульс, смещающий его с траектории, и одновременно возможна его фрагментация.

Основными параметрами взрыва, определяющими импульс астероида, являются его энергия E , масса продуктов взрыва M_p и высота взрыва h над поверхностью астероида. На рис. 1 показаны пространственная схема воздействия поражающих факторов ЯВ на астероид и угловая характеристика. Легко получить известную приближенную оценку оптимальной высоты взрыва h , при которой получаемый астероидом импульс максимален.



$$\gamma = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta); \quad dS_{\perp} = dS \sin \gamma = dS \cos(\alpha + \beta); \quad \frac{\Delta}{\lambda} = \sin \gamma = \cos(\alpha + \beta)$$

Рис. 1. Геометрия задачи по взрыву ядерного заряда над поверхностью астероида и ее обозначения: h — высота взрыва ядерного заряда, R — радиус астероида, r — расстояние от точки взрыва до элемента поверхности, dS — элемент площади поверхности астероида, $\Delta(\beta)$ — толщина слоя, в котором выделяется энергия, α, β — углы между осью симметрии OO_1 и элементом площади на поверхности астероида, α_k, β_k — соответственно их предельные углы

Пусть α_k и β_k — максимальные углы, а Ω_{α} и Ω_{β} — соответственно их телесные углы. Тогда в предположении независимости от угла толщины слоя Δ , в котором выделяется энергия, получим для массы слоя и выделенной в нем энергии выражения

$$M_c = \rho \Delta \Omega_{\beta} = 2\pi R^2 \rho \Delta (1 - \cos \beta_k),$$

$$E_c = \frac{E}{4\pi} \Omega_{\alpha} = \frac{1}{2} E (1 - \cos \alpha_k),$$

где ρ — плотность вещества астероида, M_c, E_c — масса и энергия, полученные слоем астероида толщиной Δ .

Тогда из общей связи интегральных величин массы M_c , импульса P_c и энергии E_c — $P_c^2 / 2M = E_c$ — получим

$$P_c = \sqrt{2\pi R^2 \rho \Delta E} \cdot \sqrt{(1 - \cos \beta_k)(1 - \cos \alpha_k)}.$$

Так как $\cos \alpha_k = \frac{r}{R+h} = \frac{\sqrt{(R+h)^2 - R^2}}{R+h}$, $\cos \beta_k = \frac{R}{R+h}$, то

$$P_c = \sqrt{2\pi R^2 \rho \Delta E} \cdot \sqrt{\frac{x}{1+x} \left(1 - \frac{\sqrt{(1+x)^2 - 1}}{1+x} \right)}, \quad (1)$$

где $x = h/R$. Дифференцируя по x и приравнивая производную нулю, получим

$$x_m = (\sqrt{2} - 1) \text{ или } h_m = (\sqrt{2} - 1)R. \quad (2)$$

Эта зависимость получена в предположении $\Delta = \text{const}$ и имеет чисто геометрическую природу.

Так как физическое содержание процессов, определяющих воздействие указанных выше поражающих факторов ЯВ, различно, то следует более подробно рассмотреть процесс формирования импульса астероида, с учетом зависимости $\Delta(\beta)$. Это важно еще и потому, что возникающие при этом ударные волны имеют сферическую геометрию, а это может повлиять на процесс фрагментации.

Для конкретизации были приняты следующие параметры ЯВ: $E = 4.2 \cdot 10^{22}$ эрг, $M_p = 10^6$ г, молекулярный вес плазмы продуктов взрыва (ППВ) $A = 27(Al)$, соответственно, количество ионов ППВ $N_p = 2.2 \cdot 10^{28}$.

Для мгновенного излучения высокоэнергетических нейтронов и γ -квантов было принято среднее значение 4 мэВ, а их количество — $N_n = 1.5 \cdot 10^{26}$ 1/Мт, $N_\gamma = 6 \cdot 10^{25}$ 1/Мт [Физика ядерного взрыва, 2009]. Для принятого значения удельной энергии $E / M_p = 4.2 \cdot 10^{12}$ Дж/кг средняя начальная температура ППВ $T \approx 3.6$ кэВ [Физика ядерного взрыва, 2009]. Были приняты следующие доли энергии для указанных факторов:

- в нейтроны $\delta_n = 0.023$,
- в γ -кванты $\delta_\gamma = 0.09$,
- в рентгеновское излучение $\delta_\nu = 0.87$,
- в плазму продуктов взрыва $\delta_p = 0.1$.

Для принятых значений энергии скорость нейтронов $v_n = 2.7 \cdot 10^9$ см/с, скорость фронта ППВ $v_{фр} = 1.2 \cdot 10^8$ см/с и, соответственно, средняя скорость $\bar{v}_p = \sqrt{3/5} v_{фр} = 0.93 \cdot 10^8$ см/с.

За время высвета нейтронов, γ - и рентгеновского излучения можно принять 100 нс [Физика ядерного взрыва, 2009]. Действие плазмы взрыва затянута во времени в соответствии с расстоянием от центра взрыва.

Если считать рентгеновское излучение планковским, то максимум его спектра будет приходиться на энергию квантов $h\nu_{\max} = 2.82T \approx 10$ кэВ (1.24 Å).

В соответствии с работой [Солнечная система, 2017] большинство астероидов каменные (~92 %). Если иметь в виду, что плотность кирпича $\rho = 1.8$ г/см³, кремния $\rho = 2.3$ г/см³, гранита $\rho = 2.6$ г/см³, а достаточно обоснованные данные по физико-химическим свойствам и струк-

туре материала астероидов не известны, то для расчета были приняты следующие значения: $\rho = 2 \text{ г/см}^3$, $A = 25 \text{ г/моль}$. Радиус астероида полагался равным 100 м.

Исходя из перечисленных выше параметров ядерного взрыва и материала астероида, проанализируем характер их взаимодействия.

Быстрые нейтроны испытывают упругое и дифракционное рассеяние на ядрах атомов [Мухин, 1993].

Суммарное сечение рассеяния равно

$$\sigma_n = 2\pi R_{\text{я}}^2, \text{ где } R_{\text{я}} = 1.5 \cdot 10^{-13} A^{1/3}.$$

Тогда пробег быстрого нейтрона будет

$$\lambda_n = \frac{1}{\sigma_n n} = \frac{A}{\sigma_n \rho N_A} = 11.8 \frac{A^{1/3}}{\rho} [\text{см}].$$

Для камня, при $A = 25 \text{ г/моль}$, $\rho = 2 \text{ г/см}^3$, получаем $\lambda_n = 17,3 \text{ см}$ (для железа, при $A = 56 \text{ г/моль}$, $\rho = 7.9 \text{ г/см}^3$, получаем $\lambda_n = 5,7 \text{ см}$).

Пробег γ -излучения $\lambda_\gamma \approx 16 \text{ см}$, пробег β -электронов $\lambda_\beta \approx 0.2 \text{ см}$. Так как максимум рентгеновского излучения приходится на кванты с энергией $\approx 10 \text{ кэВ}$, то поглощение таких квантов определяется главным образом ионизацией электронов с внутренних К-оболочек атомов. Используем водородоподобное приближение [Зельдович, Райзер, 2008]:

$$\sigma_v = \frac{7.9 \cdot 10^{-18}}{z^2} \left(\frac{h\nu_r}{h\nu} \right)^3.$$

Для $z = 13$, $h\nu_r = 2300 \text{ эВ}$ получаем $\sigma_v \approx 5 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2$ и, соответственно, пробег $\lambda_v = 4.2 \cdot 10^{-2} \text{ см}$.

Как показано в работе [Смирнов, Ступицкий, 2010] на основе детальных расчетов в приближении молекулярной динамики, ионы ППВ проникают в вещество S_i на глубину $\cong 1 \text{ мкм}$, то есть это существенное поверхностное воздействие.

Оценим характерное время процессов энерговыделения и их временную последовательность применительно к условиям взрыва на высоте, близкой к оптимальной ($h \approx 40 \text{ м}$), и для эпицентральной области на поверхности астероида ($r \approx h$). Первыми, за время $\approx 10^{-7}$, с приходят импульсы рентгеновского и γ -излучения. Рентгеновское излучение за счет фотоэффекта с К-оболочки образует электроны с энергией $\sim 100\text{--}1000 \text{ эВ}$, γ -кванты в результате комптон-эффекта образуют МэВ-е электроны. В дальнейшем происходит ионизация вещества этими быстрыми электронами и одновременно передача энергии от электронов к ионам, т. е. осуществляется разогрев вещества. Так как рентгеновское излучение уносит основную долю энергии взрыва, а толщина слоя его поглощения мала, то в этом слое достигаются высокие температуры ($\approx 100 \text{ эВ}$).

При энергии электронов $\varepsilon_e \approx 100 \div 150 \text{ эВ}$ сечение электронной ионизации максимально и составляет $\sigma_i \approx 10^{-16} \text{ см}^2$. Тогда тепловая скорость электронов $\bar{v}_e \approx 7 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ и характерное время ионизации $\tau_i \approx 1 / n \bar{v}_e \approx 4 \cdot 10^{-16} \text{ с}$, т. е. очень мало. Характерное время передачи энергии ионам равно

$$\tau_{ei} = \frac{3.15 \cdot 10^8 A T_{\text{эл}}^{3/2}}{n_z z^2 \Lambda}.$$

Полагая $n_z = n$, $\Lambda = 10$, получим $\tau_{ei} = \frac{1.6 \cdot 10^{-11}}{z^2} \text{ с}$ при $z = 1 \div 10$, $\tau_{ei} = 1.6 \cdot 10^{-11} \div 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ с}$.

Характерное время газодинамического расширения разогретого слоя Δ_v по порядку величины $\tau_g \approx \Delta_v / v \approx 10^{-8}$ с (при $\Delta_v = 0.04$ см и $v = 1.56 \cdot 10^6 \sqrt{T_{эл} / A} = 3.1 \cdot 10^6$ см/с).

Таким образом, в рентгеновском слое поглощения $\tau_g \gg \tau_i, \tau_{ei}$, и можно полагать, что трансформация энергии рентгеновского излучения в ионизацию и тепло произойдет задолго до того, как слой успеет заметно расшириться. Время распространения рентгеновского импульса $r / c \approx 1.3 \cdot 10^{-7}$ с, затем, по истечении времени порядка 10^{-8} с, начинается расширение разогретого РИ слоя вещества и формирование импульса отдачи астероиду.

Через время $\sim r / v_n \approx 1.5 \cdot 10^{-6}$ с приходит импульс нейтронов. Рассеяние энергии нейтронов происходит на атомах, т. е. сразу переходит в тепло. Общая энергия нейтронного потока значительно меньше энергии РИ, а глубина слоя их рассеяния энергии $\Delta_n \gg \Delta_v$, поэтому, как показывают аналогичные оценки и приведенные ниже результаты расчетов, температура в слое Δ_n значительно ниже, чем в слое Δ_v , и, тем более, можно предполагать, что за время выделения энергии нейтронами вещество в слое Δ_n не успеет заметно расшириться: $\tau_g = \Delta_n / v \gg \tau_n = \Delta_n / v_n$, так как $\bar{v} \sim 10^6$ см/с, $v_n = 2.7 \cdot 10^9$ см/с. Таким образом, второй импульс обусловлен импульсом, который дают сами нейтроны, и импульсом отдачи слоя Δ_n .

Поверхностная плотность потока импульса высокоэнергетичных нейтронов в направлении оси OO_1 равна

$$\sigma_{n\parallel} = \frac{dP_{n\parallel}}{dS} = \frac{P_n}{4\pi r^2} \cos(\alpha + \beta) \cos \alpha. \quad (3)$$

Здесь $dS = 2\pi R^2 \sin \beta d\beta$, $r = [h + R(1 - \cos \beta)] / \cos \alpha$, $\cos \alpha = \frac{1 + h/R - \cos \beta}{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{h}{R}\right)^2 - 2\left(1 + \frac{h}{R}\right) \cos \beta}}$.

Полный импульс нейтронов $P_n = \sqrt{2m_n N_n E \delta_n}$ и его величина, направленная по OO_1 , таковы:

$$P_{n\parallel} = \frac{1}{2} P_n \int_0^{\beta_k} \left(\frac{R}{r}\right)^2 \sin \beta \cos(\alpha + \beta) \cos \alpha d\beta. \quad (4)$$

Аналогичными выражениями определяются плотность потока $\sigma_{p\parallel}$ и суммарный импульс $P_{p\parallel}$, создаваемый плазмой продуктов взрыва, для которой полный импульс $P_p = \sqrt{2m_p N_p E \delta_p}$ (рис. 2). Так как средняя длина пробега нейтронов и γ -излучения примерно одинакова $\lambda_n \approx \lambda_\gamma$, то толщина слоев, в которых происходит энергосвечение, зависит от угла β :

$$\Delta_{n\gamma} = \lambda_{n\gamma} \cos(\alpha + \beta), \quad \Delta_v = \lambda_v \cos(\alpha + \beta). \quad (5)$$

Плотность выделившейся энергии в этих слоях определяется выражениями

$$\rho_{En\gamma} = \frac{E(\delta_n + \delta_\gamma)}{4\pi r^2 \rho \lambda_{n\gamma}}, \quad \rho_{Ev} = \frac{E \delta_v}{4\pi r^2 \rho \lambda_v}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны плотности энергии в зависимости от угла в гамма-нейтронном и рентгеновском слоях поглощения.

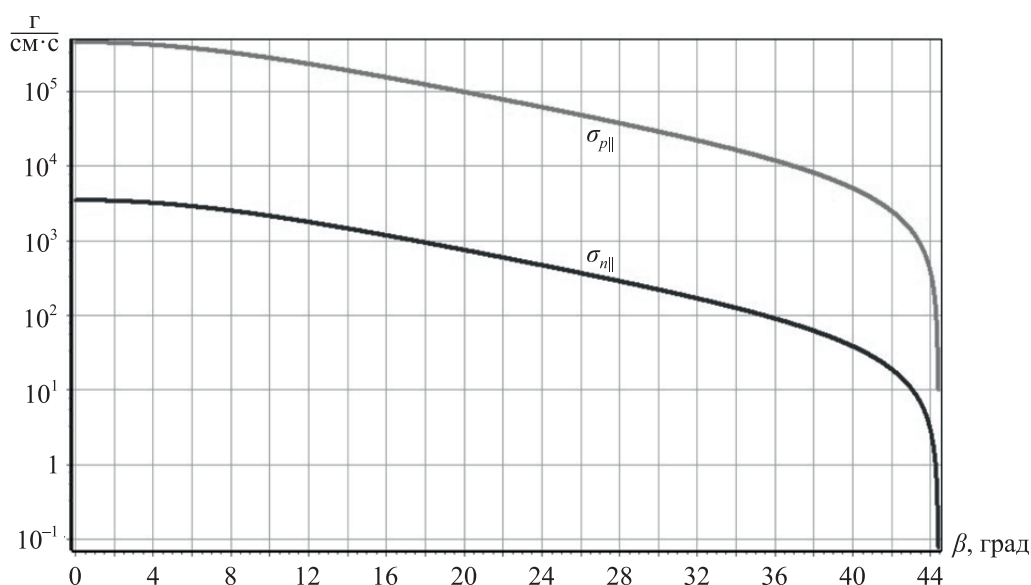


Рис. 2. Проекция плотности потока импульса плазмы $\sigma_{p||}$ и нейтронов $\sigma_{n||}$, созданных продуктами ядерного взрыва, на поверхность астероида в зависимости от угла β

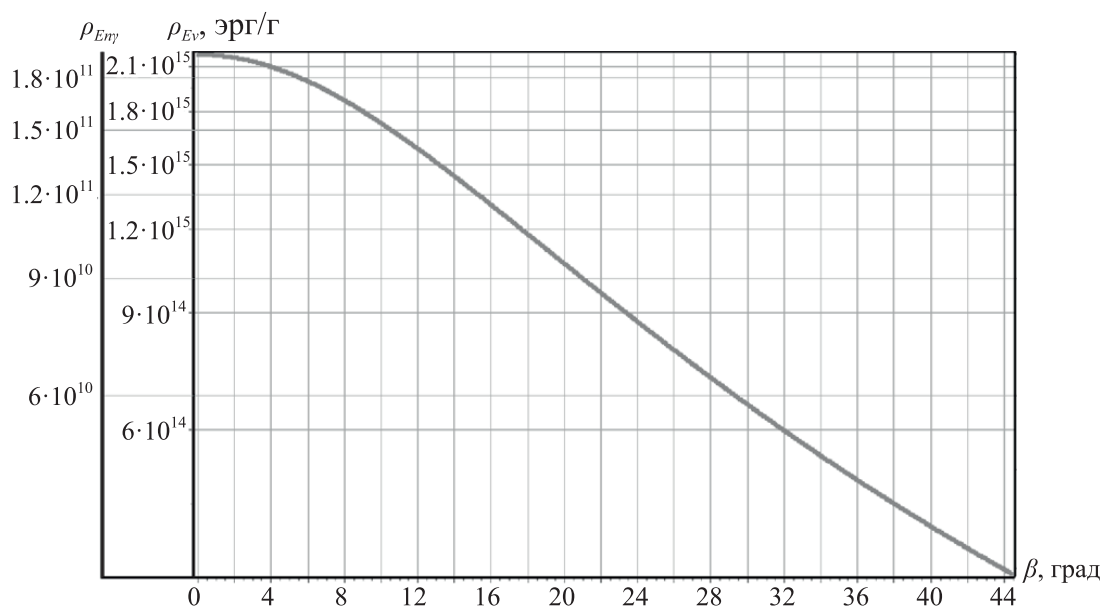


Рис. 3. Плотность выделившейся энергии в слое гамма-нейтронного поглощения $\rho_{E\gamma}$ и рентгеновского излучения $\rho_{E\nu}$ в зависимости от угла β

В рентгеновском слое она значительно выше, чем в гамма-нейтронном. Полная масса и энергия в этих слоях определялись из выражений

$$\begin{aligned} M_{0n\gamma} &= 2\pi R^2 \rho \lambda_n \int_0^{\beta_k} \sin \beta \cos(\alpha + \beta) d\beta, \\ E_{n\gamma} &= \frac{1}{2} (\delta_n + \delta_\gamma) \int_0^{\beta_k} \left(\frac{R}{r} \right)^2 \sin \beta \cos(\alpha + \beta) d\beta. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогичные выражения имеют место для $M_{0\nu}$, E_ν , E_p .

Следует отметить, что плазма продуктов взрыва приходит через время, равное $4 \cdot 10^{-5}$ с, когда нейтронный слой отлетел уже на расстояние порядка метра и на еще большее расстояние отлетел рентгеновский слой. Плазменный поток растянут во времени $\sim \frac{1}{t^3}$, и, передавая импульс астероиду, его воздействие на поверхность, по-видимому, носит эрозионный характер.

Через плотность энергии определяются повышение температуры в обоих слоях и, соответственно, их скорости теплового расширения и импульса отдачи:

$$\Delta T_v = (\rho_{Ev} - Q - Q_i) \frac{1}{C}, \quad (8)$$

где Q — удельная энергия разрушения структуры материала астероида. Теплота плавления алюминия — $3.8 \cdot 10^9$ эрг/г, железа — $2.7 \cdot 10^9$ эрг/г. В аморфных телах, которыми, по-видимому, в основном и являются астероиды, нет четкого значения энергии связи частиц в положении равновесия, но по приближенным представлениям ее среднее значение имеет порядок 1 эВ [Смирнов, Ступицкий, 2010]. Тогда удельная энергия разрушения для вещества с $A = 25$ г/моль составляет примерно $3 \cdot 10^{10}$ эрг/г. Теплота испарения близка к значению $9 \cdot 10^{10}$ эрг/г.

Для Q_i — удельной энергии ионизации вещества астероида — было получено аппроксимационное выражение в зависимости от степени ионизации $\alpha = n_e/n$ вещества на основе расчетов в работе [Замышляев и др., 1984]: для его удельной теплоемкости — $C = 5 \cdot 10^6 (1 + \alpha)$ эрг/г · град.

Средняя скорость определяется выражением

$$v_v = 3.2 \cdot 10^3 \sqrt{T_0 + \Delta T_v} \text{ см/с}. \quad (9)$$

Аналогичные выражения используются для расчета $\Delta T_{n\gamma}$, $v_{n\gamma}$. На рис. 4 показано угловое распределение температур и скоростей.

Эти значения используются для расчета проекции импульса отдачи от нейтронов и рентгена по направлению OO_1 :

$$P_{0v\parallel} = 2\pi R^2 \rho \lambda_v \int_0^{\beta_k} v_v(\beta) \sin \beta \cos(\alpha + \beta) \cos \beta d\beta, \quad (10)$$

$$P_{0n\parallel} = 2\pi R^2 \rho \lambda_n \int_0^{\beta_k} v_{n\gamma}(\beta) \sin \beta \cos(\alpha + \beta) \cos \beta d\beta.$$

Таким образом, рассчитывается суммарный импульс, который получает от взрыва астероид:

$$P_{0\Sigma} = P_{n\parallel} + P_{p\parallel} + P_{0n\parallel} + P_{0v\parallel}. \quad (11)$$

Приобретаемая от этого импульса скорость астероида такова:

$$u = P_{0\Sigma} / M. \quad (12)$$

В таблице 1 приведены основные интегральные величины, полученные в расчетах.

Таблица 1. Интегральные по углу величины массы, импульса и энергии

$P_{n\parallel}$ [г · см/с]	$P_{p\parallel}$ [г · см/с]	M_{0n} [г]	M_{0v} [г]	$P_{0n\parallel}$ [г · см/с]	$P_{0v\parallel}$ [г · см/с]
$8.873 \cdot 10^{10}$	$1.156 \cdot 10^{13}$	$2.053 \cdot 10^9$	$4.928 \cdot 10^6$	$7.462 \cdot 10^{14}$	$5.036 \cdot 10^{13}$
$E_{n\gamma}$ [эрг]	E_v [эрг]	E_p [эрг]	$P_{0\Sigma}$ [г · см/с]	u_0 [см/с]	E_Σ [эрг]
$2.030 \cdot 10^{20}$	$5.484 \cdot 10^{21}$	$6.164 \cdot 10^{20}$	$8.082 \cdot 10^{14}$	96	$6.303 \cdot 10^{21}$

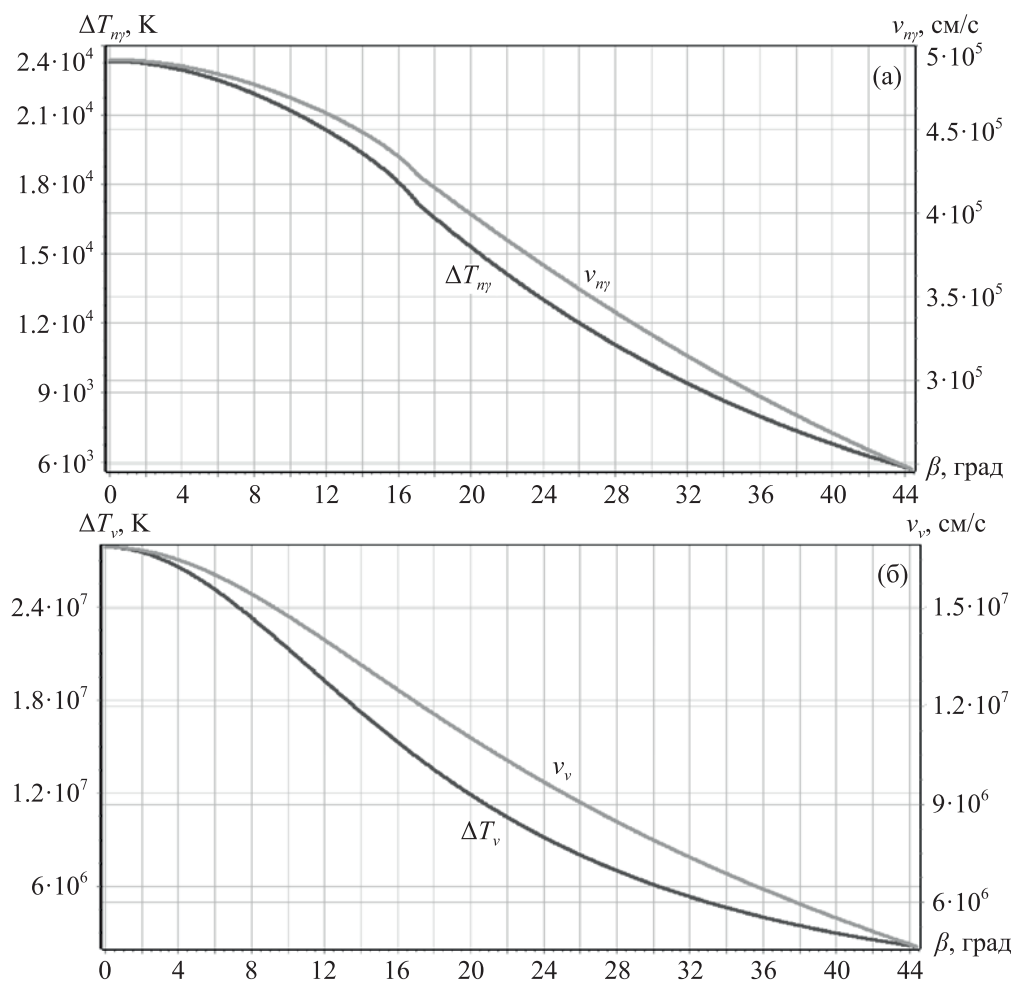


Рис. 4. Распределение температур T и скоростей v в слоях поглощения нейтронного (а) и рентгеновского (б) излучения в зависимости от угла β

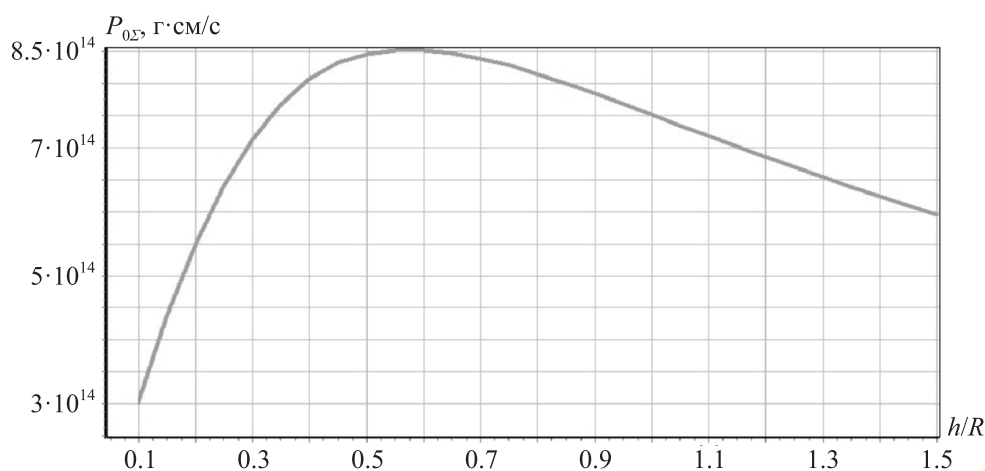


Рис. 5. Суммарный импульс, определяемый по формуле (11), который получает астероид, в зависимости от высоты взрыва ядерного заряда на расстоянии h

Проведены также расчеты для различных высот взрыва. Результаты расчета показывают, что корректный учет геометрии откольных слоев астероида приведет к существенному смещению оптимальной высоты взрыва (рис. 5).

3. Оценка процесса фрагментации астероида

На настоящее время отсутствуют несколько-нибудь обоснованные представления о структуре материала каменных астероидов [Ghiorso, Nevins et al., 2009; Chopelas, 1990]. По-видимому, можно предположить, что в результате длительного воздействия солнечного излучения их каменные структуры содержат большое количество трещин различного размера. Поэтому волны сжатия и разрежения, формируемые внутри астероида нейтронными, рентгеновскими и плазменными потоками, могут приводить к его дроблению [Solem, 1993].

Несмотря на то что существуют силовой и энергетический подходы к развитию трещин в материале [Партон, 1990; Николаева, 2010], сам процесс его разрушения обычно описывается сугубо эмпирически. Известный критерий Гриффитса [Николаева, 2010] основан на балансе энергии, однако трудность состоит в количественном определении соотношения между энергией и динамической фрагментацией, приводящей к определенному массовому спектру осколков дробления при заданных конкретных условиях эксперимента.

В работе [Орленко и др., 2012] выполнены расчеты энергии ядерного заряда, необходимого для разрушения опасных астероидов диаметром более 100 м, при взрывах на различных глубинах от поверхности до центра астероида. Под разрушением авторы, по-видимому, понимают дробление астероида на фрагменты размером не больше нескольких метров, которые определенно сгорят в атмосфере планеты. Однако, как показано в ряде работ [Григал и др., 1997], заглубление ЯЗ более чем на несколько метров практически невозможно, оценок размеров фрагментов нет даже для малоуглубленных взрывов. В работе [Пилюгин и др., 2001] моделируется разрушение космических тел при высокоскоростном ударе в лабораторных условиях с использованием оргстекла в качестве мишени. Показано, что распределение фрагментов ударного кратера по массам подчиняется степенному закону, и это согласуется с данными других авторов для других материалов, что свидетельствует о возможности оценки фрагментации на основе достаточно общих энергетических соображений.

В работе [Grady, 1982] энергетический подход основан на равновесном балансе поверхностной энергии фрагмента и локальной кинетической энергии. Используется модель расширения жидкой капли, что может быть неприменимо для каменного материала. Следует отметить, что задача об оптимизации воздействия взрыва на астероид связана с задачей о последствиях высокоскоростного соударения Земли с облаками, образующимися при взрыве осколков, т. е. с задачей о фрагментации, решения которой применительно к астероиду в достаточно удовлетворительном виде пока не существует [Кондауров и др., 1996; Фортов, 2005].

По данной проблеме ряд работ был выполнен учеными РФЯЦ-ВНИИЭФ. В работе [Заграфов и др., 1996] для контактного взрыва, на основе подхода, изложенного в [Grady, 1982], оценена энергия, необходимая для получения фрагментов различного радиуса: в частности, для $R = 10$ м $E_0 = 0.02$ кт и для $R = 100$ м $E_0 = 3$ Мт. По оценкам работы [Заграфов и др., 2009], для контактного взрыва сделан вывод о незначительности доли, по мнению авторов, энергии, идущей на фрагментацию, поэтому достаточное отклонение траектории астероида как целого объекта невозможно без его разрушения.

Значительное количество образовавшихся осколков размером в несколько десятков метров, которые не смогут сгореть в атмосфере, ставит дополнительную задачу о способах их ликвидации.

На основе численного моделирования, проведенного в работах [Шаненко и др., 2016, 2017], исследуется процесс формирования волн сжатия и разрежения в астероиде при поглощении нейтронов и рентгеновского излучения ЯВ, которые могут привести к фрагментации по крайней мере поверхностных слоев астероида.

Для оценки среднего размера осколка при фрагментации будем предполагать, что разрушение происходит при достаточной предельной упругой деформации внутри астероида, соответствующей предельному напряжению σ_m . Полагая $\sigma_m = E\Delta l_m / R$, $U = \frac{1}{2}F_m\Delta l_m$, $\sigma_m = \frac{F_m}{S}$,

получаем $U = \frac{1}{2} \frac{\sigma_m^2 SR}{E}$, где E — модуль Юнга, $S = 4\pi r^2$ — площадь поверхности осколка (полагая ее сферической), через которую происходит упругой взаимодействие с другими фрагментами вплоть до их отделения. Тогда

$$E_g = UN, \quad (13)$$

где E_g — энергия, выделившаяся на астероиде, которая переходит в предельную энергию упругой деформации.

В результате получаем для среднего размера фрагмента соотношение

$$r = \frac{2\pi R^4 \sigma_m^2}{EE_g}. \quad (14)$$

Поскольку материал астероида не известен достаточно определенно, чтобы использовать адекватное значение σ_m и E , а также можно говорить лишь о приближенном значении E_g , то структура полученного соотношения (14) была проверена на простом эксперименте, в определенной степени соответствующего логике его получения. С определенной высоты h , составляющей несколько метров, на абсолютно твердую поверхность падало тело (кирпич) и раскалывалось на фрагменты различного размера. Так как в справочных изданиях имеется значительный разброс в значениях σ_m и E , в соответствии с имеющимися данными в настоящей работе использовались их средние значения: $\bar{\sigma}_m = 1.87 \cdot 10^7$ Па и $\bar{E} = 2.75 \cdot 10^{10}$ Па. Полагая, что вся потенциальная энергия mgh переходит в E_g , получим, что при принятых в эксперименте значениях $m = 3.3$ кт и $h = 3$ м из (14) следует, что $r = 2.65$ см, значение достаточно хорошо соответствует среднему значению r , полученному в эксперименте. Этот факт, по-видимому, свидетельствует о том, что соотношение (14), хотя и очень приближенно, в целом правильно описывает зависимость среднего значения размера осколков от параметров задачи. Распределение по количеству осколков данного размера также примерно соответствует степенной зависимости, что характерно для процесса фрагментации [Астероидно-кометная..., 1996; Пилюгин и др., 2001].

Изложенные выше результаты расчетов показывают, что при принятых исходных параметрах суммарная энергия, переданная поглощенному слою астероида, составляет $\approx 15\%$ от E_0 , т. е. $\approx 6.3 \cdot 10^{21}$ эрг. В результате передачи импульса скорость астероида в направлении OO_1 (рис. 1) будет $u \approx 100$ см/с и, соответственно, кинетическая энергия его движения $Mu^2/2 \approx 4.2 \cdot 10^{16}$ эрг. Исходя из общефизических соображений (теорема вириала), можно предположить, что примерно такая же энергия уйдет на упругую деформацию, которая и приведет к фрагментации. Определяющий вклад в передачу энергии астероиду дают ударные волны, формируемые импульсами рентгеновского и нейтронного излучения, а также продуктам ядерного взрыва.

Однако из геометрии задачи ясно, что эти достаточно мощные возмущения выделяют свою энергию по сходящемуся направлению, примерно в конусе с телесным углом $2\pi(1 - \cos \beta_k)$. В случае оптимальной высоты взрыва $h = (\sqrt{2} - 1)R$ получаем $\beta_k = 45^\circ$, и этот телесный угол равен $\pi(2 - \sqrt{2})/2$ и составляет от общего объема астероида часть $(2 - \sqrt{2})/8$.

Оценим эквивалентный сферический радиус этого секторного объема: $r_3 = R \sqrt[3]{(2 - \sqrt{2})/8} = 0.42R = 42$ м. Если оценить r из (14), полагая в качестве размера тела его эффективный радиус $r_3 = 42$ м, энергию, которая в нем выделяется, $4.2 \cdot 10^{16}$ эрг = $4.2 \cdot 10^9$ Дж и те же значения $\bar{\sigma}_m$

и \bar{E} , что для кирпича, то получим $r = 58$ м, то есть по порядку величины этот радиус соответствует r_3 .

Таким образом, анализ геометрических и физических представлений показывает, что полученное выражение (14), по-видимому, дает физически правильное представление о размере фрагмента астероида. Так как мощность взрыва 1 Мт относительно размера астероида $D = 200$ м невелика, то можно ожидать развала астероида на достаточно крупные осколки, число которых порядка $N \cong (R/r)^3 \approx 8$. И тогда для их ликвидации можно использовать второй эшелон ядерных взрывов сравнительно малой мощности (~ 1 кт).

Определенная трудность существует в процессе наведения ядерных зарядов на эти осколки астероида, поскольку радиофизическая обстановка после первого мощного взрыва осложняется образовавшимся ионизированным облаком (ИО). Степень ионизации ИО определяется расширяющимися продуктами ядерного взрыва, к которым добавляется отлетевшее вещество астероида. Основная масса облака связана с добавлением нейтронов $M_{0n} = 2 \cdot 10^9$ г, однако его степень ионизации невелика. Существенно ионизован расширяющийся тонкий слой, образованный рентгеновским излучением. Его масса $M_{0v} = 5 \cdot 10^6$ г сравнима с массой ППВ $M_p = 10^6$ г. Как показывают расчеты [Ступицкий, Холодов, 2019], в результате быстрого расширения происходит закалка зарядового состава. При удельной энергии $\sim 4.2 \cdot 10^{12}$ Дж/кт средняя степень ионизации расширяющейся плазмы $\alpha \sim 1$.

Однако плазменное облако взрыва расширяется со скоростью $\sim 10^8$ см/с, и, соответственно, электронная концентрация падает в среднем как

$$n_e = \frac{N}{\frac{4}{5}\pi(vt)^3}.$$

После того как электронная концентрация удовлетворит неравенству $n_e < n_e^*$ (где n_e^* — критическая электронная концентрация, которая пропорциональна квадрату частоты электромагнитной волны $\sim f^2$), электромагнитные волны могут с определенным поглощением проходить через ионизированную область. На рис. 6 показаны изменение n_e^* и время t (с), через которое становится возможным прохождение волны через ИО.

Но за это время все фрагменты астероида успеют сместиться на расстояние S от места воздействия на него первого мощного взрыва. Для $f = 1$ ГГц это смещение составляет примерно 200 м при первоначальной скорости его движения ~ 30 км/с. Таким образом, возникает кинематическая задача о возможности наведения маломощных ядерных зарядов на крупные осколки астероида.

В данной работе обсуждаются лишь некоторые физические вопросы проблемы устранения астероидной опасности, и в цель работы не входило обсуждение кинематических вопросов пространственно-временной ориентации рассматриваемых объектов в процессе их динамики.

Заключение

Выполненное в настоящей работе достаточно подробное исследование трансформации энергии надповерхностного ядерного взрыва при его воздействии на астероид показало, что основной вклад в импульс дает разогретая разлетающаяся масса, образуемая потоком нейтронов $7.4 \cdot 10^{14}$ дин \cdot с. Приобретаемая от этого импульса скорость астероида $\sim 10^2$ см/с. На основе полученного приближенного соотношения для среднего размера фрагмента показано, что при принятой мощности взрыва ~ 1 Мт, по-видимому, возможно образование только нескольких крупных фрагментов. По предложенной двухмодульной ракетной системе оценена возможность их уничтожения воздействием дополнительного набора маломощных ядерных зарядов.

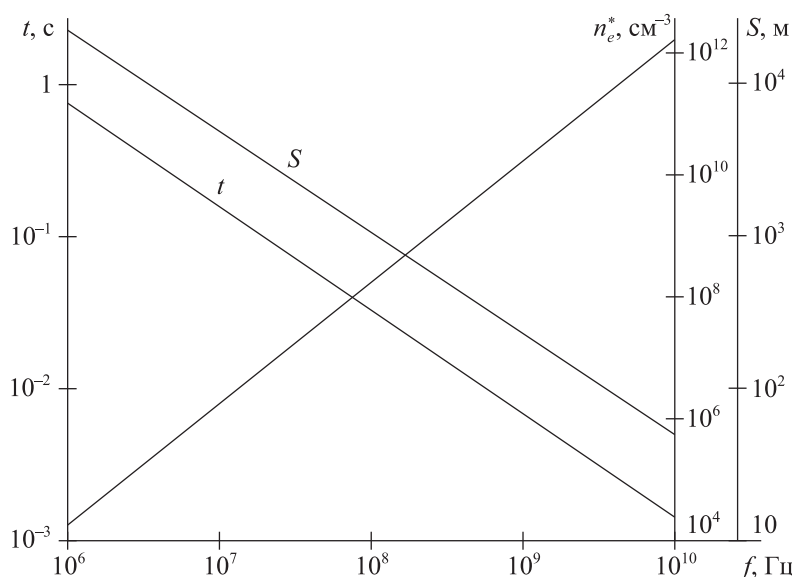


Рис. 6. Зависимость времени задержки t от возможности прохождения радиосигнала частоты f через ионизированную область, когда концентрация электронов в ней равна критической n_e^* для данной f , а удаление фрагмента астероида от его начального положения (при $t = 0$, момент взрыва) равно S

Список литературы (References)

- Андрющенко В. А., Головешкин В. А., Султанов И. А., Шевелев Ю. Д. Кометно-астероидная опасность и возможность ее предотвращения. Состояние вопроса: обзор // Проблемы вычислительной и прикладной механики. Автоматизация моделирования: сборник. — Вып. 1. — М.: МАКС Пресс, 2007. — С. 51–81.
- Andrushchenko V. A., Goloveshkin V. A., Sultanov I. A., Shevelev Yu. D. Kometno-asteroidnaya opasnost' i vozmozhnost' ee predotvrashcheniya. Sostoyanie voprosa: obzor [Comet-asteroid hazard and the possibility of its prevention. Issue Status: Review] // Problemy vychislitel'noy i prikladnoy mekhaniki. Avtomatizatsiya modelirovaniya: sbornik. — Vyp. 1. — Moscow: MAKSS Press, 2007. — P. 51–81 (in Russian).
- Астероидно-кометная опасность / под ред. А. Г. Сокольского. — СПб.: ИТА РАН, 1996.
- Asteroidno-kometnaya opasnost' [Asteroid-comet hazard] / pod red. A. G. Sokol'skogo. — St. Petersburg: ITA RAN, 1996 (in Russian).
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М.: Физматлит, 2010.
- Asteroidno-kometnaya opasnost': vchera, segodnya, zavtra. [Asteroid-comet hazard: yesterday, today, tomorrow] / pod red. B. M. Shustova, L. V. Ryhlovoj. — Moscow: Fizmatlit, 2010 (in Russian).
- Григал П. В., Любимов А. Г., Пиджаков В. А., Таранов А. А., Чистов В. Г. 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.
- Grigal P. V., Lyubimov A. G., Pidzhakov V. A., Taranov A. A., Chistov V. G. Spособ za-glublениya v asteroid yadernogo ustrojstva [The method of penetration into an asteroid of a nuclear device] // Trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Kosmicheskaya zashchita Zemli". Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra. Specvypusk. Ch. 1 [Proc. Int. Symp. "Space Protection of the Earth"]. — Chelyabinsk, 1997. — P. 201–204 (in Russian).
- Дегтярь В. Г., Волков В. А. Ракетная концепция системы противастероидной защиты Земли. — М.: Машиностроение, 2013.
- Degtyar' V. G., Volkov V. A. Raketnaya koncepciya sistemy protivasteroidnoj zashchity Zemli [Rocket concept of the Earth's anti-steroid defense system]. — Moscow: Mashinostroenie, 2013 (in Russian).
- Заграфов В. Г., Шаненко А. К. Использование ядерных взрывов для перехвата опасных космических объектов // Атомная энергия. — 1996. — Т. 80, №. 4. — С. 21.

- Zagrafov V. G., Shanenko A. K.* Using nuclear explosions to intercept dangerous space objects // Atomic energy. — 1996. — Vol. 80, Issue. 4. — P. 293–300. (Original Russian paper: *Zagrafov V. G., Shanenko A. K.* Ispol'zovanie yadernykh vzryvov dlya perekhvata opasnykh kosmicheskikh ob'ektov // Atomnaya energiya. — 1996. — Vol. 80, No. 4. — P. 293–300.)
- Заграфов В. Г., Шаненко А. К., Рыжанский В. А., Иванов А. Г.* Применение ядерных взрывов для воздействия на малые космические тела в случае опасности столкновения с Землей // Вопросы атомной науки и техники. Сер. ТИПФ. — 2009. — № 2. — С. 45–53.
- Zagrafov V. G., Shanenko A. K., Ryzhanskij V. A., Ivanov A. G.* Primenenie yadernykh vzryvov dlya vozdeystviya na malye kosmicheskie tela v sluchae opasnosti stolknove-niya s Zemlej [The use of nuclear explosions to impact small space bodies in the event of a collision with the Earth] // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser. TiPF. — 2009. — No. 2. — P. 45–53 (in Russian).
- Замышляев Б. В., Ступицкий Е. Л., Гузь А. Г., Жуков В. Н.* Состав и термодинамические функции плазмы: справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Zamyshlyayev B. V., Stupitsky E. L., Guz' A. G., Zhukov V. N.* Sostav i termodinamicheskie funkicii plazmy: spravochnik [Composition and thermodynamic functions of plasma. Directory]. — Moscow: Energoatomizdat, 1984 (in Russian).
- Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Физматлит, 2008.
- Zel'dovich Ya. B., Rajzer Yu. P.* Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodi-namicheskikh yavlenij [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. — Moscow: Fizmatlit, 1988 (in Russian).
- Катастрофические воздействия космических тел / под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова.* — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.
- Katastroficheskie vozdeystviya kosmicheskikh tel* [The catastrophic effects of space bodies] / pod red. V. V. Adushkina, I. V. Nemchinova. — Moscow: IKC “Akademkniga”, 2005 (in Russian).
- Коблов П. И., Симоненко В. А., Иванов Ю. А. и др.* Основные требования к ядерному взрывному устройству (ЯЗУ) для использования в системе защиты Земли (СЗЗ) от астероидов и комет // Известия ВНИИТФ, г. Снежинск. — Ч. 1. — 1997. — С. 182–186.
- Koblov P. I., Simonenko V. A., Ivanov Yu. A. et al.* Osnovnye trebovaniya k yadernomu vzryvnomu ustrojstvu (YaZU) dlya ispol'zovaniya v sisteme zashchity Zemli (SZZ) ot asteroidov i komet [Basic requirements for a nuclear explosive device (NED) for use in the Earth's protection system (EPS) against asteroids and comets] // Izvestiya VNIITF, g. Snezhinsk. — Ch. 1. — 1997. — P. 182–186 (in Russian).
- Кондауров В. И., Ломов И. Н., Фортков В. Е.* О действии мощного взрыва на астероид // ДАН РАН. — 1996. — Т. 348, № 2. — С. 184–187.
- Kondaurov V. I., Lomov I. N., Fortov V. E.* The effect of a powerful explosion on an asteroid // Physics — Doklady. — 1996. — Vol. 41, Iss. 5. — P. 199–202. (Original Russian paper: *Kondaurov V. I., Lomov I. N., Fortov V. E.* O deystvii moshchnogo vzryva na asteroid // DAN RAN. — 1996. — Vol. 348, No. 2. — P. 184–187.)
- Мухин К. Н.* Экспериментальная ядерная физика. — Т. 1. — М.: Энергоатомиздат, 1993.
- Muhin K. N.* Eksperimental'naya yadernaya fizika [Experimental nuclear physics]. — Vol. 1. — Moscow: Energoatomizdat, 1993 (in Russian).
- Николаева Е. А.* Основы механики разрушения. — Пермь: ПГТУ, 2010.
- Nikolaeva E. A.* Osnovy mekhaniki razrusheniya [Fundamentals of fracture mechanics]. — Perm': PGUTU, 2010 (in Russian).
- Орленко Л. П., Еськов Д. А., Симонов А. К.* Борьба с астероидами с помощью энергии взрыва // Вопросы оборонной техники. Сер. 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2012. — № 9–10. — С. 7–12.
- Orlenko L. P., Es'kov D. A., Simonov A. K.* Bor'ba s asteroidami s pomoshch'yu energii vzryva [Fight against asteroids using explosion energy] // Voprosy oboronnoj tekhniki. Ser. 16: Tekhnicheskie sredstva protivodej-stviya terrorizmu. — 2012. — No. 9–10. — P. 7–12 (in Russian).
- Партон В. З.* Механика разрушения — от теории к практике. — М.: Наука, 1990.
- Parton V. Z.* Mekhanika razrusheniya — ot teorii k praktike [The mechanics of destruction — from theory to practice]. — Moscow: Nauka, 1990 (in Russian).
- Пилюгин Н. Н., Виноградов Ю. А., Ермолаев И. К.* О моделировании разрушения космических тел при высокоскоростном ударе // Астрономический вестник. — 2001. — Т. 35, № 2. — С. 156–166.
- Pilyugin N. N., Vinogradov Yu. A., Ermolaev I. K.* On the modeling of the disruption of cosmic bodies at high-speed impacts // Solar System Research. — 2001. — Vol. 35, Iss. 2. — P. 141–150. (Original Russian paper: *Pilyugin N. N., Vinogradov Yu. A., Ermolaev I. K.* O modelirovani razrusheniya kosmicheskikh tel pri vysokoskorostnom udare // Astronomicheskij vestnik. — 2001. — Vol. 35, No. 2. — P. 156–166.)

- Родионов В. В., Возовиков В. В., Задворнов Ю. А. и др.* Ядерные средства воздействия на опасные космические объекты. Состав и схема функционирования // Известия ВНИИТФ, г. Снежинск. — Ч. 1. — 1997. — С. 187–193.
Rodionov V. V., Vozovikov V. V., Zadvornov Yu. A. et al. Yadernye sredstva vozdeystviya na opasnye kosmicheskie ob'ekty. Sostav i skhema funkcionirovaniya [Nuclear means of influence on dangerous space objects. The composition and functioning scheme] // Izvestiya VNIITF, g. Snezhinsk. — Ch. 1. — 1997. — P. 187–193 (in Russian).
- Смирнов Е. В., Стулицкий Е. Л.* Численное моделирование воздействия разреженного плазменного потока на поверхность твердого тела // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2010. — № 11. — С. 102–112.
Smirnov E. V., Stupitskii E. L. Numerical simulation of the effect of rarefied plasma flow on the solid surface // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2010. — Vol. 4, No. 4. — P. 965–975. (Original Russian paper: *Smirnov E. V., Stupitskii E. L.* Chislennoe modelirovanie vozdeystviya razrezhnogo plazmennogo potoka na poverhnost' tverdogo tela // Poverhnost'. Rentgenovskie, sin-hrotronnye i nejtronnye issledovaniya. — 2010. — No. 11. — P. 102–112.)
- Солнечная система / под ред. В. Г. Сурдина. — М.: Физматлит, 2017.
 Solnechnaya sistema [Solar system] / pod red. V. G. Surdina. — Moscow: Fizmatlit, 2017 (in Russian).
- Стулицкий Е. Л., Холодов А. С.* Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов. — Долгопрудный: Интеллект, 2019.
Stupitskii E. L., Holodov A. S. Fizicheskie issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie krupnomasshtabnykh geofizicheskikh eksperimentov [Physical research and mathematical modeling of large-scale geophysical experiments]. — Dolgoprudny: Intellect, 2019 (in Russian).
- Физика ядерного взрыва. — Т. 1. — М.: Физматлит, 2009.
 Fizika yadernogo vzryva [Physics of Nuclear Explosion]. — Vol. 1. — Moscow: Fizmatlit, 2009 (in Russian).
- Форт В. Е.* О действии мощного взрыва на астероид // Избранные статьи и доклады. Ред.-изд. Отдел ИПХФ РАН. — Черноголовка, 2005. — С. 501–503.
Fortov V. E. O deystvii moshchnogo vzryva na asteroid [On the effect of a powerful explosion on an asteroid] // Izbrannye stat'i i doklady. Red.-izd. Otdel IPHF RAN. — Chernogolovka, 2005. — P. 501–503 (in Russian).
- Шаненко А. К., Соколов С. С., Мотлохов В. Н. и др.* Изменение траектории опасного космического тела // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. — 2016. — № 1. — С. 53–59.
Shanenko A. K., Sokolov S. S., Motlokhov V. N. et al. Izmenenie traektorii opasnogo kosmicheskogo tela [Changing the trajectory of a dangerous space body] // VANT. Ser. Teoreticheskaya i prikladnaya fizika. — 2016. — No. 1. — P. 53–59 (in Russian).
- Шаненко А. К., Соколов С. С., Мотлохов В. Н. и др.* Численное моделирование воздействия высокого ядерного заряда на астероид // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. — 2017. — № 1. — С. 8–14.
Shanenko A. K., Sokolov S. S., Motlokhov V. N. et al. Chislennoe modelirovanie vozdeystviya vysokogo yadernogo zaryada na asteroid [Numerical simulation of the effects of a high nuclear charge on an asteroid] // VANT. Ser. Teoreticheskaya i prikladnaya fizika. — 2017. — No. 1. — P. 8–14 (in Russian).
- Borovička J., Spurný P., Brown P., Wiegert P. et al.* The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor // Nature. — 2013. — Vol. 503. — P. 235–237.
- Cepelcha Z., Revelle D. O.* Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss and radiation in the atmosphere // Meteoritics and Planetary Science. — 2005. — Vol. 40, No. 1 — P. 35–54.
- Chopelas A.* Thermal properties of forsterite at mantle pressures derived from vibrational spectroscopy // Phys. Chem. Minerals. — 1990. — Vol. 17, No. 2 — P. 149–156.
- Ghiorso M. S., Nevins D., Cutler I., Spera F. J.* Molecular dynamics studies of CaAl₂Si₂O₈ liquid II. Equation of state and a thermodynamic model // Geochim Cosmochim Acta. — 2009. — Vol. 73, No. 22 — P. 6937–6951.
- Grady D. E.* Local inertial effects in dynamic fragmentation // J. Appl. Phys. — 1982. — Vol. 53, No. 1. — P. 322–325.
- McInnes C. R.* Deflection of near-Earth asteroids by kinetic energy impacts from retrograde objects // Planetary and Space Sci. — 2004. — Vol. 52, No. 7 — P. 587–590.
- Solem J. C.* Interception of comets and asteroids on collision course with Earth // Journal of Spacecraft and rockets. — 1993. — Vol. 30, No. 2 — P. 222–228.

