

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.04.037>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина, 61022
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Физические эффекты Липецкого метеороида. 1

Целью настоящей работы является оценка ряда физических эффектов, сопутствовавших падению и взрыву метеороида вблизи г. Липецк (Россия) 21 июня 2018 г. Начальная кинетическая энергия метеороида была близка к 11.7 ТДж или 2.8 кт ТНТ. В энергию световой вспышки трансформировалось около 10.4 % или 1.22 ТДж начальной кинетической энергии космического тела. Метеороид оказался каменным, точнее хондритом, с плотностью вещества около 3.3 т/м³. Космическое тело двигалось под углом к горизонту около 79°. Начальная масса тела была около 113 т, начальная скорость — 14.4 км/с, а начальный диаметр тела — 4 м. Высота взрыва Липецкого тела была близка к 27 км, а длина области взрыва — около 3.75 км. Проведено комплексное моделирование процессов во всех геосферах, вызванных падением метеороида. Оценены механические, оптические и газодинамические эффекты, сопровождавшие падение Липецкого метеороида. Показано, что основное энерговыделение (около 10¹³ Дж) имело место вблизи высоты 25...27 км, где скорость потерь массы достигала примерно 130...140 т/с, а торможение — около 21 км/с². Вблизи высоты взрыва скорость метеороида уменьшилась примерно на 12 %, масса — на 16 %. Оценены основные параметры ударной волны. Энергия и мощность взрывной ударной волны были близки к 10 ТДж и 0.8 ТВт соответственно. Вблизи эпицентра взрыва метеороида давление во фронте ударной волны составляло около 140 Па. Этого оказалось недостаточно для того, чтобы вызвать разрушения элементов конструкций сооружений. Энергия и мощность световой вспышки составили около 1.22 ТДж и 2...3 ТВт соответственно. Энергия вспышки на 5-6 порядков была меньше энергии, при которой возникает воспламенение веществ и пожары в области эпицентра. Относительные возмущения давления воздуха на ионосферных высотах

© Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2019

над эпицентром взрыва достигали десятков и даже сотен процентов.

Ключевые слова: метеороид, комплексное моделирование, механические эффекты, оптические эффекты, газодинамические эффекты.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время проблеме астероидно-кометной угрозы уделяется значительное внимание [2, 14, 21, 30]. Благодаря популяризации этой проблемы, все большее число жителей планеты осознает, что мы живем фактически в космосе, на малой и уязвимой планете.

Ввиду уникальности события и значимости последствий актуальной междисциплинарной задачей является детальное и всестороннее изучение эффектов падения на Землю каждого достаточно крупного космического тела, а также последствий такого падения. Новый всплеск интереса к эффектам метеороидов был связан с падением челябинского космического тела [1, 3, 12, 13, 16, 18—20, 22, 25, 32, 35, 36].

Другим примером подобного, но менее масштабного события является пролет Липецкого метеороида [28].

Полет и взрыв липецкого космического тела над населенными пунктами сопровождался яркой вспышкой, регистрацией его видеокамерами, микробарографами и сейсмографами (рис. 1).

Метеороид вторгся в атмосферу Земли 21 июня 2018 г. в 01:16:20 УТ. Космическое тело двигалось под углом к горизонту около 79° с начальной скоростью $v_0 = 4$ км/с [28]. Высота взрыва равнялась 27 км, энергия свечения составляла 10^{12} Дж [28]. По расчетам начальная масса тела была равна $m_0 = 113$ т, а начальный диаметр d_0 — примерно 4 м. Высота взрыва метеороида, его кинематические характеристики и найденные осколки свидетельствуют о том, что он был каменным, точнее, космическое тело представляло собой хондрит (рис. 2).

Цель настоящей работы — оценка механических, оптических и газодинамических эффектов, сопутствовавших падению Липецкого метеороида.

Методика анализа физических эффектов подобна методике, которая применялась автором при анализе физических эффектов Челябинского и Румынского метеороидов [20, 22—24].

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ПАДЕНИЕ МЕТЕОРОИДА

Падение достаточно крупных метеороидов сопровождается целым комплексом физических процессов [4]. Кинетическая энергия метеороида в процессе его полета частично расходуется на образование бал-



Рис. 1. Три последовательных фотографии Липецкого болида. На фотографиях указано местное время [Bright fireball streaks through the sky over Russia, causing sonic boom URL: <https://bgr.com/2018/06/25/fireball-asteroid-russia-video-sonic-boom/> (Дата обращения: 07.03.2019)]



Рис. 2. Фрагменты Липецкого метеороида [Karmaka meteorites. Meteoritics&Cosmochemistry URL: <http://karmaka.de/approxp=15382> (Дата обращения: 07.03.2019)]

листической ударной волны. За фронтом ударной волны происходит нагрев воздуха в ударно-сжатом слое, возбуждение колебаний молекул, их диссоциация и ионизация, т.е. образование плазмы. Определенная часть кинетической энергии частиц воздуха за фронтом ударной волны передается метеороиду за счет конвективного переноса. Электроны плазмы передают космическому телу часть энергии за счет теплопроводности. Нагретый воздух излучает электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Энергия излучения обеспечивает прогревание, расширение и разлетание паров вещества метеороида, нагревание и ионизацию воздуха перед фронтом ударной волны. Разлет паров дает свой вклад в ударную волну. Непоглощенная часть излучения высвечивается в инфракрасном, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах.

Увеличение силы сопротивления воздуха, обусловленное увеличением давления атмосферы и миделя, приводит к взрывоподобному преобразованию кинетической энергии метеороида, полному разрушению космического тела и генерации взрывной ударной волны.

Образовавшаяся при движении метеороида баллистическая волна расширяется в стороны от траектории тела, постепенно затухая. Баллистическая и взрывная волны, сложившись, образуют единую ударную волну (деление на баллистическую и взрывную волны, конечно, является условным [34]). Достигая поверхности Земли, интенсивная ударная волна от космического тела может производить механические повреждения, разрушения и землетрясение. Световая вспышка вызывает нагрев, ожоги и даже при достаточной энергии — пожары. Остатки метеороида, двигаясь с дозвуковой скоростью, выпадают на поверхность Земли.

Движение достаточно крупных космических тел, сопровождаемое генерацией ударных волн, приводит к образованию нагретого турбулентного следа в атмосфере. После взрывоподобного выделения энергии на заключительной стадии торможения часть продуктов взрыва всплывают вверх, перемещаясь вдоль следа. Образуется так называемый газопылевой плюм [14]. Нагретый след релаксирует в течение длительного времени (единицы часов).

Тепловые и ударно-волновые процессы при движении метеороида, а также плюма сопровождаются механическими, гидродинамическими, световыми, плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными, акустическими и сейсмическими возмущениями, которые подробнее рассматриваются в этой и последующих частях работы.

ИСХОДНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Взаимодействию метеороидов с атмосферой посвящено большое количество работ [6—8, 10, 15, 17, 21, 32, 33]. В работе [10] изучены особенности движения и разрушения метеороидов в атмосфере, детально

разработана теория дробления метеороидов. Дробление малых астероидов и сопутствующие эффекты исследовались в работе [33]. Развитие теории и физического механизма квазинепрерывного дробления метеороидов представлено в работах [6—8, 33]. Книга [17] посвящена применению достижений физико-химической динамики к анализу метеороидов. В монографии [21] приведены количественные оценки основных эффектов, возникающих при падении крупных космических тел на Землю.

Движение метеороида диаметром не более 20...30 м (при бóльших размерах необходимо решать систему газодинамических уравнений) в атмосфере Земли описывается известными уравнениями [4, 15]:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{C_d}{2} v^2 S - mg \sin \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \frac{C_h}{2Q} v^3 S, \quad (2)$$

$$mv \frac{d}{dt} = mg \cos \alpha - \frac{mv^2}{R_E} \cos \alpha - \frac{C_L}{2} v^2 S, \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = v \sin \alpha, \quad (4)$$

$$I = \frac{I}{2} \frac{d}{dt} mv^2, \quad (5)$$

$$i = \frac{i}{M_m v} \frac{dm}{dt}, \quad (6)$$

где m и v — масса и скорость тела, S — площадь сечения (мидель) метеороида, g — ускорение свободного падения, α — угол между касательной к траектории и горизонтом, C_d и C_L — коэффициенты динамического сопротивления и подъемной силы, C_h — коэффициент теплообмена, Q — удельная теплота сублимации, R_E — радиус Земли, ρ — плотность атмосферы на высоте z , I — коэффициент светимости, i — линейная концентрация электронов, i — коэффициент ионизации, M_m — масса молекулы метеороида.

Уравнения (1)—(5) описывают торможение, потерю массы космическим телом, изменение угла наклона траектории и высоты тела, а также мощность его свечения и эффект ионизации.

Оценки показывают, что влиянием силы тяжести можно пренебречь вплоть до высоты взрыва z_e , которая, как будет показано ниже, примерно равнялась 27 км. При расчетах далее пренебрегалось также изменением угла α вплоть до высоты 23 км. Считалось, что начальная форма тела близка к шарообразной. Полагалось, что коэффициенты C_d , C_h и I в процессе движения тела оставались неизменными. Учитывалось дробление метеороида и изменение $S(z)$.

Исключая при помощи (4) время из соотношений (1) и (2), получим следующую систему уравнений:

$$m \frac{dv}{dz} = \frac{C_d}{2 \sin} v S, \quad (7)$$

$$\frac{dm}{dz} = \frac{C_h}{2Q \sin} v^2 S. \quad (8)$$

Для экспоненциальной модели атмосферы

$$\rho(z) = \rho_0 e^{-z/H},$$

где $H = 7.5$ км — приведенная высота атмосферы, $\rho_0 = 1.3$ кг/м³.

Кинематические критерии. Из соотношений (7) и (8) следуют безразмерные критерии обтекания и выпадения космического тела:

$$b = \frac{C_d}{2} \frac{\rho_0 S_0 H}{m_0 \sin}, \quad (9)$$

$$b = \frac{C_h}{2C_d} \frac{v_0^2}{Q}, \quad (10)$$

где $S_0 = d_0^2/4$ — начальное значение миделя.

Обычно коэффициент b именуют баллистическим коэффициентом, а коэффициент b — параметром уноса массы.

Положим в (9) и (10) $\rho_0 = 1.3$ кг/м³, $S_0 = 12.56$ м², $H_0 = 7.5$ км, $m_0 = 113$ т, $\sin = 79$, $v_0 = 14.4$ км/с. Будем считать, что $C_d = 0.6$, $C_h = 0.03$ и $Q = 6.5$ МДж/кг [4, 14, 27]. Тогда получим, что $b = 0.33$, $b = 7.9$.

Известно, что при $b > 1$ космическое тело сильно тормозится, а при $b > 1$ оно практически полностью разрушается и испаряется [11, 21]. Добавим, что критерий b , даваемый соотношением (9), справедлив для монолитного космического тела. Если же имеет место дробление тела, мидель облака фрагментов становится большим ($S > S_0$), и значение b существенно увеличивается. Именно такая ситуация наблюдалась для Липецкого метеороида.

Таким образом, при падении Липецкого метеороида произошло его полное разрушение и взрывоподобное выделение энергии в атмосфере.

Энергетические оценки. Начальная кинетическая энергия космического тела

$$E_{k_0} = \frac{m_0 v_0^2}{2}$$

близка к $1.17 \cdot 10^{13}$ Дж. Такая энергия выделяется при взрыве 2.8 кт тринитротолуола (ТНТ). Энергия взрыва Липецкого метеороида была в 4.3 раза меньше энергии взрыва бомбы, сброшенной в 1945 г. на Хиросиму (около 12 кт ТНТ).

Основное выделение энергии падающего космического тела происходит в слое атмосферы толщиной $L \approx H/2$. При $H \approx 7.5$ км имеем $L \approx 3.75$ км. Тогда средняя погонная плотность энергии равна

$$E_L = \frac{E_{k0}}{L} \approx 3.1 \cdot 10^9 \text{ Дж/м.}$$

Характерное время энерговыделения составляет

$$\tau_e = \frac{L}{v_0} \approx 0.26 \text{ с.}$$

При этом характерная мощность процесса равна

$$P_c = \frac{E_{k0}}{\tau_e} \approx 45 \text{ ТВт.}$$

Поскольку

$$E_k = \frac{m}{2} v^2,$$

текущая мощность процесса выражается формулой

$$P = \frac{dE_k}{dt} = m v \frac{dv}{dt} = \frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt},$$

или, при $dl = v dt$, —

$$\frac{dE_k}{dl} = m \frac{dv}{dt} = \frac{v}{2} \frac{dm}{dt}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в соотношении (11) представляет собой погонную энергию E_b , затрачиваемую на торможение, второе слагаемое — погонную энергию E_a , обеспечивающую процесс абляции. Отношение этих погонных энергий

$$\frac{E_a}{E_b} = \frac{v(dm/dt)}{2m(dv/dt)} = \frac{v}{2m} \frac{dm}{dv}.$$

С учетом (7) и (8)

$$\frac{E_a}{E_b} = 2 \frac{v^2}{v_c^2},$$

где

$$v_c = 2 \sqrt{\frac{C_d}{C_h} Q} = \frac{2}{\sqrt{a}}$$

— характерная скорость, $a = C_h / (C_d Q)$ — параметр абляции [4, 10, 32]. При указанных выше значениях C_h , C_d и Q характерная скорость равна $v_c \approx 16.1$ км/с.

Если $v_0 = 14.4$ км/с, то $E_a/E_b = 1.53$. Таким образом, в начале траектории погонная энергия E_a примерно в 1.5 раза превышала энергию E_b . В процессе движения метеороида отношение E_a/E_b уменьшалось на несколько порядков.

Область взрывоподобного выделения энергии имеет протяженность $L_e \ll L$. Оценим L_e , исходя из диапазона высот z_e , где кинетическая энергия метеороида при неизменной массе уменьшается от $0.9E_{k0}$ до $0.1E_{k0}$, а его скорость — от $v_1 = 0.948v_0$ до $v_2 = 0.316v_0$. Как показано в работе [32],

$$v = v_0 e^{-\alpha r^2}, \quad (12)$$

где

$$\alpha = \frac{B^2}{2C^2}, \quad B = \frac{C_d(z_0)S_0H}{m_0 \sin \theta}, \quad C^2 = \frac{3C_d d_0 \sin \theta}{16H}, \quad r = e^{-x} - 1.$$

При $C_d = 0.6$, $(z_0) = 0.018$ кг/м³, $H = 7.5$ км, $\theta = 3.3$ т/м³, $d_0 = 4$ м, $\theta = 79^\circ$, высоте начала дробления $z_0 = 32$ км (см. далее) имеем $B = 9.3 \cdot 10^3$, $C^2 = 6.0 \cdot 10^5$, $\alpha = 0.72$.

При этом из соотношения (12) получим

$$r_1 = r(z_1) = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \ln \frac{v_0}{v_1}} = 0.27,$$

$$r_2 = r(z_2) = \sqrt{\frac{1}{\alpha} \ln \frac{v_0}{v_2}} = 1.26.$$

Тогда

$$z_e = H \ln \frac{1 + r_2}{1 + r_1} = 0.58H = 4.3 \text{ км},$$

$$L_e = \frac{z_e}{\sin \theta} = 4.4 \text{ км}.$$

Действительно $L_e \ll H/2$. При этом эффективная длительность взрывной ударной волны $t_a = L_e / v_s$, где $v_s = 300$ м/с — скорость звука. Отсюда имеем $t_a = 12.5$ с.

Кинетическая энергия космического тела расходуется на его дробление, нагревание, плавление, абляцию, ионизацию, нагревание вещества в следе, а также на образование баллистической и взрывной ударных волн. Оценим некоторые из энергий.

При удельной энергии абляции Q и массе уносимого вещества m связанная с абляцией энергия равна $E_{Q0} = Q m$. При указанных выше значениях Q и $m = m_0$ имеем $E_{Q0} = 7.3 \cdot 10^{11}$ Дж, или 6.2 % от E_{k0} . Поскольку известно $m < m_0$, реально энергия E_Q всегда меньше E_{Q0} .

Если удельная энергия дробления каменного космического тела составляет $d = 10^4 \dots 10^5$ Дж/кг, полная энергия дробления равна $E_d = d m_0 = 1.1 \cdot 10^9 \dots 1.1 \cdot 10^{10}$ Дж, или (9.4...94) 10^{-3} % от E_{k0} .

Легко показать, что полное число ионизированных атомов (молекул) составляет $N_i = 3.5 \cdot 10^{28}$. Действительно, число атомов в метеороиде $N = m_0 / M_m$. При значениях коэффициента ионизации $1.54 \cdot 10^{-2}$ [4], $M_m = 5 \cdot 10^{26}$ кг и начальной массы $m_0 = 1.13 \cdot 10^5$ кг имеем $N = 2.26 \cdot 10^{30}$, $N_i = 3.5 \cdot 10^{28}$. При средней энергии, затрачиваемой на один акт ионизации нейтральной частицы ($\epsilon_i = 50$ эВ), имеем $E_i = N_i \epsilon_i = 3.15 \cdot 10^{11}$ Дж, или 2.7 % от E_{k0} .

Основная часть (около 80 %) начальной кинетической энергии космического тела расходуется на образование ударной волны и нагревание вещества на фронте ударной волны [14, 27].

КИНЕМАТИКА МЕТЕОРОИДА

Рассмотрим основные эффекты, сопровождавшие падение Липецкого метеороида.

Дробление метеороида. Процесс дробления каждого метеороида — индивидуален. Будем считать, что имело место квазинепрерывное дробление. В верхней части траектории каменный метеороид испытывал шелушение, на высотах 32...25 км — дробление. Первоначально шароподобное тело постепенно превращалось в блинообразное тело с поперечным сечением (миделем) $S(z)$. Продукты дробления далее двигались как квазижидкость. При значительном (в разы, на порядок) увеличении $S(z)$ произошло взрывоподобное выделение энергии. За этим последовала вспышка, высвечивание электромагнитной энергии преимущественно в оптическом диапазоне.

Теория дробления крупных метеороидов ($d_0 = 1...100$ м) разработана в работах [5—8, 10, 32, 33].

Космическое тело разрушается при условии, что динамическое давление на него сравнивается с прочностью вещества тела d [14, 27]:

$$0.365 \rho v^2 = d. \quad (13)$$

Разные части метеороида имеют разную прочность, поэтому прочность каменного тела (хондрита) изменяется в широких пределах: $d = 1...3$ МН/м² [7, 8, 14, 27, 32, 33]. Тогда условие (13) выполняется соответственно на высоте

$$z_0 = H \ln \frac{0.365 \rho_0 v^2}{d}$$

При $v = 14.4$ км/с, $d = 1.4 \cdot 10^6$ Н/м² имеем $z_0 = 32$ км.

Таким образом, можно принять, что дробление метеороида началось на высоте $z_0 = 32$ км, а закончилось на высоте около 26 км.

После начала дробления осколки движутся как квазижидкость, приобретая поперечную скорость [5—8, 10, 14, 27, 32, 33]:

$$v_t = k_v v \frac{1}{b}^{1/2}, \quad (14)$$

где $k_v \sim 1$ — коэффициент, b — плотность вещества метеороида. Далее положим, что $k_v = 1$, $b = 3.3 \text{ т/м}^3$,

$$r_t = r_0 \exp\left(\frac{z - z_0}{H}\right) = r_0 e^{x/2}, \quad (15)$$

где $r_0 = r_t(z_0)$, $z_0 = 32 \text{ км}$, $x = (z - z_0)/H$.

Считая квазизжидкость непрерывной и используя соотношения (4) и (14), вычислим приращение радиуса расширяющегося в поперечном направлении образования («блина»):

$$dr_t = \sqrt{\frac{r_t}{b}} \frac{dz}{\sin},$$

или, с учетом (15), —

$$dr_t = \sqrt{\frac{r_0}{b}} \exp\left(\frac{z - z_0}{2H}\right) \frac{dz}{\sin}, \quad r_t(z_0) = 0. \quad (16)$$

Интегрируя выражение (16), получим

$$r_t = r_{tm} (e^{x/2} - 1), \quad r_{tm} = \frac{2H}{\sin} \sqrt{\frac{r_0}{b}}.$$

Тогда диаметр и площадь миделя при $z < z_0$ даются соотношениями

$$d(x) = d_0 - 2r_t(x) = d_0(1 - k_d(e^{x/2} - 1)), \quad (17)$$

$$S(x) = \frac{\pi}{4} d^2(x) = S_0(1 - k_d(e^{x/2} - 1))^2, \quad (18)$$

$$k_d = \frac{2r_{tm}}{d_0} = \frac{4H}{d_0 \sin} \sqrt{\frac{r_0}{b}}. \quad (19)$$

Коэффициент k_d описывает степень уширения дробящегося метеороида. При $d_0 = 4 \text{ м}$, $\sin = 0.98$, $r_0 = 0.018 \text{ кг/м}^3$, $b = 3.3 \text{ т/м}^3$ из (19) имеем $k_d = 17.5$. Из-за довольно больших значений k_d имеет место почти мгновенный процесс дробления. Например, увеличение диаметра облака вдвое имеет место при $x = 0.11$ и $z = 0.9 \text{ км}$.

Результаты расчета $d(x)$ и $S(x) = d^2/4$ по соотношениям (17) и (18) приведены в табл. 1.

Скорость движения метеороида. Разделив уравнение (8) на уравнение (7), получим соотношение, связывающее массу m и скорость v метеороида:

$$\frac{1}{m} \frac{dm}{dv} = \frac{C_h}{2C_d} \frac{v}{Q} = \frac{2v}{v_c^2}, \quad m(v_0) = m_0. \quad (20)$$

Таблица 1. Высотная зависимость плотности атмосферы, кинематических, геометрических и энергетических параметров Липецкого метеороида

z , км	ρ , г/м ³	v , км/с	m , т	E_k , ТДж	dE_k/dz , ГДж/м	I , ТВт	d , м	S_0 , м ²	\dot{m} , т/с	\dot{v} , км/с ²	$m\dot{v}$, МН
32	18.2	14.40	113	11.70	—	—	4	12.56	1.57	0.126	14
31	20.8	14.33	112.1	11.51	0.19	0.29	8.8	60.8	8.57	0.697	78
30	23.8	14.255	111.2	11.30	0.21	0.31	14	153.5	24.25	1.98	220
29	27.2	14.04	108.6	10.70	0.62	0.90	19.5	298	51.55	4.41	480
28	31.1	13.57	103.3	9.51	1.19	1.68	25.4	508	86.36	8.45	870
27	35.5	12.68	94.4	7.73	1.78	2.35	31.7	788	130.81	14.3	1300
26	40.6	11.0	81.0	4.90	2.83	3.24	38.4	1160	144.2	21.1	1700
25	46.4	5.58	57.2	0.89	4.01	2.33	45.6	1630	30.2	12.3	710
24	53.0	2.20	51.7	0.125	0.765	0.18	53.3	2230	2.89	3.3	170
23	60.5	0.60	50.8	0.009	0.116	$7 \cdot 10^{-3}$	61.5	2970	0.09	0.38	190

Интегрируя (20), получаем

$$m = m_0 e^{(v_0^2 - v^2)/v_c^2}. \quad (21)$$

С учетом (21) соотношение (7) примет вид

$$e^{(v_0^2 - v^2)/v_c^2} \frac{dv^2}{v^2} = B \frac{S(x)}{S_0} dx, \quad v(0) = v_0, \quad (22)$$

где $S(x)$ дается выражением (18), а

$$B(z_0) = \frac{C_d(z_0)S_0H}{m_0 \sin}$$

— баллистический коэффициент на высоте z_0 . При указанных выше параметрах получаем значение $B(z_0) = 9.3 \cdot 10^{-3}$.

Выполняя интегрирование в (22), получим следующее уравнение для вычисления скорости метеороида:

$$\text{Ei}(v) = \text{Ei}(v_0) + F(x), \quad (23)$$

$$F(x) = B e^{v_0^2/v_c^2} (k-1)^2 (1 - e^{-x}) + \frac{4}{3} k(k-1) (1 - e^{-3x/2}) + \frac{k^2}{2} (1 - e^{-2x}),$$

где

$$\text{Ei}(y) = \int_0^y e^y \frac{dy}{y}$$

— интегральная показательная функция; $v = v_c \sqrt{y}$.

Полученные с использованием соотношения (23) значения $v(z)$ приведены в табл. 1. Видно, что основное уменьшение скорости метеороида имело место на высотах, меньших 26 км.

Потеря массы метеороидом. Зная $v(z)$ и используя уравнение (21), можно вычислить изменение массы метеороида вдоль траектории (по высоте), а из соотношения (2) — скорость ее потерь dm/dt . Уравнение (21) эквивалентно следующему соотношению [32]:

$$m = m_0 e^{-a(v_0^2 - v^2)/2}.$$

Положим, что $m_0 = 113$ т, $v_0 = 14.4$ км/с, $a = 1.5 \cdot 10^8$ с²/м². Рассчитанные значения текущей массы m и dm/dt также приведены в табл. 1. Видно, что наибольшие потери массы имели место на высотах 26...27 км, где они достигали значений 130...140 т/с.

ЭФФЕКТ СВЕЧЕНИЯ МЕТЕОРОИДА

Для оценки мощности свечения воспользуемся соотношением (5). Коэффициент светимости I существенно зависит от размера и массы метеорита. Для метеороидов миллиметрового — сантиметрового диапазонов $I = 3 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-2}$ [4]. Для болидов значения I , зависящие от E_r , существенно больше [14, 26, 27]. Оценим I , исходя из зависимости [14, 26]

$$I = 0.1212 E_r^{0.115},$$

где E_r — интегральная энергия излучения в кт ТНТ. Отсюда начальная кинетическая энергия тела равна $E_{k0} = E_r / I = 8.2508 E_r^{0.885}$. По данным НАСА $E_r = 1.22 \cdot 10^{12}$ Дж = 0.29 кт ТНТ [28]. Такое значение E_r определено при помощи сенсоров, установленных на геостационарных ИСЗ США [28]. Тогда $I = 10.4$ %, а $E_{k0} = 1.17 \cdot 10^{13}$ Дж = 2.8 кт ТНТ. При эффективной длительности импульса излучения $\tau_e = L_e / v_0 = 0.31$ с, где $L = 4.4$ км, имеем среднюю мощность излучения

$$P_r = \frac{E_r}{\tau_e} = 3.9 \text{ ТВт.}$$

При мощности торможения $|P(z_e)| = 27$ ТВт (см. табл. 1) получим, что

$$\tau_e = \frac{P_r}{|P(z_e)|} = 15 \%,$$

т. е. $\tau_e > I$.

Оценим далее плотность потока энергии оптического излучения. Считая, что излучение истекает от эллипсоидального объема с малой осью $d = 10$ м и большой осью $L_e = 4.4$ км. Тогда площадь поверхности эллипсоида вращения с осями d , d и L_e равна $S_e = (2/3)L_e d = 9.9 \cdot 10^4$ м². Тогда

$$(z_e) \frac{P_r}{S(z_e)} = 4.75 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2.$$

Плотность потока мощности вблизи эпицентра взрыва выражается формулой

$$p_r(R) = \frac{P_r}{4 R^2} \exp(-\tau_r),$$

где согласно [21]

$$\tau_r = \int_{R_0}^R \kappa_s dR = 0.15 \kappa_s p dR.$$

Здесь $\kappa_s = 3000 \text{ м}^2/\text{кг}$ — массовый коэффициент поглощения света субмикронными частицами пыли, p — их объемная плотность. При $p = 10^{-7} \text{ кг/м}^3$ и толщине слоя пыли $L_t = 1 \text{ км}$ имеем $\tau_r = 0.04 \ll 1$. При $R = 27 \text{ км}$ имеем $p_r(R) = 500 \text{ Вт/м}^2$. Плотность потока света от метеороида была сопоставима с плотностью потока света от Солнца в дневное время. Оценка потока света хорошо соответствует результатам наблюдений.

Если бы область взрыва имела свойства абсолютного черного тела, его температура при указанных значениях (z_e) давалась бы следующим соотношением:

$$T = \sqrt[4]{\frac{P_r}{\sigma (z_e)}},$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ — постоянная Стефана — Больцмана. Тогда $T = 5400 \text{ К}$. При этом максимум излучения приходится на длину волны

$$\frac{b}{T} = 5.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Такое значение b соответствует середине видимого диапазона. Здесь $b = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ — постоянная Вина.

Зная величину E_r , можно оценить потенциальную пожароопасность, обуславливаемую метеороидом. Вблизи эпицентра

$$E_r = \frac{E_r}{4 R^2} \exp(-\tau_r),$$

где $E_r = 1.22 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$, $\tau_r = 0.04$. Тогда вблизи эпицентра ($R = 27 \text{ км}$) имеем $E_r(R) = 130 \text{ Дж/м}^2$. Возгорание сухого вещества возникает при $E_{r \text{ min}} = 0.2 \dots 1 \text{ МДж/м}^2$ [31]. Так что пожары при взрыве липецкого космического тела жителям заведомо не грозили.

ПАРАМЕТРЫ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Баллистическая ударная волна. Полет метеороида с гиперзвуковой скоростью сопровождался генерацией баллистической ударной волны. Она начала генерироваться на высоте, где воздух для падающего тела представлял сплошную среду. Критерием «сплошности» является

ся число Кнудсена $Kn = l/d \ll 1$, где l — длина свободного пробега молекул воздуха, d — диаметр тела [4]. Баллистическая волна заметной интенсивности возникает при $Kn \approx (0.7 \dots 1.2) \cdot 10^{-2}$. При $d = d_0 = 4$ м это имело место на высоте $z_{\max} = 92 \dots 95$ км соответственно. На высотах $z > 30$ км баллистическая волна накладывалась на взрывную ударную волну. Деление на баллистическую и взрывную волны, конечно, условное. Первая из них менее интенсивна, и своим конусом вытянута вдоль траектории.

Радиус баллистической волны дается следующим соотношением [34]:

$$R_b = Md,$$

где $M = v/v_s$ — число Маха, v и v_s — скорости космического тела и звука. При $v = v_0 = 14$ км/с, $v_s = 0.3$ км/с, $d = d_0 = 4$ м имеем $M = 47$ и $R_b = 188$ м. Радиусу R_b соответствуют характерный и фундаментальный периоды [34] акустических колебаний

$$T_b = \frac{R_b}{v_s}, \quad T_b = 2.81 \frac{R_b}{v_s}. \quad (24)$$

Согласно работе [34] эти периоды за счет дисперсии увеличиваются по закону

$$T_b(R) = T_b(R_b) \left(\frac{R}{R_b}\right)^{1/4}, \quad T_b(R) = T_b(R_b) \left(\frac{R}{R_b}\right)^{1/4}. \quad (25)$$

Рассчитанные значения этих периодов приведены в табл. 2.

Выражение для зависимости относительного давления во фронте баллистической волны от расстояния R приведено в работе [34]:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{2}{1 + \left(1 + 4.803 R^2 / R_b^2\right)^{3/8}} \cdot 0.4503,$$

где $\gamma = 1.4$ — показатель адиабаты. Если же $R^2 \gg R_b^2$, то это соотношение упрощается:

$$\frac{p}{p_0} \approx 0.3 \left(\frac{R_b}{R}\right)^{3/4}. \quad (26)$$

Таблица 2. Зависимость периодов акустических колебаний, генерируемых баллистической и взрывной волнами, от пройденного расстояния

R , км	T_b , с	T_b , с	T_c , с	T_c , с
50	1.4	3.9	3.4	9.5
100	1.7	4.8	4.0	11.3
300	2.2	6.2	5.3	14.9
500	2.5	7.0	6.0	17.0
1000	3.0	8.4	7.2	20.2
1500	3.3	9.3	7.9	22.3

Выражения (24) и (26) справедливы лишь при удалении от источника в горизонтальном направлении, так как они не учитывают экспоненциальное уменьшение атмосферного давления p при увеличении высоты z :

$$p(z) = p(0)e^{-z/H}, \quad (27)$$

где $p(0) = 10^5$ Па — давление на поверхности Земли ($z = 0$), H — приведенная высота атмосферы. В общем случае $H = H(z)$, и тогда (26) следует заменить на выражение

$$p(z) = p(0) \exp \int_0^z \frac{dz}{H(z)}. \quad (28)$$

Если высоту отсчитывать от высоты взрыва z_e , то

$$p(z) = p(z_e) \exp \int_{z_e}^z \frac{dz}{H(z)} = p(z_e) e^{-I}, \quad (29)$$

где

$$I = \int_{z_e}^z \frac{dz}{H(z)}.$$

В экспоненциальной атмосфере [9]

$$p = p_0 \exp \left(-\frac{z}{2H} \right), \quad p = p_0 \exp \left(-\frac{z}{H} \right).$$

Тогда (26) с учетом (29) преобразуется к виду

$$\frac{p}{p_0} = 0.3 \frac{R_b}{R} e^{I/2}.$$

В частности, у поверхности Земли при $z_e = 27$ км, $R_b = 188$ м и значении экспоненты 0.135 имеем $p/p_0 = 9.8 \cdot 10^{-4}$ и $p(0) = 98$ Па.

По мере удаления от траектории метеороида баллистическая волна по своей структуре постепенно приближается к структуре сферической волны, для которой $p(R) = R^{-1}$. Это происходит на расстояниях $R = (z_{\max} - z_e) / \sin \theta = 66 \dots 69$ км, где $z_e = 27$ км.

Взрывная ударная волна. Будем полагать, что взрывоподобное выделение энергии имело место на длине траектории метеороида, равной $L = 3.75$ км. Тогда погонная плотность энергии $E_L = 3.1 \cdot 10^9$ Дж/м.

Будем считать, что основное взрывоподобное энерговыделение имело место вблизи высоты $z_e = 27$ км (см. табл. 1). Считая взрыв цилиндрическим, вычислим радиус ударной волны из следующего соотношения:

$$R_c = \sqrt{\frac{E_L}{p(z_e)}},$$

где $p(z_e) = 2.7$ кПа — давление атмосферы на высоте максимального энерговыделения. При $E_L = 3.1 \cdot 10^9$ Дж/м имеем $R_c = 0.6$ км, диаметр $2R_c = 1.2$ км. Таким образом, размеры огненного эллипсоида составля-

ли 3.75 1.2 1.2 км. При таких размерах взрывная ударная волна, строго говоря, не является сферической, она все же ближе к цилиндрической.

Значения характерного и фундаментального периодов, рассчитанные по соотношениям (25) с заменой R_b на R_c , приведены в табл. 2.

Вблизи области взрыва цилиндрическая волна является существенно нелинейной. Ее амплитуда убывает по закону $p(R) \sim 1/R^2$. На расстоянии $R_L = 3.16R_c$ от z_e значение $p(z_e, R_L) = 0.1p(z_e)$. При $R = R_L = 1.9$ км ударная волна от метеороида становится практически сферической, т. е. $p(R) \sim 1/R$, в то время как на расстояниях $R = R_L$ она близка к цилиндрической.

Считая, что ударная волна распространяется в экспоненциальной атмосфере, для расстояний $R = R_L$ имеем соотношение для относительного избыточного давления:

$$\frac{p(R)}{p} = \frac{p(z_e, R_L)}{p(z_e, R_L)} \frac{R_L}{R} \exp \frac{z - (z_e - R_L)}{2H}, \quad (30)$$

где $p(z_e, R_L) = 3.5$ кПа. При расчете избыточного давления на высотах $z = z_e - R_L$ и $z = z_e + R_L$ в выражении (30) следует выбирать знаки «минус» и «плюс» соответственно. В частности, под эпицентром взрыва, где $R = z_e$, имеем $p = 140$ Па. Значение экспоненты при этом составляет около 0.035. Значения $p(z)$, полученные по соотношению (30), приведены в табл. 3.

Распространение ударной волны вверх привело к возмущению верхней атмосферы. При $R = R_L$ также справедлива формула (30).

Результаты расчета высотной зависимости $p(z)$ для $z = 30$ км с использованием соотношения (30) приведены в табл. 4. При этом учитывалась высотная зависимость $H(z)$ и выполнялось численное интегрирование по z . Видно, что по мере увеличения высоты избыточное давление во фронте ударной волны довольно быстро уменьшается. Относительное изменение p/p_0 сначала несколько уменьшается, а при $z > 80$ км увеличивается. На больших высотах $p/p_0 > 1$, и даже $p/p_0 \gg 1$. Реально величина эффекта будет существенно меньше, так как при расчетах не учитывалась диссипация энергии волны, которая при $p/p_0 > 0.2...0.3$ вызвана, прежде всего, влиянием нелинейности. При этом спектр акустического сигнала обогащается высшими

Таблица 3. Зависимость давления в ударной волне от высоты

z , км	p_0 , 10^4 Па	p/p_0 , 10^{-3}	p , Па
0	10	1.4	140
5	5.1	2.4	123
10	2.6	4.5	116
15	1.4	9.3	130
20	0.69	25	174
25	0.36	100	360

Таблица 4. Высотные зависимости приведенной высоты атмосферы давления в невозмущенной атмосфере, относительного и абсолютного давления в ударной волне

z , км	$2H$, км	p_0 , Па	p / p_0	p , Па
30	15	1800	0.1	180
40	15	540	0.036	19.4
50	15	70	0.037	2.6
60	15	10	0.048	0.5
70	16	3	0.071	0.2
80	17	1	0.11	0.1
90	18	0.3	0.18	0.055
100	19	0.1	0.30	0.03
120	21	0.01	0.85	$8.5 \cdot 10^{-3}$
150	26	0.001	4.72	$4.7 \cdot 10^{-3}$
200	44	10^{-4}	93.4	$9.3 \cdot 10^{-3}$
300	87	10^{-5}	$4.6 \cdot 10^4$	0.46

гармониками, которые диссипируют на меньших высотах. По этой причине ударная волна, распространяющаяся вверх, полностью поглотится на высотах примерно 100...150 км.

Энергия ударной волны в глубине атмосферы распространяется и в горизонтальном направлении. Этому способствуют стратосферный и термосферный волноводы. Так, при цилиндрической расходимости волны в волноводе на высоте $z = 100...150$ км и $R = 1000$ км $p / p_0 = 0.1...1$.

Если предположить, что в энергию ударной волны преобразовалось около 80 % энергии E_{k0} , то энергия волны была близка к 10^{13} Дж. При длительности взрывной ударной волны $T_{sw} = L_e / v_s = 12.5$ с имелась мощность около 0.8 ТВт.

Выше приведены лишь оценки амплитуды ударных волн. Волновые профили ударных волн могут быть получены методами газовой динамики [25].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате комплексного анализа основных процессов в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, сопровождавших падение Липецкого метеороида, установлено следующее.

1. Начальная кинетическая энергия метеороида была близка к 11.7 ТДж, или 2.8 кт ТНТ. В энергию световой вспышки трансформировалось около 10.4 % начальной кинетической энергии космического тела.

2. Высота взрыва липецкого тела была близка к 27 км, а длина области взрыва — около 3.75 км. Вблизи этой высоты скорость метеороида уменьшилась примерно на 12 %, масса — на 16 %. Скорость потери массы составляла 130...140 т/с, торможение — около 21 км/с².

3. Значения энергии и мощности световой вспышки составили около 1.22 ТДж и 2...3 ТВт соответственно. Энергия вспышки на 5-6 порядков была меньше энергии, при которой возникает воспламенение веществ и пожары.

4. Избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра взрыва составило около 140 Па. Этого оказалось недостаточно для того, чтобы вызвать разрушения элементов конструкций сооружений.

5. Относительные возмущения давления воздуха на ионосферных высотах над эпицентром взрыва достигали десятков и даже сотен процентов.

6. Энергия и мощность взрывной ударной волны была близка к 10 ТДж и 0.8 ТВт соответственно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась в рамках планового финансирования учреждений Министерства образования и науки Украины, номер госрегистрации 0115U000463.

1. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П., Галкин К. А., Гивишвили Г. В., Глухов Я. В., Давиденко Д. В., Зубачев Д. С., Иванов В. Н., Кархов А. Н., Коломин М. В., Коршунов В. А., Лапшин В. Б., Лещенко Л. Н., Лысенко Д. А., Минлигареев В. Т., Морозова М. А., Перминова Е. С., Портнягин Ю. И., Русаков Ю. С., Сталь Н. Л., Сыроешкин А. В., Тертышников А. В., Тулинов Г. Ф., Чичаева М. А., Чудновский В. С., Штырков А. Ю. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* М.: ФГБУ «ИПГ», 2013. 37 с.
2. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра.* — Под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. — М.: Физматлит, 2010. 384 с.
3. *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47, № 4. (Тематический выпуск).
4. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений.* М.: Наука, 1981. 416 с.
5. Бронштэн В. А. Вход в атмосферу крупных метеороидов. *Астрон. вестн.* 1993. 27, № 1. С. 102—121.
6. Бронштэн В. А. О физическом механизме квазинепрерывного дробления крупных метеорных тел. *Астрон. вестн.* 1993. 27, № 3. С. 65—74.
7. Бронштэн В. А. Применение теории Григоряна к расчету дробления гигантских метеороидов. *Астрон. вестн.* 1994. 28. № 2. С. 118—124.
8. Бронштэн В. А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере. *Астрон. вестн.* 1995. 29, № 5. С. 450—459.
9. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере.* М.: Мир. 1978. 532 с.
10. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет. *Космич. исслед.* 1979. 17, № 6. С. 875—893.
11. Грицевич М. И., Стулов В. П., Турчак Л. И. Классификация последствий ударов природных космических тел о землю. *Докл. АН.* 2009. 429, № 1. С. 45—49.
12. Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. *Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск.* М.: ГЕОС. 2014. 160 с.
13. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыхлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. *Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля*

- 2013 года. *Астрон. вестн.* 2013. 47, № 4. С. 262—277.
14. *Катастрофические воздействия космических тел.* — Под ред. Адушкина В. В., Немчинова И. В. — М.: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
 15. Кручиненко В. Г. *Математико-фізичний аналіз метеорного явища.* К.: Наукова думка. 2012. 294 с.
 16. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции.* — Редкол. Н. А. Антипин и др. — Челябинск. 2014. 694 с.
 17. Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. *Аэродинамика болидов.* М.: Наука. Физматлит. 1995. 240 с.
 18. *Челябинский суперболид.* — Под ред. Н. Н. Горькавого, А. Е. Дудорова. — Челябинск: Изд-во Челябинского университета. 2016. 223 с.
 19. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Мат. Всероссийской науч. конф.* — Редкол. Н. А. Антипин и др. — Челябинск. 2014. С. 229—264.
 20. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инж. физ.* 2013. 8. С. 23 — 40.
 21. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф.* Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
 22. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді НАН України.* 2013. № 10. С. 97—104.
 23. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія.* 2018. 24, № 1. С. 49—70.
 24. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія.* 2018. 24, № 2. С. 18—35.
 25. Шувалов А. В., Артемьева Н. А., Попова А. П. Оценка параметров ударной волны, вызванной падением Челябинского космического тела. Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. *Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск.* М.: ГЕОС. 2014. С. 48—59.
 26. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E. The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature.* 2002. 420. P. 294—296.
 27. *Catastrophic events caused by cosmic objects.* — Adushkin V., Nemchinov I. (Eds.). — Netherlands: Springer. 2008. XI + 357 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6452-4.
 28. *Center for Near Earth object studies.* URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/> (Last access: 01.03.2019)
 29. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol.* 2013. 86. № 4. P. 136 — 139.
 30. *Hazards due to comets and asteroids.* — Gehrels T. (Ed.). — Tucson; London: Univ. Arizona Press. 1994. 1300 p.
 31. Glasstone S., Dolan P. J. *Effects of nuclear weapons.* Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy. 1977. 653 p.
 32. Grigoryan S. S. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar Syst. Res.* 2013. 47, № 4. P. 268—274.
 33. Hills J. G., Goda M. P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* 1993. 105. N. 3. P. 1114—1144.
 34. *Infrasound monitoring for atmospheric studies.* — Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds.) — Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer. 2010. 734 p.
 35. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science.* 2013. 342. P. 1069—1073.
 36. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science.* 2013. 145 p.

REFERENCES

1. Alpatov V. V., Burov V. N., Vagin J. P., Galkin K. A., Givishvili G. V., Gluhov J. V., Davidenko D. V., Zubachev D. S., Ivanov V. N., Karhov A. N., Kolomin M. V., Korshunov V. A., Lapshin V. B., Leshenko L. N., Lysenko D. A., Minligareev V. T., Morozova M. A., Perminova E. S., Portnyagin J. I., Rusakov J. S., Stal N. L., Syroeshkin A. V., Tertyshnikov A. V., Tulinov G. F., Chichaeva M. A., Chudnovsky V. S., Shtyrkov A. Y. (2013) *Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013*. M.: FGBU "IPG" Publ. (in Russian).
2. *Asteroid-Comet Hazards: Yesterday, Today, and Tomorrow*. (2010). — Shustov B. M., Ryhlova L. V. (Eds). — M.: Fizmatlit Publ., 384 p. (in Russian).
3. *Solar System Research*. (2013) **47** (4). (Thematical issue).
4. Bronshten V. A. (1983) *Physics of Meteor Phenomena*. Springer. 416 p.
5. Bronsten V. A. (1993) The entry of the large meteoroids into the atmosphere. *Astronomicheskij vestnik*. **27** (1). P. 102—121 (in Russian).
6. Bronsten V. A. (1993) About physical mechanism of the large meteor bodies quasicontinuous fragmentation. *Astronomicheskij vestnik*. **27** (3). P. 65—74 (in Russian).
7. Bronsten V. A. (1994) The theory Grigoryan using to the case of the giant meteoroids fragmentation. *Astronomicheskij vestnik*. **28** (2). P. 118—124 (in Russian).
8. Bronsten V. A. (1995) Large meteor bodies fragmentation and destruction into the atmosphere. *Astronomicheskij vestnik*. **29** (5). P. 450—459 (in Russian).
9. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975) *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation* (Developments in Atmospheric Science). Elsevier Scientific Pub. Co., 472 p.
10. Grigoryan S. S. (1980) Motion and Destruction of Meteorites in Planetary Atmospheres. *Cosmic Research*. **17** (6). P. 724—740.
11. Gritsevich M. I., Stulov V. P., Turchak L. I. (2009) Classification of the Consequences for Collisions of Cosmic Bodies with the Earth. *Doklady Physics*. **54** (11). P. 499—503.
12. *Dinamicheskije processy v geosferah. Vypusk 5. Geophysical effects of the Chelyabinsk meteoroid fall: Proceedings IDG RAN. Thematical issue*. (2014). M.: GEOS. 160 p. (in Russian).
13. Emelyanenko V. V., Popova O. P., Chugaj N. N., Sheljakov M. A., Pahomov Ju. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Birjukov E. E., Rybnov Ju. S., Marov M. Ja., Ryhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Harlamov V. A., Trubeckaja I. A. (2013) Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event. (February 15, 2013). *Solar System Research*. **47** (4), 240—254 (2013).
14. Adushkin V. V., Nemchinov I. V. (eds). (2005) *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. M.: ECC Akademkniga Publ. 310 p. (in Russian).
15. Kruchinenko V. G. (2012) *Mathematical and physical analysis of the meteor phenomenon*, 294 p. Kyiv. (in Ukrainian).
16. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. (2014). (Eds Antipin N. A., Dudorov A. E., Zamozdra S. N., Kolisnichenko S. V., Kocherov A. V., Shajgorodskij E. A.). — Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ., 694 p. (in Russian).
17. Stulov V. P., Mirskii V. N., Vislyi A. I. (1995) *Aerodynamics of Bolides*. M.: Nauka Publ., 240 p. (in Russian).
18. *Chelyabinsk superbolide*. (2016). — Gor'kavyi N. N., Dudorov A. E. (Eds). 223 p. Chelyabinsk: Chelyabinskiy Gosud. Univ. (in Russian).
19. Chernogor L. F. (2014) Main effects of Chelyabinsk meteorite falling: physics and mathematics calculation results. *Meteorit Cheljabinsk — god na Zemle: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii*. (Eds N. A. Antipin et al.) 229—264. Chelyabinsk, (in Russian).

20. Chernogor L. F. (2013) Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Engineering Physics*. **8**. P. 23—40 (in Russian).
21. Chernogor L. F. (2012) *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National Univ. Publ., 556 p. (in Russian).
22. Chernogor L. F. (2013) Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 10. P. 497—104 (in Russian).
23. Chernogor L. F. (2018) The physical effects of Romanian meteoroid. 1. *Space Science and Technology*. 24 (1), P. 449—70 (in Russian).
24. Chernogor L. F. (2018) The physical effects of Romanian meteoroid. 2. *Space Science and Technology*. 24 (2), P. 418—35 (in Russian).
25. Shuvalov V. V., Artem'jeva N. A., Popova A. P. (2014) The shock wave parameters estimation caused the Chelyabinsk meteoroid fall. *Dinamicheskije processy v geosferah. Vypusk 5. Geofizicheskije efekty padenija Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Special'nyj vypusk*. M.: GEOS. P. 48—59. (in Russian).
26. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E. (2002) The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*. 420. P. 294—296.
27. *Catastrophic events caused by cosmic objects* (2008). — Adushkin V., Nemchinov I. (Eds). — Netherlands: Springer. XI + 357 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6452-4.
28. *Center for Near Earth object studies*. (2019). URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/> (Last access: 01.03.2019)
29. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2013) The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol.* 86. № 4. P. 136—139.
30. *Hazards due to comets and asteroids*. (1994). — Gehrels T. (Ed.). — Tucson; London: Univ. Arizona Press. 1994. 1300 p.
31. Glasstone S., Dolan P. J. (1977) *Effects of nuclear weapons*. Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy. 653 p.
32. Grigoryan S. S. (2013) Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar Syst. Res.* **47**, № 4. P. 268—274.
33. Hills J. G., Goda M. P. (1993) The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* **105**. № 3. P. 1114—1144.
34. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. — Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds) — Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer. 2010. 734 p.
35. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. **342**. P. 1069—1073.
36. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. (2013) Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 145 p.

Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Харків, Україна

ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ ЛИПЕЦЬКОГО МЕТЕОРОЇДА. I

Метою роботи є оцінка ряду фізичних ефектів, що супроводжували падіння та вибух метеороїда поблизу м. Липецьк (Росія) 21 червня 2018 р. Початкова кінетична енергія метеороїда була близькою до 11.7 ТДж, або 2.8 кт ТНТ. У енергію світлового спалаху трансформувалося близько 10.4 %, або 1.22 ТДж початкової кінетичної енергії космічного тіла. Метеороїд виявився кам'яним, точніше хондритом, з густиною речовини близько 3.3 т/м³. Космічне тіло рухалося під кутом до горизонту близько 79°. Початкова маса тіла була близькою до 113 т, початкова швидкість —

14.4 км/с, а початковий діаметр тіла — 4 м. Висота вибуху Липецького тіла була близькою до 27 км, а довжина області вибуху — приблизно 3.75 км. Проведено комплексне моделювання процесів у всій геосфері, викликаних падінням метеороїда. Оцінено механічні, оптичні та газодинамічні ефекти, що супроводжували падіння Липецького метеороїда. Показано, що основне енерговиділення (приблизно 10^{13} Дж) мало місце поблизу висоти 25...27 км, де швидкість втрат маси сягала приблизно 130...140 т/с, а гальмування — 21 км/с^2 . Поблизу висоти вибуху швидкість метеороїда зменшилася приблизно на 12 %, маса — на 16 %. Оцінено основні параметри ударної хвилі. Енергія та потужність вибухової ударної хвилі була близькою до 10 ТДж і 0.8 ТВт відповідно. Поблизу епіцентру вибуху метеороїда тиск у фронті ударної хвилі становив приблизно 140 Па. Цього виявилось недостатньо для того, щоб викликати руйнування елементів конструкцій споруд. Енергія та потужність світлового спалаху становили близько 1.22 ТДж і 2...3 ТВт відповідно. Енергія спалаху на 5-6 порядків була меншою за енергію, при якій виникає займання речовин і пожежі у ділянці епіцентру. Відносні збурення тиску повітря на іоносферних висотах над епіцентром вибуху досягали десятків чи навіть сотень відсотків.

Ключові слова: метеороїд, комплексне моделювання, механічні ефекти, оптичні ефекти, газодинамічні ефекти.

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

THE PHYSICAL EFFECTS OF LIPETSK METEOROID. 1

This study aims at estimating a few physical effects associated with the passage via the atmosphere and airburst of the Lipetsk meteoroid (Russia) on June 21, 2018. The initial kinetic energy of the meteoroid was equal to approximately 11.7 TJ or 2.8 kt TNT. About 10.4 % or 1.22 TJ of the initial kinetic energy of the celestial body transformed into a flare. The meteoroid was found to be stony with the matter density of 3.3 t/m^3 . The celestial body moved along the trajectory inclined at angle of approximately 79° to the horizon. The initial mass of the body was equal to about 113 t, its initial speed 14.4 km/s, and the initial diameter 4 m. The altitude of the Lipetsk meteoroid explosion was about 27 km, and the explosion length approximately 3.75 km. Comprehensive modeling of the processes launched by the meteoroid passage through all geospheres has been performed. Mechanical, optical, and gas-dynamic effects associated with the passage of the Lipetsk meteoroid. The main release of energy (10^{13} J) is shown to occur at approximately 25...27 km altitude where the rate of mass loss attains approximately 130...140 t/s, the deceleration about 21 km/s^2 . In the vicinity of the meteoroid explosion, the meteoroid speed decreased by about 12 %, and its mass by approximately 16 %. The main parameters of shock wave have been estimated. The shock wave energy and power are equal to approximately 10 TJ and 0.8 TW, respectively. At the epicenter of the meteoroid explosion, the pressure at the shock reached 140 Pa. This turns out not to be enough for causing building destruction. The energy and optical radiation power were equal to 1.22 TJ and 2...3 TW, respectively. The flare energy was by 6 orders of magnitude less than that needed for causing ignition of materials and fires in epicenter region. The relative disturbances in air pressure at ionospheric heights above the explosion epicenter attained tens or even hundreds per cents.

Key words: meteoroid, complex simulation, mechanical effects, optical effects, gas-dynamical effects.

Статья поступила в редакцию 13.03.2019

После доработки 19.06.2019

Принята к публикации 19.06.2019