

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.05.025>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

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

Физические эффекты Липецкого метеороида. 2

Проведено комплексное моделирование процессов во всех геосферах, вызванных падением и взрывом метеороида вблизи г. Липецк (Россия) 21 июня 2018 г. Оценены термодинамические и плазменные эффекты, а также эффекты плюма и турбулентности, сопровождавшие падение Липецкого метеороида. Показано, что пролет космического тела привел к образованию газопылевого плюма. Нагретый след от метеороида остывал в течение нескольких часов. Детально рассмотрены четыре стадии охлаждения следа метеороида. Первая из них длилась около 0.01 с, за счет излучения температура следа уменьшилась вдвое. В течение второй стадии (~1 с) имело место охлаждение за счет излучения и расширения следа, температура уменьшилась на 15 %. В течение третьей стадии продолжительностью примерно 3 с продукты взрыва и нагретый газ (термик), имея ускорение 100...200 м/с², набрали скорость подъема до значений 200 м/с, температура уменьшилась на 10 %. Четвертая стадия длилась около 100 с, термик интенсивно присоединял холодный воздух, постепенно охлаждался и тормозился. Максимальная высота подъема термика достигала 15...20 км. Входившие в состав термика продукты взрыва (пылинки, аэрозоли) в дальнейшем принимали участие в трех процессах: медленном оседании на поверхность Земли, турбулентном перемешивании с окружающим воздухом, в переносе преобладающими ветрами вокруг планеты. Показано, что эффект турбулентности в следе метеороида был хорошо выражен, а эффект магнитной турбулентности проявлялся слабо. Оценены основные параметры плазмы в следе: высотные зависимости линейной и объемной концентраций электронов, их времен релаксации, частот соударений частиц, проводимости плазмы, времен релаксации температуры

© Л. Ф. ЧЕРНОГОР, 2019

электронов. Показано, что линейная и объемная концентрации электронов в следе в начальный момент составляли около $(2...40) 10^{23} \text{ м}^{-1}$ и $(1...4) 10^{21} \text{ м}^{-3}$, проводимость плазмы была близка к $10^3 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Обсуждается роль пылевого компонента плазмы.

Ключевые слова: Липецкий метеороид, комплексное моделирование, термодинамические эффекты, плазма, плюм, турбулентность

ВВЕДЕНИЕ

Физическим эффектам Липецкого метеороида посвящена работа автора [29]. В первой части настоящей работы описаны механические, оптические и газодинамические эффекты, вызванные полетом и взрывом Липецкого метеороида [29].

Цель второй части работы — изложение результатов расчетов и оценок термодинамических и плазменных эффектов, а также эффектов плюма и турбулентности, сопровождавших падение Липецкого космического тела.

Обозначения в этой части работы такие же, как и в первой части [29].

Подчеркнем, что перечисленные эффекты для крупных метеороидов как в теоретическом, так и в экспериментальном планах изучены недостаточно. Имеются лишь оценки отдельных эффектов [3—7, 13, 18, 19, 30, 33, 34]. Автором предпринята попытка оценки всего комплекса эффектов для Челябинского и Румынского метеороидов [21—23, 27, 28, 31]. В обобщающих работах других исследователей по Челябинскому метеороиду [10—12, 14, 15, 17, 36, 37] перечисленные выше эффекты вообще не рассматривались.

ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ

Динамика ударной волны. Метеороид, двигаясь в атмосфере, создал за собой нагретый след, который затем излучал электромагнитную энергию и расширялся до тех пор, пока давление газа в нем не сравнялось с атмосферным. При этом плотность воздуха для любого крупного метеороида существенно (в 10...100 раз) уменьшается [16, 30]. Для оценки параметров следа от метеороида учтем, что поперечная скорость ударной волны дается соотношением [16, 30]

$$\frac{dR_s}{dt} = \frac{r}{R_s}, \quad R_s(0) = r,$$

где r — радиус тела. Интегрирование этого соотношения при $t > 0$ дает

$$R_s = r \sqrt{1 + \frac{2t}{r}}. \quad (1)$$

Поскольку характерное время торможения метеороида равно $t_e = H / (v \sin \alpha)$, то

$$R_s(z_e) = \sqrt{\frac{2rH}{\sin \alpha}} = \sqrt{\frac{Hd}{\sin \alpha}} = \sqrt{Ld}. \quad (2)$$

При $z = z_e$ значение $d = 32$ м, $H = 7.5$ км и $\alpha = 79^\circ$, $L = 7.64$ км из (2) тогда имеем $R_s(z_e) = 490$ м. Характерное время расширения следа до $R_s = r$, как это следует из (1), равно

$$t_d = \frac{r^2}{2v}.$$

При $v = 12$ км/с на высоте $z = z_e$, $r = d/2 = 16$ м и $R_s / r = 30.6$ имеем $t_d = 0.78$ с, что сопоставимо с $t_e = 0.26$ с (индекс «e», как обычно, относится к высоте взрыва).

По мере излучения и расширения следа газ в нем охлаждается, пары взрыва конденсируются и образуется видимый след. Визуализации следа способствует также конденсация паров, возникших в результате абляции вещества космического тела. При диаметре следа $2R_s(z_e) = 0.98$ км угловой размер следа на расстоянии $R = 100$ км равен

$$\frac{2R_s(z_e)}{R} = 0.01 \text{ рад} = 0.6^\circ.$$

Угловой размер следа метеороида был несколько больше углового размера Солнца.

Заметим, что при $R_e = 0.6$ км

$$\frac{2R_e}{R} = 0.012 \text{ рад} = 0.7^\circ.$$

Охлаждение следа. Нагретый след от метеороида, называемый термиком, или плюмом [16, 30], охлаждается за счет теплового излучения, теплового расширения, подъема с присоединением холодного воздуха, гидростатического расширения в результате уменьшения давления окружающего воздуха при подъеме термика, увеличения объема в результате турбулентной диффузии.

Будем различать четыре стадии охлаждения.

Стадия 1. При временах $t < t_1$ плотность ρ_p вещества в следе больше плотности невозмущенного газа. Значение t_1 определяется из условия $\rho_p(t_1) = \rho_0(z_e)$. При этом ρ_p определяется в основном суммарной массой m фрагментов метеороида. Радиус цилиндрического образования $r(t) = vt^{1/2}$ (см. далее).

Стадия 2. При временах $t_2 > t > t_1$, где t_2 — время расширения следа от r_e до $r_m = R_e = 607$ м, плотность вещества в термике определяется в основном плотностью нагретого воздуха:

$$\frac{T_0}{T_e} = \frac{c}{v}, \quad (3)$$

где T и T_0 — температура воздуха в следе и в невозмущенной атмосфере, $\rho_0(z_e) = 35.5 \text{ г/м}^3$ — плотность воздуха на высоте взрыва $z_e = 27 \text{ км}$. При этом площадь S поверхности термика и его объем V даются соотношениями

$$S(t) = 2 r(t)L_e, \quad (4)$$

$$V(t) = \frac{2}{3} r^2(t)L_e. \quad (5)$$

Объем моделируется эллипсоидом вращения с полуосями r , r и $L_e/2$. Отношение площади и объема термика равно

$$S(t)/V(t) = r^{-1}(t) t^{1/2}.$$

Стадия 3. При временах $t_3 > t > t_2$, где t_3 — время набора скорости подъема термика.

Стадия 4. При временах $t > t_3$ термик энергично поднимается, присоединяет большие массы холодного воздуха, увеличивается в диаметре за счет уменьшения давления окружающего воздуха, его объем увеличивается за счет турбулентной диффузии. Все эти факторы приводят к ускоренному охлаждению термика, его торможению и остановке.

Уравнение для температуры продуктов взрыва имеет вид

$$Cm \frac{dT}{dt} = (T^4 - T_0^4)S(t), T(0) = T_m, \quad (6)$$

где C и m — удельная теплоемкость и масса продуктов взрыва, $S(t)$

$= 2 r(L_e - r) = 2 r(t)L_e$ — площадь поверхности огненного образования при его моделировании цилиндром.

Рассмотрим первую стадию охлаждения термика.

Для цилиндрического взрыва радиус образования дается известным соотношением (см., например, [21, 27, 28]):

$$r(t) = \frac{E_L t^2}{e}^{1/4} = r_e \frac{t}{t_0}^{1/2}. \quad (7)$$

Здесь $r_e = d_e/2$, $d_e = 32 \text{ м}$, $t_0 = r_e^2 \sqrt{e/E_L}$. При $e = 35.5 \text{ г/м}^3$, $E_L = 3.12 \text{ ГДж/м}$, $r_e = 16 \text{ м}$ имеем $t_0 = 870 \text{ мкс}$, что намного меньше t_e , t_r и t_d .

Масса m_e продуктов взрыва и масса m_a нагретого воздуха определяют общую массу вещества в термике. Из условия $\rho_p(t_0) = \rho_0(z_e)$ с учетом (3) и (5) имеем

$$\frac{m_e}{V(t)} = \frac{m_a}{V(t)} \rho_0(z_e),$$

где $V(t) = \frac{2}{3} r^2(t)L_e$ и согласно (7) $r(t) = r_e (t/t_0)^{1/2}$. Тогда

$$m_e = \frac{\rho_0(z_e)}{3} V(t_1) = \frac{\rho_0(z_e)}{3} r_e^2 L_e \frac{t_1}{t_0}.$$

Отсюда

$$t_1 = t_0 \frac{3 m_e}{2 \rho_0(z_e) r_e^2 L_e}. \quad (8)$$

При $\rho_0(z_e) = 35.5 \text{ г/м}^3$, $t_0 = 8.7 \cdot 10^4 \text{ с}$, $r_e = 16 \text{ м}$, $m_e = 0.8 m_0 = 0.9 \cdot 10^5 \text{ кг}$, $L_e = 3.75 \text{ км}$, из (8) получим $t_1 = 0.0011 \text{ с}$. При $\tau = 15$ (см. ниже) имеем $t_1 = 16.5 \text{ мс}$.

При $m = m_e = m(z_e) = \text{const}$ с учетом (4) и (7) имеем

$$S(t) = S_0 \frac{t}{t_0}^{1/2}, \quad (9)$$

где $S_0 = 2 r_e L_e = 3.8 \cdot 10^5 \text{ м}^2$, решение уравнения (6) имеет вид

$$f(\tau) = \frac{4}{3} \frac{t}{t_1}^{3/2} = f(\tau_{m1}). \quad (10)$$

Здесь $\tau = T/T_0$, $\tau_{m1} = T_m/T_0 = 24.5$,

$$f(\tau) = \text{arctg} \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\tau}, \quad (11)$$

$$t_1 = (t_0^{1/2})^{2/3}, \quad (12)$$

$$t = \frac{C m_e}{T_0^3 S_0}. \quad (13)$$

При $C = 10^3 \text{ Дж/(кг К)}$, $m_e = 0.9 \cdot 10^5 \text{ кг}$, $T_0 = 220 \text{ К}$ и $S_0 = 3.8 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ из (13) и (12), получим, что $t = 400 \text{ с}$, $t_1 = 5.16 \text{ с}$.

Из уравнения (10) следует, что

$$t = t_r \frac{3}{4} (f(\tau) - f(\tau_{m1}))^{2/3}.$$

Если бы охлаждение следа происходило только за счет излучения, то характерное время этого процесса было бы равно t_1 . Время t_r является характерным временем охлаждения следа при совместном влиянии процессов термодинамического расширения с характерным временем $t_0 = 870 \text{ мкс}$ и излучения с характерным временем $t = 400 \text{ с}$.

Результаты расчета временных зависимостей τ , T и T по соотношению (11) приведены в табл. 1. Видно, что время уменьшения температуры в следе метеороида вдвое составляет около 20 мс.

В течение второй стадии $(t) = \rho_0 / (t)$, $S(t)/V(t) = t^{-1/2}$, и уравнение (6) в безразмерных переменных примет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{t^4 - 1}{t_1} \right) \frac{t_0}{t}^{1/2}, \quad (0) = m_2 = 15, \quad (14)$$

Таблица 1. Временные зависимости относительной и абсолютной T температур, а также ее превышение $T = T - T_0$ в следе метеороида

t, c		T, K	T, K
0.0045	20	4400	4180
0.015	15	3300	3020
0.03	14.5	3187	2967
0.13	14.1	3107	2887
0.43	13.6	2996	2776
1.4	12.8	2826	2606
5.8	10	2200	1980
15.4	8	1760	1540
42.5	6	1320	1100
154.4	4	880	660
373.4	3	660	440

где t_1 дается соотношением (12). Решение (14) описывается следующим соотношением:

$$(t) \frac{m^2}{\sqrt[4]{m^2 \left(\frac{4}{m} - 1 \right) \exp\left((t/t_2)^{1/2} \right)}}, \quad (15)$$

$$t_2 = \frac{t^2}{t_0} = 3 \cdot 10^4 \text{ с.} \quad (16)$$

Из (16) видно, что время остывания на этой стадии очень значительное. Рассчитанные значения t , T и T также приведены в табл. 1.

Рассмотрим третью стадию охлаждения следа от метеороида. При этом $S(t) = \text{const}$, $m(t) = \text{const}$. Уравнение для t имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{1}{t^3} = -\frac{4}{t^4}, \quad (0) \quad m_3 = 12, \quad (17)$$

$$t_3 = \frac{C_0(z_e)r_m}{3 T_0^3} = t_1 \frac{r_m}{r_0} = 1.52 \cdot 10^4 \text{ с.} \quad (18)$$

Решение (17) может быть представлено в виде

$$t = t_3 (f(\dots) - f(\dots)), \quad (19)$$

где $f(\dots)$ дается соотношением (11).

Результаты расчета t , T и T с использованием решения (19) представлены в табл. 1.

Сравним времена релаксации на первых трех стадиях $t_1 = 5.16 \text{ с}$, $t_2 = 3 \cdot 10^4 \text{ с}$ и $t_3 = 1.5 \cdot 10^4 \text{ с}$. Видно, что на второй и третьей стадиях охлаждение термика идет очень медленно. Если первая стадия была очень непродолжительной ($\sim 0.01 \text{ с}$), вторая длилась около 1 с, то третья стадия продолжалась примерно 3 с. За это время термик, имея огромное ускорение a , приобрел большую скорость ($\sim 200 \text{ м/с}$) и

Таблица 2. Временные зависимости относительной температуры, относительного ускорения a/g , характерной скорости v_m , скорости v и высоты z подъема метеороидного плюма

t, c		a/g	$v_m, m/c$	$v, m/c$	z, m
0.01	15	14	278	1.4	0.007
0.03	14.5	13.5	278	4.2	0.063
0.1	14.1	13.1	277.5	13.5	0.76
0.3	13.6	12.6	277.2	29	5.1
1	12.8	11.8	276.5	121	58
2	11.9	10.9	275.5	230	232
3	11	10	274.6	359	510

сместился вверх почти на 0.5 км (табл. 2). Движение с такой скоростью приводило к интенсивному присоединению масс холодного воздуха и усилению турбулизации под термиком. Как показано в работе [26], скорость увеличения массы присоединенного воздуха пропорциональна скорости и полной площади S поверхности термика, т. е.

$$\frac{dm_a}{dt} = \tau S_T v_0,$$

где $\tau = 0.1$ — коэффициент захвата холодного воздуха, $S = 2 r_m L_e = 1.43 \cdot 10^7 \text{ м}^2$. Начальная масса воздуха в объеме $V_m = 2 r_m^2 L_e / 3$ составляет $m_{a0} = 2 r_m^2 L_e (z_e) / 3$. Тогда за время t имеем $m_a / m_{a0} = 3 t / 2 r_m$. При $v_0 = v_0(z_e) = 35.5 \text{ г/м}^3$, $v_0 = 200 \text{ м/с}$, $dm / dt = 10^7 \text{ кг/с}$. За время $t = 10 \text{ с}$ имеем $m / m_0 = 0.5$. При $t = 20 \text{ с}$ $m_a / m_{a0} = 1$.

При достижении заметной скорости и ощутимом смещении термика, т. е. при $t = 10 \dots 15 \text{ с}$, уравнения для массы, скорости и температуры вещества в термике необходимо решать совместно, как это сделано в работе [26]. Добавим, что при $v = 100 \dots 200 \text{ м/с}$ и $L_t = 2 r_m = 1.2 \text{ км}$ коэффициент турбулентной диффузии составляет $D_t = v L_t = (1 \dots 2) \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}$, что значительно больше, чем $D_{t0} = 100 \dots 1000 \text{ м}^2/\text{с}$. Это также способствовало увеличению массы термика и его охлаждению.

ПОДЪЕМ МЕТЕОРОИДНОГО ПЛЮМА

В результате пролета метеороида под действием ударной волны в атмосфере образовался нагретый примерно до 5400 К след, по форме близкий к цилиндру. Его радиус в соответствии с выражением (2) дается соотношением

$$R_s(z_e) = \sqrt{Ld} \sqrt{Hd / \sin \theta}.$$

Нагретый до высоких температур воздух вместе с испарившимся веществом метеороида, расширяясь, устремляется вдоль следа и

вверх. Так возникает эффект всплывания вещества, получивший название эффекта плюма.

Задача о движении плюма строго может быть решена численными методами трехмерной гидродинамики. Однако из-за существенного различия продольных (десятки километров) и поперечных (сотни метров) размеров следа численное решение этой задачи при помощи современных компьютеров сильно затруднено из-за необходимости применять достаточно малые размеры расчетной ячейки. Примеры гидродинамических расчетов для весьма крупных ячеек приведены в работах [16, 30].

Далее описываются простые аналитические модели, позволяющие оценить основные параметры плюма. Для этого вместо трехмерного движения плюма рассматривается одномерное движение вверх. Подобные модели приведены автором в работе [25].

Рассмотрим движение плюма по вертикали. Сначала оценим кинематические параметры плюма.

Известно, что метеорная пыль (аэрозоли) всегда есть на высотах 20...30 км. Скорость ее производства составляет около 10 кт/год [35]. Например, при взрыве челябинского космического тела в стратосферу было выброшено несколько кило тонн аэрозолей. При взрыве Липецкого метеороида масса пыли не превышала несколько десятков тонн [29]. Пыль вместе с нагретым до температуры порядка 5000 К газом быстро расширились в направлении, перпендикулярном к направлению движения. В результате этого возникло горячее образование длиной L_e и радиусом r , которое за счет силы Архимеда F_A со значительным начальным ускорением a_p в результате конвекции стало быстро подниматься вверх. По мере подъема образование увеличивалось в объеме, остывало за счет излучения, расширения и турбулентного перемешивания. Постепенно плотность остывающего вещества приближалась к плотности холодного воздуха, сила Архимеда значительно уменьшалась и подъем образования практически прекратился.

Нагретое образование в первом приближении можно аппроксимировать цилиндром с длиной $L_e = 3.75$ км и радиусом, который во времени изменялся согласно соотношению (7) от $r_e = 16$ м до $r_m = 607$ м.

Из-за крутой траектории площадь поперечного сечения $S_1 = r^2 \sin^2 \theta$, где $r(t)$ — радиус цилиндрического объема. На первой стадии, т. е. при $t < t_1$, термик оставался практически неподвижным. Для второй и третьей стадии имеем следующее уравнение движения газа и пыли массой m в вертикальном направлении [21]:

$$m \frac{d}{dt} (F_A - mg - \frac{C_d}{2} \rho_0^2 S), \quad (20)$$

где $m = \rho V$, — плотность вещества в плюме объемом V , $F_A = \rho_0 V g$ — сила Архимеда, g — ускорение свободного падения, $C_d = 0.6$ — коэффициент аэродинамического сопротивления, ρ_0 — невозмущенная плотность воздуха, $S = r^2 \sin^2 \theta$ — площадь поперечного сечения

цилиндра радиусом r и длиной L_e . Предполагая, что масса пыли и газа в процессе всплывания и расширения остается неизменной, получим, что $V(t) = V_0$, $S(t) = S_0$, где согласно (7) $r(t) = r_e^{-1/2}$, $V_0 = \frac{2}{3} r_e^2 L_e$, $S_0 = r_e^2$ и t/t_0 . Из соотношения (20) при $r = r(t)$ и (t) имеем

$$\frac{d}{dt} = -\frac{0}{1} g \frac{3C_d}{4} \frac{0}{L_e}^2. \quad (21)$$

На третьей стадии давление внутри термика сравнялось с внешним давлением. При этом $0/T = T/T_0$. Тогда из (21) получим следующее уравнение:

$$\frac{d}{dt} = (1)g \frac{3C_d}{4} \frac{2}{L_e}, \quad (22)$$

где $a = (1)g$ — ускорение термика, $a_r = 3C_d^2 / 4L_e$ — его торможение. При $a = a_r$ имеем

$$\sqrt{\frac{4gL_e(1)}{3C_d}}. \quad (23)$$

При $\gg 1$ получим, что

$$m \sqrt{\frac{4gL_e}{3C_d}}. \quad (24)$$

При $g = 9.8 \text{ м/с}^2$, $L_e = 3.75 \text{ км}$, $C_d = 0.6$ имеем $m = 286 \text{ м/с}$. Как видно из (22), характерное время становления скорости подъема

$$t = \frac{1}{(1)g}.$$

На третьей стадии 10 и $t = 3.2 \text{ с}$. Характерное время уменьшения намного больше, чем t . Это обстоятельство позволяет решать уравнение (22), считая, что (t) — медленно изменяющаяся функция. Соотношение (22) удобно переписать в виде

$$\frac{d}{dt} = a \left(1 - \frac{2}{2}\right), \quad (0) = 0. \quad (25)$$

Решение (25) дается следующим соотношением:

$$(t) = \text{th} \frac{at}{2}. \quad (26)$$

Для высоты подъема z имеем уравнение

$$\frac{d}{dt} z = \text{th} \frac{at}{2}, \quad z(0) = 0. \quad (27)$$

Решение (27) имеет вид

$$z(t) = z_0 \ln \left(1 + \frac{at}{z_0} \right), \quad z_0 = \frac{v_0^2}{a}. \quad (28)$$

При $\bar{z} = 5$ получим значение $z_0 = 5/3$ км.

При $at/z_0 \gg 1$ из (28) получим, что

$$z(t) \approx \frac{v_0^2}{a} \ln \left(1 + \frac{at}{z_0} \right) \approx \frac{v_0^2}{a} \ln \left(\frac{at}{z_0} \right). \quad (29)$$

Из (29) следует, что при достаточно больших t , т. е. при $t \gg z_0/a$ имеем зависимость $z(t) \approx \frac{v_0^2}{a} \ln \left(\frac{at}{z_0} \right)$. При $\bar{z} \gg 1$ должно быть $t \gg 29/\bar{z}$. Если $\bar{z} = 10$, то $t \gg 2.9$ с. При этом $\bar{z} = 5$.

Как видно из соотношений (28) и (29), максимальная высота подъема зависит от v_0 , т. е. от \bar{z} .

Положим, что $t = 100$ с. Тогда из (29) при $\bar{z} = 5$, $v_0 = 256$ м/с получим, что $z = 25.6$ км. Реально значение z будет несколько меньше, так как не учитывался ряд факторов: присоединение холодного воздуха, увеличение радиуса термика при увеличении высоты из-за уменьшения давления окружающего воздуха, турбулизация воздуха под термиком. Все это приводило к уменьшению v_0 , а значит и z , а также z . В любом случае значения z могли достигать 15...20 км. Это заметно больше, чем высота подъема термика от Челябинского метеороида, для которого $z = 10$ км. Причина различий кроется в том, что при пологой траектории космического тела площадь поперечного сечения, отвечающая за торможение термика, пропорциональна его радиусу и длине, а при квазивертикальном падении она пропорциональна квадрату радиуса. Поскольку длина термика всегда намного больше его радиуса, то торможение термика при крутой траектории и прочих равных условиях будет намного меньшим торможения термика при пологой траектории.

ОСЕДАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ

В процессе абляции, а затем и взрыва космического тела возникли его фрагменты с радиусом r_p от 1 мкм до 1 см и массой m_p примерно от 10^{-12} до 1 г. Относительно тяжелые фрагменты космического тела (с массой более 1 г) выпали на поверхность Земли в виде метеоритов. Наиболее легкие пылинки (аэрозоли), напротив, поднялись вверх вместе с горячими продуктами взрыва на 15...20 км, т. е. до высоты $z_p = 42...47$ км. В дальнейшем аэрозоли принимали участие в трех процессах. Во-первых, в медленном оседании на поверхность Земли. Во-вторых, в турбулентном перемешивании с окружающим воздухом. В-третьих, в переносе преобладающими ветрами вокруг Земли, осуществляя полный оборот примерно за двое суток [1, 10—12, 32].

Скорость оседания аэрозолей дается известным соотношением [20, 24]:

Таблица 3. Зависимость скорости и времени оседания аэрозолей от их радиуса

r_p , МКМ	v_p , М/с	t_p , с	t_p , СУТ
1	$4.6 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^7$	1134
2	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^7$	284
3	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^7$	127
5	0.012	$3.7 \cdot 10^6$	44
10	0.046	$9.8 \cdot 10^5$	11.3
20	0.18	$2.5 \cdot 10^5$	2.8
30	0.41	$1.1 \cdot 10^5$	1.27
50	1.2	$3.7 \cdot 10^4$	0.44
100	4.6	$9.8 \cdot 10^3$	0.13

$$v_p = \frac{2}{9} \frac{\rho_a g}{\rho_p} r_p^2,$$

где $\rho_a = 3.3 \cdot 10^3$ кг/м³ — объемная плотность аэрозоля, $g = 9.8$ м/с², $\rho_p = 1.7 \cdot 10^5$ Па с — коэффициент динамической вязкости атмосферного газа. Время оседания аэрозолей $t_p = z_p^2 / v_p$. Полученные оценки t_p и v_p для $z_p = 45$ км приведены в табл. 3. Согласно табл. 3 аэрозоли радиусом 1 мкм могут находиться в атмосфере более двух лет. Этого, однако, не происходит. За счет турбулентного перемешивания с окружающим газом эти аэрозоли оседают на землю за время [21]

$$t_{pt} = \frac{z_p^2}{D_{t0}},$$

где D_{t0} — коэффициент турбулентной диффузии. Полагая $z_p = 52$ км, $D_{t0} = 1000...3000$ м²/с, получим, что $t_{pt} = 11...32$ сут. Если же $z_p = 46$ км, то $t_{pt} = 8.6...25$ сут.

Таким образом, предложенная модель подъема, стабилизации и разрушения газопылевого плюма, вызванного взрывом Липецкого метеороида, позволила качественно и количественно объяснить основные наблюдаемые факты: увеличение скорости всплывания при увеличении высоты облака, продолжительность всплывания, максимальную высоту подъема газопылевого образования, оседание аэрозолей и их движение вокруг земного шара. Пылинки размером порядка 100 мкм опускались со скоростью около 10 м/с.

Установлены зависимости ускорения и скорости движения плюма от высоты. На расстоянии около 25 м от места взрыва сначала имело место быстрое увеличение скорости всплывания от 0 до порядка 100 м/с за счет значительного (до 240 м/с²) начального ускорения. Это привело к быстрому увеличению силы сопротивления окружающего воздуха и уменьшению ускорения практически до нуля.

После подъема плюма примерно на 15...20 км от места взрыва наступила стабилизация его подъема. Причиной этого было охлаждение облака из-за турбулентного перемешивания с холодным воздухом. Этот фактор способствовал тому, что значение подъемной силы на высоте около 42...47 км обратилось практически в нуль.

После окончания всплывания плюм принял участие в трех процессах: в оседании пылинок на поверхность Земли, в дальнейшем турбулентном перемешивании с окружающим воздухом и в движении пылинок под действием ветра почти в горизонтальном направлении. Из-за турбулентного перемешивания даже самые мелкие (1...10 мкм) аэрозоли находились в атмосфере около 10...30 сут. За это время остатки газопылевого облака несколько раз обогнули земной шар. Пылинки размером порядка 100 мкм опускались со скоростью около 10 м/с.

ЭФФЕКТ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Турбулентность в сплошной среде становится определяющей, если число Рейнольдса [2] равно

$$\text{Re} = \frac{v}{\nu} = \frac{v d}{\nu} \text{Re}_{cr} \approx 10^3. \quad (30)$$

Здесь v и d — скорость и диаметр космического тела, ν — кинематическая и динамическая вязкости, ρ — плотность атмосферы на заданной высоте. Условие (30) при диаметре $d = 4$ м, $\nu = 1.7 \cdot 10^{-5}$ Па с и $\rho = 1.4$ кг/м³ реализуется при $v > 3 \cdot 10^6$ м/с, т. е. на высотах $z < 100$ км.

Таким образом, след метеороида был сильно турбулизированным на высотах $z = 23...100$ км. Внешний масштаб турбулентности составлял $L_t = d(z) = 4...60$ м на высотах 100...23 км соответственно (табл. 4). Время становления турбулентности

$$t_t = \frac{L_t}{v_t} = \frac{L_t}{v} \approx 2.8 \cdot 10^{-4} \dots 1 \text{ с}$$

для того же диапазона высот. Здесь $v_t = v / \text{Re}_t$, v_t — характерная скорость турбулентного движения. Обычно полагают $\text{Re}_t \approx 0.1$ [2, 4]. Видно, что при $z > 25$ км $t_t \ll t_e \sim 0.2$ с, т. е. процесс турбулизации был сравнительно малоинерционным.

Коэффициент турбулентной диффузии оценим следующим образом [21]:

$$D_t = v_t L_t \approx \frac{v L_t}{\text{Re}_t}$$

При $v_t = 1400...200$ м/с и $L_t = 10...50$ м имеем $D_t = (1...4.2) \cdot 10^4$ м²/с (см. табл. 4). В невозмущенной атмосфере на высотах 23...100 км $D_{t0} = 100...1000$ м²/с. Видно, что на всех высотах $D_t \gg D_{t0}$.

Таблица 4. Высотная зависимость параметров турбулентности в следе метеороида

z , км	v , км/с	L_t , м	τ , мс	D_t , $10^4 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	Re_m
32	1.4	4	2.9	0.56	6.3
31	1.4	8.8	6.3	1.2	13.6
30	1.4	14	10	2	23.9
29	1.4	19.5	13.9	2.7	30.2
28	1.36	25.4	18.9	3.5	40
27	1.23	31.7	25.8	3.9	45.6
26	1.10	38.4	34.9	4.2	46.9
25	0.56	45.6	81.4	2.6	18.3
24	0.22	53.3	242	1.2	3.6
23	0.06	61.5	1025	0.37	0.14

След метеороида заполнен плазмой с проводимостью σ . Турбулентность плазмы характеризуется магнитным числом Рейнольдса

$$Re_m = \sigma_0 L_t \tau, \quad (31)$$

где σ_0 — магнитная постоянная. При указанных значениях τ , L_t и $\sigma_0 = 1000 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ (см. ниже) из (31) получаем $Re_m = 4 \dots 47$ для $z = 24 \dots 32$ км соответственно (табл. 4). Критическое значение $Re_{mcr} = 40$. Таким образом, $Re_m > Re_{mcr}$ лишь вблизи высоты взрывоподобного выделения энергии ($z = 26 \dots 28$ км).

ПЛАЗМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Концентрация электронов. Линейная концентрация электронов вычисляется из следующего уравнения [2]:

$$i = \frac{M_m}{M_m} \frac{dm}{dt}.$$

Положим $M_m = 5 \cdot 10^{-26}$ кг, $i = 1.54 \cdot 10^{-2}$ [2]. Значения i и объемной концентрации электронов $N = i/S$ приведены в табл. 5. Видно, что вблизи высоты максимального энерговыделения $i_{i \max} = 4 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-1}$ и $N(0)_{\max} = 4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. На всех высотах степень ионизации плазмы $s_i(0) = N(0) / N_n \ll 1$, где N_n — концентрация нейтралов в следе (см. табл. 6).

После окончания процесса ионизации электроны исчезают в результате прилипания к молекулам кислорода при тройных соударениях в реакции [8, 38]:

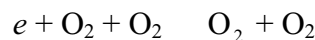


Таблица 5. Высотные зависимости основных параметров атмосферы и плазменного следа метеороида

z , км	$N_n, 10^{23} \text{ м}^{-3}$	$N[\text{O}_2], 10^{23} \text{ м}^{-3}$	$n_i(0), 10^{23} \text{ м}^{-3}$	$N(0), 10^{21} \text{ м}^{-3}$	$s_i(0), 10^{-3}$	$N_c, 10^{21} \text{ м}^{-3}$
32	2.8	0.60	0.34	2.7	9.6	4.8
31	3.2	0.68	1.8	3.0	9.5	6.1
30	3.7	0.78	5.2	3.4	9.2	7.9
29	4.2	0.89	11	3.8	9.0	10
28	4.8	1.0	20	3.9	8.0	13
27	5.5	1.16	32	4.0	7.3	17
26	6.3	1.3	41	3.5	5.5	21
25	7.2	1.5	17	1.0	1.4	27
24	8.2	1.7	4.1	0.18	0.22	34
23	9.4	2.0	0.46	0.016	0.016	46

и рекомбинации с метеорными ионами. Уравнение баланса числа частиц имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = -k_a N - r N^2, \quad N|_{t=0} = N(0), \quad (32)$$

где $k_a = k_{a0} N^2[\text{O}_2]$ — коэффициент прилипания, k_a — скорость реакции, r — коэффициент радиативной рекомбинации метеорных частиц. Учтем, что [8, 38]

$$k_a = k_{a0} \frac{300}{T} \exp\left(-\frac{600}{T}\right), \quad k_{a0} = 1.4 \cdot 10^{41} \text{ м}^6 \text{ с}^{-1},$$

$$r = r_0 \frac{T_0}{T}^{3/2}, \quad r_0 = 10^{18} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1},$$

Решение (3) имеет вид

$$N = \frac{N(0)N_c}{(N(0) + N_c) \exp(t/t_{N1}) + N(0)},$$

где $N_c = k_a / r$, $t_{N1} = 1 / k_a$ (см. табл. 5).

Как следует из уравнения (32), релаксация ионизированного следа, вообще говоря, определяется как прилипанием электронов, так и их рекомбинацией с метеорными ионами. Времена релаксации за счет этих процессов, согласно выражению (32), даются соотношениями

$$t_{N1} = \frac{1}{k_a},$$

$$t_{N2} = [r N(0)]^{-1}.$$

Полученные значения этих и других параметров атмосферы приведены в табл. 6. Считалось, что при временах $t = t_{N1}, t_{N2}$ температура газа в следе $T(t) = T_m = 5400 \text{ К}$. Тогда $k_a(T_m) = (1.2 \dots 1.3) \cdot 10^{42} \text{ м}^6 / \text{с}$,

Таблица 6. Высотные зависимости параметров атмосферы и времен релаксации концентрации электронов в следе метеороида

z, км	T ₀ , К	k _a , 10 ⁻⁴² м ⁶ с ⁻¹	α, с ⁻¹	t _{N1} , мс	t _{N2} , мс
32	229.7	1.34	4820	0.21	0.37
31	227.5	1.32	6100	0.16	0.32
30	225.5	1.30	7910	0.13	0.29
29	223.1	1.28	10140	0.10	0.26
28	220.9	1.26	12600	0.08	0.26
27	218.8	1.24	16700	0.06	0.25
26	216.6	1.22	20600	0.05	0.29
25	214	1.20	27000	0.04	0.98
24	212	1.18	31100	0.03	5.5
23	210	1.15	46000	0.02	64

$r(T_m) = 1.3 \cdot 10^{20} \text{ м}^3/\text{с}$. Из табл. 6 видно, что времена релаксации t_{N1} и t_{N2} — соизмеримы (одного порядка), причем $t_{N1} \sim t_{N2} \sim 10^4 \text{ с}$.

Частота соударений электронов. Плазменные электроны испытывают соударения с ионами и нейтралами. При этом в системе СИ [9]

$$\begin{aligned} \nu_{ei} &= 5.5 \cdot 10^6 N T_e^{3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{1/3}), \\ \nu_{en} &= 5.7 \cdot 10^{20} N_n T_e^{-3/2} \frac{kT_e}{m} \end{aligned}$$

где N , T_e , m и T_n — концентрация, температура, масса и тепловая скорость электронов, k — постоянная Больцмана, N_n — концентрация нейтралов в разреженном следе (см. табл. 5). Учитывая, что время релаксации температуры электронов t_{Te} намного меньше времени релаксации температуры нейтралов t_T , будем считать, что во всем объеме газа $T_e(t) = T(t) = T_m = 5400 \text{ К}$. Кроме того, полагаем, что $N = N(0)$. Рассчитанные при таких условиях значения ν_{ei} , ν_{en} и ν_{ee} приведены в табл. 7. Видно, что почти на всех высотах $\nu_{ei} \gg \nu_{en}$ и $\nu_{ee} \gg \nu_{en}$.

Частоты соударений ν_{ei} и ν_{en} определяют время релаксации T_e :

$$t_{Te} = \left(\nu_{ei} + \nu_{en} \right)^{-1},$$

где ν_{ei} и ν_{en} — относительная доля энергии, теряемая при одном акте соударений с ионом и нейтралом соответственно. Полагаем, что $\nu_{ei} = 10^4$ и $\nu_{en} = 3 \cdot 10^3$. Результаты расчета t_{Te} также приведены в табл. 7. Как видно из табл. 7, $t_{Te} = 22...46 \text{ нс} \ll t_T$.

Проводимость плазмы. В следе электронная проводимость [9]

$$\frac{e^2 N}{m_e}$$

На высотах $z = 26 \text{ км}$ $\nu_{ei} \gg \nu_{en}$ и

Таблица 7. Высотные зависимости частот соударений, проводимости плазмы и времени релаксации температуры электронов в следе метеороида в начальный момент времени

z , км	$\nu_{ei}, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$\nu_{en}, 10^9 \text{ с}^{-1}$	$\nu_e, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$\sigma, \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$	t_{Te} , нс
32	8.0	4.6	8.5	890	46
31	8.9	5.2	9.4	897	41
30	9.8	6.0	10	955	36
29	11	6.8	12	890	32
28	11	7.8	12	913	29
27	11	9.0	12	937	26
26	10	10	11	894	25
25	3.5	12	4.7	598	25
24	0.77	13	2.1	241	25
23	0.084	15	1.6	28	22

$$\frac{e^2 N}{m_{ei}}$$

Поскольку $\nu_{ei} \propto N$, проводимость электронов при $t \approx t_{N1}$ практически не зависит от N и составляет величину около $1000 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. При $t \approx t_{N1}$ значения ν_{en} быстро уменьшаются из-за уменьшения $N(t)$ и влияния ν_{en} .

Пылевой компонент плазмы. Кроме электронно-ионной плазмы след от метеороида заполнен атомами метеорного вещества и пылевыми частицами, которые несут на себе заряд. Пыль в следе появляется в результате конденсации испарившегося вещества и взрывоподобного выделения энергии при резком торможении космического тела. Такая плазма является газопылевой. Ее свойства, как известно, заметно отличаются от свойств классической плазмы. В частности, в дисперсионной зависимости появляются новые ветви, описывающие иные виды волн и колебаний. Пыль существенно влияет на диффузионные процессы. Более детальное исследование роли метеорной пыли выходит за рамки настоящей работы.

ВЫВОДЫ

Проведен комплексный анализ основных процессов в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, сопровождавших падение Липецкого метеороида, и установлено следующее.

1. Нагретый примерно до 5400 К след от метеороида остывал главным образом за счет излучения, а также в результате термодинамического расширения, присоединения холодного воздуха при подъеме термика и турбулентного перемешивания с холодным воздухом. Выявлены и рассмотрены четыре стадии охлаждения следа от метеороида. Время жизни нагретого термика составляло нескольких часов.

2. Установлено, что первая стадия длилась примерно 0.01 с, за счет излучения температура следа уменьшилась вдвое. В течение второй стадии (~1 с) имело место охлаждение за счет излучения и расширения следа, температура уменьшилась примерно на 15 %. В течение третьей стадии продолжительностью около 3 с продукты взрыва и нагретый газ (термик), имея ускорение $100...200 \text{ м/с}^2$, набрали скорость подъема до значений около 200 м/с, температура уменьшилась на 10 %. Четвертая стадия длилась примерно 100 с, термик интенсивно присоединял холодный воздух, постепенно охлаждался и тормозился.

3. Предложена упрощенная одномерная модель движения плюма в вертикальном направлении.

Найдены временные и высотные зависимости скорости, ускорения и высоты подъема газопылевого облака, вызванного конвекцией нагретых продуктов взрыва. Оценены скорость, ускорение и высота вертикального подъема плюма. Показано, что ускорение плюма вначале достигало максимального значения 240 м/с^2 . Его скорость увеличивалась от 0 до примерно 200 м/с, затем постепенно уменьшалась до 0 м/с. Время подъема составило около 100 с, а высота подъема плюма в этой модели — 15...20 км.

4. Входящие в состав термика продукты взрыва (пылинки, аэрозоли) в дальнейшем принимали участие в трех процессах: медленном оседании на поверхность Земли, турбулентном перемешивании с окружающим воздухом, в переносе преобладающими ветрами вокруг планеты.

Показано, что в отсутствие турбулентного перемешивания время жизни микрометровых пылинок составляло бы около трех лет. Реально же их время оседания ограничивалось турбулентным перемешиванием и в зависимости от размера не превышало 10...30 сут.

5. Показано, что эффект турбулентности в следе метеороида был хорошо выражен, а эффект магнитной турбулентности проявлялся слабо.

6. Оценены основные параметры плазмы в следе: высотные зависимости линейной и объемной концентраций электронов, их времен релаксации, частот соударений частиц, проводимости плазмы, времен релаксации температуры электронов. Показано, что линейная и объемная концентрации электронов в следе в начальный момент составляли $(2...40) 10^{23} \text{ м}^{-1}$ и $(1...4) 10^{21} \text{ м}^{-3}$, проводимость плазмы равнялась приблизительно $1000 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Роль пылевого компонента плазмы могла быть существенной.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

1. Артемьева Н. А., Шувалов В. В. Атмосферный шлейф Челябинского метеороида. *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск. Москва: ГЕОС. 2014. С. 134—146.
2. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений*. Москва: Наука. 1981. — 416 с.
3. Бронштэн В. А. Магнитогидродинамический механизм генерации радиоизлучения ярких болидов. *Астрон. вестн.* 1983. 17, № 2. С. 94—98.
4. Бронштэн В. А. Вход в атмосферу крупных метеороидов. *Астрон. вестн.* 1993. 27, № 1. С. 102—121.
5. Бронштэн В. А. О физическом механизме квазинепрерывного дробления крупных метеорных тел. *Астрон. вестн.* 1993. 27, № 3. С. 65—74.
6. Бронштэн В. А. Применение теории Григоряна к расчету дробления гигантских метеороидов. *Астрон. вестн.* 1994. 28. № 2. С. 118—124.
7. Бронштэн В. А. Дробление и разрушение крупных метеорных тел в атмосфере. *Астрон. вестн.* 1995. 29, № 5. С. 450—459.
8. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. *Физика ионосферы*. Москва: Наука. 1988.— 527 с.
9. Гинзбург В. Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. Москва: Наука. 1967. — 684 с.
10. Горькавый Н. Н., Лихарев Д. С., Миннибаев Д. Н. Цветовые вариации аэрозольного следа Челябинского болида. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Мат. Всероссийской науч. конф.* — Редкол. Н. А. Антипин и др. — Челябинск. 2014. С. 118—123.
11. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А. Взаимодействие Челябинского болида с атмосферой. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Мат. Всероссийской науч. конф.* — Редкол. Н. А. Антипин и др. — Челябинск. 2014. С. 124—129.
12. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А., Проворникова Е. А., и др. Аэрозольный шлейф Челябинского болида. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Мат. Всероссийской науч. конф.* — Редкол. Н. А. Антипин и др. — Челябинск. 2014. С. 130—135.
13. Григорян С. С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет. *Космич. исслед.* 1979. 17, № 6. С. 875—893.
14. Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. *Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск*. Москва: ГЕОС. 2014. 160 с.
15. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрон. вестн.* 2013. 47, № 4. С. 262—277.
16. *Катастрофические воздействия космических тел*. Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
17. *Метеорит Челябинск — год на Земле. Мат. Всероссийской науч. конф.* — Редкол. Н. А. Антипин и др. — Челябинск. 2014. 694 с.
18. Стулов В. П., Мирский В. Н., Вислый А. И. *Аэродинамика болидов*. Москва: Наука. Физматлит. 1995. 240 с.
19. *Челябинский суперболид*. Под ред. Н. Н. Горькавого, А. Е. Дудорова. Челябинск: Изд-во Челябинского университета. 2016. 223 с.
20. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012.—556 с.
21. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита “Челябинск”. *Инж. физ.* 2013. 8. С. 23—40.

22. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Допов. Нац. акад. наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
23. 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.
24. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газопылевого следа Челябинского метеороида 2013 года. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. 53, №3. С. 296—306.
25. Черногор Л. Ф. Магнито-ионосферные эффекты метеороидного плюма. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 1. С. 125—132.
26. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Всплывание метеороидного термика в атмосфере Земли. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. 34, №4. С. 53—66.
27. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 1. С. 49—70.
28. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 2. С. 18—35.
29. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кинематика и физика небес. тел.* 2019. 35, № 4. С. 37—59.
30. *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.
31. 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.
32. Gorkavyi N. N., Taidakova T. A., Provornikova E. A. Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide. *Solar Syst. Res.* 2013. 47, № 4. P. 275—279.
33. Grigoryan S. S. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar Syst. Res.* 2013. 47, № 4. P. 268—274.
34. Hills J. G., Goda M. P. The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* 1993. 105. № 3. P. 1114—1144.
35. Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B., et al. Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 1980. 37. P. 1342—1357.
36. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 2013. 342. P. 1069—1073.
37. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1. Last access 1.10.2015. 145 p.
38. Schunk R. W., Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press. 2000. 554 p.

REFERENCES

1. Artem'jeva N. A., Shuvalov V. V. (2014) Atmosfernyj shlejf Chelyabinskogo meteoroida. Dinamicheskie processy v geosferah. Vypusk 5. Geofizicheskie efekty padeniya Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Specialnyj vypusk. Moskva: GEOS. 2014. P. 134—146 (in Russian).
2. Bronshten V. A. (1983) *Physics of Meteor Phenomena*. Springer. 416 p. (in Russian).
3. Bronshten V. A. (1983) Magnitogidrodinamicheskiy mekhanizm generatsii radioizlucheniya yarkikh bolidov. *Astronomicheskij vestnik*. 17(2). S. 94—98 (in Russian).

4. Bronsten V. A. (1993) The entry of the large meteoroids into the atmosphere. *Astronomicheskij vestnik*. **27** (1). P. 102—121 (in Russian).
5. Bronsten V. A. (1993) About physical mechanism of the large meteor bodies quasicontinuous fragmentation. *Astronomicheskij vestnik*. **27** (3). P. 65—74 (in Russian).
6. 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).
7. Bronsten V. A. (1995) Large meteor bodies fragmentation and destruction into the atmosphere. *Astronomicheskij vestnik*. **29**(5). P. 450—459 (in Russian).
8. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. (1988) *Fizika ionosfery*. Moskva: Nauka.—527 p. (in Russian).
9. Ginzburg V. L. (1967) *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme*. Moskva: Nauka. 684 p. (in Russian).
10. Gor'kavyy N. N., Likharev D. S., Minnibayev D. N. (2014) Tsvetovyye variatsii aerol'z'nogo sleda Chelyabinskogo bolida. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. (Eds Antipin N. A., Dudorov A. E., Zamozdra S. N., Kolisnichenko S. V., Kocherov A. V., Shajgorodskij E. A.). — Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ. P. 118—123 (in Russian).
11. Gor'kavyy N. N., Taydakova T. A. (2014) Vzaimodeystviye Chelyabinskogo bolida s atmosferoy. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. (Eds Antipin N. A., Dudorov A. E., Zamozdra S. N., Kolisnichenko S. V., Kocherov A. V., Shajgorodskij E. A.). — Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ. P. 124—129 (in Russian).
12. Gor'kavyy N. N., Taydakova T. A., Provornikova Ye. A., et al. (2014) Aerol'z'nyy shlyef Chelyabinskogo bolida. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. (Eds Antipin N. A., Dudorov A. E., Zamozdra S. N., Kolisnichenko S. V., Kocherov A. V., Shajgorodskij E. A.). — Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ. P. 130—135 (in Russian).
13. Grigoryan S. S. (1980) Motion and Destruction of Meteorites in Planetary Atmospheres. *Cosmic Research*. **17** (6). P. 724—740.
14. *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).
15. 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.
16. *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. (2005) (Eds Adushkin V. V., Nemchinov I. V.). — M.: ECC Akademkniga Publ. 310 p. (in Russian).
17. *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).
18. Stulov V. P., Mirskii V. N., Vislyi A. I. (1995) *Aerodynamics of Bolides*. M.: Nauka Publ., 240 p. (in Russian).
19. *Chelyabinsk superbolide*. (2016). — Gor'kavyy N. N., Dudorov A. E. (Eds). 223 p. Chelyabinsk: Chelyabinskiy Gosud. Univ. (in Russian).
20. Chernogor L. F. (2012) *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National Univ. Publ., 556 p. (in Russian).

21. Chernogor L. F. (2013) Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Engineering Physics*. 8. P. 23—40 (in Russian).
22. Chernogor L. F. (2013) Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 10. P. 97—104 (in Russian).
23. Chernogor L. F. (2014) Osnovnyye efekty padeniya meteorita Chelyabinsk: rezul'taty fiziko-matematicheskogo modelirovaniya. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. (Eds Antipin N. A., Dudorov A. E., Zamozdra S. N., Kolisnichenko S. V., Kocherov A. V., Shajgorodskij E. A.). — Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ. P. 229—264 (in Russian).
24. Chernogor L. F. (2017) Atmosfernnyye efekty gazopylevogo sleda Chelyabinskogo meteoroida 2013 goda. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 53(3). P. 296—306 (in Russian).
25. Chernogor L. F. (2018) Magnito-ionosfernnyye efekty meteoroidnogo plyuma. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 58(1). P. 125—132 (in Russian).
26. Chernogor L. F., Milovanov Yu. B. (2018) Rise of a meteoroid thermal in the Earth's atmosphere. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 34(4). P. 198—206.
27. Chernogor L. F. (2018) The physical effects of Romanian meteoroid. 1. *Space Science and Technology*. 24 (1), P. 49—70 (in Russian).
28. Chernogor L. F. (2018) The physical effects of Romanian meteoroid. 2. *Space Science and Technology*. 24 (2), P. 18—35 (in Russian).
29. Chernogor L. F. (2019) Physical effects of the Lipetsk meteoroid. 1. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(4). P. 37—59. (in Russian).
30. *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.
31. 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.
32. Gorkavyi N. N., Taidakova T. A., Provornikova E. A. (2013) Aerosol plume after the Chelyabinsk bolide. *Solar system research*. 2013. 47(4). P. 275—279.
33. Grigoryan S. S. (2013) Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar Syst. Res.* 47(4). P. 268—274.
34. Hills J. G., Goda M. P. (1993) The fragmentation of small asteroids in the atmosphere. *Astron. J.* 105(3). P. 1114—1144.
35. Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B., et al. (1980) Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere. *J. Atmos. Sci.* 37. P. 1342—1357.
36. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 342. P. 1069—1073.
37. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. (2013) Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. URL: www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1. Last access 1.10.2015. 145 p.
38. Schunk R. W., Nagy A. (2000) *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press. 554 p.

Л. Ф. Черногор

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

ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ ЛИПЕЦЬКОГО МЕТЕОРОЇДА. 2

Проведено комплексне моделювання процесів у всіх геосферах, що були зумовлені падінням та вибухом метеороїда поблизу м. Липецьк (Росія) 21 червня 2018 р. Оцінено термодинамічні та плазмові ефекти, а також ефекти турбулентності, що супроводжували падіння Липецького метеороїда. Показано, що проліт космічного тіла призвів до утворення газопилового пюму. Нагрітий слід від метеороїда остигав протягом декількох годин. Детально розглянуто чотири стадії охолодження сліду метеороїда. Перша з них тривала приблизно 0.01 с, за рахунок випромінювання температура сліду зменшилася вдвічі. Впродовж другої стадії (~1 с) відбувалося зменшення температури на 15 % за рахунок випромінювання та розширення сліду. Впродовж третьої стадії тривалістю приблизно 3 с продукти вибуху та нагрітий газ (термік), маючи прискорення 100...200 м/с², набрали швидкість підйому до значень 200 м/с, температура зменшилася на 10 %. Четверта стадія тривала близько 100 с, термік інтенсивно приєднував холодне повітря, поступово охолоджувався та гальмувався. Максимальна висота підйому терміка досягала 15...20 км. Продукти вибуху (пилінки, аерозолі), що входили до складу терміка, надалі брали участь у трьох процесах: повільному осіданні на поверхню Землі, турбулентному перемішуванні з навколишнім повітрям, у перенесенні переважними вітрами навколо планети. Показано, що ефект турбулентності у сліді метеороїда був добре виражений, а ефект магнітної турбулентності проявлявся слабо. Оцінено основні параметри плазми в сліді: висотні залежності лінійної та об'ємної концентрацій електронів, їхніх часів релаксації, частот зіткнень частинок, провідності плазми, часів релаксації температури електронів. Показано, що лінійна та об'ємна концентрації електронів у сліді у початковий момент становили близько (2...40) 10²³ м⁻¹ та (1...4) 10²¹ м⁻³, провідність плазми дорівнювала 1000 Ом⁻¹м⁻¹. Обговорюється роль пилового компонента плазми.

Ключові слова: Липецький метеороїд, комплексне моделювання, термодинамічні ефекти, плазма, пюм, турбулентність

L. F. Chernogor

V. N. Karazin Kharkiv National University,
Kharkiv, Ukraine

THE PHYSICAL EFFECTS OF LIPETSK METEOROID. 2

Comprehensive modeling studies of the processes induced in all geospheres by the passage and explosion of the meteoroid near the Lipetsk City (Russia) on June 21, 2018 are described. Thermodynamic and plasma effects, as well as the effects of the plume and turbulence, accompanying the passage of the Lipetsk meteoroid are estimated. It is shown that the passage of the celestial body led to the formation of a gas-dust plume. The heated trail of the meteoroid cooled for several hours. Four stages of meteoroid trail cooling are considered in detail. The first of these persisted for ~0.01 s, and the temperature of the trail decreased by a factor of two due to emissions. During the second stage of order of 1 s in duration, cooling due to the trail emissions and expansion took place, and the temperature of the trail decreased by 15 %. In the course of the third stage of order of 3 s in duration, the products of the explosion and the heated gas, thermic, experienced an 100...200 m/s² acceleration and attained an 200 m/s speed of uplifting, and the temperature decreased on 10 percents. The fourth stage persisted for 100 s, during which the thermic absorbed the cool air at an intensive rate and gradually cooled off and decelerated. The maximum altitude of the uplifting of the thermic reached 15...20 km. Contained in the thermic, the

products of the explosion, specks of dust and aerosols, further took part in the following three processes: a slow precipitation to the surface of the Earth, turbulent mixing with the ambient air, and the transport by the predominant winds around the globe. The effect of turbulence in the trail has been shown to be well-pronounced, while the effect of magnetic turbulence has been shown to be weakly displayed. The following basic parameters of the plasma in the trail have been estimated: the height dependences of the electron densities per unit length and per unit volume, their relaxation times, the particle collision frequencies, the plasma conductivities, and the electron temperature relaxation time. At the initial moment, the linear and volume electron densities in the trail have been shown to be equal to about $(2...40) \cdot 10^{23} \text{ m}^{-1}$ and $(1...4) \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$, respectively, and the plasma conductivity to be equal to $\sim 1000 \text{ Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$. The role of the dusty plasma component is discussed.

Key words: Lipetsk meteoroid, complex simulation, thermodynamic effects, plasma, plume, turbulence effects

Статья поступила в редакцию 31.03.2019

После доработки 18.06.2019

Принята к публикации 18.06.2019