

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.018>

УДК 533.6.011.6+523.682

Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина

## ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РУМЫНСКОГО МЕТЕОРОИДА. 2

*Проведено комплексное моделирование процессов во всех геосферах, вызванных падением и взрывом метеороида над Румынией 7 января 2015 г. Оценены эффект турбулентности, магнитные, электрические, электромагнитные и сейсмические эффекты, а также эффекты акустико-гравитационных волн и ионосферные эффекты. Пролет метеороида привел к образованию плазменного следа, к заметному возмущению не только нижней, но и верхней атмосферы на удаленностях не менее 1 тыс. км. Величины плазменного, магнитного, электрического, электромагнитного и акустического эффектов были существенными. Магнитуда землетрясения, вызванного взрывом метеороида, не превышала 1. Средняя частота падения космических тел, подобных Румынскому метеороиду, составляет  $8.4 \text{ лет}^{-1}$ .*

**Ключевые слова:** метеороид, эффект турбулентности, магнитные, электрические, электромагнитные, сейсмические эффекты, акустико-гравитационные волны, ионосферные эффекты, частота падений.

### ВВЕДЕНИЕ

Физическим эффектам Румынского метеороида посвящены работы [41, 45, 61]. В первой части настоящей работы описаны механические, газодинамические, оптические и термодинамические эффекты, вызванные полетом и взрывом Румынского метеороида [41].

Цель второй части работы — изложение результатов расчетов и оценок эффектов турбулентности и акустико-гравитационных волн, а также плазменных, магнитных, электрических, электромагнитных, ионосферных и сейсмических эффектов, сопровождавших падение Румынского космического тела. Обозначения в этой части работы такие же, как и в первой части [41]. Подчеркнем, что перечисленные эффекты для крупных метеороидов как в теоретическом,

так и в экспериментальных планах изучены недостаточно. Имеются лишь оценки отдельных эффектов [9, 10, 20, 21, 43, 44, 58]. Ранее автором предпринята попытка оценки всего комплекса эффектов для Челябинского метеороида [37, 38, 49]. В обобщающих работах по Челябинскому метеороиду [59, 60] перечисленные выше эффекты вообще не рассматриваются.

### ЭФФЕКТ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Турбулентность в сплошной среде становится определяющей, если число Рейнольдса [7] составляет

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu} = \rho \frac{vd}{\eta} \geq \text{Re}_{cr} \approx 10^3. \quad (1)$$

Здесь  $v$  и  $d$  — скорость и диаметр космического тела,  $\nu$  и  $\eta$  — кинематическая и динамическая вязкости,  $\rho$  — плотность атмосферы на заданной высоте. Условие (1) при диаметре  $d \approx 1.1 \text{ м}$ ,

$\eta = 1.7 \cdot 10^{-5}$  Па · с и  $v \approx 35$  км/с реализуется при  $\rho > 4.4 \cdot 10^{-7}$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. на высотах  $z < 105$  км.

Таким образом, след метеороида был сильно турбулизированным на высотах  $z \approx 105...40$  км. Внешний масштаб турбулентности  $L_t \approx d(z) \approx \approx 1...20$  м на высотах 105...42 км соответственно (см. табл. 1 в работе [41]). Время становления турбулентности

$$\tau_t = \frac{L_t}{v_t} = \frac{L_t}{\alpha_t v} \approx 2.9 \cdot 10^{-4} \dots 2.9 \cdot 10^{-2} \text{ с}$$

для того же диапазона высот. Здесь  $\alpha_t = v_t / v$ ,  $v_t$  — характерная скорость турбулентного движения. Обычно полагают  $\alpha_t \approx 0.1$  [7, 10]. Видно, что  $\tau_t \ll \tau_e \sim 0.3$  с, т. е. процесс турбулизации был сравнительно малоинерционным. Здесь  $\tau_e$  — характерное время энерговыделения [41].

Коэффициент турбулентной диффузии оценим следующим образом:

$$D_t = v_t L_t = v_t^2 \tau_t.$$

При  $v_t \approx 3.5...1.0$  км/с и  $L_t = 1...20$  м имеем  $D_t \approx 3.5 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>. В невозмущенной атмосфере на высотах 40...105 км  $D_{t0} \approx 400...5000$  м<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>. Видно, что вблизи высоты максимального энерговыделения  $D_t \gg D_{t0}$ , на остальных высотах величины  $D_t$  и  $D_{t0}$  одного порядка.

След метеороида заполнен плазмой с проводимостью  $\sigma$ . Турбулентность плазмы характеризуется магнитным числом Рейнольдса

$$\text{Re}_m = \mu_0 v_t L_t \sigma = \mu_0 D_t \sigma, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная. При указанных значениях  $v_t$ ,  $L_t$  и  $\sigma \approx 3 \cdot 10^4$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup> (см. далее) из (2) получаем  $\text{Re}_m \approx 125...720$  для  $z \approx 105...40$  км соответственно. Критическое значение  $\text{Re}_{mcr} \approx 40$ .

Таким образом,  $\text{Re}_m > \text{Re}_{mcr}$ , и магнитные свойства турбулентности для тел метрового диапазона активно проявляются. Для тел декаметрового диапазона эти свойства также существенны. Существенными они были и для Челябинского метеороида [37].

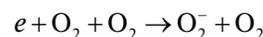
## ПЛАЗМЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ

**Концентрация электронов.** Линейная концентрация электронов вычисляется из следующего уравнения:

$$\alpha_i = - \frac{\beta_i}{M_m v} \frac{dm}{dt}.$$

Положим  $M_m = 5 \cdot 10^{-26}$  кг,  $\beta_i \approx 0.0154$  [7]. Результаты расчета  $\alpha_i$  и объемной концентрации электронов  $N = \alpha_i / S$  приведены в табл. 1. Видно, что вблизи высоты максимального энерговыделения  $\alpha_{i\max} \approx 4.7 \cdot 10^{22}$  м<sup>-1</sup>, а  $N_{\max} \approx 8 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup>. На всех высотах степень ионизации плазмы  $s_i(0) = N / N_n < 1$ , где  $N_n$  — концентрация нейтралов в невозмущенной атмосфере (см. табл. 1).

После окончания процесса ионизации электроны исчезают в результате прилипания к молекулам кислорода при тройных соударениях в реакции [11]:



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

$$\frac{dN}{dt} = -\beta_a N - \alpha_r N^2, \quad N|_{t=0} = N(0), \quad (3)$$

где  $\beta_a = k_a N^2 [O_2]$  — коэффициент прилипания,  $k_a$  — скорость реакции,  $\alpha_r$  — коэффициент радиативной рекомбинации метеорных частиц. Учтем, что [11]

$$k_a = k_{a0} \frac{300}{T} e^{-600/T}, \quad k_{a0} \approx 1.4 \cdot 10^{-41} \text{ м}^6/\text{с},$$

$$\alpha_r \approx \alpha_{r0} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{3/2}, \quad \alpha_{r0} \approx 10^{-18} \text{ м}^3/\text{с},$$

Решение (3) имеет вид

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

где  $N_c = \beta_a / \alpha_r$ ,  $t_{N1} = 1 / \beta_a$  (см. табл. 1).

Как следует из уравнения (3), релаксация ионизированного следа, вообще говоря, определяется как прилипанием электронов, так и их рекомбинацией с метеорными ионами. Времена релаксации за счет этих процессов, согласно выражению (3), даются соотношениями

$$t_{N1} = \beta_a^{-1},$$

$$t_{N2} = (\alpha_r N(0))^{-1}.$$

Результаты расчета этих и других плазменных параметров приведены в табл. 1. Считалось, что при временах  $t \leq t_{N1}$ ,  $t_{N2}$  температура газа в сле-

де  $T(t) \approx T_m \approx 3500$  К. Тогда  $k_a(T_m) \approx 10^{-42}$  м<sup>6</sup>/с,  $\alpha_r(T_m) \approx 1.9 \cdot 10^{-20}$  м<sup>3</sup>/с. Из табл. 1 видно, что на высотах 42...48 км  $t_{N1} > t_{N2}$ .

**Частота соударений электронов.** Плазменные электроны испытывают соударения с ионами и нейтралами. При этом в системе СИ [12]

$$v_e = v_{ei} + v_{in},$$

$$v_{ei} = 5.5 \cdot 10^{-6} N T_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}),$$

$$v_{en} = 5.7 \cdot 10^{-20} N_n v_{Te},$$

$$v_{Te} = \left( \frac{k T_e}{m} \right)^{1/2},$$

где  $N$ ,  $T_e$ ,  $m$  и  $v_{Te}$  — концентрация, температура, масса и тепловая скорость электронов,  $k$  — постоянная Больцмана,  $N_n$  — концентрация нейтралов в разреженном следе (см. табл. 1). Учтывая, что время релаксации температуры электронов  $t_{Te}$  намного меньше времени релаксации температуры нейтралов  $t_T$ , будем считать, что во всем объеме газа  $T_e(t) \approx T(t) \approx T_m \approx 3500$  К. Кроме того, полагаем, что  $N \approx N(0)$ . Рассчитанные при таких условиях значения  $v_{ei}$ ,  $v_{en}$  и  $v_e$  приведены в табл. 1. Видно, что почти на всех высотах  $v_{ee} \gg v_{en}$  и  $v_e \approx v_{ei}$ .

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

$$t_{Te} = (\delta_{ei} v_{ei} + \delta_{en} v_{en})^{-1},$$

где  $\delta_{ei}$  и  $\delta_{en}$  — относительная доля энергии, теряемая при одном акте соударений с ионом и нейтралом соответственно. Полагаем, что  $\delta_{ei} \approx 10^{-4}$  и

$\delta_{en}(T_m) \approx 0.003$ . Результаты расчета  $t_{Te}$  также приведены в табл. 1. Как видно,  $t_{Te} \sim 10$  мкс  $\ll t_T$ .

**Проводимость плазмы.** В следе электронная проводимость равна

$$\sigma = \frac{e^2 N}{m v_e}.$$

На высотах  $z \geq 43$  км  $v_{ei} \gg v_{en}$  и

$$\sigma = \frac{e^2 N}{m v_{ei}}.$$

Поскольку  $v_{ei} \propto N$ , проводимость электронов при  $t \leq t_{N1}$  практически не зависит от  $N$  и составляет величину около  $3 \cdot 10^4$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>. При  $t > t_{N1}$  значения  $\sigma$  быстро уменьшаются из-за уменьшения  $N(t)$  и влияния  $v_{en}$ .

**Пылевой компонент плазмы.** Кроме электроно-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.

Таблица 1. Основные параметры плазменного следа

$z$ , км	$N_p$ , $10^{21}$ м <sup>-3</sup>	$N[O_2]$ , $10^{20}$ м <sup>-3</sup>	$N(0)$ , $10^{20}$ м <sup>-3</sup>	$\alpha_i(0)$ , $10^{22}$ м <sup>-1</sup>	$s_i(0)$	$\beta_a$ , с <sup>-1</sup>	$t_{N1}$ , с	$N_c$ , $10^{18}$ м <sup>-3</sup>	$t_{N2}$ , с	$v_{ei}$ , $10^8$ с <sup>-1</sup>	$v_{en}$ , $10^7$ с <sup>-1</sup>	$v_e$ , $10^7$ с <sup>-1</sup>	$t_{Te}$ , $10^{-6}$ с
41	3.9	8.2	0.0061	0.019	$1.6 \cdot 10^{-4}$	0.67	1.5	35	86	0.012	5.1	5.2	6.7
42	3.4	7.2	1.1	2.4	0.032	0.52	1.9	27	0.5	1.4	4.4	18	6.8
43	3.0	6.3	10	15	0.33	0.40	2.5	21	0.05	9.2	3.9	96	5.0
44	2.6	5.5	16	15	0.62	0.30	3.3	16	0.03	14	3.4	140	4.2
45	2.3	4.8	17	8.8	0.74	0.23	4.3	12	0.03	14	3.0	140	4.3
46	2	4.2	16	4.1	0.80	0.18	5.7	9.5	0.03	14	2.6	140	4.5
47	1.7	3.6	14	1.2	0.82	0.13	7.7	6.8	0.04	12	2.2	120	5.4
48	1.4	3	12	0.12	0.86	0.10	10	5.3	0.04	11	1.8	110	6.1

## МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

**Оценка магнитного возмущения.** Турбулентность в плазменном следе может приводить к хаотизации («закручиванию», «запутыванию» [8]) магнитных силовых линий и усилению магнитного поля. Оценим этот эффект. Будем исходить из того, что плотности энергии турбулентного движения плазмы  $\varepsilon_t$  и магнитного поля  $\varepsilon_m$  сравниваются. С учетом того, что

$$\varepsilon_t = \frac{1}{2} m_i N v_i^2,$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0},$$

получим

$$B = \sqrt{\mu_0 m_i N} v_i.$$

Здесь  $m_i$  — масса иона.

При  $N \approx N(0) \approx 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ,  $m_i = 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ ,  $v_i \approx 1 \dots 3 \text{ км/с}$  получим характерное значение

$$B(0) = \sqrt{\mu_0 m_i N(0)} v_i \approx 8 \dots 24 \text{ мТл}.$$

Время становления турбулентности  $\tau_t \approx 0.3 \dots 30 \text{ мс} \ll t_{N2} \approx 0.03 \dots 0.5 \text{ с}$ . За это время  $N(t)$  существенно не уменьшится на высотах 42...46 км.

Заметим, что полученные значения  $B$  примерно на 2...2.7 порядка больше значения геомагнитного поля ( $B_0 \approx 0.5 \text{ мкТл}$ ). Сгенерированное метеороидом поле относится к квазистатическим. На расстоянии  $R$  от следа

$$B(R) \approx B(0) \left( \frac{d}{R} \right)^3,$$

где  $d$  — диаметр следа. Под эпицентром взрыва  $R \approx 44 \text{ км}$ . Тогда при  $d \approx 10 \text{ м}$  имеем  $B(R) \approx 0.1 \dots 0.3 \text{ пТл}$ , что находится на пределе чувствительности лучших магнитометров. Длительность возмущения магнитного поля определяется временем жизни ионизированного следа порядка 0.1 с (см. табл. 1).

**Оценка электродвижущей силы.** Изменения магнитного поля в следе должны приводить к возникновению электродвижущей силы (ЭДС). Исходим из соотношения

$$\mathbf{E} = - \frac{d\Phi}{dt} \approx -S \frac{dB}{dt}. \quad (4)$$

Здесь  $\Phi$  — поток индукции магнитного поля. Заменим выражение (4) оценкой:  $\mathbf{E} \approx B(0)S / \tau_t$ .

На высотах  $z \approx 42 \dots 48 \text{ км}$  для  $S \approx 200 \dots 1 \text{ м}^2$ ,  $B(0) \approx 10 \dots 30 \text{ мТл}$ ,  $\tau_t = 30 \dots 0.3 \text{ мс}$  соответственно. Тогда для этих же высот  $\mathbf{E} \approx 0.07 \dots 0.1 \text{ кВ}$ . Если электрические токи внутри следа замыкаются благодаря турбулентным вихрям с размером  $L_t$  и площадью сечения  $S_t \approx L_t^2$ , сопротивление замыкания равно

$$R_t = \frac{L_t}{\sigma S_t} \approx \frac{1}{\sigma L_t}.$$

Сила тока при этом

$$I = \frac{\mathbf{E}}{R_e + R_t},$$

где  $R_e \approx L / \sigma(z_e) S(z_e) \approx 4.2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ ,  $R_t \approx 3.3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$ . При оценках полагалось, что  $L = 10 \text{ км}$ ,  $\sigma(z_e) = 3 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ ,  $S(z_e) \approx 80 \text{ м}^2$ ,  $L_t \approx d(z_e) \approx 10 \text{ м}$ . При  $\mathbf{E} \approx 0.1 \text{ кВ}$  получим  $I \approx 24 \text{ кА}$ .

Таким образом, в случае замыкания электрических токов в следе метеороида могла возникнуть ЭДС  $\mathbf{E} \approx 0.1 \text{ кВ}$  и ток силой порядка десятков килоампер.

## МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

Магнитный эффект крупных метеороидов изучен недостаточно. Возмущения геомагнитного поля могут генерироваться за счет дипольного момента космических тел и за счет диамагнитного возмущения, вносимого ударной волной взрывающегося космического тела [8, 10].

Геомагнитные пульсации (квазипериодические вариации геомагнитного поля) могут генерироваться за счет МГД-эффекта при периодическом движении ионосферной плазмы в поле акустико-гравитационной волны, генерируемой при пролете и взрыве метеороида [34—38, 40].

**Геомагнитный эффект ионосферных токов.** Механизмы генерации геомагнитных возмущений, перечисленные в работах [8, 10], не могут считаться эффективными. Наиболее существенным механизмом является модуляция ионосферных токов, точнее токовой струи в динамообласти ионосферы. Последняя находится в основном на высотах  $z \approx 100 \dots 150 \text{ км}$ . Модуляция происходит за счет движения газа в поле акустической волны от взрыва. Из роторного уравнения Максвелла для амплитуды возмущения

индукции магнитного поля имеем [35]:

$$\Delta B \approx \frac{\mu_0 \Delta j_0}{k_a} \approx \frac{\mu_0 j_0 \delta_N}{k_a},$$

где  $j_0$  — плотность ионосферных токов,  $\Delta j_0$  и  $\delta_N$  — возмущение плотности ионосферных токов и концентрации электронов на высотах динамо-области,  $k_a$  — волновое число акустической волны. Здесь

$$k_a = \frac{2\pi}{v_s T_{a0}},$$

где  $v_s$  — скорость звука. Полагая на высоте 125 км  $v_s \approx 400$  м/с,  $T_{a0} \approx 1...10$  с,  $\delta_N \approx \delta_p = \Delta p/p_0 \approx 0.5...1$ ,  $j_0 \approx 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>, получим, что  $\Delta B \approx 5...50$  пТл. При этом геомагнитный эффект очень слабый.

В случае модуляции токовой струи внутренней гравитационной волной с периодом  $T_{a0} > 5$  мин амплитуда геомагнитного возмущения [36]

$$\Delta B \approx \mu_0 j_0 \delta_N \Delta z,$$

где  $\Delta z \approx 30$  км — толщина динамо-области. При тех же значениях  $\delta_N$  и  $j_0$  получим  $\Delta B \approx 2.3$  нТл. Такой эффект может наблюдаться при помощи современных магнитометров.

**Магнитный эффект электрического тока в следе.** При силе тока в следе  $I$  на расстоянии  $R$  из соотношения

$$\Delta B = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}$$

можно оценить  $\Delta B$ . Например, при  $I = 1...10$  кА,  $R = 100$  км получим, что  $\Delta B \approx 2...20$  нТл. Магнитный эффект в этом случае мог быть весьма значительным.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Проблема электрических и магнитных явлений, сопровождающих падения крупных космических тел, в настоящее время далека от разрешения [9]. Рассмотрим ряд возможных механизмов, приводящих к электрическому эффекту.

**Ток, обусловленный разделением заряда.** В работе [9] предполагалось, что движение электронов в следе происходит на фоне образующихся и отстающих от тела ионов. Это должно приводить к возникновению тока силой

$$I = e\alpha_i v,$$

где  $\alpha_i$  — линейная концентрация электронов в

следе метеороида (см. табл. 1),  $v$  — скорость метеороида. При  $\alpha_i \approx 10^{22}...10^{23}$  м<sup>-1</sup>,  $v \approx 30$  км/с имеем  $I \approx 48...480$  МА. Такая сила тока является аномально большой. Она возникла бы при полном разделении зарядов в следе, что не представляется возможным. Частичное же разделение заряда исключать нельзя. Тогда приведенные выше значения силы тока являются оценкой сверху.

**Эффект внешнего электрического поля.** Плазменный след находится в постоянном электрическом поле атмосферного происхождения (поле ясной погоды). У поверхности Земли напряженность этого поля  $E_0(0) \approx 100$  В/м [5]. С увеличением высоты напряженность поля убывает по следующему закону:

$$E_0(z) = E_0(0) \exp(-z/H_E),$$

где  $H_E \approx 2.5...4$  км. Тогда при  $H_E = 3.5$  км на высотах  $z \approx 41...48$  км имеем  $0.82...0.11$  мВ/м.

Между концами следа возникает разность потенциалов

$$U = \int_L E_0 dl = \int_{z_1}^{z_2} E_0(z) \frac{dz}{\sin \alpha} = \frac{E_0(z_1) H_E}{\sin \alpha} (1 - e^{-(z_2 - z_1)/H_E}). \quad (5)$$

При  $z_1 \approx 41$  км и  $z_2 \approx 48$  км из (5) имеем  $U \approx 3.2$  В. При сопротивлении следа

$$R(z_e) = \frac{H}{\sigma(z_e) S(z_e) \sin \alpha} \quad (6)$$

из (5) и (6) получим, что

$$I = \frac{U}{R(z_e)} = \sigma(z_e) E_0(z_e) S(z_e) \frac{H_E}{H} (1 - e^{-(z_2 - z_1)/H}).$$

При  $\sigma = 3 \cdot 10^4$  Ом<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>,  $E_0(z_e) \approx 0.35$  мВ/м,  $S \approx 80$  м<sup>2</sup>,  $H_E = 3.5$  км,  $H = 7.5$  км имеем  $R(z_e) \approx 0.4$  Ом,  $I \approx 8$  А.

**Эффект ударной волны.** Пролет достаточно крупного метеороида приводит к генерации ударной волны. При этом на фронте ионизации сгенерирована ЭДС [9]:

$$\mathbf{E} = \frac{kT_i}{e} \ln \frac{N(0)}{N_0},$$

где  $T_i \approx 14000$  К — критическая температура, определяющая начало ионизации,  $N_0 \approx 10^6$  м<sup>-3</sup> — фоновое значение  $N$  в атмосфере. При  $N(0) \approx 10^{20}...10^{21}$  м<sup>-3</sup> оценка дает  $\mathbf{E} \approx 38...41$  В.

Сила тока в следе

$$I = \frac{E}{R_e + R_0},$$

где  $R_e$  — сопротивление следа,  $R_0$  — сопротивление замыкания электрической цепи. Поскольку  $R_0 \gg R_e$ , сила тока в следе за счет этого механизма будет крайне незначительной. Если же принять, как и выше, что  $R_e \approx 4.2 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $R_0 \approx R_l \approx 3.3 \cdot 10^{-6}$  Ом,  $I \approx 9 \dots 10$  кА.

**Электростатический эффект.** Оценим электростатический эффект метеороида, опираясь на результаты работы [26].

Электрический заряд системы плазма + окружающий воздух определяется балансом прямого и обратного потоков электронов в этой системе [26]. Будем считать поверхность плазменной оболочки метеороида сферой радиусом  $r_s$ . С нее убегают вперед электроны, которые более подвижны, чем ионы. Убегание электронов будет продолжаться до тех пор, пока положительный заряд не начнет возвращать их назад. При этом скорость уноса электронов, близкая к скорости метеороида, становится равной скорости возврата электронов, имеющих подвижность  $\mu_e$ , т. е.

$$v = \mu_e E_s, \quad (7)$$

где  $E_s$  — напряженность электрического поля на поверхности плазменной оболочки. Из соотношения (7) определяется потенциал электрического поля относительно Земли:

$$\varphi = E_s r_s = \frac{v r_s}{\mu_e}. \quad (8)$$

Зная  $\varphi$ , можно вычислить заряд  $q$  и энергию  $E$  электрического поля:

$$q = 4\pi\epsilon_0 r_s \varphi = \frac{4\pi\epsilon_0}{\mu_e} v r_s^2, \quad (9)$$

$$E = q\varphi = \frac{4\pi\epsilon_0}{\mu_e^2} v^2 r_s^3, \quad (10)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная. Важно, что  $q \propto v r_s^2$ , а  $E \propto v^2 r_s^3$ .

Положим для Румынского метеороида  $r_s = 0.5 \dots 10$  м,  $v = 35 \dots 7$  км/с,  $\mu_e = 0.003 \dots 0.03$  м<sup>2</sup>В<sup>-1</sup>с<sup>-1</sup> [26] в диапазоне высот 48...41 км соответственно. Тогда из выражений (7)—(10) для этого же диапазона высот получим, что  $E_s \approx 11.7 \dots 0.2$  МВ/м,  $\varphi = 5.8 \dots 2.3$  МВ,  $q = 0.65 \dots 0.26$  мК и  $E = 3.8 \dots 0.6$  кДж. Добавим, что пробой идеально чистого воздуха у

поверхности Земли наступает при  $E_s = 3$  МВ/м, а «грязного» воздуха — при  $E_s \sim 1$  МВ/м. Таким образом, при пролете Румынского метеороида вполне мог возникнуть слабый молниевый разряд, энергия которого сравнительно невелика ( $\sim 1$  кДж).

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Механизмы возникновения электромагнитных эффектов при падении крупных космических тел как в теоретическом, так и особенно в экспериментальном планах, изучены недостаточно [9, 20, 21, 36, 40, 49]. Ниже рассмотрим возможные механизмы генерации электромагнитных процессов, вызванных движением метеороидов.

**Импульс электрического поля.** Резкое изменение магнитного поля в следе сопровождается генерацией импульса электрического поля. Из уравнения Максвелла

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

заменяя производные оценкой, имеем оценку напряженности электрического поля:

$$E = \frac{\lambda B(0)}{2\pi\tau}.$$

Полагая  $B(0) = 8 \dots 24$  мТл,  $\tau_1 \approx 0.3 \dots 30$  мс,  $\lambda \approx 2L \approx 19$  км (длина электромагнитной волны), получим  $E = 80 \dots 2.4$  кВ/м.

**Электромагнитное излучение следа.** При протекании в следе метеороида тока силой  $I$  возникает импульс электромагнитного поля с амплитудой напряженности электрического поля, которая в предположении, что излучатель является элементарной антенной типа диполя Герца, дается следующим соотношением [14, 37]:

$$E = \frac{\mu_0 I l f}{2R},$$

где  $l$  — длина излучателя,  $f$  — частота электромагнитного поля. Мощность излучения [14, 37]

$$P = \frac{\pi}{3} Z_0 I^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2, \quad (11)$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $Z_0 = 120\pi$  Ом — сопротивление свободного пространства. Из соотношения (11) видно, что при  $(l/\lambda)^2 \ll 1$  мощность излучения невелика. Проводник с током длиной  $l$  эффективно излучает при  $l = \lambda/2$ . По-

лагая, что  $l_{\min} = L_e \approx 3.9$  км, а  $l_{\max} = L \approx 9.6$  км, получим, что  $\lambda \approx 7.8...19.2$  км и  $f \approx 38.5...15.6$  кГц.

Если  $I = 1...10$  кА и  $l = \lambda/2$ , мощность излучения  $P \approx 1...10$  МВт. При этом в излучение преобразуется доля мощности  $P_c(z_e) \approx 10$  ТВт [41].

$$\eta_l = \frac{P}{P_c(z_e)} \approx 10^{-5}...10^{-4} \text{ \%}.$$

**Электромагнитный эффект инфразвука.** Хорошо известно, что воздействие на геосферы целого ряда высокоэнергичных источников приводит к генерации синхронных возмущений акустического и геоэлектрического (атмосферного) полей. К таким источникам относятся: движение атмосферного фронта и солнечного терминатора, солнечные затмения, микробаромы и др. [15—17, 27, 28, [http://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/ru/abstr\\_7796.pdf](http://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/ru/abstr_7796.pdf)]. Важно, что при этом наблюдается приблизительная пропорциональность амплитуды возмущений атмосферного электрического поля  $E_a$  и амплитуды давления  $\Delta p$ . Механизм генерации возмущений электрического поля связан, скорее всего, с вариациями плотности объёмного заряда  $\Delta\rho_{el}$  в приземной атмосфере (высоты 10...100 м) при периодических изменениях давления воздуха в поле инфразвуковой или ударной волн. Оценим величину  $E_a$ .

Из уравнения Максвелла

$$\operatorname{div}\mathbf{E} = \frac{\Delta\rho_{el}}{\varepsilon_0}$$

имеем следующее соотношение для оценки амплитуды:

$$\frac{E_a}{L_z} \approx \frac{\Delta\rho_{el}}{\varepsilon_0}, \quad (12)$$

где  $L_z = \min\{L_r, k_a^{-1}, H_E\}$ . Здесь  $L_r \approx 10...100$  м — толщина приземного слоя атмосферы с объёмным электрическим зарядом  $\Delta\rho_{el0}$ ,  $k_a$  — волновое число инфразвука,  $H_E \approx 2.5...4$  км — характерный высотный масштаб изменения  $E$ . При периоде инфразвука  $T > 0.2...2$  с имеем  $L_z \approx L_r \approx 10...100$  м. В силу того, что заряженная составляющая в приземной атмосфере является малой примесью, изменение  $\Delta\rho_{el}$  составляет

$$\Delta\rho_{el} \approx \rho_{el0} \frac{\Delta N_n}{N_{n0}} \approx \rho_{el0} \frac{\Delta p}{p}. \quad (13)$$

Тогда из (12) и (13) следует, что

$$E_a \approx \frac{\rho_{el0} L_r}{\varepsilon_0} \frac{\Delta p}{p}, \quad (14)$$

т. е. амплитуда  $E_a$  действительно пропорциональна избыточному давлению  $\Delta p$ .

При  $\rho_{el0} \approx 5 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>,  $L_r \approx 10$  м для Румынского метеороида  $\Delta p \approx 10...20$  Па и  $E_a \approx 0.56...1.13$  В/м. Невозмущенное электрическое поле (поле ясной погоды) у поверхности Земли обычно близко к 100 В/м. Учитывая, что чувствительность электрометров составляет 0.01 В/м, регистрация возмущений приземного электрического поля, вызванного акустической волной от Румынского метеороида, не представляла труда.

Распространение инфразвука вдоль поверхности Земли сопровождалось бегущей волной возмущения электрического поля с частотой инфразвука  $\omega$  и амплитудой  $E_a$  (см. выражение (14)). Периодические вариации  $\Delta p$  в поле инфразвука вызвали периодические изменения  $E$ . При этом следовало ожидать периодических вариаций магнитного поля. Оценим амплитуду индукции магнитного поля  $B_a = \mu_0 H_a$ . Из уравнения Максвелла

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

для амплитуды  $B_a$  имеем следующее соотношение:

$$B_a = \frac{\varepsilon_0 \mu_0 \omega}{k} E_a = \frac{\omega E_a}{kc^2} = \frac{E_a}{c}, \quad (15)$$

где  $k = \omega/c$  — волновое число электромагнитного поля. При записи (15) учтено, что  $|\operatorname{rot}\mathbf{B}| \approx kB_a$ ,  $|\partial \mathbf{E}/\partial t| \approx \omega E_a$ . Если  $E_a = 0.6...1.1$  В/м, то  $B_a \approx 1.8...3.7$  нТл. Такой эффект легко регистрируется. Сравним обсуждаемый эффект с эффектом Челябинского метеороида.

Для Челябинского метеороида при  $E_a \approx 56...113$  В/м получим, что вблизи эпицентра  $B_a \approx 187...377$  нТл. В то же время в магнитной обсерватории АРТИ, удаленной от эпицентра на 220 км, где, по расчетам,  $\Delta p \approx 100...200$  Па,  $E_a \approx 6...11$  В/м и  $B_a \approx 19...38$  нТл, возмущения магнитного поля отсутствовали, что, возможно, связано с наличием «мертвой зоны» для приема инфразвука на таких расстояниях. В то же время на расстоянии от эпицентра в 1500 км  $\Delta p \approx 0.5...1$  Па, а  $E_a \approx 28...56$  мВ/м и  $B_a = 93...187$  пТл. Возмущения электрического и магнитного полей —

малы, но в принципе могли быть зарегистрированы в ряде российских обсерваторий.

**Генерация ионного и магнитного звука инфразвуком.** Как отмечалось в первой части нашей работы [41], амплитуда инфразвука на высотах более 100 км оставалась достаточно большой, чтобы создать предпосылки для преобразования энергии инфразвука в энергию ионно-звуковой волны. Такое преобразование становится возможным благодаря тому, что в диапазоне высот 60...130 км электроны в отличие от ионов являются замагниченными. Возникает как бы раздельное движение электронов и ионов, что и способствует генерации ионного звука с частотой инфразвука. Для Румынского метеороида эта частота порядка 0.1...1 Гц.

В диапазоне высот 130...150 км газокINETическое давление становится соизмеримым с магнитным давлением ( $\sim 10^{-3}$  Па). При этом инфразвуковая волна может трансформироваться в магнитозвуковую волну. Последняя может достигать магнитосферы и тем самым обеспечивать взаимодействие подсистем в системе Земля (внутренние оболочки) — атмосфера — ионосфера — магнитосфера.

С другой стороны, часть энергии магнитозвуковой волны может каналироваться в F-области ионосферы и распространяться вдоль этой области со скоростью 20...40 км/с. Пройдя значительные расстояния, магнитозвуковая волна на высотах 130...150 км может обратно трансформироваться в инфразвук.

**Генерация неустойчивостей.** Выше 100 км инфразвуковая волна становится нелинейной, поскольку здесь  $\Delta p/p > 0.2...0.3$ . При этом её профиль становится пилообразным. На крутом фронте может генерироваться градиентно-дрейфовая неустойчивость ионного звука с той же частотой (период 1...10 с). При наличии ионосферного электрического поля с напряженностью 0.1...1 мВ/м в направлении, перпендикулярном к направлению ионно-звуковой волны, может генерироваться короткопериодная (с периодом  $T \ll 1...10$  с) ионно-звуковая волна. Причиной этой генерации служит дрейфово-диссипативная неустойчивость. По оценкам ее частота может составлять 10...100 МГц.

Разумеется, рассмотренные выше электрические, магнитные и электромагнитные эффекты не могут претендовать на законченность теории электромагнитных явлений, генерируемых метеороидами. В будущем предстоит еще развить соответствующую теорию и проранжировать основные эффекты. Заметим, что все электромагнитные эффекты тесно связаны с плазменными процессами.

### ЭФФЕКТ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Движение метеороида в атмосфере приводит к генерации волн плотности в широком диапазоне частот: от акустических частот порядка 1 кГц до частот, соответствующих внутренним гравитационным волнам, 1...3 мГц. По данным [13] при падении космического тела в энергию акустических ( $E_{ac}$ ) и внутренних гравитационных ( $E_g$ ) волн преобразуется около 1 и 0.2 % кинетической энергии метеороида. При  $E_k \approx 1.66$  ТДж имеем  $E_{ac} \approx 17$  МДж,  $E_g \approx 3.3$  ГДж. Скорее всего, оценки коэффициентов преобразования [13] справедливы лишь для мелких космических тел.

**Генерация акустических волн.** При взрыве Румынского космического тела в энергию ударной волны трансформировалось около 10 % его начальной кинетической энергии [42]. Тогда  $E_{ac} \approx 170$  МДж. При этом коэффициент преобразования (акустическая эффективность) на порядок превосходит оценку коэффициента в работе [13]. Очевидно, акустическая эффективность является функцией кинетической энергии космического тела.

На достаточно больших удалениях от места взрыва энергия взрывной ударной волны трансформируется в энергию акустических волн (см., например, [1]). При эффективной длительности взрывной ударной волны в месте ее генерации  $\tau_a \approx 11$  с (см. работу [42]) энергии  $E_{ac}$  соответствует средняя мощность около 150 ГВт.

Период акустических волн  $T_{a0}$  с наибольшей амплитудой связан с энергией источника  $E_e$  следующим соотношением [19, 59]:

$$E_e = 2 \left( \frac{T_a}{T_{a0}} \right)^{3.34}, \quad T_{a0} \approx 5.92 \text{ с}, \quad (16)$$

где  $E_e$  выражается в кт, а  $T_a$  — в с. Полагая  $E_e \approx 0.8 E_{k0} \approx 1.3 \text{ ТДж} \approx 0.316 \text{ кт ТНТ}$ , из (16) получим, что  $T_a \approx 3.4 \text{ с}$ . Примерно такой же период наблюдался в исследовании [42].

Формула (16) справедлива для приземных взрывов. При взрыве на высоте  $z_e$  соотношение (16) попытаемся заменить следующим [37]:

$$E_e \frac{p(0)}{p(z_e)} = 2 \left( \frac{T_a}{T_{a0}} \right)^{3.34}, \quad (17)$$

где  $p(0) \approx 10^5 \text{ Па}$ ,  $p(z_e) \approx 160 \text{ Па}$ . Тогда из (17) получаем, что  $T_a \approx 23.3 \text{ с}$ . На румынской инфразвуковой станции IPLOR наблюдались периоды 7...10 с [61].

Дальше других (вплоть до глобальных) расстояний распространяются волны с максимальным периодом [35]:

$$T_{\max} \approx 4.3 T_a \approx 100 \text{ с} \approx 1.7 \text{ мин.}$$

В энергию волн с периодом  $T_a \approx T_{\max}$  переходит около 10 % энергии взрыва.

**Генерация внутренних гравитационных волн (ВГВ).** Эти волны могут генерироваться как прямым, так и косвенным способом. В первом случае их источником служит движение космического тела и связанные с этим ударные волны (цилиндрическая и взрывная). Размер возмущенной ударными волнами области атмосферы относительно невелик (см. выше), и эффективность генерации ВГВ при этом сравнительно низкая. Оценки по формулам из работы [13] дают  $E_g \approx 3.3 \text{ ТДж}$ , а  $\eta_g = E_g/E_{k0} \approx 0.2 \%$ .

Во втором случае механизм генерации может быть следующим. Относительное избыточное давление во фронте ударной волны с увеличением высоты увеличивается (см. табл. 4 в работе [41]). При  $\Delta p/p > 0.3$  спектр ударно-волнового сигнала (инфразвука) обогащается более высокими гармониками, которые сильнее поглощаются, чем основная гармоника, возникает диссипация энергии акустической волны и нагрев атмосферы. Нагретая область атмосферы служит источником вторичных ВГВ. Оценим ее параметры.

Из геометрических соображений следует, что нагретая инфразвуком область атмосферы из

высоты взрыва метеороида видна под углом  $2\Delta\beta$ , где  $\Delta\beta$  дается соотношением

$$\cos \Delta\beta = 1 - \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_e}.$$

Здесь  $z_1$  и  $z_2$  — высоты начала и окончания нагрева. При  $z_1 \approx 100 \text{ км}$  и  $z_2 \approx 200 \text{ км}$  имеем  $\Delta\beta \approx 68^\circ \approx 1.2 \text{ рад}$ . Горизонтальный радиус нагретой области изменяется от  $R_1 = (z_1 - z_e) \text{ tg} \Delta\beta \approx 150 \text{ км}$  до  $R_2 = (z_2 - z_e) \text{ tg} \Delta\beta \approx 400 \text{ км}$ . При этом длина ВГВ  $\lambda$  изменяется от  $2R_1$  до  $2R_2$ , т. е. в пределах 300...800 км. При средней скорости звука  $v_s \approx 400...500 \text{ м/с}$  на высотах 100...200 км имеем для периода ВГВ  $T \approx 12.5...27 \text{ мин}$  соответственно.

Энергию ВГВ можно оценить из следующего соображения:

$$E_g = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 E_{k0},$$

где  $\eta_1 \approx 0.1$  — доля энергии  $E_{k0}$ , преобразуемой в энергию инфразвука,  $\eta_2 = \Delta\Omega/4\pi \approx 0.31$  — доля энергии в телесном угле

$$\Delta\Omega = 2\pi \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_e} \approx 1.25\pi,$$

$\eta_3$  — доля энергии инфразвука, поглощаемой слоем атмосферы толщиной  $z_2 - z_1$ ,  $\eta_4$  — доля поглощенной энергии инфразвука, преобразуемая в энергию ВГВ. Полагая  $\eta_2 \approx 0.3$ ,  $\eta_3 \approx 0.5$ ,  $\eta_4 \approx 1$ , получим, что  $\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \approx 0.015$ , а  $E_g \approx 25 \text{ ГДж}$ .

Далее оценим тепловую энергию  $E_T$  в нагретом объеме:

$$E_T = \int_V C \rho_0 T_0 dV,$$

где  $T_0 \approx 210 \text{ К}$  — невозмущенная температура атмосферы на высоте  $z_1 \approx 100 \text{ км}$ ,  $\rho_0 \approx 10^{-6} \text{ кг/м}^3$  — плотность атмосферы на высоте  $z_1$ ,  $C \approx 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  — удельная теплоемкость. Оценка  $E_T$  имеет вид

$$E_T \approx C \rho_0 (z_1) T_0 (z_1) \pi R_1^2 H.$$

При  $R_1 \approx 150 \text{ км}$ ,  $H \approx 7 \text{ км}$  имеем  $E_T = 100 \text{ ТДж}$ . Тогда относительное возмущение температуры равно

$$\frac{\Delta T}{T_0} \approx \frac{E_g}{E_T} \approx 2.5 \cdot 10^{-4}.$$

На высотах 120 и 150 км значение  $\Delta T/T_0$  порядка 0.25 и 2.5 % соответственно. При этом относительное давление в ВГВ такого же порядка. Учитывая, что ВГВ каналируется в волноводе на высотах 100...200 км, относительная амплитуда

ВГВ остается достаточно большой (0.1...1 %) на расстояниях около 1000 км.

**Возможность электрофонного эффекта.** Как известно, под электрофонным эффектом понимается слышимость человеком звука во время пролета крупных космических тел еще до того, как акустическое возмущение, генерируемое движением тела, успевает достичь наблюдателя [25]. Надежная теория этого явления до настоящего времени не разработана, хотя многократно предпринимались попытки ее создания [43, 44, 50—56, 58].

Есть три вероятных механизма, способных качественно объяснить электрофонный эффект [20, 21, 25].

1. Космическое тело при падении приобретает электрический заряд, под действием которого с поверхности земли возникает стекание заряда противоположного знака. Последнее сопровождается акустическим эффектом. По оценкам стекание заряда начинается при напряженности электрического поля порядка единиц кВ/м. В случае Румынского метеороида напряженность достигала 0.1...10 МВ/м (см. выше), однако большая высота взрыва вряд ли допускает реализацию этого механизма.

2. Электромагнитные волны звукового диапазона за счет пьезоэлектрического эффекта в предметах, окружающих наблюдателя, или в самом человеке преобразуются в звук. По оценкам, при  $f \sim 1...10$  кГц напряженность электрического поля должна быть не менее сотен В/м. Такие поля возникают на поверхности земли при силе тока в следе  $I \geq 50$  кА, который вряд ли возникал при пролете Румынского космического тела.

3. Распад диссипативных градиентно-дрейфовых ионно-циклотронных нелинейных волн в результате потери устойчивости, сопровождаемый генерацией электромагнитного шума в диапазоне частот 10...1000 Гц. Высокочастотная часть шума после преобразования в акустический шум могла регистрироваться как электрофонный эффект [21]. Данный механизм, скорее всего, реализовывался при пролете Челябинского метеороида. Не ясно, однако, какова роль этого механизма при падении Румынского космического тела.

Таким образом, при падении Румынского метеороида ни один из механизмов не мог иметь место. Автору неизвестно, отмечался ли кем-либо из свидетелей события электрофонный эффект.

## ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Воздействие на ионосферу может осуществляться по нескольким каналам. Во-первых, через поток нагретого вещества вдоль плазменного плюма. Во-вторых, посредством ударной волны. В-третьих, влияние на ионосферу оказывает электромагнитное излучение, генерируемое следом (см. выше). В четвертых, за счет механизма, описанного в работе [21].

**Эффект ионизированного следа.** Эффекты плазменного плюма в ионосфере при падении Румынского тела были, скорее всего, невелики из-за относительной малости энергии взрыва. Если плазменный плюм все же возникал, то плазменный след простирался по высоте не более чем на 7...8 км.

Результаты расчета начальной линейной  $\alpha_i(0)$  и объемной концентрации электронов  $N(0)$  по следующим соотношениям, приведенным, например, в работах [7, 37, 41]:

$$\alpha_i(0) = \frac{\beta_i}{M_m} \frac{C_h}{2Q} \rho v^2 S, \quad N(0) = \frac{\beta_i}{M_m} \frac{C_h}{2Q} \rho v^2,$$

изложены в табл. 2. В этой таблице также перечислены времена становления концентрации электронов за счет амбиполярной диффузии  $t_D$ , прилипания электронов к молекулам кислорода (на высотах  $z \leq 100$  км) и рекомбинации с метеорными ионами:

$$t_D = \frac{d^2}{D}, \quad t_{N_{10}} = (k_{a_0} N_0^2 [O_2])^{-1}, \\ t_{N_{20}} = (\alpha_{r_0} N(0))^{-1}, \quad \alpha_{r_0} \approx 10^{-18} \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $D$  — коэффициент амбиполярной диффузии. Для простоты считалось, что  $T \approx T_0$  и  $\rho \approx \rho_0$ . Из табл. 2 видно, что на высотах  $z > 100$  км ионизационный след релаксирует в основном за счет амбиполярной диффузии. Перенос заряженных частиц происходит в основном вдоль магнитных силовых линий. Процесс прилипания не существенный на всех высотах. В диапа-

зоне высот 40...90 км  $N$  релаксирует в основном за счет рекомбинации.

Рассмотрим несколько подробнее влияние ударной волны и электромагнитного излучения.

**Ионосферный эффект ударной волны.** Ударная волна приводит к движущемуся фронту повышенной концентрации электронов  $N$ . Относительное возмущение последней  $\delta_N$  можно оценить по относительному возмущению давления  $\delta_p = \Delta p/p_0$ . При грубой оценке  $\delta_N \approx \delta_p$ . Результаты расчета  $\delta_p$  на ионосферных высотах приведены в табл. 4 в работе [41]. Над эпицентром взрыва следовало ожидать значений  $\delta_N \approx 0.1...1$ .

Движение ударной волны является источником перемещающихся ионосферных возмущений в диапазоне акустико-гравитационных волн (см. выше).

**Эффект электромагнитного импульса.** Генерация электромагнитного импульса ионизированным следом достаточной интенсивности может приводить к возмущению ионосферы и пробоя атмосферы. При  $(2\pi f)^2 \ll \nu_e^2$  напряженность электрического поля пробоя дается следующим соотношением [6]:

$$E_{cr}(z) = E_{cr}(0) \exp(-z/H),$$

где  $E_{cr}(0) = 3$  МВ/м. Время пробоя при  $E \approx E_{cr}$  дается таким выражением [6]:

$$\tau_{cr} = \tau_{cr}(0) \exp(z/H).$$

Здесь  $\tau_{cr}(0) = 0.02$  мкс.

Результаты расчета  $E_{cr}$  и  $\tau_{cr}$  приведены в табл. 3. Для пробоя атмосферы на высотах 95...105 км (выше

поле импульса не проникает из-за отражения на границе ионосферы) требуется  $E_{cr} \approx 5...1$  В/м соответственно. Поле такой напряженности могло возникнуть на этих высотах, если в месте генерации электромагнитного импульса  $E \approx 17...260$  кВ/м. Тогда при размере источника  $d \approx 10$  м и расстоянии  $R \approx 20...60$  км от места генерации напряженность переменного электрического поля составила бы 3...130 В/м.

Поскольку длительность электромагнитного импульса  $\tau_i \approx 0.29...29$  мс может быть сравнима с  $\tau_{cr}$ , пробой атмосферы успевает развиваться.

Кроме пробоя атмосферы, электрическое поле по-иному возмущает среду. В нижней части ионосферы ( $z \approx 80...100$  км) происходит нагревание электронов, изменение коэффициента прилипания  $\beta_a(T_e)$  и уменьшение коэффициента рекомбинации  $\alpha_r(T_e)$  электронов с ионами  $\text{NO}^+$  и  $\text{O}_2^+$  [18, 39]. Время становления процесса рекомбинации значительно превышает длительность электромагнитного импульса и поэтому нарушения ионизационно-рекомбинационного процесса заметной роли не играет.

Нагрев электронов становится существенным при  $E \geq E_p$ , где в гиротропной ионосфере при квазипродольном распространении радиоволны

$$E_p^2 = \frac{3kT_{e0}m\delta_{en}(\omega_B^2 + \nu_{en}^2)}{e^2}.$$

Здесь  $E_p$  — плазменное поле [18, 39],  $T_{e0}$  — температура электронов в невозмущенной плазме,  $\omega_B \approx 8.5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  — гирочастота электронов, точнее ее «продольная» составляющая.

Таблица 2. Параметры атмосферы и метеорной ионизации на высотах ионосферы

$z$ , км	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_0$ , К	$N_0[\text{O}_2]$ , м <sup>-3</sup>	$D$ , м <sup>2</sup> с <sup>-1</sup>	$\alpha_i(0)$ , м <sup>-1</sup>	$N(0)$ , м <sup>-3</sup>	$k_{a0r}$ , 10 <sup>-42</sup> м <sup>6</sup> с <sup>-1</sup>	$t_D$ , с	$t_{N1}$ , с	$t_{N2}$ , с
50	$1.7 \cdot 10^{-3}$	300	$7.2 \cdot 10^{21}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$10^{21}$	$10^{21}$	1.9	45	0.01	$10^{-3}$
60	$4.4 \cdot 10^{-4}$	260	$1.5 \cdot 10^{21}$	0.1	$2.6 \cdot 10^{20}$	$2.6 \cdot 10^{20}$	1	10	0.44	$3.8 \cdot 10^{-3}$
70	$1.1 \cdot 10^{-4}$	220	$4.2 \cdot 10^{20}$	0.3	$6.5 \cdot 10^{19}$	$6.5 \cdot 10^{19}$	0.9	3.3	6.3	0.015
80	$3 \cdot 10^{-5}$	180	$6.2 \cdot 10^{19}$	1	$1.8 \cdot 10^{19}$	$1.8 \cdot 10^{19}$	0.5	1	520	0.056
90	$8 \cdot 10^{-6}$	190	$8.2 \cdot 10^{18}$	3.5	$4.7 \cdot 10^{18}$	$4.7 \cdot 10^{18}$	0.6	0.29	$2.5 \cdot 10^4$	0.21
100	$2.1 \cdot 10^{-6}$	210	$1.9 \cdot 10^{18}$	12	$1.2 \cdot 10^{18}$	$1.2 \cdot 10^{18}$	—	$8.3 \cdot 10^{-2}$	—	0.83
120	$2.1 \cdot 10^{-7}$	360	$1.2 \cdot 10^{17}$	30	$1.2 \cdot 10^{17}$	$1.2 \cdot 10^{17}$	—	$3.3 \cdot 10^{-2}$	—	8.3
150	$2.1 \cdot 10^{-8}$	650	$7.0 \cdot 10^{15}$	76	$1.2 \cdot 10^{16}$	$1.2 \cdot 10^{16}$	—	$1.3 \cdot 10^{-2}$	—	83
200	$2.1 \cdot 10^{-9}$	850	$5.6 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^3$	$1.2 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	—	$5.9 \cdot 10^{-4}$	—	830
300	$2.1 \cdot 10^{-10}$	930	$10^{13}$	$1.6 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{14}$	—	$6.3 \cdot 10^{-5}$	—	8300

Нагрев электронов описывается следующей системой уравнений [39]:

$$\frac{d\theta}{dt} + \delta_{en}(\theta)v_{en}(\theta)(\theta-1) = \frac{E^2}{E_p^2} A(\theta)\delta_0 v_{en}(\theta), \quad (18)$$

$$\frac{dE}{dz} + \frac{\omega}{c} \kappa(\theta, z)E = 0, \quad (19)$$

$$\delta_{en}(\theta) = \delta_{en0}[\theta^{-4/3} + 0.014\theta + 2^{(\theta-45)/5}],$$

$$\delta_{en}(\theta) = \delta_{en0}\theta^{5/6},$$

$$A(\theta) = \frac{\omega_B^2 + v_{en0}^2}{\omega_B^2 + v_{en}^2(\theta)},$$

где  $\theta = T_e/T_{e0}$ ,  $\omega_B = 2\pi f$  — круговая частота радиоизлучения,  $\kappa$  — показатель поглощения радиоизлучения. Результаты численного решения системы (18), (19) при  $E(z_e) = 11...33$  кВ/м приведены в табл. 3. Видно, что вблизи нижней границы ночной ионосферы значения  $\theta$  составляют 17...42. При  $z > 95$  км величина нагрева быстро уменьшается из-за эффекта самопомутнения плазмы [18, 39] (см. табл. 3).

Значительный нагрев электронов на границе ионосферы приводит к увеличению  $v_{en}(T_e) \approx v_{en}(T_{e0})(T_e/T_{e0})^{5/6}$  [18, 39], а значит к увеличению показателя преломления плазмы с горизонтальным размером в сотни километров. Такое образование может служить фокусирующей линзой для радиоизлучения в широком диапазоне частот.

**Генерация альвеновского импульса и МГД-волн.** Резкое изменение проводимости плазмы на границе ионосферы в результате возмущения  $v_{en}$  и  $N$  приводит к генерации альвеновского импульса [23]. По оценкам при пролете Румынского тела амплитуда импульса была порядка 0.1...1 мВ/м.

Таблица 3. Параметры, описывающие пробой атмосферы

z, км	$v_{en0}$ , $10^6$ с <sup>-1</sup>	$E_{cr}$ , В/м	$\tau_{cr}$ , мс	$t_{Te}$ , мс	$T_e/T_{e0}$
80	2	30	2	0.07...0.11	17...24
85	1.1	17	1.2	0.08...0.12	20...29
90	0.63	9	7	0.09...0.14	25...42
95	0.35	5	12	0.38...0.68	11...16
100	0.20	3	20	1.7	1.1...1.2
105	0.11	1	34	3	1

Как известно, альвеновская волна распространяется вдоль магнитной силовой линии, достигая магнитосферы и магнитно-сопряженной области.

Нестационарный плазменный след метеороида, взаимодействуя с геомагнитным полем, также является источником магнитогидродинамических волн, которые могут распространяться в ионосфере и магнитосфере. В результате взаимодействия этих волн с высокоэнергичными электронами радиационного пояса Земли могут возникнуть высыпания электронов в атмосферу и ее дополнительная ионизация [29—32, 35, 39, 48, 62].

Так могли возникнуть каналы воздействия Румынского метеороида на магнитосферу.

**Возможность фотоионизации.** В работах [20, 21] оценивается возможность фотоионизации молекул NO при пролете Челябинского метеороида. Дело в том, что эти молекулы имеют низкий потенциал ионизации, а их концентрация в E-области ионосферы может достигать  $(1...3) \cdot 10^{14}$  м<sup>-3</sup>. По оценкам [20, 21] на высоте 105 км мог возникнуть ионизированный след с концентрацией  $\Delta N$  до  $2 \cdot 10^{10}$  м<sup>-3</sup> длиной около 100 км. Для сравнения укажем, что в ночное время фоновое значение  $N_0 \approx (0.3...1) \cdot 10^{10}$  м<sup>-3</sup>. Тогда  $\Delta N/N_0 \approx 6.7...2$ . Учитывая, что энергия Румынского метеороида была на три порядка меньше энергии челябинского космического тела, величина дополнительной ионизации вряд ли превосходила  $10^7$  м<sup>-3</sup>. В этом случае  $\Delta N/N_0 \approx 0.03...0.1$  % и эффект фотоионизации практического значения не имел, а значит и не генерировались связанные с ним неустойчивости [20, 21].

### СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

У поверхности Земли плотность акустической энергии и плотность ее потока равны:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{\Delta p^2}{\rho_0 v_s^2}, \quad \Pi_{ac} = \varepsilon_{ac} v_s = \frac{\Delta p^2}{\rho_0 v_s}.$$

Полагая  $\Delta p = 20...30$  Па и  $\rho_0 = 1.3$  кг/м<sup>3</sup>, получим  $\Pi_{ac} \approx 1...2.3$  Дж/(м<sup>2</sup> · с). При площади воздействия ударной волны  $S_a \approx 1000$  км<sup>2</sup> и длительности воздействия  $\Delta t_a \approx 100$  с имеем оценку энергии ударной волны у поверхности Земли, вызывающей землетрясения,  $E_{ac} \approx 0.1...0.23$  ТДж. В энер-

гию сейсмических волн  $E_{sw}$  переходит около  $10^{-5}$  энергии ударной волны от приземного взрыва [19]. При этом  $E_{sw} \approx 1...2.3$  МДж. Такому значению  $E_{sw}$  соответствует магнитуда землетрясения  $M$ , даваемая следующим соотношением [19]:

$$\lg E_{sw} = 4.8 + 1.5M.$$

Отсюда  $M \approx 0.8...1$ . Землетрясение с такой магнитудой практически не ощущаются человеком. Добавим, что сейсмические измерения, выполненные на украинских сейсмических станциях, дали  $M \approx 1$ .

#### ЧАСТОТА ПАДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Частота падения космических тел или интервал времени между падениями  $\Delta T$  зависит от его энергии. При этом число падающих тел в течение 1 года дается известным соотношением [19, 46]:

$$\lg N_s = 0.5677 - 0.9 \lg E_k,$$

где  $E_k$  измеряется в кт. При  $E_k \approx 0.4$  кт имеем  $N_s \approx 8.4 \text{ лет}^{-1}$ . Тогда  $\Delta T = N_s^{-1} \approx 43$  сут.

Следовательно, тела, подобные Румынскому метеороиду, падают на Землю примерно каждые 43 дня. К сожалению, большинство из них не документируется, а значит и не анализируется.

Заметим, что по данным работы [22] оценка частоты падений тел с массой около 2.6 т будет примерно  $0.5 \text{ сут}^{-1}$ . Последняя оценка, однако, представляется сильно завышенной.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Падение Румынского метеорита привело к ряду ощутимых или сильных эффектов во всех геологических оболочках. Это событие целесообразно сравнить с падением Челябинского тела [2 — 4, 24, 36 — 38, 59, 60].

Пролет и взрыв Челябинского метеороида вызвал целый комплекс физических (и не только физических) процессов в околоземной среде. Высота основного энерговыделения примерно равнялась 23 км.

Размер (около 18 м) и начальная кинетическая энергия (около 0.44 Мт ТНТ) Челябинского метеороида была достаточно велика, чтобы тело отнести к малым астероидам, вызывающим явление суперболида.

Эффекты Челябинского метеороида существенно отличались от эффектов, вызванных взрывом Румынского тела. Основных причин две. Первая из них — начальная кинетическая энергия челябинского тела была на три порядка больше, чем румынского. Вторая причина заключается в том, что высота взрыва челябинского тела равнялась приблизительно 23 км. Поэтому зона частичных разрушений при падении челябинского тела составляла около  $6000 \text{ км}^2$  [4, 37, 49, 60]. Достаточно большая высота взрыва Челябинского метеороида привела к относительно незначительным разрушениям элементов жилых построек (окон, оконных рам, дверей, крыш и т. п.). Этим же объясняется и относительная легкость ранений жителей пострадавшего региона.

В случае Румынского метеороида разрушения отсутствовали, так как они возникают при избыточном давлении более 1 кПа. Для Румынского космического тела избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра не превышало 20...30 Па.

Обсудим магнитный эффект космических тел. Магнитный эффект тунгусского тела составил огромную величину — около 50...70 нТл [19], что объясняется движением плюма, для которого площадь сечения была более чем  $10^6 \text{ м}^2$ , а сила тока в следе  $I \approx 30$  кА. При этом  $\Delta B \approx 60$  нТл. Эта оценка хорошо соответствует результатам наблюдений [10, 19]. В то же время для челябинского тела  $\Delta B \approx 1$  нТл. Примерно такая же величина  $\Delta B$ , обусловленная модуляцией токовой струи ВГВ, могла быть и для Румынского метеороида.

Важно, что возмущения, вызванные взрывами и челябинского, и румынского тел распространялись как по вертикали на сотни километров вверх, так и по горизонтали на расстояние не менее тысячи километров. Регистрируемые возмущения возникли не только в атмосфере, но и в ионосфере, а также в геомагнитном поле. Результаты наблюдения эффектов в этих средах еще предстоит детально проанализировать. Уже сейчас можно утверждать, что при падении достаточно крупных ( $d \approx 1...10$  м) космических тел сама природа предоставляет редкую возможность изучения целого комплекса явлений на поверхности Земли, в атмосфере и геокосмосе

астрономам, физикам, геофизикам, минералогам, химикам, сейсмологам и другим специалистам. Изучение этого комплекса явлений требует системного подхода к объекту Земля (внутренние оболочки) — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [29 — 31, 35, 37, 38, 48, 62].

## ВЫВОДЫ

Проведен комплексный анализ основных процессов в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, сопровождавших падение космических тел, подобных Румынскому метеороиду, и установлено следующее.

1. Пролет и взрыв метеороида размером 1 м и более вызывает во всех геооболочках заметные (или сильные) возмущения.

2. Пролет упомянутых тел сопровождается плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными и акустическими эффектами. Возмущение геомагнитного поля на поверхности Земли вблизи взрыва метеороида может достигать 0.5...1 нТл.

3. Заметные возмущения от взрыва и вторичных процессов распространяются по горизонтали на расстояние не менее тысячи километров. По оценкам период ВГВ составляет несколько десятков минут, а относительная амплитуда — единицы процентов.

4. Относительные возмущения концентрации электронов над эпицентром взрыва достигают десятков — сотен процентов.

5. Магнитуда землетрясения, вызванного взрывом Румынского тела, не превышала 1.

6. Космические тела, подобные Румынскому метеороиду, падают на Землю в среднем с частотой один раз в 43 дня.

7. Для изучения всего комплекса явлений потребовался системный подход к объекту ЗАИМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Попова А. П., Рыбнов Ю. С., Кудрявцев В. Н., Мальцев А. Л., Харламов В. А. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2002 г. // Докл. Акад. наук. — 2004. — 397, № 5. — С. 685—688.
2. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П. и др. Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г. — М.: ФГБУ ИПГ, 2013. — 37 с.
3. Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль: Матер. Междунар. научно-практ. конф. одна конференция (Чебаркуль, 21 — 22 июня 2013 г.). — 168 с.
4. *Астрономический вестник*. — 2013. — 47, № 4. (Тем. вып.).
5. *Атмосфера*. Справочник. — Л.: Гидрометеиздат, 1991. — 510 с.
6. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. Искусственная ионизированная область в атмосфере. — М.: ИЗМИРАН, 1985. — 184 с.
7. Бронитэн В. А. Физика метеорных явлений. — М.: Наука, 1981. — 416 с.
8. Бронитэн В. А. Магнитогидродинамический механизм генерации радиоизлучения ярких болидов // *Астрон. вестник*. — 1983. — 17, № 2. — С. 94—98.
9. Бронитэн В. А. Электрические и электромагнитные явления, сопровождающие полет метеоров // *Астрон. вестник*. — 1991. — 25, № 2. — С. 131—144.
10. Бронитэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита // *Геомагнетизм и аэрномия*. — 2002. — 42, № 6. — С. 854—856.
11. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
12. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. — М.: Наука, 1967. — 684 с.
13. Голицын Г. С., Григорьев Г. И., Докучаев В. П. Излучение акустико-гравитационных волн при движении метеоров в атмосфере // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. — 1977. — 13, № 9. — С. 926—936.
14. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. — М.: Сов. радио, 1971. — 664 с.
15. Горбачев Л. П., Глушков А. И., Котов Ю. Б. и др. Генерация геомагнитных возмущений нестационарными источниками с высокой энергией. — М.: МИФИ, 2001. — 353 с.
16. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978. — 532 с.
17. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу. — М.: Наука, 2008. — 295 с.
18. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Физ.-мат. изд-во, 1973. — 272 с.
19. *Катастрофические воздействия космических тел* / Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. — 310 с.
20. Ковалева И. Х., Ковалев А. Г., Попель С. И., Попова О. П. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида // Триггерные эффекты в геосистемах: Матер. Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочеряна. — М.: ГЕОС, 2013. — С. 41—50.
21. Ковалева И. Х., Ковалев А. Г., Попова О. П. и др. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере

- Земли при падении метеороида // Динамические процессы в геосферах. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сб. науч. тр. ИДГ РАН. Спец. вып. — М.: ГЕОС, 2014. — С. 26—48.
22. Кручиненко В. Г. Математико-фізичний аналіз метеороидного явища. — Киев.: Наук. думка, 2012. — 294 с.
  23. Ляцкий В. Б. Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений. — Л.: Наука, 1978. — 199 с.
  24. Метеорит Челябинск — год на Земле : матер. Всероссийской науч. конф. / [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, 2014. — 694 с.
  25. Ольховатов А. Ю. Анализ механизмов генерации электрофонных звуков, сопровождающих болидные явления // Геомагнетизм и аэрномия. — 1993. — **33**, № 2. — С. 154—155.
  26. Райзер Ю. П. О дискуссии по поводу приобретения электрического потенциала метеоритным телом // Астрон. вестник. — 2003. — **37**, № 4. — С. 364—366.
  27. Соловьев С. П., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А. Синхронные возмущения акустического и электрического полей, вызванные источниками природного и техногенного происхождений // Триггерные эффекты в геосистемах. Матер. третьего Всероссийского семинара-совещания / Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г. Кочеряна. — М.: ГЕОС, 2015. — С. 317—326.
  28. Сурков В. В. Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях. — М.: МИФИ, 2000. — 448 с.
  29. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59—106.
  30. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. — 2006. — **4**, № 12. — С. 655—697.
  31. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. — 2007. — **5**, № 4. — С. 225—246.
  32. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
  33. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека // Физиол. журн. — 2010. — **56**, № 3. — С. 25—40.
  34. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. // Геомагнетизм и аэрномия. — 2011. — **51**, № 1. — С. 119—132.
  35. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. — 556 с.
  36. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида // Радиофизика и электроника. — 2013. — **4** (18), № 3. — С. 47—54.
  37. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск» // Инженерная физика. — 2013. — № 8. — С. 23—40.
  38. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита // Доп. Нац. академії наук України. — 2013. — № 10. — С. 97—104.
  39. Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. — Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. — 448 с.
  40. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле // Геомагнетизм и аэрномия. — 2014. — **54**, № 5. — С. 658—669.
  41. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1 // Космічна наука і технологія. — 2018. — **24**, № 1. — С. 49—70.
  42. Черногор Л. Ф., Ляшук А. И. Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г. // Кинематика и физика небес. тел. — 2018. — **33**, № 6. — С. 34—54.
  43. Beech M., Brown P., Jones J. VLF detection of fireballs // Earth Moon Planets. — 1995. — **68**. — P. 181—188.
  44. Beech M., Foschini L. A. A space charge model for electrophonic bursters // Astron. and Astrophys. — 1999. — **345**. — P. L27—L31.
  45. Borovička J., Spurný P., Grigore V. I., Svoreň J. The January 7, 2015, superbolide over Romania and structural diversity of meter-sized asteroids // Planet. and Space Sci. — 2017. — **143**. — P. 147—158.
  46. Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., et al. The flux of small near-Earth objects colliding with Earth // Nature. — 2002. — **420**. — P. 294—296.
  47. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes // Int. J. Remote Sens. — 2011. — **32**, N 11. — P. 3199—3218.
  48. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — atmosphere — geospace as an open nonlinear dynamical system // Radio Phys. and Radio Astron. — 2008. — **13**, N 2. — P. 120—137.
  49. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage // Probl. Atomic Sci. and Technology. — 2013. — **86**, N 4. — Pp. 136—139.
  50. Kaznev V. Y. Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis // Sol. Sys. Res. — 1994. — **28**. — P. 49—60.
  51. Keay C. S. L. Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs // Science. — 1980. — **210**. — P. 11—15.
  52. Keay C. S. L. Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs // J. Roy. Astron. Soc. Can. — 1980. — **74**. — P. 253—260.
  53. Keay C. S. L. Meteor fireball sounds identified // Asteroids, Comets, Meteors. — 1991, 1992. — P. 297—300.
  54. Keay C. S. L. Electrophonic sounds from large meteor fireballs // Meteoritics. — 1992. — **27**. — P. 144—148.

55. Keay C. S. L. Electrophonic Sounds Catalog // WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org. — 1994. — 6. — P. 151–172.
56. Keay C. S. L., Ceplecha Z. Rate of observation of electrophonic meteor fireballs // J. Geophys. Res. — 1994. — 99. — P. 13,163–13,165.
57. Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. Infrasound monitoring for atmospheric studies. — Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. — 734 p.
58. Popel S. I. Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body // Planet. Space Sci. — 1997. — 45. N 7. — P. 869–875.
59. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. — 2013. — 342. — P. 1069–1073.
60. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization // Science. — 2013. — 145 p.
61. Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., et al. Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteorite-producing fireball that exploded over Romania on January 7, 2015 // Proc. Romanian Acad. Ser. A. — 2016. — 17, N 2. — P. 133–136.
62. Zalyubovskiy I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties, processes and phenomena // Space Res. in Ukraine. 2006–2008. — Kyiv, 2008. — P. 19–29.
5. Atmosphere: A Handbook, 510 p. (Gidrometeoizdat, Leningrad, 1991) [in Russian].
6. Borisov N. D., Gurevich A. V., Milih G. M. Artificially Ionized Region in the Atmosphere, 184 p. (IZMIRAN, Moscow, 1985) [in Russian].
7. Bronshten V. A. Physics of Meteor Phenomena, 358 p. (Springer Netherlands, 1983).
8. Bronshten V. A. A magneto-hydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs. *Solar System Research*. 17 (2), 70–74 (1983).
9. Bronshten V. A. Electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight. *Solar System Research*, 25 (2), 93–104 (1991).
10. Bronshten V. A. Magnetic Effect of the Tungus Meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy*. 42 (6), 854–856 (2002).
11. Brunelli B. E., Namgaladze A. A. *Physics of ionosphere*, 527 p. (Moscow, Nauka, 1988) [In Russian].
12. Ginzburg V. L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas, 684 p. (London, Pergamon Press, 1970).
13. Golitsyn G. S., Grigoriev G. I., Dokuchaev V. P. Radiation of acoustic gravity waves during the motion of meteoroids in the atmosphere. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 1977, 13 (9), 926–936 [In Russian].
14. Goldshtein L. D., Zernov N. V. *Electromagnetic fields and waves*, 664 p. (Sov. radio, Moscow, 1971) [In Russian].
15. Gorbachev L. P., Bitter V. V., Glushkov A. I., Kotov Yu. B., Krashenninnikov M. V., Lazarev B. M., Levahina L. V., Matronchik A. Yu., Mozgov K. S., Savchenko Yu. N., Semenova T. A., Skrylnik A. A., Fedorov V. F. The generation of the geomagnetic disturbances by non-stationary high-energy sources, 353 p. (MIFI, Moscow, 2001) [In Russian].
16. Gossard E. E., Hooke Y. X., *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation*, 532 p. (Developments in Atmospheric Science). *Elsevier Scientific Pub. Co.*, 472 p. (1975).
17. Gohberg M. B., Shalimov S. P. The action of earthquakes and explosions on the ionosphere, 295 p. (Nauka, Moscow, 2008) [In Russian].
18. Gurevich A. V., Shvartsburg A. B. *Nonlinear Theory of Radio Wave Propagation in the Ionosphere*, 272 p. (Nauka, Moscow, 1973) [In Russian].
19. Adushkin V. V., Nemchinov I. V. (eds). *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. 310 p. (Moscow, Russia: ECC Akademkniga Publ., 2005) [in Russian].
20. Kovaleva I. H., Kovalev A. G., Popel S. I., Popova O. P. The electromagnetic effects generated in the Earth ionosphere during the meteoroid falling. *Trigernnyie efektyi v geosistemah. Materialy Vserossiyskogo seminara-soveshaniya*. Ed.: V. V. Adushkin, G. G. Kocheryan, 41–50. (GEOS, Moscow, 2013) [In Russian].
21. Kovaleva I. H., Kovalev A. G., Popova O. P., et al. The electromagnetic effects generating in the Earth ionosphere

Стаття надійшла до редакції 30.10.17

## REFERENCES

- Adushkin V. V., Popova O. P., Rybnov Yu. S., Kudryavtsev V. I., Mal'tsev A. L., Kharlamov V. A. Geophysical effects of the Vitim bolide. *Doklady Earth Sciences*, 397 (6), 861–864 (2004).
- 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. and Shtyrkov A. Y., 2013. Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013. (FGBU "IPG" Publ., Moscow, Russia, 2013) [in Russian].
- Materials and reports of international scientific practical conference "Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the lake Chebarkul", 21–22 June 2013, Chebarkul, 168 p. (2013) [in Russian].
- Solar System Research*. 47 (4). (Thematical issue) (2013) [in Russian].

- during the meteoroid falling. *Dinamicheskije processy v geosferah. Vypusk 5. Geofizicheskije efekty padenija Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Special'nyj vypusk*, 26—48 (GEOS, Moscow, 2014) [in Russian].
22. Kruchinenko V. G. Mathematical and physical analysis of the meteor phenomena, 294 p. (Kyiv, 2012) [in Ukrainian].
  23. Liatskij V. B. The Current Systems of the magnetospheric and ionospheric disturbances, 199 p. (Nauka, Leningrad, 1978) [in Russian].
  24. Antipin N. A., ed. The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., 694 p. (Chelyabinsk, 2014) [in Russian].
  25. Ol'khovarov A. Yu. The electrophone sounds mechanisms generation analysis that accompany bolide effects. *Geomagnetism and Aeronomy*. **33** (2), 154—155 (1993) [in Russian].
  26. Raizer Yu. L. A Debate over the Acquisition of an Electric Potential by a Meteoroid. *Solar System Research*. **37** (4), 333—335 (2003)
  27. Soloviev S. P., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A. The synchronic disturbances of the acoustic and electric fields caused by artificial and natural sources. *Triggemyie efekty v geosistamah. Materialy tretogo Vserossiyskogo seminar-soveschaniya. Pod red. V. V. Adushkina, G. G. Kocheryana*, 317—326 (GEOS, Moskva, 2015) [in Russian].
  28. Surkov V. V. Electromagnetic effects caused by earthquakes and explosions, 448 p. (MEPhI, Moscow, 2000) [in Russian].
  29. Chernogor L. F. Physics of Earth, Atmosphere, and Geospace from the Standpoint of System Paradigm. *Radiofizika i Radioastronomija*. **8** (1), 59—106 (2003) [in Russian].
  30. Chernogor L. F. Earth—Atmosphere—Ionosphere—Magnetosphere as Opened Dynamic Nonlinear Physical System. 1. *Nelinejnyj mir*. **4** (12), 655—697 (2006) [in Russian].
  31. Chernogor L. F. Earth—Atmosphere—Ionosphere—Magnetosphere as Opened Dynamic Nonlinear Physical System. 2. *Nelinejnyj mir*. **5** (4), 225—246 (2007) [in Russian].
  32. Chernogor L. F. On the Nonlinearity In Nature and Science, 528 p. (Kharkiv V. N. Karazin National University, Kharkiv, 2008) [in Russian].
  33. Chernogor L. F. The ways in which variations in space and tropospheric weather impact the biosphere (humans). *Physyologichnyj journal*. **56**, № 3. — C. 25 — 40 (2010) [in Russian].
  34. Chernogor L. F. Oscillations of the Geomagnetic Field Caused by the Flight of Vitim Bolide on September 24, 2002. *Geomagnetism and Aeronomy*. **51** (1), 116—130 (2011).
  35. Chernogor L. F. Physics and Ecology of Catastrophes: monograph, 556 p. (Kharkiv V. N. Karazin National University, Kharkiv, 2012) [in Russian].
  36. Chernogor L. F. Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Radiophysika i electronica*. **4** (18) (3), 47—54 (2013) [in Russian].
  37. Chernogor L. F. Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Inzhenernaja physica*. **8**, 23—40. (2013) [in Russian].
  38. Chernogor L. F. The Physical Effects of Chelyabinsk Meteorite Passage. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukraini*. **10**, 97—104 (2013) [in Russian].
  39. Chernogor L. F. Physics of High-Power Radio Emissions in Geospace : Monograph, 448 p. (Kharkiv V. N. Karazin National University, Kharkiv, 2014) [in Russian].
  40. Chernogor L. F. Geomagnetic Field Effects of the Chelyabinsk Meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. **54** (5), 613—624 (2014).
  41. Chernogor L. F. The physical effects of Romanian meteoroid. 1. *Space Science and Technology*. **24** (1), 49—70 (2018).
  42. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7, 2015. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. **33** (6), 276—290 (2017).
  43. Beech M., Brown P., Jones J. VLF detection of fireballs. *Earth Moon Planets*. **68**, 181—188 (1995).
  44. Beech, M., Foschini L. A. A space charge model for electrophonic bursters. *Astron. Astrophys.* **345**, L27—L31 (1999).
  45. Borovička J., Spurný P., Grigore V. I., Svoreň J. The January 7, 2015, superbolide over Romania and structural diversity of meter-sized asteroids. *Planetary and Space Science*. **143**, 147—158 (2017).
  46. Brown P., Spalding R. E., ReVelle D. O., Tagliaferri E., Worden S. P. The flux of small near-Earth objects colliding with Earth. *Nature*. **420**, 294—296 (2002).
  47. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *International Journal of Remote Sensing*. **32** (11), 3199—3218 (2011).
  48. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — Atmosphere — Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Physics and Radio Astronomy*. **13** (2), 120—137 (2008).
  49. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Problems of Atomic Science and Technology*. **86** (4), 136—139 (2013).
  50. Kaznev V. Y. Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis. *Sol. Sys. Res*. **28**, 49—60 (1994).
  51. Keay C. S. L. Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science*. **210**, 11—15 (1980).
  52. Keay C. S. L. Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. R. Astron. Soc. Canada*. **74**. 253—260 (1980).

53. Keay C. S. L. Meteor fireball sounds identified. Asteroids, Comets, Meteors. 297–300, *Lunar and Planet. Inst., Houston, Tex.*, (1991, 1992).
54. Keay C. S. L. Electrophonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics*, **27**, 144–148 (1992).
55. Keay C. S. L. Electrophonic Sounds Catalog. *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* **6**, 151—172 (1994).
56. Keay C. S. L., Ceprecha Z. Rate of observation of electrophonic meteor fireballs. *J. Geophys. Res.* **99**, 13163–13165 (1994).
57. Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. Infrasound monitoring for atmospheric studies. 734 p. (*Springer Dordrecht Heidelberg London New York*, 2010).
58. Popel S. I. Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body. *Planet. Space Sci.* **45** (7), 869–875 (1997).
59. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., YIN Q. Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Kharlamov V., Solovyov A., Rusaakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G. Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. **342**, 1069–1073 (2013).
60. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 145 p. (2013).
61. Pricopi D., Dascalu M., Badescu O., et al. Orbit reconstruction for the meteoroid of the meteorite-producing fireball that exploded over Romania on January 7, 2015. *Proc. Romanian Academy, Series A.* **17** (2), 133–136 (2016).
62. Zalyubovsky I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The Earth — Atmosphere — Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena. *Space Research in Ukraine*. 2006–2008. Kyiv. 19–29 (2008).

Received 30.10.17

Л. Ф. Черногор

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

#### ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ РУМУНСЬКОГО МЕТЕОРОЇДА. 2

Проведено комплексне моделювання процесів у всіх геосферах, які зумовлені падінням та вибухом типового метеороїда над Румунією 7 січня 2015 р. Оцінені ефект турбулентності, магнітні, електричні, електромагнітні та сейсмічні ефекти, а також ефекти акусто-гравітаційних хвиль та іоносферні ефекти. Політ метеороїда призвів до утворення плазмового сліду, до помітного збурення не тільки нижньої, але й верхньої атмосфери на відстані не менш ніж 1 тис. км. Значення плазмового, магнітного, електричного, електромагнітного та акустичного ефектів були помітними. Магнітуда землетрусу, який було викликано вибухом метеороїду, не перевищувала 1. Середня частота падіння космічних тіл, подібних Румунському метеороїду, складає  $8.4 \text{ рік}^{-1}$ .

**Ключові слова:** метеороїд, ефект турбулентності, магнітні, електричні, електромагнітні, сейсмічні ефекти, акустико-гравітаційні хвилі, іоносферні ефекти, частота падінь.

L. F. Chernogor

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

#### PHYSICAL EFFECTS OF THE ROMANIAN METEOROID. 2

We describe various aspects of a comprehensive modeling study of the processes induced in all geospheres the meteoroid passed and exploded over Romania on January 7, 2015. We estimated turbulence generation, magnetic, electric, electromagnetic, and seismic effects, the effects of acoustic-gravity waves, and ionospheric effects. The passage of the meteoroid has caused the formation of a plasma trail and an appreciable disturbance not only in the lower but also in the upper atmosphere at the distances not less than 1,000 km. The magnitudes of plasma, magnetic, electric, electromagnetic, and acoustic effects were significant. The magnitude of the earthquake caused by the meteoroid explosion did not exceed 1. The mean rate of the fall of cosmic bodies similar to the Romanian meteoroid is equal to 8.4 times a year.

**Keywords:** meteoroid, turbulence effect, magnetic, electric, electromagnetic, seismic effects, acoustic-gravity waves, ionospheric effects, falling frequency.