

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.06.034>

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. 3

Проведено комплексное моделирование процессов во всех геосферах, вызванных падением и взрывом метеороида вблизи г. Липецк (Россия) 21 июня 2018 г. Оценены магнитные, электрические, электромагнитные, ионосферные и сейсмические эффекты, а также эффекты акустико-гравитационных волн. Показано, что магнитный эффект турбулентности был незначительным. Магнитный эффект ионосферных токов и тока в следе метеороида мог быть существенным (~1 нТл). Эффект внешнего электрического поля мог приводить к кратковременному импульсу тока силой порядка 10^4 А. Электростатический эффект мог сопровождаться накоплением заряда величиной около 1 мКл, напряженностью электрического поля 0.01...1 МВ/м. Протекание электрического тока в следе могло приводить к излучению электромагнитного импульса в диапазоне частот 40...80 кГц с напряженностью 1...10 В/м. Установлено, что электромагнитный эффект инфразвука мог быть существенным (1...10 В/м и 1...10 нТл). Поглощение ударной волны на высотах динамо-области ионосферы (100...150 км) могло сопровождаться генерацией вторичных атмосферных гравитационных волн с относительной амплитудой 0.1...1. Пролет метеороида привел к образованию плазменного следа, к заметному возмущению не только нижней, но и верхней атмосферы на удаленностях не менее 1 тыс. км. Обсуждается возможность возникновения электрофонного эффекта, генерации ионного и магнитного звука инфразвуком, а также генерация градиентно-дрейфовой и дрейфово-диссипативной неустойчивостей. Сделан вывод, что рассмотренные в статье магнитные, электрические и электромагнитные эффекты существенно восполняют пробелы в теории физических эффектов метеороидов в системе Земля — атмосфера — ионос-

фера — магнитосфера. Магнитуда землетрясения, вызванного взрывом метеороида, не превышала 1.7. Средняя частота падения космических тел, подобных Липецкому метеороиду, составляет 0.68 год^{-1} .

Ключевые слова: Липецкий метеороид, комплексное моделирование, магнитные эффекты, электрические эффекты, электромагнитные эффекты, ионосферные эффекты, сейсмические эффекты, акустико-гравитационные волны, акустические эффекты, плазменный след.

ВВЕДЕНИЕ

Физическим эффектам Липецкого метеороида посвящены работы автора [40, 41]. В двух частях настоящей работы описаны механические, газодинамические, оптические, термодинамические и плазменные эффекты, а также эффект турбулентности, вызванные полетом и взрывом Липецкого метеороида [40, 41].

Цель третьей части работы — изложение результатов расчетов и оценок магнитных, электрических, электромагнитных, ионосферных и сейсмического эффектов, а также эффектов акустико-гравитационных волн, сопровождавших падение Липецкого космического тела.

Обозначения в этой части работы такие же, как в первой и второй частях [40, 41].

Подчеркнем, что перечисленные эффекты для крупных метеороидов как в теоретическом, так и в экспериментальном планах изучены недостаточно. Имеются лишь результаты исследования отдельных эффектов [7—9, 14, 15, 47, 48, 63]. Ранее автором предпринята попытка оценки всего комплекса эффектов для Челябинского и Румынского метеороидов [30, 31, 37, 38, 52]. Заметим, что в обобщающих работах по Челябинскому метеороиду других исследователей [1, 2, 17, 64, 65] магнитные, электрические, электромагнитные эффекты вообще не рассматривались.

МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Как показано в работе [41], в области взрыва метеороида $Re_m \sim Re_{mc}$. Это означает, что мог иметь место магнитный эффект турбулентности. Оценим его.

Оценка магнитного возмущения. Турбулентность в плазменном следе может приводить к хаотизации («закручиванию», «запутыванию» [7]) магнитных силовых линий и усилению магнитного поля. Для оценки этого эффекта будем исходить из того, что плотность энергии ϵ_m магнитного поля достигает плотности энергии ϵ_t генерирующего его турбулентного движения плазмы. С учетом того, что

$$\epsilon_t = \frac{1}{2} m_i N_t^2,$$

$$m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\rho},$$

получим

$$B = \sqrt{2 \rho m_i N}.$$

Здесь m_i — масса иона. При $N = N(0) = (1..4) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$, $m_i = 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$, $\rho = 1.4 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ получим характерное значение

$$B(0) = \sqrt{2 \rho m_i N(0)} = 19 \text{ мТл}.$$

При $z = 32..26 \text{ км}$ время становления турбулентности $t = 3..35 \text{ мс} \gg \gg t_{N1}, t_{N2} \sim 0.1 \text{ мс}$. За это время $N(t)$ существенно уменьшится на высотах $26..32 \text{ км}$, т. е. $N(t) \ll N_0$. Поэтому на высоте z_e реальное значение $B(t) \ll 2 \text{ нТл}$. Такие значения вариаций геомагнитного поля не могут быть измерены на поверхности Земли, где они значительно меньше, чем 2 нТл .

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

$$E_{EMF} = \frac{d}{dt} \int S dB. \quad (4)$$

Здесь $\int S dB$ — поток индукции магнитного поля. Заменяем выражение (4) оценкой: $E_{EMF} = B(0)S / t_N$, где $t_N = \min[t_{N1}, t_{N2}]$. На высотах $z = 26..32 \text{ км}$ $S = 1000..12 \text{ м}^2$, $B(0) = 1.9 \text{ нТл}$, $t_N = 0.1 \text{ мс}$ соответственно. Тогда для этих же высот $E_{EMF} = 20..0.24 \text{ мВ}$. Если электрические токи внутри следа замыкаются благодаря турбулентным вихрям с размером L_t и площадью сечения $S_t = L_t^2$, сопротивление замыкания будет равно

$$R_t = \frac{L_t}{S_t} = \frac{1}{L_t},$$

а сила тока при этом равна

$$I = \frac{E_{EMF}}{R_e + R_t},$$

где $R_e = L / (z_e)S(z_e) = 3.75 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, $R_t = 3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$. При оценках предполагалось, что $(z_e) = 10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $S(z_e) = 10^3 \text{ м}^2$, $L_t = d(z_e) = 32 \text{ м}$. При $E_{EMF} = 20..0.24 \text{ мВ}$ получим $I = 0.06..5.3 \text{ А}$.

Таким образом, в случае замыкания электрических токов в следе метеороида могла возникнуть ЭДС $E_{EMF} = 0.24..20 \text{ мВ}$ и ток силой не более единиц ампер.

МАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

Магнитный эффект крупных метеороидов изучен недостаточно. В принципе возмущения геомагнитного поля могут генерироваться за

счет дипольного момента космических тел и за счет диамагнитного возмущения, вносимого ударной волной взрывающегося космического тела [7, 9].

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 [27 — 29, 32].

Геомагнитный эффект ионосферных токов. Механизмы генерации геомагнитных возмущений, перечисленные в работах [7, 9], не могут считаться эффективными. Более существенным механизмом является модуляция ионосферных токов, точнее токовой струи в динамо-области ионосферы. Последняя находится в основном на высотах $z = 100...150$ км. Модуляция происходит за счет движения газа в поле акустической волны от взрыва. Из роторного уравнения Максвелла для амплитуды возмущения индукции магнитного поля имеем [28]:

$$B = \frac{j_0}{k_a} - \frac{j_0 N}{k_a},$$

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

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

где s — скорость звука. Полагая на высоте 125 км $s = 400$ м/с, $T_{a0} = 1...10$ с, $N = p/p_0 = 0.5$, $j_0 = 10^7$ А/м², получим, что $B = 8...80$ пТл. При этом геомагнитный эффект очень слабый даже вблизи токовой струи.

В случае модуляции токовой струи внутренней гравитационной волной с периодом $T_{a0} > 5$ мин амплитуда геомагнитного возмущения [29] равна

$$B = j_0 N z,$$

где $z = 30$ км — толщина динамо-области. При тех же значениях N и j_0 получим $B = 1.9$ нТл. Такой эффект может наблюдаться при помощи современных наземных магнитометров.

Различие амплитуд магнитных эффектов акустических и внутренних гравитационных волн (ВГВ) обусловлено различием их длин волн. При длинах ВГВ порядка сотен километров вся динамо-область колеблется как целое, порождая сравнительно большой интегральный ток. В случае инфразвуковых волн (длины волн порядка единиц километров) в динамо-области укладывается много длин волн, токи которых ослабляют друг друга.

Динамо-эффект акустико-гравитационных волн [46, 61, 62]. Этот эффект становится преобладающим, если плотность тока в поле

волны $j = eN_w j_0$. Здесь w — скорость нейтральных частиц в волне. При $N = 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $w = 4 \text{ м/с}$ имеем $j = 6.4 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2$, а $j_0 = N \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2} = 10^{-9} \text{ А/м}^2$. Если же $w = 40 \text{ м/с}$, то $j = 6.4 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$, а $j_0 = N \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2$, поскольку $N = w/w_s \cdot 0.1$. При этом для акустической волны $B = 0.5 \dots 5 \text{ нТл}$. Добавим, что $j > j_0$ имеет место всегда, поскольку скорость ветра всегда меньше скорости звука. По этой причине динамо-эффект акустико-гравитационных волн всегда более эффективен, чем динамо-эффект ветра.

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

$$B = \frac{I}{2R}$$

можно оценить B . Например, при $I = 0.1 \dots 1 \text{ кА}$, $R = 100 \text{ км}$ получим, что $B = 0.2 \dots 2 \text{ нТл}$. Магнитный эффект в этом случае мог быть достаточно точным для его регистрации наземными магнетометрами.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Проблема электрических и магнитных явлений, сопровождающих падения крупных космических тел, в настоящее время далека от разрешения [8, 30, 37]. Рассмотрим ряд возможных механизмов, приводящих к электрическому эффекту.

Ток, обусловленный разделением заряда. В работе [8] считается, что движение электронов в следе происходит на фоне образующихся и отстающих от тела ионов. Это должно приводить к возникновению тока силой

$$I = e_i v_i,$$

где v_i — скорость метеороида. При $v_i = (0.03 \dots 4) \cdot 10^{24} \text{ м}^{-1}$, $v_i = 14 \dots 10 \text{ км/с}$ имеем $I = (6.7 \dots 640) \cdot 10^7 \text{ А}$. Такая сила тока является аномально большой. Она возникала 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 $E_0(0) = 100 \text{ В/м}$ [4]. С увеличением высоты напряженность поля уменьшается по закону

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

где $H_E = 2.5 \dots 4 \text{ км}$. Тогда при $H_E = 3.5 \text{ км}$ на высотах $z = 25 \dots 32 \text{ км}$ имеем $E(z) = 79 \dots 11 \text{ мВ/м}$.

Между концами следа возникает разность потенциалов

$$U = \int_L E_0 dz = E_0(z) \frac{z_2 - z_1}{\sin H_E} \exp \left(-\frac{z_2 - z_1}{H_E} \right) \quad (5)$$

При $z_1 = 25$ км и $z_2 = 32$ км из уравнения (5) имеем $U = 168$ В. При сопротивлении следа

$$R(z_e) = \frac{L}{(z_e)S(z_e)} \quad (6)$$

из (5) и (6) получим, что

$$I = \frac{U}{R} = (z_e)E_0(z_e)S(z_e) \frac{H_E}{L} \exp \left(-\frac{z_2 - z_1}{H_E} \right)$$

При $10^3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, $E_0(z_e) = 27$ мВ/м, $S = 10^3 \text{ м}^2$, $H_E = 3.5$ км, $L = 3.75$ км имеем $R = 3.75 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, $I = 4.5 \cdot 10^4 \text{ А}$.

Эффект ударной волны. Пролет достаточно крупного метеороида приводит к генерации ударной волны. При этом на фронте ионизации генерируется ЭДС [8]

$$E_{EMF} = \frac{kT_i}{e} \ln \frac{N(0)}{N_0},$$

где $T_i = 14000$ К — критическая температура, определяющая начало ионизации, $N_0 = 10^6 \text{ м}^{-3}$ — фоновое значение N в атмосфере. При $N(0) = 4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ получаем оценку $E_{EMF} = 43$ В. Сила тока в следе

$$I = \frac{E_{EMF}}{R_e + R_0},$$

где $R_e = R(z_e)$ — сопротивление следа, R_0 — сопротивление замыкания электрической цепи. Поскольку $R_0 \ll R_e$, сила тока в следе за счет этого механизма будет крайне незначительной. Если же принять, как и выше, что $R = 3.75 \cdot 10^3 \text{ Ом}$, $R_0 = R_i = 3 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, $I = 1.1 \cdot 10^4 \text{ А}$.

Электростатический эффект. Оценим электростатический эффект метеороида, опираясь на результаты работы [19].

Электрический заряд системы «плазма + окружающий воздух» определяется балансом прямого и обратного потоков электронов в этой системе [19]. 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 метеорита, становится равной скорости возврата электронов, имеющих подвижность μ_e , т. е.

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

где E_s — напряженность электрического поля на поверхности плаз-

менной оболочки. Из соотношения (7) определяется потенциал электрического поля относительно Земли:

$$E_s r_s = \frac{r_s}{e}. \quad (8)$$

Зная ϵ_0 , можно вычислить заряд q и энергию E электрического поля:

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

$$E = q \frac{4}{2} \frac{e}{e} r_s^3, \quad (10)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная. Важно, что $q \propto r_s^2$, а $E \propto r_s^3$.

Положим для Липецкого метеороида $r_s = 2...15$ м, $v = 14...1$ км/с, $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^3 ... 3 \cdot 10^2$ м²В⁻¹с⁻¹ [19] в диапазоне высот 32...23 км соответственно. Тогда из (7)—(10) для этого же диапазона высот получим, что $E_s = 0.03...3.7$ МВ/м, $\phi = 7.4...0.5$ МВ, $q = 1.6...0.8$ мК и $E = 11.1...1.5$ кДж.

Таким образом, в следе метеороида могли возникать молниевые разряды, где напряженность поля пробоя составляла величину 0.03...0.1 МВ/м.

Добавим, что пробой идеально чистого воздуха у поверхности Земли наступает при напряженности $E_s = 3$ МВ/м, а «грязного» воздуха — при $E_s = 1$ МВ/м. Таким образом, при пролете Липецкого метеороида вполне мог возникнуть слабый молниевый разряд, энергия которого сравнительно невелика (1...10 кДж).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Механизмы возникновения электромагнитных эффектов при падении крупных космических тел как в теоретическом, так и особенно в экспериментальном планах, изучены недостаточно [8, 14, 15, 30, 31, 51]. 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

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

заменяя производные оценкой, имеем оценку напряженности электрического поля:

$$E \approx \frac{B(0)}{2 t_N}.$$

Полагая $B(0) = 2$ нТл, $t_N = 0.1$ мс, $2L = 7.5$ км (длина электромагнитной волны), получим $E = 24$ мВ/м. Импульс электрического поля за счет этого механизма был крайне незначительным.

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 [11, 30]:

$$E = \frac{0Ilf}{2R},$$

где l — длина излучателя, f — частота электромагнитного поля. При $I = 1...5$ кА, $l = L_e = 3.75$ км, $f = 40$ кГц и $R = 50$ км имеем $E = 2...10$ В/м.

Мощность излучения [11, 30] равна

$$P = \frac{1}{3} Z_0 I^2 \frac{l}{\lambda}, \quad (11)$$

где λ — длина волны излучения, $Z_0 = 120$ 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 $l = \lambda/2$. Полагая, что $\lambda_{\min} = L_e = 3.75$ км, а $\lambda_{\max} = H / \sin \theta = 7.7$ км, получим, что $\lambda = 7.5...15.4$ км и $f = 39...80$ кГц.

Если $I = 1...5$ кА и $l = \lambda/2$, мощность излучения $P = 0.1...2.5$ ГВт. При этом в излучение преобразуется доля мощности $P_c = 45$ ТВт (см. работу [30]):

$$\frac{P}{P_c} = 2.2 \cdot 10^{-4} \dots 5.6 \cdot 10^{-3} \%$$

Импульс электромагнитного поля длился, пока проводимость, а значит и $N(t)$ в следе были достаточно большими, т. е. при $t = (1...4)t_{N2} = 0.1...0.4$ мс. Спектр этого импульса занимал полосу частот $t^{-1} = 2.5...10$ кГц.

Электромагнитный эффект инфразвука. Хорошо известно, что воздействие на геосферы целого ряда высокоэнергичных источников приводит к генерации синхронных возмущений акустического и геоэлектрического (атмосферного) полей [20, 21, 36, 38]. К таким источникам относятся: движение атмосферного фронта и солнечного терминатора, солнечные затмения, микробаромы и др. [20, 21, 36]. Важно, что при этом наблюдается приблизительная пропорциональность амплитуды возмущений атмосферного электрического поля E_a и амплитуды давления p . Механизм генерации возмущений электрического поля связан, скорее всего, с вариациями плотности объемного заряда ρ_{el} в приземной атмосфере при периодических изменениях давления воздуха в поле инфразвуковой или ударной волн [20, 21, 36, 38]. Оценим величину E_a .

Из уравнения Максвелла

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{e_l}{0}$$

имеем следующее соотношение для оценки амплитуды:

$$\frac{E_a}{L_z} = \frac{e_l}{0}, \quad (12)$$

где $L_z = \min L_t, k_a^{-1}, H_E$. Здесь $L_t = 10 \dots 100$ м — толщина приземного слоя атмосферы с объемным электрическим зарядом e_{l0} , k_a — волновое число инфразвука, $H_E = 2.5 \dots 4$ км — характерный высотный масштаб изменения E . При периоде инфразвука $T > 0.2 \dots 2$ с имеем $L_z = L_t = 10 \dots 100$ м. В силу того что заряженный компонент в приземной атмосфере является малой примесью, изменение e_l составляет

$$e_l = e_{l0} \frac{N_n}{N_{n0}} = e_{l0} \frac{p}{p_0}. \quad (13)$$

Тогда из (12) и (13) следует, что

$$E_a = \frac{e_{l0} L_t}{0} \frac{p}{p_0}, \quad (14)$$

т. е. амплитуда E_a действительно пропорциональна избыточному давлению p .

Для Липецкого метеороида вблизи эпицентра $p = 140$ Па. При $e_{l0} = 5 \cdot 10^{10}$ Кл/м³, $L_t = 10 \dots 100$ м, $p = 10^5$ Па из соотношения (14) имеем $E_a = 0.79 \dots 7.9$ В/м. Для сравнения укажем, что для Челябинского метеороида $p = 1 \dots 2$ кПа, и значения E_a были на порядок больше. 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 Липецкого метеороида, не представляла бы труда.

Распространение инфразвука вдоль поверхности Земли сопровождалось бегущей волной возмущения электрического поля с частотой инфразвука и амплитудой E_a (см. выражение (14)). Периодические вариации p в поле инфразвука вызвали периодические изменения E . При этом следовало ожидать периодических вариаций магнитного поля. Оценим амплитуду индукции магнитного поля $B_a = \operatorname{rot} \mathbf{A}$. Пренебрегая током проводимости, из уравнения Максвелла

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

для амплитуды B_a имеем следующее соотношение:

$$B_a = \frac{0}{k} \frac{0}{c} E_a = \frac{E_a}{kc^2} \frac{E_a}{c}, \quad (15)$$

где $k = \omega / c$ — волновое число электромагнитного поля. При записи (15) учтено, что $|\operatorname{rot} \mathbf{B}| = kB_a$, $|\mathbf{E} / t| = E_a$. Если $E_a = 0.79 \dots 7.9$ В/м, то $B_a = 2.6 \dots 26.3$ нТл. Такой эффект легко регистрируется.

Генерация ионного и магнитного звука инфразвуком. Как отмечалось в первой части этой работы [40], амплитуда инфразвука на высотах более 100 км оставалась достаточно большой, чтобы создать предпосылки для преобразования энергии инфразвука в энергию ионно-звуковой волны. Генерация ионного звука с частотой инфразвука эффективна при частоте инфразвука $\sim \nu_{mn}$, где ν_{mn} — частота соударений нейтралов с нейтралами. Для Липецкого метеороида эта частота составляет 0.1...1 Гц.

В диапазоне высот 130...150 км газокинетическое давление становится соизмеримым с магнитным давлением (~ 1 мПа). 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.

Заметим, что промодулированный инфразвуком ионосферный динамоток является своеобразной антенной, излучающей МГД-волны на частоте инфразвука (см. выше).

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 может обратно трансформироваться в инфразвук.

Генерация неустойчивостей. Выше 100 км инфразвуковая волна становится нелинейной, поскольку здесь $\rho / \rho > 0.2...0.3$. При этом её профиль становится пилообразным. На крутом фронте может генерироваться градиентно-дрейфовая неустойчивость ионного звука с той же частотой (периодом, равным 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 её 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 проработать 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 0.1...3 мГц, соответствующих внутренним гравитаци-

онным волнам. Еще до взрыва космического тела в энергию акустических E_{ac} и внутренних гравитационных E_g волн преобразуется соответственно около 1 и 0.2 % кинетической энергии метеороида [14]. При $E_k = 1.7 \cdot 10^{12}$ Дж имеем $E_{ac} = 1.7 \cdot 10^{10}$ Дж, $E_g = 3.4 \cdot 10^9$ Дж.

Генерация акустических волн. По нашим оценкам при взрыве Липецкого космического тела в энергию ударной волны трансформировалось около 80 % его кинетической энергии. Тогда $E_{ac} = 10^{13}$ Дж. На достаточно больших удалениях от места взрыва энергия взрывной ударной волны трансформируется в энергию акустических волн. При эффективной длительности взрывной ударной волны в месте ее генерации $t_a = 12.5$ с энергии E_{ac} соответствует средняя мощность около 800 ГВт.

Период акустических волн T_{a0} с наибольшей амплитудой связан с энергией источника E_e следующим соотношением [13, 52]:

$$E_e = 2 \frac{T_a^{3.34}}{T_{a0}}, T_{a0} = 592 \text{ с}, \quad (16)$$

где E_e выражается в кт ТНТ. Полагая $E_e = 10^{13}$ Дж = 2.4 кт ТНТ, из (16) получим, что $T_a = 6.3$ с.

Формула (16) справедлива для приземных взрывов. При взрыве на высоте z_e соотношение (16) попытаемся заменить следующим [30]:

$$E_e \frac{p(0)}{p(z_e)} = 2 \frac{T_0^{3.34}}{T_{a0}}, \quad (17)$$

где $p(0) = 10^5$ Па, $p(z_e) = 2.7 \cdot 10^3$ Па. Тогда из (17) получаем, что $T_a = 2.9 T_{a0} = 18.5$ с.

Дальше других расстояний (вплоть до глобальных) распространяются волны с максимальным периодом [28]

$$T_{\max} = 4.3 T_a = 13 \text{ мин.}$$

В энергию волн с периодом $T_a = T_{\max}$ 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 (баллистическая 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 [10] дают $E_g = 3.4$ ГДж, а $\frac{E_g}{E_{k0}} = 0.2$ %.

Во втором случае механизм генерации может быть следующим. Относительное избыточное давление во фронте ударной волны с увеличением высоты увеличивается (см. табл. 4 в работе [40]). При $p/p_0 > 0.3$ спектр ударно-волнового сигнала (инфразвука) обогащает-

ся 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 2α , где α дается соотношением

$$\cos \alpha = \frac{z_1 - z_e}{z_2 - z_e}.$$

Здесь z_1 и z_2 высоты начала и окончания нагрева. При $z_1 = 100$ км и $z_2 = 150$ км имеем $\alpha = 54.094$ рад. Горизонтальный радиус нагретой области изменяется от $R_1 = (z_1 - z_e) \operatorname{tg} \alpha = 100$ км до $R_2 = (z_2 - z_e) \operatorname{tg} \alpha = 170$ км. При этом длина ВГВ изменяется от $2R_1$ до $2R_2$, т. е. в пределах 200...340 км. При средней скорости звука $c_s = 400$...450 м/с на высотах 100...150 км имеем для периода ВГВ $T = 7.4$...14.2 мин соответственно.

Энергию вторичной ВГВ можно оценить из следующего соображения:

$$E_g = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 E_{k0},$$

где $\alpha_1 = 0.6$ — доля энергии E_{k0} , преобразуемой в энергию инфразвука, $\alpha_2 = \frac{S}{(z_2 - z_e)^2} = 0.20$ — доля энергии в телесном угле

$$\frac{S}{(z_2 - z_e)^2} = 2 \frac{z_2 - z_1}{z_2 - z_e} = 0.81,$$

α_3 — доля энергии инфразвука, поглощаемой слоем атмосферы толщиной $z_2 - z_1$, α_4 — доля поглощенной энергии инфразвука, преобразуемая в энергию ВГВ. Здесь $S = 2(z_2 - z_e)(z_2 - z_1)$ — площадь верхней части шарового сегмента радиусом $(z_2 - z_e)$ и высотой $(z_2 - z_1)$. Полагая $\alpha_3 = 0.5$, $\alpha_4 = 1$, получим, что $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 = 0.06$, а $E_g = 7 \cdot 10^{11}$ Дж.

Далее оценим тепловую энергию E_T в нагретом объеме:

$$E_T = \int_V \rho_T dV = \int_V C_0 T_0 dV,$$

где $\rho_T = C_0 T_0$ — плотность тепловой энергии невозмущенного воздуха, $T_0 = 210$ К — невозмущенная температура атмосферы на высоте $z_1 = 100$ км, $\rho_0 = 10^6$ кг/м³ — плотность атмосферы на высоте z_1 , $C_0 = 10^3$ Дж/(кгК) — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Оценка E_T имеет вид

$$E_T = C_0(z_1) T_0(z_1) R_1^2 H.$$

При $R_1 = 100$ км, $H = 7$ км имеем $E_T = 4.9 \cdot 10^{13}$ Дж. Тогда относительное возмущение температуры

Таблица 1. Высотные зависимости температуры, плотностей атмосферы, а также тепловой и волновой энергии

z , км	ρ_0 , кг/м ³	T_0 , К	E_T , Дж/м ³	E_w , Дж/м ³	E_w / E_T
100	10^{-6}	300	0.30	0.013	0.043
120	10^{-7}	310	0.031	0.01	0.3
150	10^{-8}	350	$3.5 \cdot 10^{-3}$	0.029	8.3
200	10^{-9}	600	$6 \cdot 10^{-4}$	1	1700
300	10^{-10}	900	$9 \cdot 10^{-5}$	3000	$3.3 \cdot 10^7$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{E_g}{E_T} = 1.4 \cdot 10^{-2}.$$

На высотах 120 и 150 км значения T / T_0 имеют порядок 10 и 100 % соответственно. При этом относительная плотность газа в ВГВ такого же порядка. Учитывая, что ВГВ каналируется в волноводе на высотах 100...200 км, относительная амплитуда ВГВ остается достаточно большой (3...30 %) на расстояниях около 1000 км.

Значения удельной волновой энергии E_w и тепловой энергии E_T приведены в табл. 1. Здесь

$$E_w = \frac{P^2}{\rho_0 \cdot s^2} = \frac{P^2}{P_0}.$$

Разумеется, нагревание атмосферы инфразвуком выше 150 км невозможно из-за его поглощения в диапазоне высот 100...150 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 [18]. Надежная теория этого явления до настоящего времени не разработана, хотя многократно предпринимались попытки ее создания [46, 47, 53—60]. Рассматривают три вероятных механизма, способных качественно объяснить электрофонный эффект [14, 15, 18].

Механизм 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 Липецкого метеороида напряженность достигала 0.1...10 МВ/м (см. выше), однако большая высота взрыва вряд ли допускает реализацию этого механизма.

Механизм 2. Электромагнитные волны звукового диапазона за счет пьезоэлектрического эффекта в предметах, окружающих наблюдателя, или в самом человеке преобразуются в звук. По оценкам при $f = 1...10$ кГц напряженность электрического поля должна быть не менее сотен В/м. Такие поля возникают на поверхности Земли при силе

тока в следе $I \approx 5 \cdot 10^4$ А, который вряд ли возникал при пролете липецкого космического тела.

Механизм 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 [15]. Данный механизм, скорее всего, реализовывался при пролете Челябинского метеороида. Не ясно, однако, какова роль этого механизма при падении Липецкого космического тела.

Таким образом, при падении Липецкого 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 ионизации молекул NO, описанного в работе [15].

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

В табл. 2 приведены значения начальной линейной $n_i(0)$ и объемной $N(0)$ концентрации электронов, рассчитанные по соотношениям, полученным из уравнений (2) и (6) (см. работы [6, 30, 52, 55]):

$$n_i(0) = \frac{n_i}{M_m} \frac{C_h}{2Q} \approx 2S,$$

$$N(0) = \frac{n_i}{M_m} \frac{C_h}{2Q} \approx 2.$$

В этой таблице также перечислены времена становления концентрации электронов за счет амбиполярной диффузии t_D , прилипания электронов к молекулам кислорода и рекомбинации с метеорными ионами:

$$t_D = \frac{d^2}{D},$$

$$t_{N10} = (k_{a0} N_0^2 [\text{O}_2])^{-1},$$

$$t_{N20} = (k_{a0} N(0))^{-1},$$

Таблица 2. Высотные зависимости основных параметров атмосферы и ионосферы

z , км	ρ , кг/м ³	T_0 , К	$N[\text{O}_2]$, 10 ²⁰ м ⁻³	k_{a0} , 10 ⁻⁴² м ⁶ с ⁻¹	$i(0)$, м ⁻¹	$N(0)$, м ⁻³	D , м ² с ⁻¹	t_{M1} , с	t_{N2} , с	t_D , с
300	2.1 10 ⁻¹⁰	—	—	—	3.9 10 ¹⁴	3.1 10 ¹³	1.6 10 ⁴	—	3.2 10 ⁴	10 ⁻³
200	2.1 10 ⁻⁹	—	—	—	3.9 10 ¹⁵	3.1 10 ¹⁴	1700	—	3200	9.4 10 ⁻³
150	2.1 10 ⁻⁸	—	—	—	3.9 10 ¹⁶	3.1 10 ¹⁵	76	—	320	0.2
120	2.1 10 ⁻⁷	—	—	—	3.9 10 ¹⁷	3.1 10 ¹⁶	30	—	32	0.5
100	2.1 10 ⁻⁶	—	—	—	3.9 10 ¹⁸	3.1 10 ¹⁷	12	—	3.2	1.3
90	8 10 ⁻⁶	—	—	—	1.5 10 ¹⁹	1.2 10 ¹⁸	3.5	—	0.8	4.6
80	3 10 ⁻⁵	220	0.62	1.26	5.5 10 ¹⁹	4.4 10 ¹⁸	1	206	0.2	16
70	1.1 10 ⁻⁴	230	4.2	1.34	7.0 10 ²⁰	1.6 10 ¹⁹	0.3	4.2	0.063	53
60	4.4 10 ⁻⁴	240	14	1.44	8.2 10 ²⁰	6.5 10 ¹⁹	0.1	0.35	0.015	160
50	1.7 10 ⁻³	250	46	1.52	3.1 10 ²¹	2.5 10 ²⁰	0.03	0.03	4 10 ⁻³	533
40	6.3 10 ⁻³	240	170	1.44	1.2 10 ²²	9.3 10 ²⁰	0.01	2.4 10 ⁻³	2.4 10 ⁻³	1600

где D — коэффициент амбиполярной диффузии. Для простоты считалось, что $T = T_0$.

Из табл. 2 видно, что на высотах $z > 100$ км ионизационный след релаксирует в основном за счет амбиполярной диффузии. Процесс прилипания не существенный на всех высотах. В диапазоне высот 40...90 км концентрация 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 N можно оценить по относительному возмущению давления $p = p / p_0$. При грубой оценке N

p . Результаты расчета p на ионосферных высотах приведены в табл. 4 в работе [40]. Над эпицентром взрыва следовало ожидать значений $N = 0.1...1$.

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 $(2f)^2 \approx E_{cr}^2$ напряженность электрического поля пробоя дается следующим соотношением [5]:

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

где $E_{cr}(0) = 3$ МВ/м. Время пробоя при $E = E_{cr}$ дается таким выражением [5]:

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

где $t_{cr}(0) = 0.02$ мкс.

Таблица 3. Параметры, описывающие пробой атмосферы

z , км	n_{e0} , 10^6 c^{-1}	E_{cr} , В/м	τ_{cr} , мс	t_{pe} , мс
80	2	30	2	0.07...0.11
85	1.1	17	1.2	0.08...0.12
90	0.63	9	7	0.09...0.14
95	0.35	5	12	0.38...0.68
100	0.2	3	20	1.7
105	0.11	1	34	3

Значения E_{cr} и τ_{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 $E_{cr} = 5...1 \text{ В/м}$ соответственно. Поскольку при $R = 50 \text{ км}$ $E = 2...10 \text{ В/м}$, то $E < E_{cr}$, и пробой электромагнитным импульсом был возможен.

Кроме пробоя атмосферы в нижней части ионосферы ($z = 80...100 \text{ км}$) происходит нагрев электронов, изменение коэффициента прилипания $\alpha_e(T_e)$ и уменьшение коэффициента рекомбинации $\beta_r(T_e)$ электронов с ионами NO и O_2 [12, 33]. Время становления процесса рекомбинации значительно превышает длительность электромагнитного импульса, и поэтому нарушения ионизационно-рекомбинационного процесса заметной роли не играют.

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

$$E_p^2 = \frac{3kT_{e0}m_e n_e (\frac{\omega_B^2}{\omega_{pe}^2})}{e^2}.$$

Здесь E_p — плазменное поле [12, 33], T_{e0} — температура электронов в невозмущенной плазме, $\omega_B = 8.5 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ — гирочастота электронов, точнее ее «продольная» составляющая. Важно, что в нижней ионосфере $E_p = 0.3 \text{ В/м}$, т. е. $E_p \ll E = 2...10 \text{ В/м}$. Это означает, что нагрев электронов у границы ионосферы был значительным.

Нагрев электронов описывается следующей системой уравнений [33]:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{E^2}{E_p^2} A(z) - \alpha_e(T_e) n_e, \quad (18)$$

$$\frac{dE}{dz} = -\frac{E}{c} \left(\frac{E}{E_p} \right)^2, \quad (19)$$

где $T_e / T_{e0} = \frac{E^2}{E_p^2} A(z)$, $\alpha_e(T_e) = \alpha_{e0} \left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{4/3} \left(1 - 0.014 \left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{45/5} \right)$, $n_e = n_{e0} \left(\frac{T_e}{T_{e0}} \right)^{5/6}$, $A(z) = \frac{\beta_r(T_e) n_e}{\alpha_e(T_e) n_e} = \frac{\beta_r(T_e)}{\alpha_e(T_e)}$, $\omega_B = 2\pi f$ — круговая частота радиоизлучения, α_e —

показатель поглощения радиоизлучения. Результаты численного ре-

шения системы (18), (19) при $E(z_e) = 11...33$ кВ/м приведены в табл. 3. Видно, что вблизи нижней границы ионосферы значения σ_{en} составляют 10...40.

Значительный нагрев электронов на границе ионосферы приводит к увеличению $\sigma_{en}(T_e) = \sigma_{en}(T_{e0})(T_e / T_{e0})^{5/6}$ [12, 33], 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. Любое изменение проводимости ионосферной плазмы приводит к вариациям параметров квазистационарных ионосферно-магнитосферных токовых систем [16]. В частности, резкое изменение проводимости плазмы на границе ионосферы в результате возмущения σ_{en} и N приводит к генерации альвеновского импульса [16]. По оценкам при пролете Липецкого тела амплитуда импульса составляла 0.1...1 мВ/м. Как известно, альвеновская волна распространяется вдоль магнитной силовой линии, достигая магнитосферы и магнитосопряженной 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 выпадения электронов в атмосферу и ее дополнительная ионизация [22, 24, 25, 28, 33, 51, 66].

Так могли возникнуть каналы воздействия Липецкого метеороида на магнитосферу.

Возможность фотоионизации. В работах [14, 15] 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 $(1...3) \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$. По оценкам [14, 15] на высоте 105 км мог возникнуть ионизированный след длиной около 100 км с концентрацией N до $2 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Для сравнения укажем, что в ночное время фоновое значение равно $N_0 = (0.3...1) \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$. Тогда $N / N_0 = 6.7...2$. Учитывая, что энергия Липецкого метеороида была примерно на два порядка меньше энергии челябинского космического тела, величина дополнительной ионизации вряд ли превосходила 10^8 м^{-3} . В этом случае $N / N_0 = 0.3...1 \%$, и эффект фотоионизации практического значения не имел, а значит и не генерировались связанные с ним неустойчивости [14, 15].

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

У поверхности Земли плотность акустической энергии и ее плотность потока выражаются формулами

$$p_{ac} = \frac{p^2}{2}, \quad p_{ac} = p_{ac} \cdot s = \frac{p^2}{0.5}$$

Полагая $p = 140$ Па и $\rho_0 = 1.3$ кг/м³, получим $p_{ac} = 50$ Дж/м² с. При площади воздействия ударной волны $S_a = 1000$ км² и длительности воздействия $t_a = 50$ с имеем оценку энергии вызывающей землетрясения ударной волны у поверхности Земли: $E_{ac} = 2.5 \cdot 10^{12}$ Дж. В энергию сейсмических волн E_{sw} переходит около 10^5 энергии ударной волны от приземного взрыва [13]. При этом $E_{sw} = 2.5 \cdot 10^7$ Дж. Такому значению E_{sw} соответствует магнитуда землетрясения M , даваемая соотношением [13]

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

Отсюда $M = 1.7$. Землетрясение с такой магнитудой слабо ощущаются человеком. Добавим, что сейсмические измерения, выполненные на украинских сейсмических станциях, дали значение $M = 1.5...2$.

ЧАСТОТА ПАДЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Частота падения космических тел или интервал времени между падениями T зависит от его энергии. При этом число падающих тел в течение одного года дается известным соотношением [13, 49]:

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

где E_k измеряется в кт ТНТ. При $E_k = 2.8$ кт ТНТ имеем $N_s = 1.46$ год⁻¹. Тогда $T = N_s^{-1} = 0.68$ год = 248 сут.

Следовательно, тела, подобные Липецкому метеороиду, падают на Землю примерно каждые 248 сут. К сожалению, большинство из них не документируется, а значит и не анализируется.

ОБСУЖДЕНИЕ

Падение Липецкого метеороида привело к ряду ощутимых или сильных эффектов во всех геооболочках. Это событие целесообразно сравнить с падением Челябинского тела [1—3, 29, 30, 31, 52, 64, 65].

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 энергия (около 0.44 Мт ТНТ) Челябинского космического тела была достаточно велика, чтобы тело отнеси к малым астероидам.

Эффекты Челябинского метеороида существенно отличались от эффектов, вызванных взрывом липецкого тела. Основных причин две. Первая из них — начальная энергия челябинского тела была более чем

на два порядка больше, чем липецкого. Вторая причина заключается в том, что траектория челябинского тела была пологой ($\approx 18^\circ$). Для Липецкого метеороида $\approx 79^\circ$, поэтому он достиг высот 25...27 км. Зона частичных разрушений при падении челябинского тела составляла около 6000 км^2 [1—3, 17, 32, 52, 64, 65]. Пологая траектория и 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. Если бы траектория Челябинского тела была круче, последствия могли бы быть более значительными.

В случае Липецкого метеороида разрушений не было, так как они возникают при избыточном давлении более 1 кПа. Для липецкого космического тела избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра не превышало 140 Па.

Магнитный эффект тунгусского тела составил огромную величину — около 50...70 нТл [13], что объясняется движением плюма, для которого площадь сечения была более чем 10^6 м^2 , а сила тока $I \approx 3 \cdot 10^4 \text{ А}$. При этом $B \approx 60 \text{ нТл}$. Эта оценка хорошо соответствует результатам наблюдений [9, 13]. В то же время для челябинского тела $B \approx 1 \text{ нТл}$. Примерно такая же величина B , обусловленная модуляцией токовой струи или динамо-эффектом ВГВ, могла быть и для Липецкого метеороида.

Важно, что возмущения, вызванные взрывами и челябинского, и липецкого 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 литосфере, атмосфере, но и в ионосфере, а также в геомагнитном поле [24, 29, 32—35, 43, 45]. Результаты наблюдения эффектов в этих средах для Липецкого метеороида еще предстоит детально проанализировать. Уже сейчас можно утверждать, что при падении достаточно крупных ($d = 1...10 \text{ м}$) космических тел сама природа предоставляет редкую возможность изучения целого комплекса явлений на поверхности Земли, в атмосфере и геокосмосе исследователям разных специальностей. Изучение этого комплекса явлений требует системного подхода к объекту Земля (внутренние оболочки) — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ЗАИМ) [25, 27, 35, 38, 42—44].

ВЫВОДЫ

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

1. Пролет и взрыв Липецкого метеороида вызвал во всех геоболочках заметные (или сильные) возмущения.

2. Пролет липецкого тела сопровождался плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными и акустическими эффектами. Возмущение геомагнитного поля на поверхности Земли вблизи взрыва метеороида могло достигать $1...10$ нТл.

3. Показано, что магнитный эффект турбулентности был незначительным. Магнитный эффект акустико-гравитационных волн, ионосферных токов и тока в следе метеороида мог быть существенным (~ 1 нТл). Эффект внешнего электрического поля мог приводить к кратковременному импульсу тока силой до 10^4 А. Электростатический эффект мог сопровождаться накоплением заряда величиной 1 мКл, напряженностью электрического поля $0.01...1$ МВ/м. Протекание электрического тока в следе могло приводить к излучению электромагнитного импульса в диапазоне частот порядка 10 кГц с напряженностью $1...10$ В/м.

4. Установлено, что электромагнитный эффект инфразвука мог быть существенным ($1...10$ В/м и $1...10$ нТл). Поглощение ударной волны на высотах динамо-области ионосферы ($100...150$ км) могло сопровождаться генерацией вторичных атмосферных гравитационных волн с относительной амплитудой $0.1...1$.

5. Пролет метеороида привел к образованию плазменного следа и к возмущению не только нижней, но и верхней атмосферы.

Заметные возмущения от взрыва и вторичных процессов распространялись по горизонтали на расстояние не менее тысячи километров. По оценкам период вторичных ВГВ составлял $7...14$ мин, а относительная амплитуда — $1...10$ %.

Относительные возмущения концентрации электронов над эпицентром взрыва достигали десятков-сотен процентов.

6. Качественно оценена возможность возникновения электрофонного эффекта, генерации ионного и магнитного звука инфразвуком, а также генерация градиентно-дрейфовой и дрейфово-диссипативной неустойчивостей.

7. Рассмотренные в работе магнитные, электрические и электромагнитные эффекты существенно восполняют пробелы в теории физических эффектов метеороидов в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера.

8. Магнитуда землетрясения, вызванного взрывом липецкого тела, не превышала 1.7 .

9. Космические тела, подобные Липецкому метеороиду, падают на Землю в среднем каждые 248 сут.

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась в рамках госбюджетной НИР учреждений МОН Украины, номер госрегистрации 0119U002538.

1. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П. и др. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* Москва: ФГБУ ИПГ. 2013. 37 с.
2. *Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль. Материалы конференции.* Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). 168 с.
3. *Астрономический вестник.* 2013. 47, № 4. (Тематический выпуск).
4. *Атмосфера. Справочник.* Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
5. Борисов Н. Д., Гуревич А. В., Милих Г. М. *Искусственная ионизированная оболочка в атмосфере.* Москва: ИЗМИРАН. 1985. 184 с.
6. Бронштэн В. А. *Физика метеорных явлений.* Москва: Наука. 1981. 416 с.
7. Бронштэн В. А. Магнитогидродинамический механизм генерации радиоизлучения ярких болидов. *Астрономический вестник.* 1983. 17, № 2. С. 94—98.
8. Бронштэн В. А. Электрические и электромагнитные явления, сопровождающие полет метеоров. *Астрономический вестник.* 1991. 25, № 2. С. 131—144.
9. Бронштэн В. А. Магнитный эффект Тунгусского метеорита. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2002. 42, № 6. С. 854—856.
10. Голицын Г. С., Григорьев Г. Н., 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.
11. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. *Электромагнитные поля и волны.* Москва: Сов. радио. 1971. 664 с.
12. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере.* Москва: Физ.-мат. изд-во. 1973. 272 с.
13. *Катастрофические воздействия космических тел.* Под ред. В. В. Адушкина, И. В. Немчинова. Москва: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
14. 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. Материалы Всероссийского семинара-совещания.* Под редакцией В. В. Адушкина, Г. Г. Кочеряна. ИДГ РАН. Москва: ГЕОС. 2013. С. 41—50.
15. Ковалева И. Х., Ковалев А. Г., Попова О. П. и др. Электромагнитные эффекты, генерируемые в ионосфере Земли при падении метеороида. *Динамические процессы в геосферах. Выпуск 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида: сборник научных трудов ИДГ РАН. Специальный выпуск.* Москва: ГЕОС. 2014. С. 26—48.
16. Ляцкий В. Б. *Токовые системы магнитосферно-ионосферных возмущений.* Ленинград.: Наука. 1978. 199 с.
17. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции* (Редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин). Челябинск. 2014. 694 с.
18. Ольховатов А. Ю. Анализ механизмов генерации электрофонных звуков, сопровождающих болидные явления. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1993. 33, № 2. С. 154—155.
19. Райзер Ю. П. О дискуссии по поводу приобретения электрического потенциала метеоритным телом. *Астрономический вестник.* 2003. 37, № 4. С. 364—366.
20. 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. Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания.* Под ред. В. В. Адушкина, Г. Г.

- Кочеряна. ИДГ РАН. Москва: ГЕОС. 2015. С. 317—326.
21. Сурков В. В. *Электромагнитные эффекты при взрывах и землетрясениях*. Москва: МИФИ. 2000. 448 с.
 22. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. 8, № 1. С. 59—106.
 23. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. *Нелинейный мир*. 2006. 4, № 12. С. 655—697.
 24. Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2. *Нелинейный мир*. 2007. 5, № 4. С. 225—246.
 25. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2008. 528 с.
 26. Черногор Л. Ф. Каналы воздействия вариаций космических и атмосферных факторов на биосферу и человека. *Фізіологічний журнал*. 2010. 56, № 3. С. 25—40.
 27. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. 51, № 1. С. 119—132.
 28. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2012. 556 с.
 29. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4 (18), № 3. С. 47—54.
 30. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.
 31. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доповіді Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
 32. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54, № 5. С. 658—669.
 33. Черногор Л. Ф. *Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2014. 448 с.
 34. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. 55, № 3. С. 370—385.
 35. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела. *Космические исследования*. 2017. Т. 55. № 5. С. 342—352.
 36. Черногор Л. Ф. Электрический и магнитный эффекты инфразвука в атмосфере. *Глобальная электрическая цепь: материалы третьей Всероссийской конференции*. Геофизическая обсерватория «Борок» — филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Ярославль: Филигрань, 2017. С. 11—12.
 37. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 1. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 1. С. 49—70.
 38. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Румынского метеороида. 2. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 2. С. 18—35.
 39. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
 40. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кинематика и физика небес. тел*. 2019. 35, № 4. С. 37—59.
 41. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 2. *Кинематика и физика небес. тел*. 2019. 35, № 5. С. 25—47.

42. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела. *Кинематика и физика небес. тел.* 2014. 30, № 3. С. 27—42.
43. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита “Челябинск”. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2013. 18, № 3. С. 231—243.
44. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. 33, № 6. С. 34—54.
45. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита. *Космічна наука і технологія.* 2013. 19, № 6. С. 38—46.
46. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н. и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. *Радиофизика и радиоастрономия.* 2004. 9, № 2. С. 130—151.
47. Beech M., Brown P., and Jones J. VLF detection of fireballs. *Earth Moon Planets.* 1995. 68. P. 181—188.
48. Beech M., Foschini L. A. A space charge model for electrophonic bursters. *Astron. and Astrophys.* 1999. 345. P. L27—L31.
49. 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.
50. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing.* 2011. 32, № 11. P. 3199—3218.
51. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — atmosphere — geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 2008. 13, № 2. P. 120—137.
52. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite’s passage. *Problems of Atomic Sci. and Technology.* 2013. 86, № 4. P. 136—139.
53. *Infrasound monitoring for atmospheric studies.* Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds.). Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 2010. 734 p.
54. Kaznev V. Y. Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis. *Sol. Sys. Res.* 1994. 28. P. 49—60.
55. Keay C. S. L. Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science.* 1980. 210. P. 11—15.
56. Keay C. S. L. Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. Roy. Astron. Soc. Can.* 1980, 74. P. 253—260.
57. Keay C. S. L. Meteor fireball sounds identified. *Asteroids, Comets, Meteors.* 1991, 1992. P. 297—300.
58. Keay C. S. L. Electrophonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics.* 1992. 27. P. 144—148.
59. Keay C. S. L. Electrophonic Sounds Catalog. *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* 1994. 6. P. 151—172.
60. Keay C. S. L., Cepplecha Z. Rate of observation of electrophonic meteor fireballs. *J. Geophys. Res.* 1994. 99. P. 13,163—13,165.
61. Lizunov G. Stressing of the magnetosphere by earthquakes. *Adv. Space Res.* 2001. 28, № 5. P. 823—827.
62. Pogoreltsev A. I. Production of electromagnetic field disturbances due to the interaction between acoustic gravity waves and the ionospheric plasma. *J.*

- Atmospheric and Terrestrial Phys.* 1996. 58, № 10. P. 1125—1141.
63. Popel S. I. Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body. *Planet. Space Sci.* 1997. 45. № 7. P. 869—875.
64. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 2013. 342. P. 1069—1073.
65. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 145 p.
66. 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*. 2008. P. 19—29.

REFERENCES

1. Alpatov V. V., Burov V. N., Vagin J. P., Galkin K. A., Givishvili G. V., Gluhov J. V., Davidenko D. V., Zubachev D. S., Ivanov V. N., Karhov A. N., Kolomin M. V., Korshunov V. A., Lapshin V. B., Leshenko L. N., Lysenko D. A., Minligareev V. T., Morozova M. A., Perminova E. S., Portnyagin J. I., Rusakov J. S., Stal N. L., Syroeshkin A. V., Tertyshnikov A. V., Tulinov G. F., Chichaeva M. A., Chudnovsky V. S., Shtyrkov A. Y. (2013) *Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013*. M.: FGBU IPG Publ. (in Russian).
2. *Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the lake Chebarkul*. Materials of international scientific practical conference, 21—22 June 2013, Chebarkul. (2013) (In Russian).
3. *Solar System Research*. (2013) 47(4). (Thematical issue). (in Russian).
4. *Atmosphere: A Handbook*. (1991). Leningrad: Gidrometeoizdat. (In Russian).
5. Borisov N. D., Gurevich A. V., Milih G. M. (1985) *Artificially Ionized Region in the Atmosphere*. Moscow: IZMIRAN (In Russian).
6. Bronshten V. A. (1983) *Physics of Meteor Phenomena*. Springer (in Russian).
7. Bronshten V. A. (1983) A magneto-hydrodynamic mechanism for generating radio waves by bright fireballs. *Solar System Res.* 17(2), 70—74.
8. Bronshten V. A. (1991) Electrical and electromagnetic phenomena associated with meteor flight. *Solar System Res.* 25(2), 93—104.
9. Bronshten V. A. (2002) Magnetic effect of the Tungus meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy.* 42(6), 816—818.
10. Golitsyn G. S., Grigoriev G. I., Dokuchaev V. P. (1977) Radiation of acoustic gravity waves during the motion of meteors in the atmosphere. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 13(9). 926—936 (In Russian).
11. Goldshtein L. D., Zernov N. V. (1971) *Electromagnetic fields and waves*, Moscow: Sov. radio. (In Russian).
12. Gurevich A. V., Shvartsburg A. B. (1973) *Nonlinear theory of radio wave propagation in the ionosphere*. Moscow: Nauka. (In Russian).
13. *Catastrophic Impacts of Cosmic Bodies*. (2005) (Eds Adushkin V. V., Nemchinov I. V.). — M.: ECC Akademkniga Publ. 310 p. (in Russian).
14. Kovaleva I. H., Kovalev A. G., Popel S. I., Popova O. P. (2013) The electromagnetic effects generated in the Earth ionosphere during the meteoroid falling. *Triggernyie efekty v geosistemah. Materialy Vserossiyskogo seminara-soveschaniya*. Eds V. V.

- Adushkin, G. G. Kocheryan. Moscow: GEOS. 41—50. (In Russian).
15. Kovaleva I. H., Kovalev A. G., Popova O. P., et al. (2014) The electromagnetic effects generating in the Earth ionosphere during the meteoroid falling. *Dinamicheskiye processy v geosferah. Vypusk 5. Geophysicheskije efekty padeniya Chelyabinskogo meteoroida: sbornik nauchnyh trudov IDG RAN. Special'nyj vypusk*. Moscow: GEOS. 26—48 (In Russian).
 16. Liatskij V. B. (1978) *The Current Systems of the magnetospheric and ionospheric disturbances*. Leningrad: Nauka. (In Russian).
 17. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. (2014). (Ed. Antipin N. A.). Chelyabinsk: Kamennyi poyas Publ. (in Russian).
 18. Ol'khovtsov A. Yu. (1993) The electrophone sounds mechanisms generation analysis that accompany bolide effects. *Geomagnetism and Aeronomy*. 33(2), 154—155 (In Russian).
 19. Raizer Yu. L. (2003) A debate over the acquisition of an electric potential by a meteoroid. *Solar System Research*. 37(4), 333—335.
 20. Soloviev S. P., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A. (2015) The synchronic disturbances of the acoustic and electric fields caused by artificial and natural sources. *Triggernyye efekty v geosistemah. Materialy tretogo Vserossiyskogo seminar-soveshaniya*. Eds V. V. Adushkina, G. G. Kocheryana, Moscow: GEOS. 317—326 (In Russian).
 21. Surkov V. V. (2000) *Electromagnetic effects caused by earthquakes and explosions*. Moscow: MEPhI. (In Russian).
 22. Chernogor L. F. (2003) Physics of Earth, atmosphere, and geospace from the standpoint of system paradigm. *Radiophysika i Radioastronomiya*. 8 (1), 59—106 (In Russian).
 23. Chernogor L. F. (2006) Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere as opened dynamic nonlinear physical system. 1. *Nelinejnyj mir*. 4(12). 655—697 (In Russian).
 24. Chernogor L. F. (2007) Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere as opened dynamic nonlinear physical system. 2. *Nelinejnyj mir*. 5(4). 225—246 (In Russian).
 25. Chernogor L. F. (2008) *On the nonlinearity in nature and science*. Kharkiv: V. N. Karazin National University. (In Russian).
 26. Chernogor L. F. (2010) The ways in which variations in space and tropospheric weather impact the biosphere (humans). *Phyzyologichnyj journal*. 56(3). 25—40 (In Russian).
 27. Chernogor L. F. (2011) Oscillations of the geomagnetic field caused by the flight of Vitim Bolide on September 24, 2002. *Geomagnetism and Aeronomy*. 51(1), 116—130.
 28. Chernogor L. F. (2012) *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University. (In Russian).
 29. Chernogor L. F. (2013) Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Radiophysika i electronica*. 4 (18) (3), 47—54 (In Russian).
 30. Chernogor L. F. (2013) Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Engin. Phys.* 8, 23—40 (In Russian).
 31. Chernogor L. F. (2013) Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 10, 97—104 (In Russian).
 32. Chernogor L. F. (2014) Geomagnetic Field effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54 (5), 613—624.
 33. Chernogor L. F. (2014) *Physics of high-power radio emissions in geospace*. Kharkiv:

- V. N. Karazin National University. (In Russian).
34. Chernogor L. F. (2015) Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 55, No. 3, 353—368.
 35. Chernogor L. F. (2017) Disturbance in the lower ionosphere that accompanied the re-entry of the Chelyabinsk cosmic body. *Cosmic Research*. 55(5). 323—332.
 36. Chernogor L. F. (2017) Infrasound electric and magnetic effects in atmosphere. *Global electric circuit: Proceedings of 3rd All-Russian Conference*. «Borok» geophys. observ. (O. Yu. Shmidt RAS Earth Phys. Inst. filial). Yaroslavl: Filigran, 11—12 (In Russian).
 37. Chernogor L. F. (2018) Physical effects of the Romanian meteoroid. 1. *Space Science and Technology*. 24(1). 49—70 (In Russian).
 38. Chernogor L. F. (2018) Physical effects of the Romanian meteoroid. 2. *Space Science and Technology*. 24(2). 18—35 (In Russian).
 39. Chernogor L. F. (2018) Magnetospheric Effects during the Approach of the Chelyabinsk Meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58(2). 252—265.
 40. Chernogor L. F. (2019) The physical effects of Lipetsk meteoroid. 1. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(4) 37—59.
 41. Chernogor L. F. (2019) The physical effects of Lipetsk meteoroid. 2. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(5). 25—47.
 42. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2014) Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 30(3) 126—136.
 43. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2013) Disturbances in geospace associated with the Chelyabinsk meteorite passage. *Radio Phys. Radio Astron*. 18(3). 231—243 (In Russian).
 44. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. (2017) Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7, 2015. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 33(6). 276—290 .
 45. Chernogor L. F., Milovanov Yu. B., Fedorenko V. N., Tsybal A. M. (2013) Satellite observations of ionospheric disturbances which followed the Chelyabinsk meteorite passage. *Space Science and Technology*. 19 (6), 38—46 (In Russian).
 46. Yampolski Y. M., Zalizovski A. V., Litvinenko L. M., Lizunov G. V., Groves K., Moldwin M. (2004) Magnetic Field Variations in Antarctica and the Conjugate Region (New England) Stimulated by Cyclone Activity. *Radio Phys. Radio Astron*. 9(2). 130—151 (In Russian).
 47. Beech M., Foschini L. A. (1999) A space charge model for electrophonic bursters. *Astron. Astrophys*. 345. L27—L31.
 48. Beech M., Brown P., Jones J. (1995) VLF detection of fireballs. *Earth Moon Planets*. 68, 181—188.
 49. Brown P., Spalding R. E., Re Velle D. O., et al. (2002) The flux of small near-Earth objects colliding with Earth. *Nature*. 420, 294—296.
 50. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth — atmosphere — geospace as an open non-linear dynamical system. *Radio Phys. Radio Astron*. 13(2). 120—137 (2008).
 51. Chernogor L. F. (2011) The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sensing*. 32(11). 3199—3218.
 52. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2013) The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol*. 86(4). 136 — 139.
 53. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. (2010) Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (Eds.). Springer Dordrecht Heidelberg London New York.

54. Kaznev V. Y. (1994) Observational characteristics of electrophonic bolides: Statistical analysis. *Sol. Sys. Res.* 28. 49—60.
55. Keay C. S. L. (1980) Anomalous sounds from the entry of meteor fireballs. *Science*. 210. 11—15.
56. Keay C. S. L. (1980) Audible sounds excited by aurorae and meteor fireballs. *J. Roy. Astron. Soc. Canada*, 74. 253—260.
57. Keay C. S. L. (1991, 1992) Meteor fireball sounds identified. *Asteroids, Comets, Meteors*. 297—300.
58. Keay C. S. L. (1992) Electrophonic sounds from large meteor fireballs. *Meteoritics*. 27. 144—148.
59. Keay C. S. L. (1994) Electrophonic Sounds Catalog. *WGN Obs. Rep. Ser. Int. Meteor. Org.* 6. 151—172.
60. Keay C. S. L., Cepelcha Z. (1994) Rate of observation of electrophonic meteor fireballs. *J. Geophys. Res.* 99. 13163—13165.
61. Lizunov G. (2001) Stressing of the magnetosphere by earthquakes. *Adv. Space Res.* 28(5). 823—827.
62. Pogoreltsev A. I. (1996) Production of electromagnetic field disturbances due to the interaction between acoustic gravity waves and the ionospheric plasma. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.* 58(10). 1125—1141.
63. Popel S. I. (1997) Electromagnetic effects in the Earth's ionosphere and magnetosphere caused by a cosmic body. *Planet. Space Sci.* 45(7). 869—875.
64. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., et al. (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*. 342. 1069—1073.
65. 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.
66. Zalyubovskiy I. I., Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008) The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena. *Space Res. in Ukraine. 2006—2008*. Kyiv, 19—29.

Л. Ф. Черногор

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

ФІЗИЧНІ ЕФЕКТИ ЛИПЕЦЬКОГО МЕТЕОРОЇДА. 3

Проведено комплексне моделювання процесів в усіх геосферах, викликаних падінням і вибухом метеороїда поблизу м. Липецьк (Росія) 21 червня 2018 р. Оцінено магнітні, електричні, електромагнітні, іоносферні та сейсмічні ефекти, а також ефекти акустико-гравітаційних хвиль. Показано, що магнітний ефект турбулентності був незначним. Магнітний ефект іоносферних струмів і струму в сліді метеороїда міг бути істотним (~1 нТл). Ефект зовнішнього електричного поля міг призводити до короткочасного імпульсу струму силою до 10^4 А. Електростатичний ефект міг супроводжуватися накопиченням заряду величиною 1 мКл, напруженістю електричного поля 0.01...1 МВ/м. Протікання електричного струму в сліді могло призводити до випромінювання електромагнітного імпульсу в діапазоні частот 40...80 кГц з напруженістю 1...10 В/м. Встановлено, що електромагнітний ефект інфразвуку міг бути істотним (1...10 В/м і 1...10 нТл). Поглинання ударної хвилі на висотах динамообласті іоносфери (100...150 км) могло супроводжуватися генерацією вторинних ат-

мосферних гравітаційних хвиль з відносною амплітудою 0.1...1. Проліт метеороїда призвів до утворення плазмового сліду, до помітного збурення не лише нижньої, але і верхньої атмосфери на відстанях не менше 1 тис. км. Обговорюється можливість виникнення електрофонного ефекту, генерації іонного та магнітного звуку інфра-звуком, а також генерація градієнтно-дрейфової та дрейфово-дисипативної нестійкостей. Зроблено висновок, що розглянуті в статті магнітні, електричні й електромагнітні ефекти істотно заповнюють прогалини в теорії фізичних ефектів метеороїдів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Магнітуда землетрусу, викликаного вибухом метеороїда, не перевищувала 1.7. Середня частота падіння космічних тіл, подібних до Липецького метеороїда, становить 0.68 рік^{-1} .

Ключові слова: Липецький метеороїд, комплексне моделювання, магнітні ефекти, електричні ефекти, електромагнітні ефекти, іоносферні ефекти, сейсмічні ефекти, акустико-гравітаційні хвилі, акустичні ефекти, плазмовий слід.

L. F. Chernogor

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

THE PHYSICAL EFFECTS OF LIPETSK METEOROID. 3

Comprehensive modeling studies of the processes induced in all geospheres by the passage and explosion of the meteoroid near the city of Lipetsk (Russia) on June 21, 2018 have been conducted. Magnetic, electric, electromagnetic, ionospheric, and seismic effects, the effects of acoustic-gravity waves have been estimated. The magnetic effect of turbulence has been shown to be insignificant. The magnetic effect of the ionospheric currents and the current in the wake of the meteoroid could be substantial ($\sim 1 \text{ nT}$). Under the action of an external electric field, a transient current pulse with the current density up to 10^4 A could occur. The electrostatic effect could be accompanied by the accumulation of an electric charge of 1 mC producing the electric field intensity of $0.01...1 \text{ MV/m}$. The flow of the electric current in the wake of the meteoroid could result in the generation of an electromagnetic pulse in the $40...80 \text{ kHz}$ band with the electric field intensity of $1...10 \text{ V/m}$. The electromagnetic effect of infrasound has been determined to be significant ($1...10 \text{ V/m}$ and $1...10 \text{ nT}$). The absorption of the shock wave at ionospheric dynamo region altitudes ($100...150 \text{ km}$) could generate secondary atmospheric gravity waves with the $0.1...1$ relative amplitude. The passage of the meteoroid acted to produce a plasma wake not only in the lower but also in the upper atmosphere in the range no less than $1,000 \text{ km}$. The possibility of appearing of the electrophonic effect, the generation of the ion and magnetic sound by infrasound, as well as the generation of gradient-drift and drift-dissipative instabilities are discussed. A conclusion is drawn that magnetic, electric, and electromagnetic effects dealt with in this paper appreciably fill up gaps in the theory of physical effects produced by meteoroids in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. The magnitudes of magnetic, electric, electromagnetic, ionospheric, and acoustic effects were significant. The magnitude of the earthquake caused by the meteoroid explosion did not exceeded 1.7. The mean rate of the fall of celestial bodies similar to the Lipetsk meteoroid is equal to 0.68 yr^{-1} .

Key words: Lipetsk meteoroid, complex simulation, magnetic effects, electrical effects, electromagnetic effects, ionospheric effects, seismic effects, acoustic-gravity waves, acoustic effects, plasma trail.

Статья поступила в редакцию 31.03.2019

После доработки 15.05.2019

Принята к публикации 15.05.2019