

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.03.024>

УДК 551.388; 551.525.3; 551.54.541; 551.508.41

Л. Ф. Чорногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
м-н Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

**Фізичні ефекти в атмосфері та геокосмосі,
зумовлені наземними подіями
(на прикладі вибуху у Бейруті 4 серпня 2020 р.).
Результати теоретичного моделювання**

Для вивчення прямих і зворотних, позитивних і негативних зв'язків між підсистемами в системі Земля (внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) проводяться високоенергетичні активні експерименти. Одним із різновидів активних експериментів є вплив на систему ЗАІМ потужним хімічним вибухом. Прикладами можуть служити активні експерименти з використанням хімічних вибухів з енерговиділенням 5 кт ТНТ, 1.5 кт ТНТ і 2 кт ТНТ. Раніше встановлено, що потужний хімічний вибух впливає на всі геосфери, а саме: генерує сейсмічні хвилі в літосфері, електричні збурення, електромагнітне випромінювання, акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) в атмосфері, рухомі іоносферні збурення, МГД-хвилі в навколоземній плазмі. Фізичні ефекти й екологічні наслідки масових хімічних вибухів і супутніх пожеж також вивчалися раніше. Головний висновок цих робіт полягає в тому, що реакція на такий вплив може проявлятися у всіх підсистемах системи ЗАІМ. Метою цієї роботи є описання основних фізичних ефектів в атмосфері та геокосмосі, які супроводжували потужний вибух у м. Бейрут 4 серпня 2020 р. Виконано комплексний аналіз основних фізичних процесів, що супроводжували вибух у м. Бейрут. Встановлено, що маса тротилового еквівалента приблизно дорівнює 1 кт. Більш ніж 90 % енергії вибуху припали на енергію ударної хвилі, а інша енергія пішла на руйнування та викид ґрунту об'ємом близько 40 тис. м³ і масою близько 80 кт. Оцінено розміри та площі зон руйнування. Оцінено горизонтальні розміри тер-

міка (~100 м), швидкість його підйому (~46 м/с) та час підйому (1.6 хв) до максимальної висоти близько 4 км. Оцінено інтенсивність звуку (не менше 76 дБ) від вибуху на відстанях близько 250 км (о. Кіпр). Ударна хвиля, поширюючись вгору, викликала значні збурення в атмосфері та геокосмосі. Відносне збільшення тиску у хвилі на висотах 86...90 км становило десятки відсотків. Дисипація енергії ударної хвилі на висотах понад 80...90 км повинна призвести до нагрівання атмосфери приблизно на 10...20 %, генерації АГХ з відносним надлишком тиску порядку 0.1 та їхньому поширенню на тисячі кілометрів від епіцентру. Вторинні хвилі за рахунок динамо-ефекту могли згенерувати періодичні варіації геомагнітного поля з амплітудою 0.1...0.3 нТл.

Ключові слова: наземний вибух, атмосфера, геокосмос, ударна хвиля, відносне збільшення тиску, термік, електричний ефект, електромагнітний ефект, сейсмічний ефект, результати моделювання.

ВСТУП

Для вивчення прямих і зворотних, позитивних і негативних зв'язків між підсистемами в системі Земля (внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) проводяться високоенергетичні активні експерименти. Одним із різновидів активних експериментів є вплив на систему ЗАІМ потужним хімічним вибухом. Яскравим прикладом такого активного експерименту був спеціальний проект «МАССА» [6, 7, 13, 17]. У результаті реалізації цього проекту було вивчено дію на систему ЗАІМ окремого вибуху з енерговиділенням в 260 т ТНТ. Теоретичні основи фізичних процесів у підсистемах системи ЗАІМ, викликаних потужним хімічним вибухом, були розвинені в роботах [9, 10, 14—16, 18] і книзі [13].

Іншими прикладами можуть служити активні експерименти з використанням хімічних вибухів з енерговиділенням 5 кт ТНТ [39, 40, 44], 2 кт ТНТ [41] і 1.5 кт ТНТ [42].

Установлено, що потужний хімічний вибух впливає на всі геосфери, а саме: генерує сейсмічні хвилі в літосфері, електричні збурення [2—4, 13, 21, 25, 26, 30—36], електромагнітне випромінювання [11, 12, 14], акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) в атмосфері [9], рухомі іоносферні збурення [28, 36], МГД-хвилі в навколоземній плазмі [13].

Реакція навколоземного середовища на масові, але відносно слабкі хімічні вибухи, вивчена недостатньо. Лише окремі роботи присвячено подібним дослідженням. Як відомо, масові вибухи мають місце при кар'єрних розробках корисних копалин [4], протягом військових дій [1, 19, 22, 30, 36], а також при аваріях і катастрофах на військових складах [31—37]. Загальним для всіх цих катастроф було те, що на складах зберігалось близько 100 тис. тонн боєприпасів, вибухи та пожежі тривали по кілька діб.

Фізичні ефекти та екологічні наслідки масових хімічних вибухів і пожеж, які їх супроводжують, обговорюються в роботах [31—37].

Головний висновок цих робіт полягає в тому, що реакція на такий вплив може проявлятися у всіх підсистемах системи ЗАІМ.

Ефектам у навколоземному середовищі, які настали після військових дій в Іраку (1991 р.), Югославії (1999 р.) і у ході операції «Шок і трепет» в Іраку (2003 р.) присвячено роботи [1, 22, 30, 36]. У цих роботах обговорюються ефекти модифікації атмосфери на іоносферних висотах, а також можливі механізми поширення збурень від вибухів на великі висоти.

Метою цієї роботи є описання основних фізичних ефектів у атмосфері та геокосмосі, які супроводжували потужний вибух у м. Бейрут 4 серпня 2020 р.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ВИБУХ

Потужний вибух селітри (нітрату амонію) масою $m_s = 2.75$ кт стався у м. Бейрут, столиці Лівану, 4 серпня 2020 р. о 16:08:18 UT (тут і далі — всесвітній час). Йому передував слабкий вибух. Потужний вибух супроводжувався генерацією та поширенням сильної ударної хвилі (рис. 1), утворенням вирви діаметром 70 м, а також значними руйнуваннями будівель (рис. 2) і пожежами (рис. 3). У ближній зоні (до 1...2 км) спостерігалось повне руйнування будівель, а часткове — аж до відстаней $R = 10$ км. Виник землетрус магнітудою $M = 3.5$ (за даними німецьких сейсмологів) та $M = 4.5$ (за даними іорданських фахівців). Характерний гриб від вибуху піднявся над містом на кілька кілометрів, його було видно на відстані $R = 20...30$ км та більше. Звук великої інтенсивності від вибуху був чутний навіть на о. Кіпр ($R = 250$ км).

Вибух у Бейруті мав дуже значні соціальні наслідки: загинуло 203 людини, поранено понад 7000 осіб, 60 людей зникли безвісти, без житла залишилося близько 300 тис. осіб.

Нанесені збитки склали не менше 15 млрд доларів США.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

Енергія руйнування ґрунту. Під час наземного вибуху виникла вирва діаметром $D = 70$ м. Глибина вирви невідома, оскільки її залило морською водою.

Будемо моделювати вирву параболоїдом обертання з радіусом на поверхні землі $r = D/2$ та глибиною h . Тоді об'єм V і маса M викинутого ґрунту становлять

$$V = \frac{\pi}{2} r^2 h, \quad M = \rho V = \frac{\pi}{2} \rho r^2 h,$$

де $\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³ — щільність ґрунту.



Рис. 1. Повітряна вибухова хвиля



Рис. 2. Приклади руйнувань у м. Бейрут



Рис. 3. Приклади пожеж у м. Бейрут

Енергія, витрачена на дроблення ґрунту, дорівнює

$$E_d = \epsilon_d M,$$

де ϵ_d — питома енергія дроблення.

Енергія, витрачена на викидання ґрунту, становить

$$E_p = Mgh_1,$$

де h_1 — висота викиду. При $gh_1 = \epsilon_d$ маємо $E_p = E_d$.

Результати розрахунку E_d для різних $k = h/r$ та ϵ_d наведено в табл. 1. Видно, що навіть при $h = 1.1r$ енергія E_d не перевищує

Таблиця 1. Залежність енергії (ГДж) руйнування ґрунту від глибини вирви та щільності ґрунту

d , кДж/кг	$k = h/r$						
	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1
1	1.35	4.05	6.75	8.1	9.45	12.15	14.85
2	2.7	8.1	13.5	16.2	18.9	24.3	29.7
3	4.05	12.15	20.25	24.6	28.35	36.45	44.55
5	6.75	20.25	33.75	40.5	47.25	60.75	74.25
7	9.45	28.35	47.25	56.7	66.15	85.05	103.95
10	13.5	40.5	67.5	81	94.5	121.5	148.5

$1.5 \cdot 10^{10} \dots 1.5 \cdot 10^{11}$ Дж. Отже, енергія вибуху E помітно перевищувала E_d .

За даними [23] глибину вирви можна оцінити з емпіричного співвідношення:

$$\tilde{h} = 20 \dots 22 \text{ м/кг}^{1/3}.$$

Тоді при $m = 1$ кг ТНТ маємо $h = 20 \dots 22$ м, а середнє значення становить 21 м. При цьому $k = 0.6$, а E_d не перевищує $8.1 \cdot 10^{10}$ Дж, або 19.4 т ТНТ. При $h = 21$ м маємо $V = 4 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ і $M = 80$ кг.

Оцінка маси тротилового еквівалента. Енергія вибуху. Для оцінки маси тротилового еквівалента та енергії вибуху розрахуємо залежність надлишкового тиску p в ударній хвилі від відстані R та порівняємо його з мінімальним тиском $p_{\min} = 1$ кПа, за якого мають місце часткові руйнування будівель. Для цього скористаємося емпіричною формулою М. А. Садовського для поверхневого вибуху [24, 29]:

$$p = \frac{95}{\tilde{R}} - \frac{390}{\tilde{R}^2} + \frac{1300}{\tilde{R}^3}, \quad (1)$$

де надлишок тиску p вимірюється в кПа, \tilde{R} — приведена відстань

$$\tilde{R} = \frac{R}{m^{1/2}},$$

R — відстань у м, m — маса тротилового еквівалента в кг.

Результати розрахунку наведено в табл. 2.

З даних спостережень відомо, що часткові руйнування мали місце аж до $R = 10$ км. При цьому $p_{\min} = 1$ кПа [29, 43]. Це означає, що маса тротилового еквіваленту $m = 1$ кг (див. табл. 2). При цьому енергія вибуху $E = 1$ кг ТНТ $4.2 \cdot 10^{12}$ Дж, і це значення помітно більше, ніж значення E_d і E_p . Це означає, що більша частина енергії вибуху припадала на енергію вибухової хвилі. При $E_d = 8.1 \cdot 10^{10}$ Дж ефективність руйнування $\eta_d = 2\%$.

Оцінка тротилового еквіваленту селітри $m / m_s = 0.36$.

Таблиця 2. Залежність надлишкового тиску (кПа) від відстані R уздовж земної поверхні та еквівалентної маси m вибухової речовини

m , кг ТНТ	R , км								
	0.1	0.3	1	3	5	7	9	10	11
0.5	971	76.5	10.7	2.8	1.6	1.1	0.9	0.77	0.7
1	1785	123	14.7	3.7	2.1	1.4	1.1	0.96	0.9
1.5	2895	165	18	3.9	2.4	1.7	1.3	1.15	1
2	3381	205	20.8	4.9	2.7	1.9	1.4	1.26	1.1

Параметри ударної хвилі. Зони руйнувань. З табл. 2 видно, що при $R = 100$ м надлишковий тиск був порядку 1 МПа. Зі збільшенням відстані від епіцентру надлишковий тиск досить швидко зменшувався. Розглянемо зміну $p(R)$ при енергії в 1 кг ТНТ, яка здається найбільш імовірною, виходячи зі спостережуваних руйнувань. У табл. 3 приведено результати розрахунку низки параметрів ударної хвилі в залежності від відстані уздовж поверхні Землі. З табл. 2 та 3 видно, що $p = 1$ кПа при $R = 10$ км.

Головними залежностями є залежність надлишкового тиску $p(R)$, а також p/p_0 , де p_0 — незбурений тиск, який приблизно дорівнює 10^5 Па. Крім цих залежностей, розраховано залежності тривалості позитивної фази ударної хвилі [24, 36]:

$$t = 1.7m^{1/6}R^{1/2}$$

(де t_+ — у мс, m — в кг, R — у м), питомого імпульсу позитивної фази

$$I = 540m^{2/3}R^{-1}$$

(де I — в Па с, m — в кг і R — у м), відносної швидкості руху фронту ударної хвилі

$$\frac{u_f}{v_s} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/2},$$

масової швидкості повітря у фронті хвилі

$$\frac{v_f}{v_s} = \frac{p}{(1 - (p/p_0)^{1/2})^{1/2}},$$

відносної щільності повітря за фронтом хвилі

$$\frac{\rho_f}{\rho_0} = \frac{2}{1 - (p/p_0)^{1/2}},$$

тиску швидкісного напору p_h та відносного напору p_h/p_0

$$p_h = p_0 \frac{2}{1 - (p/p_0)^{1/2}}.$$

Таблиця 3. Залежність параметрів ударної хвилі та звуку від відстані уздовж поверхні Землі

R , км	p , Па	p	t , с	I , Па·с	v_f/v_s	u_f/v_s	$f / 0$	p_0 , Па	p_0 / p_0	I_{sv} , дБ	I_s , дБ
0.1	$1.8 \cdot 10^6$	17.85	0.17	540	16.3	34.7	4.6	$3.2 \cdot 10^6$	32	219	179
0.3	$1.2 \cdot 10^5$	1.23	0.29	180	2.05	0.86	1.74	$4.6 \cdot 10^4$	0.46	196	156
1	$1.5 \cdot 10^4$	0.15	0.54	54	1.13	0.11	1.1	800	0.008	178	138
3	3700	0.037	0.94	18	1.016	0.026	1.007	49	$4.9 \cdot 10^{-4}$	163	123
10	960	0.0096	1.7	5.4	1.004	0.0064	1.003	3.3	$3.3 \cdot 10^{-5}$	154	111
25	380	0.0038	2.7	2.2	1.002	0.0027	1.001	0.5	$5.2 \cdot 10^{-6}$	146	106
100	95	$9.5 \cdot 10^{-4}$	5.4	0.54	1	$6.8 \cdot 10^{-4}$	1	0.032	$3.2 \cdot 10^{-7}$	134	94
150	63	$6.3 \cdot 10^{-4}$	6.6	0.36	1	$4.3 \cdot 10^{-4}$	1	0.014	$1.4 \cdot 10^{-7}$	130	90
200	48	$4.8 \cdot 10^{-4}$	7.6	0.27	1	$3.4 \cdot 10^{-4}$	1	0.0082	$8.2 \cdot 10^{-8}$	128	88
250	38	$3.8 \cdot 10^{-4}$	8.5	0.20	1	$2.7 \cdot 10^{-4}$	1	0.0052	$5.2 \cdot 10^{-8}$	126	86

Таблиця 4. Параметри зон руйнування

Зона	p_{\min} , кПа	\tilde{R}_{\max} , м/кг ^{1/3}	R_{\max} , км	S_{\max} , км ²
Повного руйнування	28	6.5	0.65	1.3
Сильного руйнування	10	13	1.3	5.3
Часткового руйнування	1	95	9.5	283

де γ — показник адіабати, v_s — швидкість звуку. Вважалося, що при $p = 20$ const 1.4. Незмінною приймалася й атомна вага повітря.

Розглянемо зони руйнування, ґрунтуючись на емпіричних даних [43]. Будемо вважати, що в зоні повного руйнування $p = 28$ кПа, в зоні сильного руйнування $p = 10...28$ кПа, в зоні часткового руйнування $p = 1...10$ кПа, в зоні окремих пошкоджень $p = 0.1...1$ кПа. У безпечній зоні $p = 50$ Па (табл. 4). Видно, що радіуси перших трьох зон становлять 0.65, 1.3 і 9.5 км, а їхні площі — 1.3, 5.3 і 283 км². Остання площа є порівняною з площею м. Бейрут. Мінімальний радіус повністю безпечної зони становив 950 км.

Ефект терміку. За ствердженнями очевидців, висота гриба від вибуху становила кілька кілометрів. Підтвердимо це розрахунками.

Нагріті до температури $T = 1...2$ тис. К продукти вибуху, які мають діаметр d_e , спливають зі швидкістю v_t . Нагрітий об'єм продуктів зазвичай іменується терміком. Його розмір визначається масою вибухових речовин.

Оцінку d_e можна отримати із співвідношення [36]

$$d_e = 2r_e = m^{1/3},$$

де d_e вимірюється у м, а m — в кг. Для $m = 1$ кт маємо $d_e = 100$ м, $r_e = 50$ м.

Швидкість підйому, яка встановилася, дається наступним співвідношенням [36]:

$$v_t = \sqrt{k_t g r_e},$$

де $k_t = 8(1 - T_0/T)/3C_D$, $T_0 = 300$ К — температура повітря, C_D — коефіцієнт динамічного опору. Для кулі $C_D = 0.5$. Вважаючи $T = 1500$ К, $k_t = 4.3$, $r_e = 50$ м, отримаємо $v_t = 46$ м/с. Час досягнення швидкості v_t дорівнює $v_t/g = 4.6$ с.

Максимальна висота підйому терміку дається рівнянням [20, 36]

$$z_t = 110m^{1/3} \ln \frac{575}{m^{1/3}},$$

де z_t вимірюється у м, а m — в т. При $m = 1$ кт маємо $z_t = 4.4$ км, що цілком відповідає результатам спостережень. При $v_t = 46$ м/с час підйому становить близько 1.6 хвилин, що набагато більше часу становлення швидкості.

Електромагнітні ефекти. Розглянемо спочатку електромагнітний ефект ударної хвилі. В незбурених умовах об'ємна щільність заряду у приземній атмосфері $\rho_e = 10^{-9}$ Кл/м³ [8]. Оскільки заряджений компонент є малою домішкою, то у фронті ударної хвилі має місце збільшення щільності об'ємного заряду

$$\rho_e = \rho_{e0} \cdot \rho^*$$

Наприклад, при значеннях $R = 0.1$ км і $\rho^* = 18$ (див. табл. 3) маємо $\rho_e = 1.8 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³. З рівняння Максвелла

$$\operatorname{div} \mathbf{E}_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0}$$

отримаємо оцінку величини напруженості електричного поля

$$E_e = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} L_f,$$

де ϵ_0 — електрична стала, L_f — відстань від епіцентру до фронту ударної хвилі. При $\rho_e = 1.8 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³ та $L_f = 100$ м маємо E_e

0.2 МВ/м. При збільшенні R значення E_e спочатку достатньо швидко зменшується (спочатку пропорційно R^{-2} , а потім — R^{-1}), а далі й зовсім перестав залежати від R .

Знаючи швидкість фронту ударної хвилі та пройденої відстань, можна оцінити час поширення хвилі t_0 . Значення t_0 можна обчислити, якщо скористатися автомоделним розв'язком для точкового заряду. При характерному розмірі маси вибухової речовини $R_0 = 10$ м на відстанях $R = 100$ м можна вважати заряд точковим. Тоді відстань, пройденої ударною хвилею за час t , дорівнюватиме

$$R = \frac{Et^2}{\epsilon_0}^{1/5}.$$

Звідси

$$t = \sqrt[5]{\frac{\epsilon_0 R^5}{E}}.$$

Припускаючи, наприклад, що $E = 1$ кт ТНТ $= 4.2 \cdot 10^{12}$ Дж, $\epsilon_0 = 1.3$ кг/м³, $R = 0.3$ км, отримаємо інтервал часу $t = 0.9$ с.

Процес поширення ударної хвилі є суто нестационарним, тому $E_e(t)$, а значить і електричний ефект, супроводжується магнітним ефектом. Із рівняння Максвелла

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} = \frac{d\mathbf{D}}{dt},$$

де μ_0 — магнітна стала, \mathbf{j} — щільність стороннього струму, \mathbf{D} — індукція електричного поля, маємо співвідношення для оцінки магнітного ефекту при $\mathbf{j} = 0$, $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}_e$

$$B = \frac{E_e L_f}{c^2}.$$

Припускаючи $E_e = 0.2$ МВ/м, $L_f = 100$ м, $t = 0.06$ с, отримаємо $B = 3.7$ нТл. При збільшенні R величина $B(R)$ зменшується помітно швидше, ніж $E_e(R)$. Це пов'язано зі швидким зростанням $R^{5/2}$. Далі оцінимо електромагнітний ефект вибуху. Продукти вибуху — це слабо іонізована плазма з температурою 3...5 тис. К. Плазмові процеси породжують електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні частот [11, 12]. Одночасно з ним генеруються квазістаціонарні електричні та магнітні поля. Причиною появи електричного поля є рознесення заряду. Відомо, що продукти вибуху заряджаються позитивно, а частинки пилу — негативно. Форма імпульсу $E_e(t)$ — дипольна. Тривалість — негативного викиду визначається часом виникнення та розвитку купола, тобто часом поширення ударної хвилі та часом спливання продуктів вибуху. Амплітуда негативного викиду дається співвідношенням, справедливим для ідеально провідної землі [3, 30, 32, 36]:

$$E_e = \frac{q_e h}{2 \epsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}},$$

де h — ефективна висота розташування заряду q_e . При $R = 0$, тобто над епіцентром вибуху,

$$E_e = \frac{q_e}{2 \epsilon_0 h^2}.$$

Для наземного вибуху [2, 25, 26]

$$q_e = k_e m^{1/2},$$

де $k_e = 6 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг^{1/2} [2, 3, 25, 26, 36], m — в кг. У середньому $k_e = 10^{-4}$ Кл/кг^{1/2}. При $m = 1$ кт маємо $q_e = 0.1$ Кл. Тоді при $h = 10^2 \dots 10^3$ м отримаємо, що $E_e = 1.8 \cdot 10^2 \dots 1.8 \cdot 10^4$ В/м.

Тривалість позитивного сплеску визначається часом релаксації заряду, який відрховується після осідання купола пилу. Тривалість можна оцінити з емпіричної формули [2, 3]:

$$k_{e1} m^{0.2},$$

де τ — в с, $k_{e1} = 50$ с кг^{-0.2}, m — в кг. При $m = 1$ кт маємо $\tau = 800$ с.

Наприклад, при $E_e = 1.8 \cdot 10^2 \dots 1.8 \cdot 10^4$ В/м, $h = 10^3$ м та $\tau = 1$ с маємо $B = 2 \dots 200$ пТл. Протягом позитивного сплеску значення B істотно менше.

Як видно з викладеного, описаний механізм не належить до ефективних. Більш ефективним є електромагнітний ефект ударної хвилі.

Звуковий ефект. Інтенсивність ударної хвилі:

$$I_{sw} = 20 \lg \frac{P}{P_s},$$

де $P_s = 50$ мкПа — рівень відліку.

Як впливає з табл. 3, надлишковий тиск при збільшенні відстані від 0.1 до 250 км зменшується від 1.8 МПа до 38 Па, P — від 17.85 до $3.8 \cdot 10^{-4}$, t — збільшується від 0.17 до 8.5 с, I змінюється у межах від 540 до 0.20 Па с, а I_{sw} зменшується від 219 до 126 дБ.

Як показали спостереження, сильний звук від вибуху у м. Бейрут був чутний на о. Кіпр ($R = 250$ км). Підтвердимо це розрахунками. Як видно з табл. 3, інтенсивність ударної хвилі без урахування загасання в районі о. Кіпр досягала 126 дБ. Така інтенсивність властива злітаючому великому реактивному літаку. Інтенсивність I_{sw} стосується ударної хвилі, основна енергія якої припадає на інфразвук, оскільки t

0.5...8.5 с (див. табл. 3). Енергія звуку не перевищує 1 % від енергії ударної хвилі. При цьому інтенсивність звуку I_s приблизно на 40 дБ менше, ніж I_{sw} (див. табл. 3). На відстані $R = 250$ км інтенсивність I_s

86 дБ. Такий звук створює велика вантажівка під час руху. Таким чином, розрахунки підтверджують той факт, що жителі о. Кіпр могли чути сильний звук від вибуху в Бейруті.

Збурення в атмосфері та геокосмосі. Спочатку оцінимо тиск в ударній хвилі. Розглянемо висотну залежність $p(z)$.

Із формули М. А. Садовського (1) випливає, що при $z = z_0 = 5$ км у співвідношенні можна зберегти лише перший доданок, тобто

$$p = \frac{95}{\bar{R}} = \frac{95}{z} m^{1/3}. \quad (2)$$

Оскільки $m^{1/3} = 100 \text{ кг}^{1/3}$, то

$$p = \frac{9.5 \cdot 10^3}{z}, \quad (3)$$

де p вимірюється в кПа, а z — у метрах. Якщо z вимірювати в кілометрах, то

$$p = \frac{9.5}{z}. \quad (4)$$

Наприклад, при $z_0 = 5$ км маємо $p(z_0) = 1.9$ кПа.

Введемо відносний надлишок тиску у хвилі

$$p = \frac{P}{P_0},$$

де P_0 — незбурений тиск на даній висоті z . Відомо [36], що

$$p_p(z) = p_p(z_0) \frac{z_0}{z} A(z), \quad (5)$$

де фактор посилення дорівнює

$$A(z) = \exp \int_{z_0}^z \frac{dz}{2H(z)},$$

$H(z)$ — висота однорідної атмосфери, яка залежить від температури $T(z)$ та маси $M_n(z)$ молекул, а саме

$$H(z) = \frac{k_B T(z)}{M_n(z)g(z)},$$

k_B — стала Больцмана, g — прискорення вільного падіння. Зауважимо, що поява фактора посилення пов'язана з законом збереження густини енергії в хвилі в атмосфері з експоненційним законом зміни $p_0(z)$.

Залежність $p_p(z)$ описує сферичну розбіжність хвилі, а множник $A(z)$ — посилення p_p за рахунок падіння $p(z)$ при збільшенні висоти. Поблизу висоти z_0 $A(z) \approx 1$, і $p_p(z)$ зменшується, на великих висотах у співвідношенні (5) переважає множник $A(z)$, і $p_p(z)$ поступово збільшується.

Результати розрахунку $p_p(z)$ наведено в табл. 5. При обчисленні $A(z)$ використовувалася типова модель нейтральної атмосфери [8]. Видно, що $A(z)$ швидко збільшується зі збільшенням висоти. Значення p_p спочатку зменшуються, досягають мінімуму на висоті близько 10 км, а потім збільшуються. На висоті $z = 10$ км $p_p = 0.014$.

Нагрівання атмосфери. На висотах $z > 85 \dots 90$ км починають позначатися втрати енергії хвилі, які не враховуються співвідношенням (5). Справа в тому, що при $p_p > 0.3 \dots 0.4$ стає істотним нелінійний

Таблиця 5. Висотна залежність параметрів атмосфери ударної хвилі

z , км	p_0 , Па	A	p_p	p , Па
5	$5 \cdot 10^4$	1	0.019	950
15	$1.2 \cdot 10^4$	2.3	0.015	180
25	2200	4.8	0.018	50
35	700	10	0.027	19
45	160	24	0.051	8.2
55	40	50	0.086	3.4
65	9	102	0.15	1.4
75	3	180	0.23	0.70
85	1	320	0.36	0.36
95	0.7	550	0.55	0.17
105	0.07	103	0.90	0.063
115	0.02	2400	2.0	0.04

ефект збільшення крутизни профілю ударної хвилі, яка знову стає сильною. Спектр хвильового процесу починає збагачуватися вищими гармоніками, які швидше, ніж низькочастотні гармоніки, поглинаються в атмосфері. Ударна хвиля поступово загасає, а її енергія перетворюється в тепло. Атмосферний газ нагрівається. Відволікаючись від розгляду перехідних процесів, оцінимо ступінь нагріву атмосфери ударною хвилею.

У стаціонарному випадку відносна зміна температури

$$\frac{T}{T_0} = \frac{a}{T}, \quad (6)$$

де T_0 — незбурена температура,

$$a = \frac{p^2}{\rho_0 v_s^2} = \frac{p^2}{\rho_0 v_s^2} = \frac{p^2}{\rho_0 v_s^2}, \quad (7)$$

$$T = C_0 T_0, \quad (8)$$

a і T — густини акустичної та теплової енергії, ρ_0 — щільність повітря на даній висоті, v_s — швидкість звуку, γ — показник адіабати, C — питома теплоємність газу при постійному тиску.

З (6) з урахуванням (7) та (8) маємо

$$\frac{T}{T_0} = \frac{p^2}{C T_0} = \frac{p^2}{C M_n}, \quad (9)$$

Для висот 90...120 км $M_n = 4.9 \cdot 10^{-26}$ кг. Тоді з (9) для $C = 10^3$ Дж/(кг К) маємо:

$$\frac{T}{T_0} = 0.28 \frac{p^2}{\rho_0}. \quad (10)$$

Наприклад, при $\rho_0 = 1$ отримаємо $T/T_0 = 0.28$.

Генерація акустико-гравітаційних хвиль. Нагрівання основи термосфери може призвести до генерації атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ), які поширюються з незначним загасанням, огинаючи Землю на відстані $R = 3000...5000$ км. При цьому відносний тиск у АГХ $p = T/T_0$. АГХ модулює з таким же періодом концентрацію електронів N , яка є малою домішкою в нижній і середній іоносфері ($z = 400...500$ км).

Далі оцінимо довжину хвилі та період АГХ. Нагріту ударною хвилею область видно з поверхні Землі під кутом 2θ , де дається співвідношенням

$$\cos \theta = \frac{z_1}{z_2}.$$

Тут z_1 і z_2 — висоти початку та закінчення нагріву. При $z_1 = 80$ км і z_2

110 км маємо $\theta = 43^\circ = 0.76$ рад. Горизонтальний радіус змінюється у межах від r_1 до r_2 , де

$$r_1 = z_1 \operatorname{tg} 75^\circ \text{ км}, \quad r_2 = z_2 \operatorname{tg} 103^\circ \text{ км}.$$

При цьому максимальна довжина хвилі АГХ змінюється у межах від $2r_1 = 150$ км до $2r_2 = 206$ км, тобто $150 \dots 206$ км. При швидкості АГХ $v_a = 300$ м/с маємо їхній період $T = 500 \dots 680$ с $\approx 8 \dots 11$ хв. Можлива також генерація АГХ з $\lambda_1 = \lambda/2$ та $T_1 = 250 \dots 340$ с $\approx 4 \dots 6$ хв та інші більш високочастотні складові.

Магнітний ефект АГХ. АГХ за рахунок динамо-ефекту генерує електричний струм щільністю

$$j = eNv_w,$$

де e — заряд електрона, v_w — швидкість частинок у полі АГХ. На висотах $80 \dots 110$ км у вечірній час у м. Бейрут $N = 10^9 \dots 10^{11} \text{ м}^{-3}$. При $v_w = 1$ м/с маємо $j = 1.6 \cdot 10^{-10} \dots 1.6 \cdot 10^{-8} \text{ А/м}^2$. Якщо ж $v_w = 10$ м/с, тоді $j = 1.6 \cdot 10^{-9} \dots 1.6 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2$. Іоносферний струм, створений АГХ, викликає періодичні варіації геомагнітного поля, які можна оцінити, виходячи з роторного рівняння Максвела. Ця оцінка має вигляд [36]:

$$B = \mu_0 j z,$$

де z — товщина області зі струмом, наведеним АГХ, μ_0 — магнітна стала. Наприклад, при $j = 10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ А/м}^2$ та $z = 10$ км маємо $B = 0.1 \dots 1.3$ нТл. Такий магнітний ефект легко реєструється магнітометрами.

Можливість генерації альвенівського імпульсу та МГД-хвиль. Нагрівання атмосфери над областю вибуху призводить до нагрівання іоносферної плазми, яка є малою домішкою, а значить до локального (з горизонтальним розміром $150 \dots 210$ км) збурення провідності іоносферної плазми. Останнє є джерелом альвенівського імпульсу, який поширюється аж до магнітоспряженої області, та МГД-хвиль.

Сейсмічний ефект. Згідно із спостереженнями сейсмологів у Німеччині, магнітуда землетрусу $M = 3.5$, за даними фахівців з Іордану $M = 4.5$. Перевіримо, який результат був ближчим до дійсності.

За даними [23, 38] при контактному вибуху сейсмічна ефективність, яка дорівнює відношенню енергії E_s сейсмічних хвиль до енергії E вибуху, досягає $\eta_s = (1 \dots 3) \cdot 10^{-3}$. Будемо вважати, що середнє значення $\eta_s = 1.8 \cdot 10^{-3}$. Енергію E_s знайдемо із співвідношення [5, 27]

$$\lg E_s = \frac{3}{2} M - 4.8, \quad (11)$$

де E_s вимірюється в джоулях. При $M = 3.5$ з (11) маємо значення E_s

$1.1 \cdot 10^{10}$ Дж. Тоді при $\eta_s = (2 \dots 3) \cdot 10^{-3}$ отримаємо значення $E = (5.5 \dots 3.7) \cdot 10^{12}$ Дж $\approx 1.3 \dots 0.9$ кт ТНТ і середнє значення $E = 1.1 \pm 0.2$ кт ТНТ. Це значення є дуже близьким до значення $E = 1$ кт ТНТ, отриманого з даних спостережень руйнувань.

Якщо покласти, що $M = 4.5$, то $E_s = 3.5 \cdot 10^{11}$ Дж. При тому ж s маємо $E = (1.75...1.17) \cdot 10^{14}$ Дж $\approx 42...29$ кт ТНТ. Дана оцінка не узгоджується з масою селітри (2.75 кт) і її тротиловою ефективністю 0.36.

ОБГОВОРЕННЯ

Енергетика процесів. Руйнування. Проведені розрахунки показали, що в результаті вибуху утворилася вирва радіусом 35 м і глибиною близько 21 м. При цьому об'єм викинутого ґрунту склав близько 40 тис. м³, а його маса — 80 кт, зокрема маса пилу порядку 10 кт. На руйнування ґрунту та його викидання витрачено кілька відсотків енергії вибуху.

Виходячи з розрахунків зони та ступеня руйнувань, оцінено тротиловий еквівалент селітри, яка вибухнула. Він склав приблизно 1 кт ТНТ або $4.2 \cdot 10^{12}$ Дж. При цьому вибухова здатність селітри була близько 36 % від вибухової здатності тротилу. Вибух викликав землетрус магнітудою близько 3.5. Розрахунковим шляхом підтверджено, що звуки від вибуху були чутні на о. Кіпр. Без урахування загасання звуку його інтенсивність становила понад 80 дБ.

Основна енергія від вибуху виділилася у вигляді ударної хвилі. Вона спричинила повні руйнування в зоні радіусом близько 0.65 км, сильні руйнування в зоні радіусом близько 1.3 км, а також часткові руйнування в зоні радіусом 10 км. Безпечна зона лежала на відстанях в багато десятків кілометрів від епіцентру.

Ефект терміку. Згідно з проведеними розрахунками, продукти вибуху (термік) з горизонтальним розміром близько 100 м піднімалися над епіцентром зі швидкістю 46 м/с та досягли максимальної висоти, близької до 4.4 км, приблизно за 1.6 хв. Оцінена висота терміка («гриба») відповідає результатам спостережень. Разом з терміком у атмосферу було закинуто приблизно 10 кт пилу.

Звуковий ефект. Без урахування загасання інтенсивність звуку на відстані 250 км (о. Кіпр) дорівнювала близько 86 дБ. Якщо загасання становило навіть 10 дБ, інтенсивність звуку в 76 дБ для мешканців о. Кіпр була досить сильною, що й підтверджують свідки.

Ефекти в атмосфері та геокосмосі. Поширюючись угору, ударна хвиля викликала значні збурення в атмосфері та навіть у геокосмосі. Як видно з табл. 5, відносний тиск у хвилі спочатку зменшувався до висоти близько 10 км, а потім досить швидко збільшувався. На границі термосфери він без урахування втрат був близьким до одиниці. Дисипація сильної ударної хвилі через вплив нелінійного ефекту збільшення крутизни профілю хвилі призвела до нагрівання атмосферного газу на висотах понад 85...90 км. Відносне збільшення температури атмосфери становило кілька десятків відсотків. Розмір збуреної області по горизонталі був не меншим за 150...200 км, а по вер-

тикалі — десятки кілометрів. Нагрітий об'єм послужив джерелом вторинних хвиль, а саме АГХ з періодами 8...11 хв і менше, які здатні поширюватися на багато тисяч кілометрів від джерела.

Нагрітий об'єм слабо іонізованої іоносферної плазми також є джерелом електродинамічних процесів, супроводжуваних генерацією альвенівського імпульсу та МГД-хвиль.

Вторинні хвилі за рахунок динамо-ефекту генерують періодичні варіації геомагнітного поля з амплітудою 0.1...0.3 нТл.

Сейсмічний ефект. Вибух також згенерував сейсмічні хвилі. Як показали розрахунки, магнітуда землетрусу була близько 3.5. При цьому сейсмічна ефективність становила 0.002...0.003. Йорданська оцінка $M = 4.5$ видається сильно завищеною.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Виконано комплексний аналіз основних фізичних процесів, що супроводжували вибух у м. Бейрут, і отримано такі результати.

1. Маса тротилового еквівалента приблизно дорівнює 1 кт.
2. Понад 90 % енергії вибуху припадали на енергію ударної хвилі, а інша частина енергії пішла на руйнування та викидання ґрунту об'ємом близько 40 тис. м³ і масою близько 80 кт.
3. Оцінено розміри та площі зон руйнування.
4. Оцінено горизонтальні розміри терміку (~ 100 м), швидкість його підйому (~ 46 м/с) та час підйому (1.6 хв) до максимальної висоти близько 4 км.
5. Оцінено інтенсивність звуку (не менше 76 дБ) від вибуху на відстанях близько 250 км (о. Кіпр).
6. Ударна хвиля, поширюючись угору, викликала значні збурення в атмосфері та геокосмосі. Відносне збільшення тиску у хвилі на висотах вище 86...90 км становило десятки відсотків.
7. Дисипація енергії ударної хвилі на висотах більше 80...90 км повинна призвести до нагрівання атмосфери приблизно на 10...20 %, генерації АГХ з $\nu_p \sim 0.1$ та їхнього поширення на тисячі кілометрів від епіцентру. Вторинні хвилі за рахунок динамо-ефекту могли згенерувати періодичні варіації геомагнітного поля з амплітудою 0.1...0.3 нТл.

Дослідження Чорногора Л. Ф. виконано в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»). Також робота Чорногора Л. Ф. була частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0118U002039, 0119U002538).

1. Адушкин В. В., Горелый К. И. Доплеровское зондирование ионосферы над Югославией во время военных действий в Косово. *ДАН*. 2000. 373. № 6. С. 87—89.
2. Адушкин В. В., Соловьев С. П. Возмущения электрического поля атмосферы в ближней зоне подземного взрыва. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1989. № 3. С. 51—59.
3. Адушкин В. В., Соловьев С. П., Сурков В. В. Электрическое поле, возникающее при взрыве на выброс. *Физика горения и взрыва*. 1990. 26. № 4. С. 117—121.
4. Адушкин В. В., Спивак А. А., Соловьев С. П., Перник Л. М., Кишкина С. Б. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2000. № 6. С. 554—563.
5. Аки К., Ричардс П. *Количественная сейсмология*. М.: Мир, 1983. 880 с.
6. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Дробжев В. И., Троицкая В. А., Федорович Г. В. Проект МАССА исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 5—8.
7. Альперович Л. С., Пономарев Е. А., Федорович Г. В. Моделируемые взрывом геофизические явления (Обзор). *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 9—20.
8. *Атмосфера. Справочник*. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.
9. Ахмедов Р. Р., Куницын В. Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004. 44. № 1. С. 105—112.
10. Борисов Н. Д., Моисеев Б. С. Возбуждение МГД возмущений в ионосфере волной Рэлея. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1989. 29. № 4. С. 614—620.
11. Боронин А. П., Капинос В. Н., Кренев С. А., Минеев В. Н. О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Обзор литературы. *Физика горения и взрыва*. 1990. 26. № 5. С. 110—116.
12. Боронин А. П., Капинос В. Н., Кренев С. А., Минеев В. Н. О физическом механизме генерации электромагнитного поля при взрыве зарядов конденсированного ВВ. Результаты экспериментальных исследований. *Физика горения и взрыва*. 1990. 26. № 5. С. 117—123.
13. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. *Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу*. М.: Наука, 2008. 295 с.
14. Данилов А. В., Довженко В. А. О возбуждении электромагнитных полей при вхождении акустических импульсов в ионосферу. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1987. 27. № 5. С. 772—777.
15. Девятериков И. А., Иванов Е. А., Козлов С. И., Кудрявцев В. П. О поведении заряженных частиц в нижней ионосфере при акустическом воздействии. *Космические исследования*. 1984. 22. № 2. С. 238—242.
16. Дробжева Я. И., Краснов В. М. Пространственная структура поля акустических волн в атмосфере от «точечного взрыва». *Акустический журнал*. 2001. 47. № 5. С. 641—649.
17. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. (Специальный выпуск). 1985. № 11.
18. Китов И. О. Сейсмические и акустические эффекты взрыва в геофизической среде: Диссертация ... доктора физ.-мат. наук. М.: Институт динамики геосфер РАН, 1995. 256 с.
19. Николаев А. В., Жигалин А. Д. Геоэкологические аспекты военной деятельности. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2003. № 1. С. 23—31.

20. Онуфриев А. Т. Теория движения вихревого кольца под действием силы тяжести. Подъем облака атомного взрыва. *ПМТФ*. 1967. № 2. С. 3—15.
21. Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. О генерации электрических волн в верхней атмосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1990. 30. № 5. С. 869—871.
22. Похотелов О. А., Липеровский В. А., Фомичев Ю. П., Рубцов Л. Н., Алимов О. А., Шарадзе З. С., Липеровская Р. Х. Модификация ионосферы во время военных действий в зоне Персидского залива. *ДАН*. 1991. 321. № 6. С. 1168—1172.
23. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Ромашов А. Н., Цветков В. М. *Механический эффект подземного взрыва*. М.: Недра, 1971. 354 с.
24. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн. *Физика взрыва*. 1952. № 1. С. 20—110.
25. Соловьев С. П., Сурков В. В. Электрические возмущения в приземном слое атмосферы, обусловленные воздушной ударной волной. *Физика горения и взрыва*. 1994. 30. № 1. С. 117—121.
26. Соловьев С. П., Сурков В. В. Электростатическое поле и молнии, возникающие в газопылевом облаке продуктов взрыва. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2000. 40. № 1. С. 68—76.
27. Стейси Ф. *Физика Земли*. М.: Мир, 1972. 342 с.
28. Таран В. И., Подъячий Ю. И., Смирнов А. Н., Герштейн Л. Я. Возмущения ионосферы после наземного взрыва по наблюдениям метода некогерентного рассеяния. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1985. № 11. С. 75—79.
29. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. *Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов*. М.: Недра, 1981. 192 с.
30. Черногор Л. Ф. Физические процессы в околоземной среде, сопровождавшие военные действия в Ираке (март—апрель 2003 г.). *Космічна наука і технологія*. 2003. 9. № 2/3. С. 13—33.
31. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах — источник экологических катастроф в Украине. *Экология и ресурсы*. 2004. № 10. С. 55—67.
32. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и геоэкологические последствия массовых химических взрывов на военных складах в г. Артемовске. *Геофизический журнал*. 2004. 26. № 4. С. 31—44.
33. Черногор Л. Ф. Геофизические эффекты и экологические последствия пожара и взрывов на военной базе вблизи г. Мелитополь. *Геофизический журнал*. 2004. 26. № 6. С. 61—73.
34. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2006. № 6. С. 522—535.
35. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 4. С. 359—369.
36. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
37. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Магнито-ионосферные эффекты, сопровождавшие сильнейшую техногенную катастрофу. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58. № 5. С. 700—712.
38. Шишкин Н. И. Сейсмическая эффективность контактного взрыва и высокоскоростного удара. *Прикладная механика и техническая физика*. 2007. 42. № 2. С. 3—12.

39. Blanc E., Jacobson A. R. Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion. 2. Prolongated anomalies and stratifications in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* 1989. 24. № 6. P. 739—746.
40. Blanc E., Rickel D. Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source. *Radio Sci.* 1989. 24. № 3. P. 279—288.
41. Calais E., Minster B. J., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. J. Inter.* 1998. 132. № 1. P. 191—202.
42. Fitzgerald T. J. Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. 59. № 7. P. 829—834.
43. Glasstone S., Dolan P. J. *Effects of nuclear weapons*. Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy, 1977. 653 p.
44. Jacobson A. R., Carlos R. C., Blanc E. Observation of ionospheric disturbances following a 5 kt chemical explosion. 1. Persistent oscillation in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* 1988. 23. P. 820—830.

REFERENCES

1. Adushkin V. V., Gorelyi K. I. (2000). Doppler sounding of the ionosphere above Yugoslavia during military operations in Kosovo. *Dokl. Earth Sci.* 373(5), 882—884.
2. Adushkin V. V., Solov'ev S. P. (1989). Perturbations of atmospheric electric field in the near zone of an underground explosion. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. Zemli.* (3), 51—59 (In Russian).
3. Adushkin V. V., Solov'ev S. P., Surkov V. V. (1990). Electric field arising during ejection explosion. *Combust., Explos. Shock Waves.* 26(4), 478—482. <https://doi.org/10.1007/BF00745095>
4. Adushkin V. V., Spivak A. A., Solov'ev S. P., Pernik L. M., Kishkina S. B. (2000). Geoeological consequences of mass chemical explosions on careers. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology.* (6), 554—563 (In Russian).
5. Aki K., Richards P. G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. W. H. Freeman and Co., 948.
6. Al'perovich L. S., Gokhberg M. B., Drobzhev V. I., Troitskaya V. A., Fedorovich G. V. (1985). MASSA — A project for studying the magnetosphere—atmosphere coupling during seismoacoustic phenomena. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. Zemli.* (11), 5—8.
7. Al'perovich L. S., Ponomarev E. A., Fedorovich G. V. (1985). Geophysical phenomena modeling by an explosion: a review. *Izv. AN SSSR. Earth Physics.* (11), 9—20 (in Russian).
8. *Atmosphere: A Handbook*. (1991). Leningrad: Gidrometeoizdat. 510 in Russian].
9. Akhmedov R. R., Kunitsyn V. E. (2004). Simulation of the ionospheric disturbances caused by earthquakes and explosions. *Geomagn. Aeron.* 44(1), 95—101.
10. Borisov N. D., Moiseev B. S. (1989). Generation of MHD disturbances in the ionosphere by a Rayleigh wave. *Geomagn. Aeron.* 29(4), 614—620 (In Russian).
11. Boronin A. P., Kapinos V. N., Krenev S. A., Mineev V. N. (1990). Physical mechanism of electromagnetic field generation during the explosion of condensed explosive charges. Survey of literature. *Combust., Explos. Shock Waves.* 26(5), 597—602. <https://doi.org/10.1007/BF00843137>
12. Boronin A. P., Kapinos V. N., Krenev S. A., Mineev V. N. (1990). Physical mechanism

- of electromagnetic field generation with explosion of condensed explosive charges. Results of experimental studies. *Combust., Explos. Shock Waves*. 26(5), 603—609. <https://doi.org/10.1007/BF00843138>
13. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (2008). *Influence of Earthquakes and Explosions on the Ionosphere*. Moscow: Nauka, 295 (In Russian).
14. Danilov A. V., Dovzhenko V. A. (1987). Excitation of electromagnetic fields by acoustic pulses entering the ionosphere. *Geomagn. Aeron.* 27(5), 772—777 (In Russian).
15. Devyaterikov I. A., Ivanov E. A., Kozlov S. I., Kudryavtsev V. P. (1984). Behavior of charged particles in lower ionosphere with acoustical effects. *Kosm. Issled.* 22(2), 238—242 (In Russian).
16. Drobzheva Ya. I., Krasnov V. M. (2001). The spatial structure of the acoustic wave field generated in the atmosphere by a point explosion. *Acoust. Phys.* 47(5), 556—564. <https://doi.org/10.1134/1.1403545>
17. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. Zemli* (Thematical Issue). (1985) (11).
18. Kitov I. O. (1995) Seismic and acoustic effects of explosions in the geophysical environment. Doctoral (Phys.—Math.) Dissertation. Moscow: Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, 256 (In Russian).
19. Nikolaev A. V., Zhigalin A. D. (2003). Geoenvironmental aspects of military operations. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. (1), 23—31 (In Russian).
20. Onufriev A. T. (1967). Theory of the motion of a vortex ring under gravity. Rise of the cloud from a nuclear explosion. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 8, 1—7. <https://doi.org/10.1007/BF00918021>
21. Polyakov S. V., Rapoport V. O., Trakhtengerts V. Yu. (1990). Generation of electric waves in the upper atmosphere. *Geomagn. Aeron.* 30(5), 869—871 (In Russian).
22. Pokhotelov O. A., Liperovskii V. A., Fomichev Yu. P., Rubtsov L. N., Alimov O. A., Sharadze Z. S., Liperovskaya R. Kh. (1991). Modification of the ionosphere during military actions in the Persian Gulf region. *Dokl. Akad. Nauk.* 321(6), 1168—1172 (In Russian).
23. Rodionov V. N., Adushkin V. V., Kostyuchenko V. N., Nikolaevskii V. N., Romashov A. N., Tsvetkov V. M. (1971). *The Mechanical Effect of an Underground Explosion*. Moscow: Nedra, 354 (In Russian).
24. Sadovskii M. A. (1952). Mechanical action of air blast waves according from experimental data. *Fiz. Vzryva*. (1), 20—110 (In Russian).
25. Solov'ev S. P., Surkov V. V. (1994). Electric perturbations in the atmospheric surface layer caused by an aerial shock wave. *Combust., Explos. Shock Waves*. 30(1), 117—121. <https://doi.org/10.1007/BF00787894>
26. Solov'ev S. P., Surkov V. V. (2000). Electrostatic field and lightning generated in the gaseous dust cloud of explosive products. *Geomagn. Aeron.* 40(1), 61—69.
27. Stacey F. D., Davis P. M. (2008). *Physics of the Earth*. Cambridge: Cambridge University Press, 513.
28. Taran V. I., Pod'yachii Yu. I., Smirnov A. N., Gershtein L. Ya. (1985). Disturbances of the ionosphere after a ground level burst on supervision by a method of incoherent scatter. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Fiz. Zemli*. (11), 75—79 (In Russian).
29. Tseitlin Ya. I., Smolin N. I. (1981). *Seismic and Shock Waves in Air Induced by Industrial Explosions*. Moscow: Nedra, 192 (In Russian).
30. Chernogor L. F. (2003). Physical Processes in the Near-Earth Environment Associated with March—April 2003 Iraq War. *Space Science and Technology*. 9(2/3), 13—33 (in Russian).
31. Chernogor L. F. (2004). The ammunition explosions on military bases as a source of

- ecological catastrophe in Ukraine. *Ekologiya i resursy*. (10), 55—67 (in Russian).
32. Chernogor L. F. (2004). Geophysical effects and geoecological consequences of mass chemical explosions in military warehouses in the city of Artemovsk. *Geophys. J.* 26(4), 31—44 (in Russian).
 33. Chernogor L. F. (2004). Geophysical Effects and Ecological Consequences of the Fire at the Military Base Near Melitopol City. *Geophys. J.* 26(6), 61—73 (in Russian).
 34. Chernogor L. F. (2006). Ecological consequences of mass chemical explosions in anthropogenic catastrophe. *Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. (6), 522—535 (in Russian).
 35. Chernogor L. F. (2008). Geoecological consequences of the explosion of an ammunition depot. *Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. (4), 359—369 (in Russian).
 36. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 556 (in Russian).
 37. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2018). Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagn. Aeron.* 58(5), 673—685. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050031>
 38. Shishkin N. I. (2007). Seismic efficiency of a contact explosion and a high-velocity impact. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 48, 145—152. <https://doi.org/10.1007/s10808-007-0019-6>
 39. Blanc E., Jacobson A. R. (1989). Observation of ionospheric disturbances following a 5-kt chemical explosion. 2. Prolonged anomalies and stratifications in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* 24(6), 739—746. <https://doi.org/10.1029/RS024i006p00739>
 40. Blanc E., Rickel D. (1989). Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source. *Radio Sci.* 24(3), 279—288. <https://doi.org/10.1029/RS024i003p00279>
 41. Calais E., Minster B. J., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. (1998). Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophys. J. Inter.* 132(1), 191—202.
 42. Fitzgerald T. J. (1997). Observations of total electron content perturbations on GPS signals caused by a ground level explosion. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 59(7), 829—834. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(96\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00105-8)
 43. Glasstone S., Dolan P. J. (1977). *Effects of nuclear weapons*. Washington, DC (USA): Department of Defense, Department of Energy, 653.
 44. Jacobson A. R., Carlos R. C., Blanc E. (1988). Observation of ionospheric disturbances following a 5 kt chemical explosion. 1. Persistent oscillation in the lower thermosphere after shock passage. *Radio Sci.* 23(5), 820—830. <https://doi.org/10.1029/RS023i005p00820>

L. F. Chernogor

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

EXAMPLIFIED BY THE EXPLOSION AT THE CITY OF BEIRUT ON AUGUST 4, 2020: THEORETICAL MODELING RESULTS

The study direct and reverse, positive and negative interconnections among the subsystems in the Earth (internal spheres) — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system (EAIMS) is commonly based on high-power active experiments. One of the experiments of opportunity is an impact on the EAIMS of large chemical explosions. Examples include active experiments utilizing 5 kt TNT, 1.5 kt TNT, and 2 kt TNT yield explosions. A power-

ful chemical explosion has been shown earlier to affect all geospheres, viz, it generates seismic waves in the lithosphere, disturbances in the electric field, electromagnetic emissions, acoustic and atmospheric gravity waves (AGWs), traveling ionospheric disturbances, and MHD waves in the near-Earth plasma. The physical effects and ecological consequences of multiple chemical explosions and accompanying fires have also been studied earlier. The major conclusion that has been drawn in these studies is that a response to such an impact can appear in all EAIMS subsystems. This paper aims to describe the principle physical effects in the atmosphere and geospace accompanying the powerful explosion at the city of Beirut on August 4, 2020. The comprehensive analysis of the main physical processes accompanying the explosion in the city of Beirut has been performed to determine the following. The Beirut explosion yield was estimated to be about 1 kt TNT. More than 90 % of explosion energy was transformed into the energy of the shock, and the rest was spent to cause damage and to leave a crater roughly of $40 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ and the 80 kt mass of the ground jettisoned. The damage size and surface area have been estimated. The thermic has been estimated to have sim 100 m horizontal size, the sim 46 m/s speed of its ascending, and the 1.6 min time of the ascent up to the maximum altitude of about 4 km. At a range of 250 km, the island of Cyprus, the intensity of sound has been estimated to be no less than 76 dB. The shock wave traveling upwards caused significant disturbance in the atmosphere and geospace. An increase in the wave pressure has been estimated to be tens of per cent in the 86...90 km altitude range. Shock wave dissipation in the 80...90 km altitude range could have caused atmospheric heating by 10...20 %, the generation of AGWs with $\Delta p \sim 0.1$, which propagated to distances of thousand kilometers from the epicenter. The secondary waves could have generated periodic variations, via the dynamo effect, in the geomagnetic field with amplitude of 0.1...0.3 nT.

Key words: Earth's surface explosion, atmosphere, geospace, shock wave, increase in pressure on a relative scale, thermic, electric effect, electromagnetic effect, seismic effect, modeling results.

Стаття надійшла до редакції 19.01.2021

Після доопрацювання 19.01.2021

Прийнята до друку 28.01.2021