

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.035>

УДК 551.515.3; 551.54.541; 551.508.41

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш

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 спостережень

4 серпня 2020 р. у м. Бейрут (Ліван) пролунав потужний вибух. За оцінками енергія вибуху відповідала еквівалентній масі тринітродуолу (ТНТ) в 1 кт. Детально проаналізовано фізичні ефекти вибуху в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Цікавим є аналіз результатів спостережень можливих ефектів, викликаних вибухом. Потужні вибухи становлять значний інтерес для геокосмофізиків і радіофізиків. Вони дозволяють виявити механізми перенесення збурень як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках, а також механізми взаємодії підсистем в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Мета цієї роботи — опис результатів радіофізичних і магнітометричних спостережень процесів у нижній іоносфері та геомагнітному полі, які супроводжували потужний вибух у м. Бейрут 4 серпня 2020 р. Для спостережень за можливою реакцією навколосемного середовища на вибух використовувалися комплекс похилого зондування іоносфери та магнітометр-флюксометр. За допомогою радіотехнічного комплексу похилого зондування нижньої іоносфери виявлено збільшення фази іоносферної хвилі до 5.3 та амплітуди сигналу до 3.3 %, викликані збуренням концентрації електронів приблизно на 3 %. Якщо це збільшення було викликане вибухом, швидкість поширення збурень дорівнювала 3 км/с. За допомогою магнітометра-флюксометра виявлено зміни характеру варіацій рівня геомагнітного поля через 5 і 79 хв після вибуху. Якщо ці варіації пов'язані з вибухом, то швидкості поширення збурень могли становити десятки та більше кілометрів за секунду, а також 490 м/с. Більшу швидкість мають МГД-хвилі, а меншу — акустико-гравітаційні хвилі.

© Л. Ф. ЧОРНОГОР, К. П. ГАРМАШ, 2021

Ключові слова: наземний вибух, атмосфера, геокосмос, космічна погода, фазовий ефект, амплітудний ефект, флуктуації геомагнітного поля, МГД-хвилі, акустико-гравітаційні хвилі

ВСТУП

4 серпня 2020 р. у м. Бейрут (Ліван) прогрімів потужний вибух. За оцінками роботи [15] енергія вибуху відповідала еквівалентній масі тринітротолуолу (ТНТ) в 1 кт. У роботі [15] детально проаналізовано фізичні ефекти вибуху в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ). Цікавим є аналіз результатів спостережень можливих ефектів, викликаних вибухом. Потужні вибухи становлять значний інтерес для геокосмофізиків і радіофізиків. Вони дозволяють досліджувати механізми перенесення збурень як по вертикалі, так і по горизонталі, а також механізми взаємодії підсистем у системі ЗАІМ.

Відомо всього кілька цілеспрямованих експериментів, які використовують потужні вибухи (від сотень тонн до 5 кт ТНТ) [2, 5, 19—23]. Найчастіше вивчалася реакція системи ЗАІМ на поодинокі та масові вибухи відносно невеликої інтенсивності [4, 7—12, 14, 17]. Отримано цікаві, але далеко не повні відомості про реакцію системи ЗАІМ на потужні наземні вибухи. Тому особливий інтерес становлять спостереження можливої реакції навколоземного середовища на потужний вибух у м. Бейрут.

Мета цієї роботи — опис результатів радіофізичних і магнітометричних спостережень процесів у нижній іоносфері та геомагнітному полі, які супроводжували потужний вибух у м. Бейрут 4 серпня 2020 р.

Для спостережень можливої реакції навколоземного середовища на вибух використовувалися комплекс похилого зондування іоносфери та магнітометр-флюксметр.

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, утворенням вирви діаметром 70 м, а також значними руйнуваннями будівель і пожежами. На відстанях до 10 км спостерігалося часткове руйнування будівель. Вибух викликав землетрус магнітудою $M = 3.5$ (за даними німецьких сейсмологів) та $M = 4.5$ (за даними йорданських фахівців). Характерний гриб від вибуху піднявся над містом на декілька кілометрів, його було видно на відстані 20...30 км і більше. Звук великої інтенсивності від вибуху був чутний навіть на о. Кіпр, відстань до якого близька до 250 км.

За даними роботи [15] еквівалентна маса вибуху дорівнювала приблизно 1 кт ТНТ. Вибух викликав цілий комплекс фізичних процесів у системі ЗАІМ.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

Часові варіації параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля, K_p і D_{st} -індексів приведено на рис. 1. Видно, що 2 серпня 2020 р. спостерігалися сплески концентрації частинок до $n_{sw} = 18 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. 4 серпня 2020 р. значення n_{sw} не перевищували $(1...2) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Швидкість частинок у сонячному вітрі збільшилася від 350 км/с 1 серпня 2020 р. до 600...700 км/с 3 і 4 серпня 2020 р.

Температура частинок у сонячному вітрі 1 серпня 2020 р. була не більшою, ніж $0.5 \cdot 10^5 \text{ К}$, а 2 і 3 серпня 2020 р. вона збільшилася до $(2...3) \cdot 10^5 \text{ К}$. 4 серпня 2020 р. вона поступово зменшувалася від $3 \cdot 10^5 \text{ К}$ до $1.2 \cdot 10^5 \text{ К}$.

Тиск частинок сонячного вітру 1 серпня 2020 р. не перевищував 1...2 нПа. 2...3 серпня 2020 р. він збільшувався до 4...4.8 нПа. 3 серпня 2020 р. тиск зменшувався від 4.8 нПа до 1.5 нПа. 4 і 5 серпня 2020 р. він флюктуював у межах 1...2 нПа.

Флуктуації рівня міжпланетного магнітного поля були найбільш суттєвими (до 5...8 нТл) 2 і 3 серпня 2020 р. 4 і 5 серпня 2020 р. вони не перевищували 1...2 нТл.

Найбільший сплеск (до 14 ГДж/с) функції Акасофу A мав місце 3 серпня 2020 р. 4 і 5 серпня 2020 р. величина A не перевищувала 1...2 ГДж/с.

3 і 4 серпня 2020 р. геомагнітне поле було спокійним. Індекс K_p змінювався від 0.3 до 1. Зменшення D_{st} -індексу не перевищувало -22 нТл . Поблизу моменту вибуху $K_p = 1$, а $D_{st} = 5 \text{ нТл}$. 5 серпня 2020 р. індекс K_p зріс до 3...3.3, флуктуації D_{st} -індексу не перевищували 8 нТл. Магнітне поле було злегка збуреним.

Таким чином, стан космічної погоди 4 серпня 2020 р. був цілком сприятливим для спостереження ефектів вибуху.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Засоби зондування іоносфери та магнітометр-флюксометр розташовані в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (географічні координати: 49 38 пн. ш., 36 20 сх. д.) поблизу м. Харків, Україна.

Комплекс похилого зондування іоносфери. Для цілей автоматизованого вимірювання спотворень характеристик (фази й амплітуди) сигналів кілометрового діапазону при їхньому поширенні у природному хвилеводі Земля — іоносфера створено приймальну систему на базі удосконаленого приймача-компаратора ПК-66 [18]. Як зондувальні

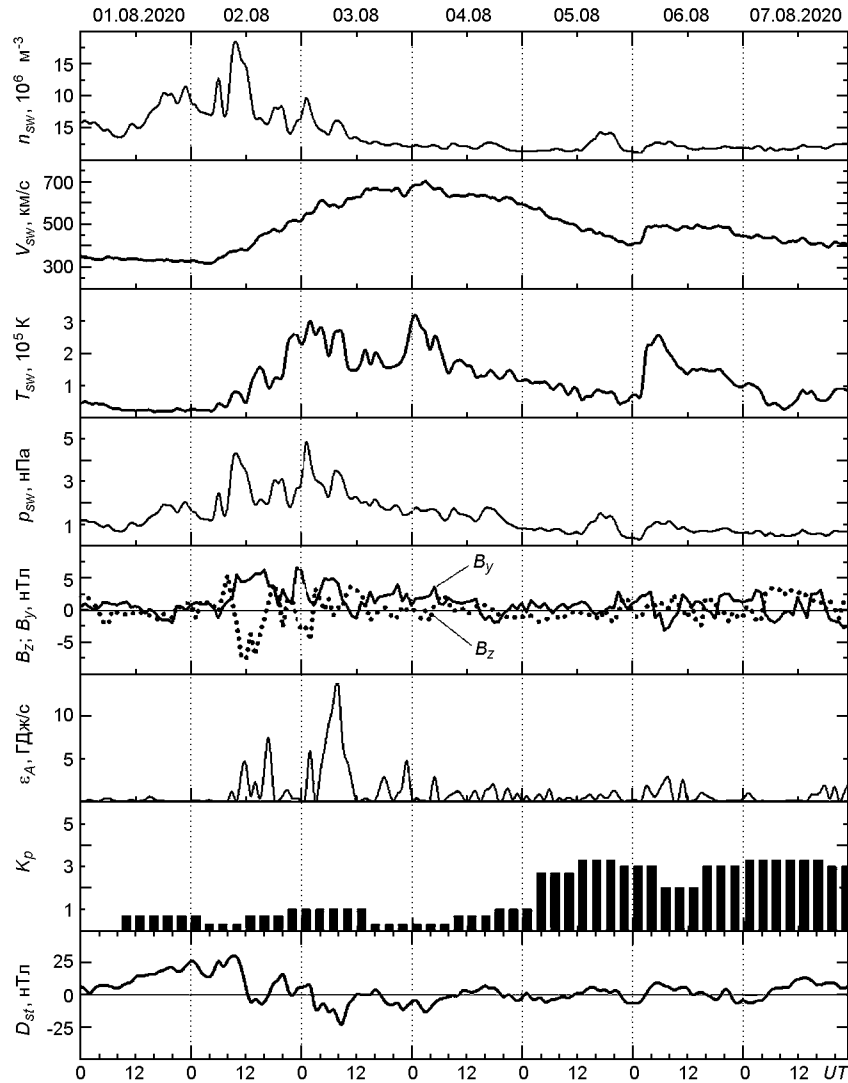


Рис. 1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряних значень концентрації n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} частинок (за даними <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>) та розрахованих значень динамічного тиску p_{sw} ; виміряних значень компонентів B_z та B_y міжпланетного магнітного поля (за даними супутника ACE); розрахованих значень енергії ϵ_A , яка передається сонячним вітром до магнітосфери Землі за одиницю часу; K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/>) за період 01...07 серпня 2020 р. (дати вказано вгорі)

сигнали використовуються радіосигнали станції РБУ служби еталонних сигналів частоти та часу ($f = 66\frac{2}{3}$ кГц), розташовані поблизу м. Москва, Росія (географічні координати: 56.75 пн. ш., 37.5 сх. д.).

Для визначення фазових варіацій реалізовано апаратний метод синхронного детектування усереднених на чвертьперіодних інтервалах часу квадратурних складових сигналу з мікропрограмною реаліза-

цією визначення за ними фази й усунення неоднозначності зворотних тригонометричних функцій в інтервалі кутів $0...360$. Стабільність часо-частотних параметрів системи (значення довготривалої відносної нестабільності частоти зразкового сигналу порядку $(1...2) 10^{-11}$ та відносна похибка установки його частоти не гірше 10^{-10}) забезпечують рубідієві стандарти частоти: внутрішній (типу FE-5680A) для вимірювально-реєстраційного блоку або зовнішній (Ч1-69). Відліки фази й амплітуди, усереднені на секундних інтервалах часу, щосекунди зберігаються у файлах на зовнішньому USB-флеш-накопичувачі. Похибка значень фази після обробки експериментальних даних, як правило, є близькою до $0.1...0.3$, а відносна похибка вимірювання амплітуди становить декілька відсотків.

Магнітометр-флюксометр. Основою магнітометричного комплексу є індуктивний магнітометр-флюксометр ІМ-ІІ розробки ОКБ Інституту фізики Землі РАН. Він має високу чутливість ($0.5...500$ пТл у діапазоні періодів $1...1000$ с відповідно) і досить широку смугу досліджуваних частот (від 0.001 до 1 Гц). Магнітометр ІМ-ІІ підключено до спеціалізованого мікроконтролерного реєстратора, який виробляє оцифровку та попередню фільтрацію на інтервалах 0.5 с магнітометричних сигналів, а також збереження відфільтрованих відліків і часу їхнього отримання в USB-флеш-пам'яті. Інформація про поточні дату та час, яка отримується від приймача GPS-сигналів BR-304, що входить до складу комплексу, використовується для щодобової корекції власного енергонезалежного (який має незалежне батарейне живлення) годинника мікроконтролерного реєстратора. Завдяки цьому похибка часової прив'язки магнітометричних даних не перевищує декількох десятих часток секунди.

За допомогою зазначеного магнітометра-флюксометра ведуться безперервні спостереження варіацій рівня горизонтальних (H - та D -) складових магнітного поля Землі.

Більш докладне описання параметрів комплексу похилого зондування іоносфери та магнітометра-флюксометра наведено в роботі авторів [18].

Для спектрального аналізу використовувалися описані в роботі [13] віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) та вейвлет-перетворення (ВП), що взаємно доповнюють одне одного.

Системний спектральний аналіз (ССА) часових варіацій рівня геомагнітного поля виконано для діапазону періодів $100...1000$ с.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Фазовий ефект. Часові варіації фази радіохвилі наведено на рис. 2а для дня з вибухом і двох контрольних днів. Видно, що 4 серпня 2020 р. приблизно з 16:24 до 17:10 мало місце збільшення фази приблизно на

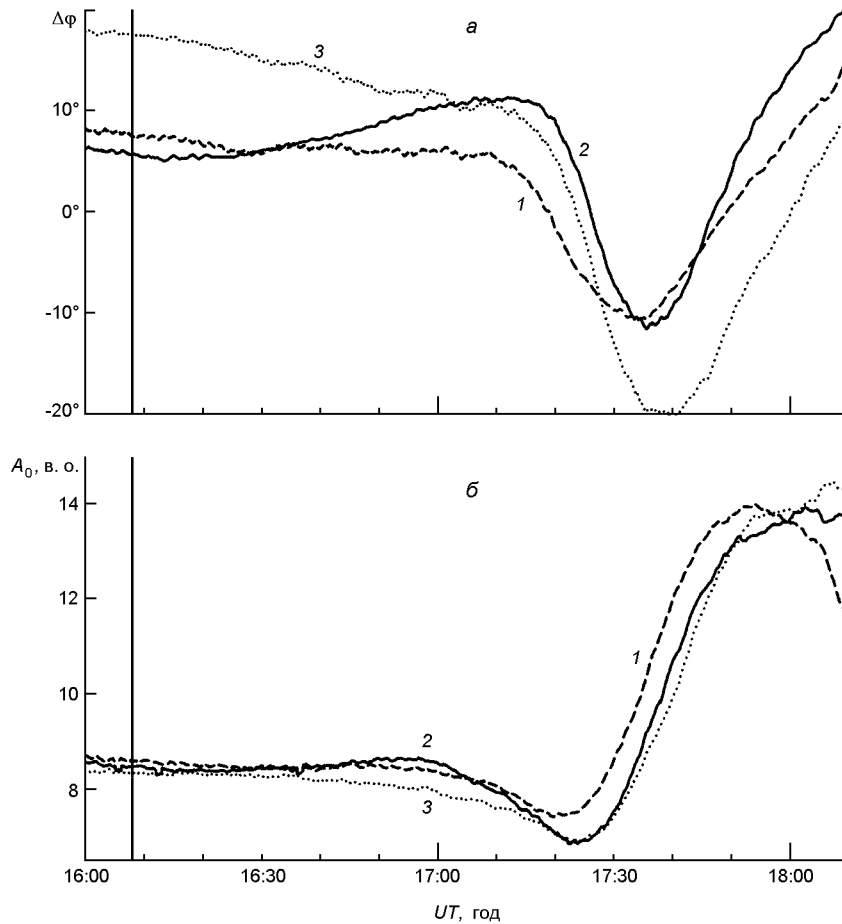


Рис. 2. Часові варіації фази й амплітуди радіохвилі: 1 — 3 серпня 2020 р., 2 — 4 серпня 2020 р., 3 — 5 серпня 2020 р. Момент вибуху показано вертикальною лінією

5.3 . За ним настало зменшення фази, яке тривало приблизно до 17:35. Далі знову відзначалося збільшення фази.

У контрольні дні відзначалося зменшення фази в інтервалі часу з 16:00 до 17:30...17:40.

Амплітудний ефект. З рис. 2б видно, що в контрольні дні з 16:00 до 17:00 $A_0(t) = \text{const}$. Потім протягом 20...25 хв спостерігалось зменшення амплітуди. Після 17:20...17:25 відзначалося її зростання.

У день вибуху приблизно з 16:25 до 17:00 реєструвалося незначне (до 3.3 %), але стійке збільшення $A_0(t)$.

Геомагнітний ефект. Часові варіації та результати системного спектрального аналізу рівня D -складової (напрямок схід — захід) для 3, 4 і 5 серпня 2020 р. наведено на рис. 3, 4 і 5 відповідно.

З рис. 3 можна бачити, що в контрольний день флуктуації рівня, як правило, не перевищували 0.4 нТл. Період коливань змінювався у широких межах. Найбільшу амплітуду мали коливання з періодом

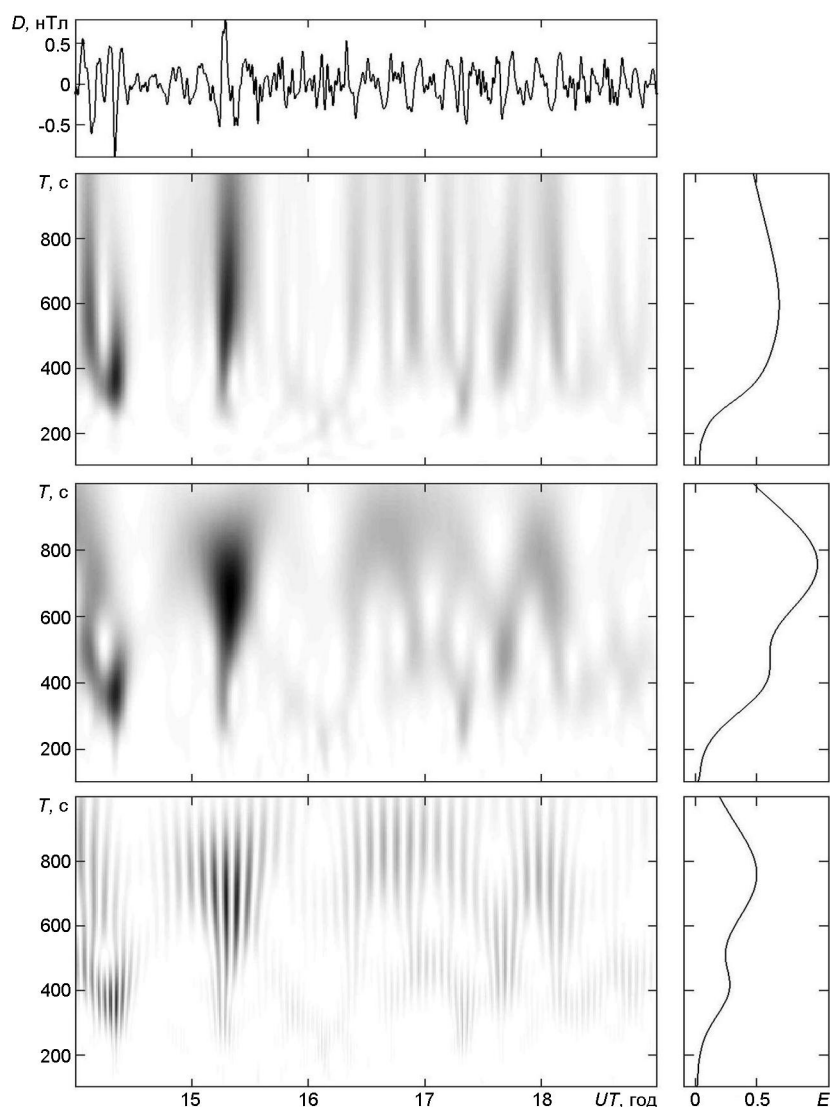


Рис. 3. Результати ССА магнітометричних даних (D -складова) для 3 серпня 2020 р. Панелі зверху вниз: вихідні дані, результати віконного, адаптивного перетворень Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч — енергограми (розподіл енергії за періодами)

$T = 300 \dots 500$ с, $T = 700 \dots 800$ с. Значне зростання (до $0.5 \dots 0.7$ нТл) амплітуди відзначалося в інтервалах часу $14:00 \dots 14:25$ та $15:00 \dots 15:30$.

4 серпня 2020 р. з $14:00$ до $17:25$ рівень флуктуацій не перевищував $0.2 \dots 0.3$ нТл. Спектр сигналу містив гармоніки від 300 до 900 с, виділених періодів не спостерігалось. Уперше характер сигналу помітно змінився приблизно о $16:13$ і до $17:10$: з'явився квазіперіодичний процес з $T = 10$ хв і амплітудою близько 0.2 нТл. З $17:26$ до $19:00$ характер флуктуацій знову істотно змінився. Амплітуда збільшилася до $0.4 \dots 0.5$ нТл й далі — до 0.7 нТл. У широкосмуговому спектрі

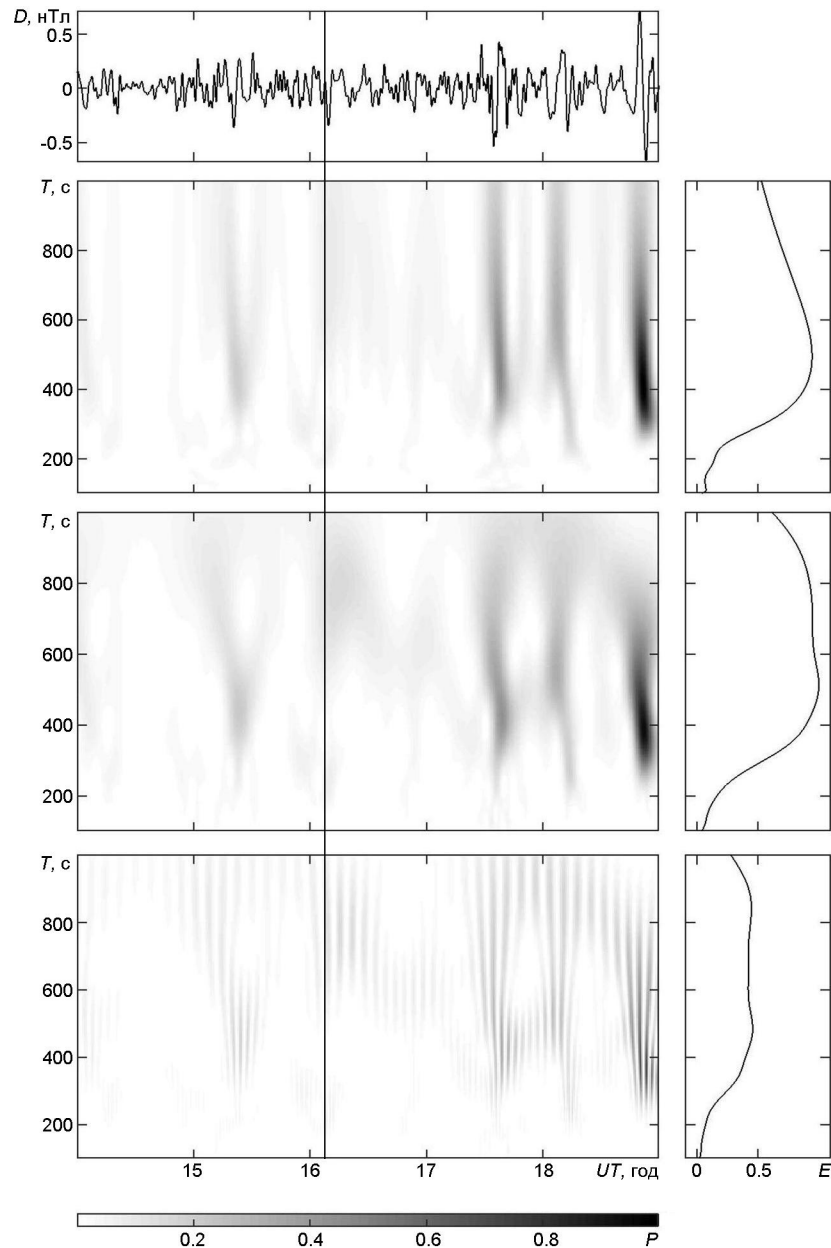


Рис. 4. Те ж, що на рис. 3, для 4 серпня 2020 р. Момент вибуху показано вертикальною лінією

виділялися гармоніки з $T = 300\text{...}500$ с і $T = 700\text{...}900$ с.

5 серпня 2020 р. рівень флуктуацій змінювався від 0.2...0.3 до 0.4...0.5 нТл. Близько 16:00 і 18:30 переважали складові з $T = 700\text{...}900$ с. Слід мати на увазі, що 5 серпня 2020 р. магнітне поле було помітно збуреним ($K_p = 3$). Тому контрольним днем слід обирати 3 серпня 2020 р.

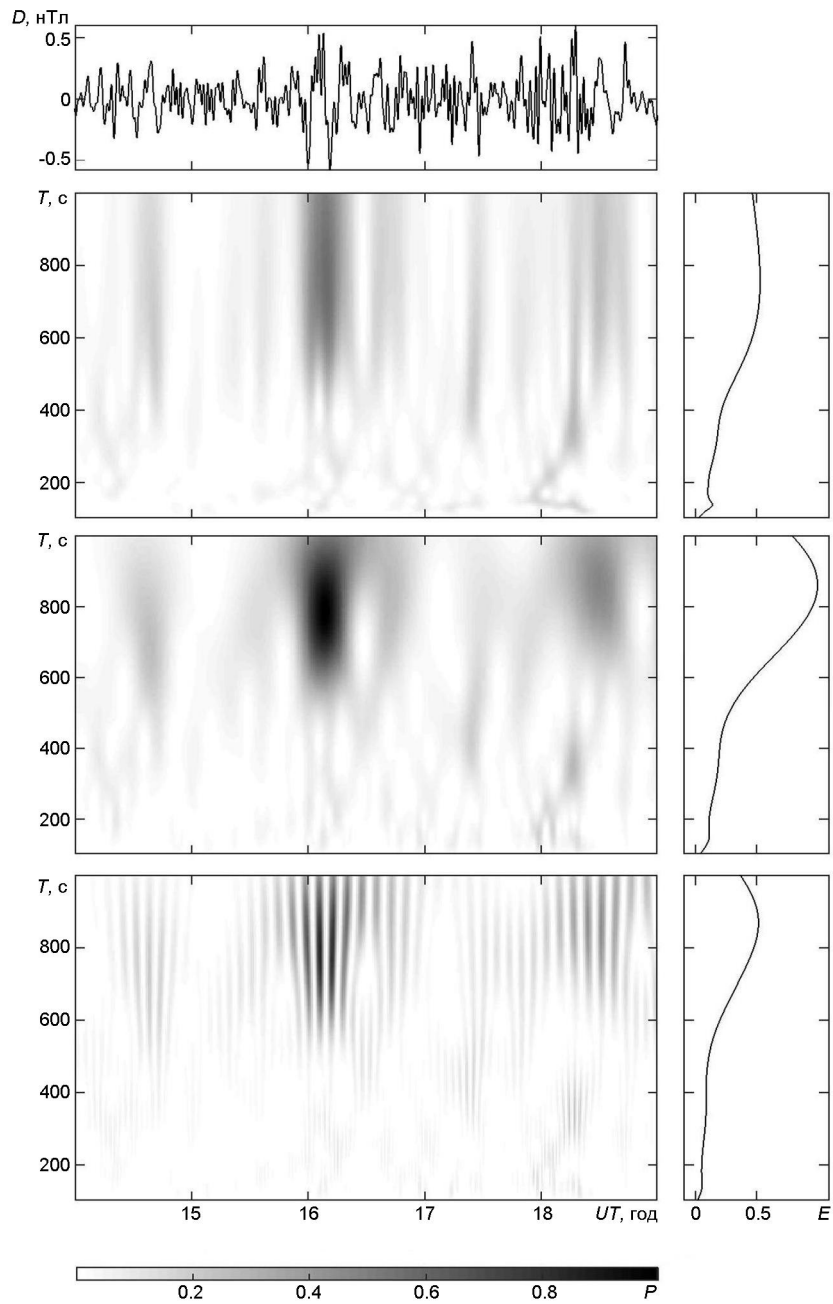


Рис. 5. Те ж, що на рис. 3, для 5 серпня 2020 р.

ОБГОВОРЕННЯ

Фазовий ефект. Виміряні значення варіацій фази та амплітуди слід віднести до іоносферної хвилі. Лінійно-поляризовані хвилі в іоносфері розкладаються на звичайну (O) та незвичайну (X) хвилі. Виконано

детальні числові розрахунки показників заломлення та поглинання, а також умов відбиття О- та Х-хвиль. Встановлено, що для умов експерименту на частоті $f = 66\frac{2}{3}$ кГц О-хвиля відбивається поблизу висоти $z = 80$ км, а Х-хвиля — на висоті близько 88 км. Відносне збурення концентрації електронів N_p , де p — відносне збурення тиску, яке на висоті 80 км значно менше, ніж на висоті 88 км [15]. Тому зміну фази після вибуху слід віднести до Х-хвилі.

Для визначення зміни фази скористаємося співвідношенням з роботи [16]:

$$\frac{8}{R_r} \frac{z_r}{z_r}, \quad (1)$$

де $c/f = 4.5$ км — довжина радіохвилі, $z_r = 88$ км — висота відбиття радіохвилі, z_r — зміщення висоти відбиття за рахунок зміни концентрації електронів, $R_r = 782$ км — відстань між передавачем і приймачем. Із співвідношення (1) випливає, що при 5.3 маємо $z_r = 0.16$ км. Для лінійного профілю

$$N = N_0 \left(1 - \frac{z_r}{L} \right), \quad (2)$$

де N_0 — початкове значення концентрації електронів, L — характерний масштаб зміни $N(z)$. Припускаючи $L = 5$ км, з виразу (2) отримуємо, що $N = z_r / L = 3\%$. Такі збурення цілком реальні в нижній іоносфері на відстанях від епіцентру вибуху до середини траси $R = 2150$ км.

Далі оцінимо характерну швидкість поширення збурень. Якщо збільшення фази викликано вибухом, то час запізнення становить $t = 16$ хв. Час поширення збурення від поверхні Землі до висоти 80 км $t_0 = 4$ хв. Тоді горизонтальна швидкість поширення збурення дорівнює

$$v = \frac{R}{t - t_0}. \quad (3)$$

Оцінка за формулою (3) дає $v = 3$ км/с. Таку швидкість мають сейсмічні хвилі [1, 6]. Таким чином, якщо зафіксоване збільшення фази пов'язане з вибухом, його могли викликати збурення в іоносфері, які переносяться уздовж поверхні Землі сейсмічною хвилею.

Повільніших збурень, наприклад пов'язаних з поширенням АГХ, які мали б швидкість близько 0.3 км/с [3] і менше, виявити не вдалося. Приблизно після 17:10 варіації фази та амплітуди були зумовлені більш потужним джерелом енерговиділення, а саме вечірнім термінатором.

Геомагнітний ефект. У день вибуху характер варіацій рівня гео-

магнітного поля змінювався двічі. Якщо ці зміни пов'язані з вибухом, то часи запізнення збурень становлять $t_1 = 5$ хв і $t_2 = 79$ хв. У першому випадку t_1 приблизно дорівнює часу поширення ударної хвилі до висоти $z = 100$ км, тобто до висоти динамо-області атмосфери. Рух газу та плазми в геомагнітному полі Землі призвів до генерації геомагнітного збурення, яке поширюється зі швидкістю, яка значно перевищує швидкість звуку. З цієї причини час поширення до місця реєстрації є набагато меншим за час t_1 .

При часі запізнення t_2 маємо швидкість квазігоризонтального поширення

$$v = \frac{R}{t_2 - t_1} = 490 \text{ м/с.}$$

Таку швидкість, а також спостережувані періоди 300...500 с і 700...900 с мають АГХ. Додамо, що за розрахунками $T_1 = 250$...340 с, $T_2 = 500$...680 с [15].

Таким чином, обидва геомагнітних ефекти могли бути пов'язані з вибухом у м. Бейрут.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. За допомогою радіотехнічного комплексу похилого зондування нижньої іоносфери виявлено збільшення фази іоносферної хвилі до 5.3 , а амплітуди сигналу — до 3.3 %, викликані зміною концентрації електронів приблизно на 3 %. Якщо ця зміна викликана вибухом, швидкість поширення збурень була близькою до 3 км/с.

2. За допомогою магнітометра-флюксометра виявлено зміни характеру варіацій рівня геомагнітного поля через 5 і 79 хв після вибуху. Якщо ці варіації пов'язані з вибухом, то швидкості поширення збурень могли становити десятки та більше кілометрів за секунду, а також 490 м/с. Більшу швидкість мають МГД-хвилі, а меншу — АГХ.

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

1. Аки К., Ричардс П. *Количественная сейсмология*. М.: Мир, 1983. 880 с.
2. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Дробжев В. И., Троицкая В. А., Федорович Г. В. Проект МАССА исследование магнитосферно-атмосферных связей при сейсмоакустических явлениях. *Физика Земли*. 1985. № 11. С. 5—8.
3. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере: Инфразвук и гравитационные волны*

- в атмосфере — их возникновение и распространение. М.: Мир, 1978. 532 с.
4. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. *Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу*. М.: Наука, 2008. 295 с.
 5. *Изв. АН СССР. Физика Земли*. (Специальный выпуск). 1985. № 11.
 6. Стейси Ф. *Физика Земли*. М.: Мир, 1972. 342 с.
 7. 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.
 8. Черногор Л. Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах — источник экологических катастроф в Украине. *Экология и ресурсы*. 2004. № 10. С. 55—67.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Черногор Л. Ф. Экологические последствия массовых химических взрывов при техногенной катастрофе. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2006. № 6. С. 522—535.
 12. Черногор Л. Ф. Геоэкологические последствия взрыва склада боеприпасов. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2008. № 4. С. 359—369.
 13. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. 48. № 5. С. 681—702.
 14. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
 15. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти в атмосфері та геокосмосі, зумовлені наземними подіями (на прикладі вибуху у Бейруті 4 серпня 2020 р.). Результати теоретичного моделювання. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2021. 37. № 3. С. 24—45. <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.03.024>.
 16. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита «Челябинск». *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. 18. № 3. С. 231—243.
 17. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Магнито-ионосферные эффекты, сопровождавшие сильнейшую техногенную катастрофу. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. 58. № 5. С. 700—712.
 18. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах. *Космический проект «Ионосат-Микро»*. Киев: Академперіодика, 2013. С. 160—182.
 19. 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.
 20. 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.
 21. 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.
 22. 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.

23. 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. Aki K, Richards P. G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. W. H. Freeman and Co., 948.
2. 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.
3. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975). *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 472.
4. Gokhberg M. B., Shalimov S. L. (2008) *Influence of Earthquakes and Explosions on the Ionosphere*. Moscow: Nauka, 295 (In Russian).
5. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Fiz. Zemli* (Thematical Issue). (1985) (11).
6. Stacey F. D. (1972). *Physics of the Earth*. Moscow: Mir, 342 (In Russian).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. Chernogor L. F. (2006). Ecological consequences of mass chemical explosions in anthropogenic catastrophe. *Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology.* (6), 522—535 (in Russian).
12. Chernogor L. F. (2008). Geoecological consequences of the explosion of an ammunition depot. *Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology.* (4), 359—369 (in Russian).
13. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagn. Aeron.* 48(5), 652—673. <https://doi.org/10.1134/S0016793208050101>
14. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ., 556 (in Russian).
15. Chernogor L. F. (2021) Physical effects in atmosphere and geospace that accompanying a ground explosion in Beirut on August 4, 2020: theoretical modeling results. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 37(3), 24—45.
16. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2013). Disturbances in geospace associated with the Chelyabinsk meteorite passage. *Radio Phys. Radio Astron.* 18(3), 231—243.
17. 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>
18. Chernogor L. F., Garmash K. P., Podnos V. A., Tyrnov O. F. (2013). The V. N. Karazin Kharkiv National University Radio physical Observatory — the tool for ionosphere monitoring in space experiments. *Space Project «Ionosat-Micro»*. Kyiv: Akademperiodika Publ., 160—182 (in Russian).

19. 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>
20. 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>
21. 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.
22. 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)
23. 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, K. P. Garmash

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

EXAMPLIFIED BY THE EXPLOSION AT THE CITY OF BEIRUT ON AUGUST 4, 2020: OBSERVATIONAL DATA

On August 4, 2020, the massive chemical explosion rocked the city of Beirut, Lebanon. The explosion yield has been estimated to be equivalent to 1 kt of TNT, and the physical effects of the explosion on the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system have been analyzed in detail. The possible effects of powerful explosions are of considerable interest to geophysicists and radio physicists to analyze. They allow the mechanisms for transporting the disturbances to be determined in both the vertical and horizontal directions, as well as the mechanisms for coupling the subsystems in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system to be established. The purpose of the present paper is to describe radio and magnetometer observations of the processes that accompanied the powerful explosion at the city of Beirut on August 4, 2020 in the lower ionosphere and in the geomagnetic field. The observations of the possible response of the near-Earth medium to the explosion have been made with the fluxmeter magnetometer and the radio system for sounding the ionosphere at oblique incidence. The latter system detected an increase of up to 5.3 in the phase of the ionospheric wave and an increase of 3.3 % in the signal amplitude caused by an electron density change of approximately 3 %. If these increases are due to the explosion, then the speed of propagation of the disturbance is estimated to be about 3 km/s. The fluxmeter magnetometer have detected changes in the character of variations in the level of the geomagnetic field occurring in 5 min and in 79 min after the explosion. If these variations were associated with the explosion, then the speeds of propagation can be estimated to be tens of km/s and greater, as well as 490 m/s. The MHD waves have the greater speed, and the acoustic gravity waves have the smaller one, respectively.

Key words: surface explosion, atmosphere, geospace, space weather, phase effect, amplitude effect, geomagnetic field fluctuations, MHD waves, acoustic gravity waves.

Стаття надійшла до редакції 19.01.2021

Після доопрацювання 19.01.2021

Прийнята до друку 28.01.2021