

УДК 551.515.3, 551.54.541; 551.508.41

ПАРАМЕТРИ ІНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛУ В АТМОСФЕРІ, ЗГЕНЕРОВАНОГО ВИБУХОМ ПОТУЖНОГО ВУЛКАНА

Л. Ф. Черногор

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

e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Метою цієї роботи є викладення результатів побудови регресій, які описують залежність амплітуди інфразвукового сигналу, згенерованого під час вибуху вулкану Св. Олена, від відстані та оцінка низки параметрів сигналу й атмосфери. За даними вимірювань амплітуди тиску вибухової хвилі, згенерованої початком виверження вулкану Св. Олена, виконаних на 13 станціях, віддалених на відстані близько 0.9 – 39 Мм, зроблено спробу знаходження регресії, яка описує залежність амплітуди від відстані. Встановлено, що найбільшу перевагу слід віддати регресії, заснованій на припущенні хвилеводного поширення інфразвуку з його ослабленням. За даними спостережень за ударною хвилею від вибуху вулкана Св. Олена оцінено енергію повітряної хвилі ($\sim 10^{16}$ Дж) й її середню потужність (~ 2.3 ТВт). За даними вимірювань амплітуди та тривалості цугу інфразвукової хвилі, згенерованої вибухом вулкана Св. Олена, оцінено її енергію (близько 10^{16} Дж) і середню потужність (~ 2 ТВт). Обидві оцінки добре узгоджуються між собою, але істотно відрізняються від наведених у літературі. Останні здаються надто завищеними. З отриманої регресії оцінено глибину загасання інфразвукової хвилі (близько 33 Мм). За вимірюваннями на інших станціях цей масштаб є близьким до 24 Мм. Виходячи з теоретичної залежності коефіцієнта ослаблення інфразвукової хвилі турбулентністю атмосфери, оцінено значення глибини загасання інфразвуку з періодами 10–300 с. Для періодів 20–300 с це значення виявилось набагато більшим за значення, оцінене з даних спостережень. Обговорюються інші механізми загасання інфразвукового сигналу (висвічування частини енергії з хвилеводу, втрати при відбитті від стінок хвилеводу). У той же час механізм послаблення інфразвукових хвиль за рахунок їхнього розсіяння на турбулентних утвореннях може бути істотним для періодів, менших за 20–50 с (в залежності від інтенсивності турбулізації). Проведено порівняння отриманої регресії з відповідними регресіями для інших джерел інфразвукових хвиль, які поширюються в атмосфері.

Ключові слова: вибух вулкану, інфразвукова хвиля, ударна хвиля, амплітуда сигналу, регресії, ослаблення сигналу.

1. Вступ

Дослідження особливостей поширення інфразвукових сигналів у атмосфері Землі займає важливе місце в атмосферній фізиці [1–4]. Крім загальнонаукової

значущості, такі дослідження необхідні для розв'язання оберненої задачі, яка полягає у визначенні параметрів джерела інфразвуку за вимірними його характеристиками (амплітуді, спектральному складу, тривалості хвильового пакета і т. д.). Як відомо,

техногенними джерелами інфразвукових хвиль є потужні вибухи [5–9], польоти ракет і великих літаків, космічних апаратів, що спускаються [10–15] та ін. До природних джерел інфразвукових хвиль відносяться морське хвилювання [16, 17], землетруси [18], виверження вулканів [19–24], погодні фронти [25], полярні сьйва [26], падіння великих космічних тіл [4, 5, 27–40], тайфуни [41, 42] та ін.

Відмінною властивістю інфразвукових хвиль є їхня здатність поширюватися в глобальних масштабах (відстані $r \sim 1\text{--}10$ Мм) практично без загасання. У процесі поширення змінюються всі характеристики (амплітуда, тривалість, період, швидкість приходу, азимут і ін.) інфразвукового сигналу, але найбільше до таких змін схильна амплітуда. Амплітуда інфразвукового сигналу при збільшенні довжини траси зменшується за рахунок розходження фронту хвилі, поглинання в атмосфері, розсіяння на турбулентних утвореннях, дефокусування на атмосферних неоднорідностях. У той же час, за певних умов можливе й фокусування акустичних променів. Все це призводить до складної залежності амплітуди інфразвукового сигналу від відстані [36–38].

Метою цієї роботи є викладення результатів побудови регресій, що описують залежність амплітуди інфразвукового сигналу, згенерованого під час вибуху вулкану Св. Олена, від відстані та оцінка низки параметрів сигналу й атмосфери.

2. Загальні відомості про вибух вулкану

Вибуху вулкана Св. Олена й атмосферним ефектам вибуху присвячено низку робіт (див., наприклад, [19–24]). Результати дослідження іоносферних ефектів вибуху вулкану описані в роботах [43–45]. Ці ефекти

обумовлені генерацією хвиль густини з періодами більшими за 5 хвилин.

Вулкан Св. Олена (St. Helens) розташований у північно-західній частині США (округ Скаманія, штат Вашингтон). Його географічні координати такі: $46^{\circ}11'28''\text{N}$, $122^{\circ}11'40''\text{W}$. Висота кратеру над рівнем моря становить 2549 м, висота кратеру над рівнем ґрунту – 1404 м.

Вибух вулкану стався 18 травня 1980 року. Виділена теплова енергія становила 24 Мт ТНТ. Він супроводжувався генерацією потужної ударної хвилі в атмосфері, яка на великих (понад 300–500 км) відстанях поступово перетворилася в інфразвукову хвилю. Ударна хвиля призвела до вивалення дерев на відстані в десятки кілометрів від епіцентру вибуху, загинули 57 осіб, зруйновано 200 будинків, 47 мостів, 24 км залізниць і 298 км шосейних доріг. Виверження вулкана Св. Олена – найпотужніше в історії США [24]. У цьому полягає його унікальність.

Ударна хвиля, породжена вибухом вулкану, була зареєстрована 21 мікробарографом Національної служби погоди США на відстанях від 54 до 371 км. Надлишок тиску Δp при цьому змінювався від 373 до 73 Па [24].

Інфразвукові станції в кількості 13 зареєстрували інфразвуковий сигнал на відстанях від 925 до 8211 км (табл. 1). Крім того, дві з них зареєстрували антиподні сигнали, які прийшли по великій дузі. При цьому відстані становили 32049 і 39106 км (див. табл. 1) [24]. Амплітуда інфразвукового сигналу при цьому зменшувалася приблизно на порядок. З табл. 1 випливає, що в цілому спостерігалася тенденція до зменшення амплітуди інфразвукової хвилі при збільшенні відстані між вулканом та інфразвуковою станцією. Амплітуда хвилі на

станціях DeBilt (20 Па) для короткої траси ($r \approx 7.982$ Мм) та Berkeley (6.5 Па) для довгої траси ($r \approx 39.106$ Мм) була аномально великою в порівнянні з амплітудою для інших станцій з близькими значеннями r . Можливо, це пов'язано з фокусуванням променів в атмосфері. Значення амплітуди на

станції Akita (1.5 Па) було аномально низьким. При побудові регресій їх доцільно розглядати як грубі помилки (промахи).

Зауважимо, що в табл. 1 наведені значення амплітуди інфразвукового сигналу, а в роботі [24] – розмах коливання, тобто подвоєна амплітуда.

Таблиця 1. Загальні відомості про інфразвукові станції, які зареєстрували інфразвуковий сигнал від виверження вулкану Св. Олена (за матеріалами роботи [24])

Місце розташування мікробарографа	Широта	Довгота	Відстань, Мм	Напрямок вітру	Амплітуда, Па
Berkeley, CA	37.9°N	122.3°W	0.925	Південний	17.5
Boulder, CO	40.0°N	105.2°W	1.530	Південно-східний	25
Washington, DC	39.0°N	77.1°W	3.700	Східний	10.5
Palisades, NY	41.4°N	73.9°W	3.950	Східний	10
Honolulu, HI	21.3°N	157.6°W	4.156	Західний	8.5
Kushiro, Japan	43.0°N	144.4°E	6.945	Західний	7
Akita, Japan	39.7°N	140.1°E	7.453	Західний	1.5
Tokyo, Japan	35.7°N	139.8°E	7.778	Західний	5
Wajima, Japan	37.4°N	136.9°E	7.833	Західний	5.5
DeBilt, Netherlands	52.2°N	5.3°E	7.982	Східний	20
Hamburg, FRG	53.5°N	10.1°E	8.000	Східний	7.1
Buchholz, FRG	53.4°N	9.9°E	8.010	Східний	7.35
Tonago, Japan	35.4°N	133.4°E	8.211	Західний	5.5
DeBilt, Netherlands	52.2°N	5.3°E	32.049	Західний	1.5
Berkeley, CA	37.9°N	122.3°W	39.106	Північний	6.5

3. Залежність амплітуди інфразвукового сигналу від відстані

На відстанях r в кілька сот кілометрів переважає променеве поширення інфразвукових хвиль [1, 4]. Конфігурація променів визначається висотною залежністю температури повітря та структурою вітру в атмосфері. На зазначених відстанях слід очікувати приблизно сферичної розбіжності фронту хвилі, при цьому $\Delta p \sim r^{-1}$. На великих відстанях інфразвукова хвиля поширюється в хвилеводах “земля – стратосфера”, “земля – мезосфера” та “земля – термосфера” [4].

З енергетичної точки зору перший хвилевід відіграє основну роль. У хвилеводному поширенні слід очікувати циліндричної розбіжності фронту хвилі, при цьому $\Delta p \sim r^{-0.5}$. Крім того, для достатньо високочастотного інфразвуку (частота близько 0.1 – 10 Гц) може бути істотним його розсіяння на турбулентних утвореннях в атмосфері, а також молекулярне поглинання. При цьому $\Delta p \sim \exp(-\gamma r)$, де γ – коефіцієнт ослаблення.

Виходячи з викладених міркувань, проводився пошук відповідних регресій, які найближче апроксимують дані спостережень.

На рис. 1 показана регресія, яка відповідає сферичній розбіжності фронту хвилі. Тут і далі апроксимація здійснювалася за даними всіх 13 станцій (по 15 реєстраціях). Далі з розгляду виключалися точки, найбільш віддалені від кривої регресії, які розглядалися як промахи. З рис. 1 видно, що коефіцієнт достовірності R після виключення даних окремих станцій збільшувався від 0.26 до 0.68, а стандартне відхилення σ – зменшувалася від 6.43 до 4.68.

Спроба поліпшення апроксимації показана на рис. 2, з якого видно, що значення R змінилися від 0.67 до 0.83, а σ – від 5.12 до 3.73.

Далі розглянемо модельний закон убавання амплітуди з відстанню, що передбачає поступовий перехід від поширення зі сферичною розбіжністю фронту хвилі до поширення з циліндричною розбіжністю.

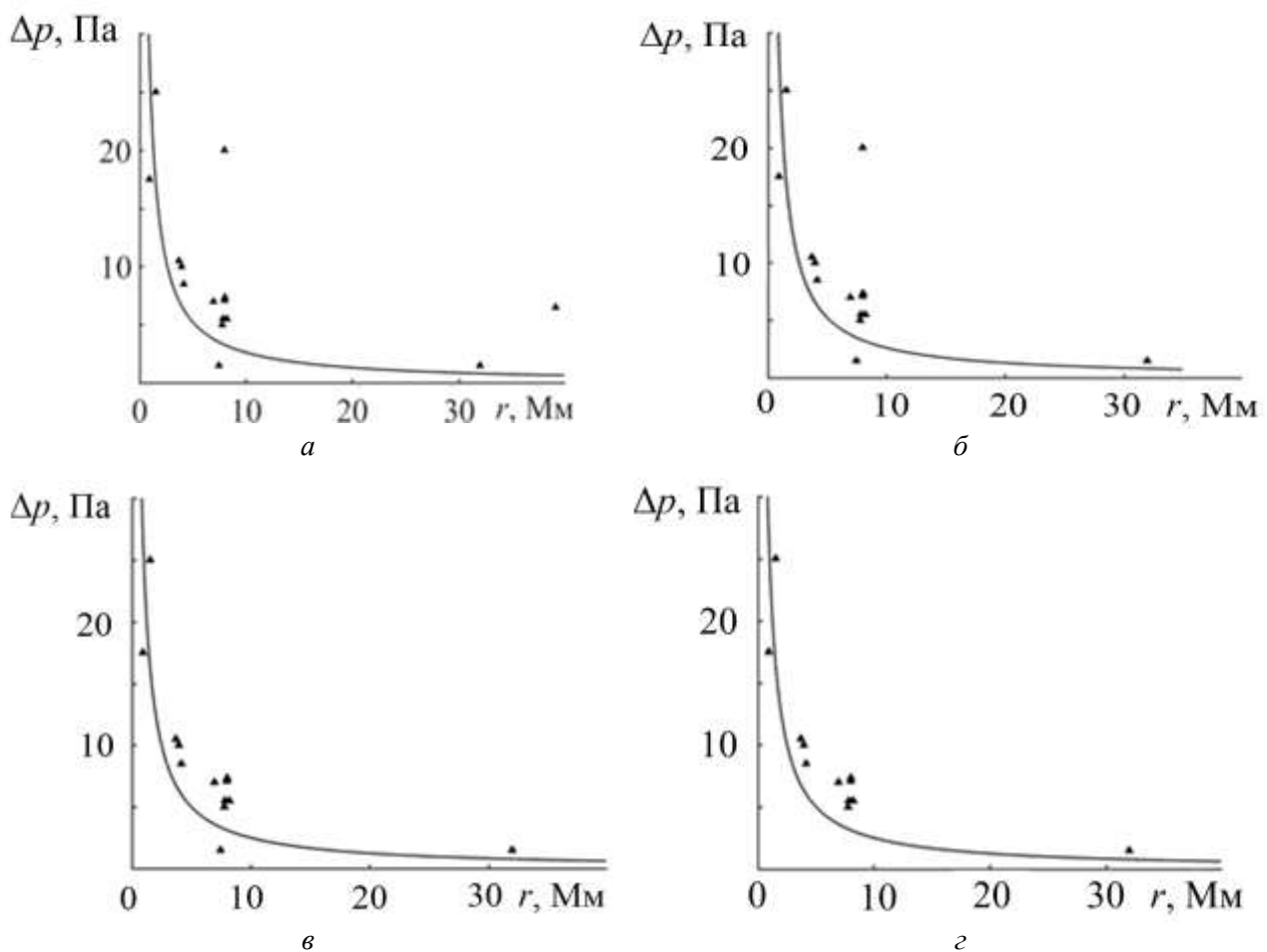


Рис. 1. Залежність амплітуди хвилі тиску, згенерованої виверженням вулкана Св. Олена, від відстані між епіцентром і мікробарографом. Апроксимація степеневим законом: *a* – за 15 трасами, $\Delta p = 26.18r^{-1}$ (r тут і далі в Мм), коефіцієнт достовірності апроксимації $R \approx 0.26$, середнє квадратичне відхилення $\sigma \approx 6.43$; *б* – за 14 трасами (опущено значення станції Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 26.1r^{-1}$, $R \approx 0.33$, $\sigma \approx 6.48$; *в* – за 13 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 25.01r^{-1}$, $R \approx 0.68$, $\sigma \approx 4.68$, $\sigma \approx 3.86$; *г* – за 12 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм), Akita), $\Delta p = 25.14r^{-1}$, $R \approx 0.64$, $\sigma \approx 4.86$.

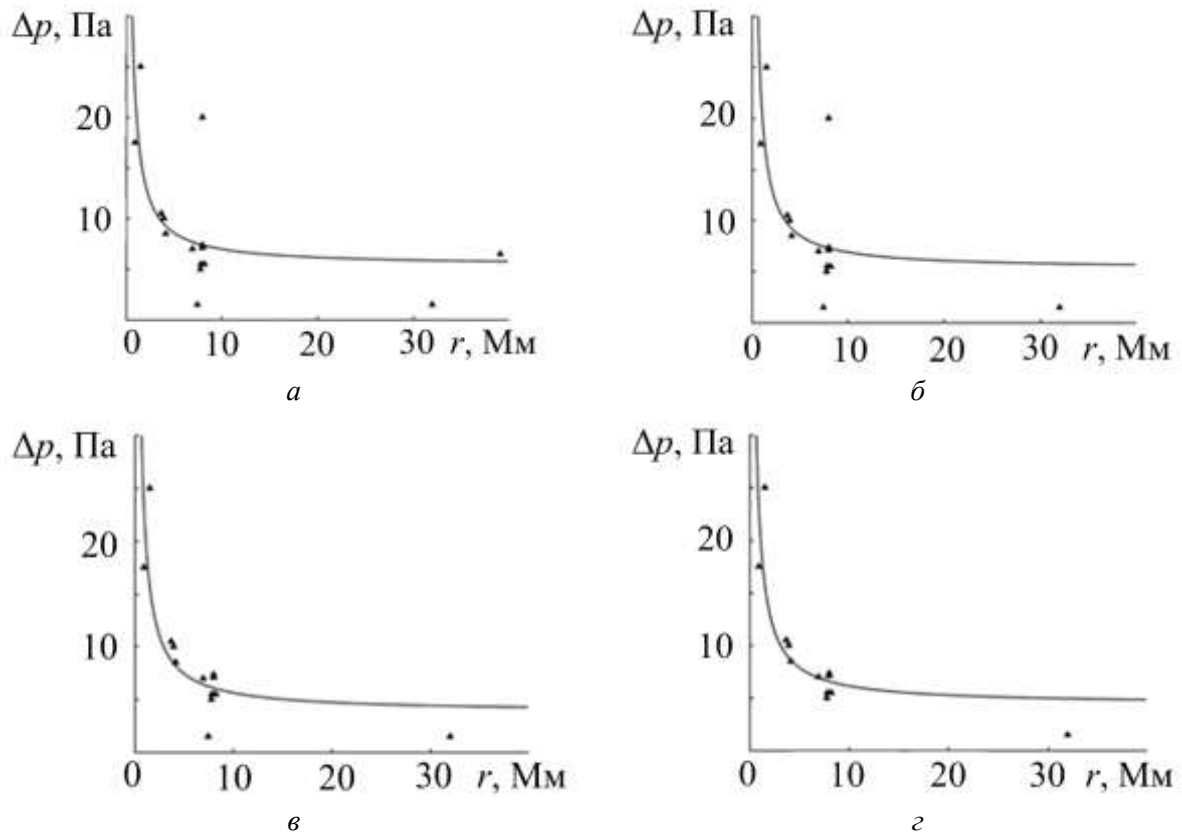


Рис. 2. Залежність амплітуди хвилі тиску, згенерованої виверженням вулкана Св. Олена, від відстані між епіцентром і мікробарографом. Апроксимація степеневим законом: *a* – за 15 трасами, $\Delta p = 16.21r^{-1} + 5.35$, $R \approx 0.67$, $\sigma \approx 5.12$; *б* – за 14 трасами (опущено значення станції Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 16.37r^{-1} + 5.26$, $R \approx 0.67$, $\sigma \approx 5.33$; *в* – за 13 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 18.14r^{-1} + 3.82$, $R \approx 0.82$, $\sigma \approx 3.86$; *г* – за 12 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм), Akita), $\Delta p = 17.45r^{-1} + 4.4$, $R \approx 0.83$, $\sigma \approx 3.73$.

Результати відповідної апроксимації показані на рис. 3. З рис. 3 видно, що апроксимація може бути прийнятною, оскільки значення $R \approx 0.86 - 0.87$, а $\sigma \approx 3.46 - 3.21$ відповідно. Перехід від сферичної розбіжності фронту хвилі до циліндричної відбувався на відстанях $r_0 \approx 100 - 200$ км.

Якщо вважати, що на відстанях $r \geq 0.925$ Мм, для яких виконані вимірювання, мала місце лише циліндрична розбіжність фронту хвилі, то результати апроксимації представляються рис. 4. З рис. 4 випливає, що значення R змінюються

в межах $0.70 - 0.87$, а значення σ – в межах $4.73 - 3.08$ відповідно. Апроксимація не є цілком задовільною при $r \approx 30$ Мм. Спроба поліпшити апроксимацію на відстанях $r \approx 30$ Мм показана на рис. 5. При цьому $R \approx 0.70 - 0.89$, а $\sigma \approx 4.90 - 3.08$ відповідно.

Спробуємо разом з циліндричною розбіжністю фронту хвилі врахувати й можливе загасання інфразвуку. Результат апроксимації для такого випадку показаний на рис. 6, при цьому $R \approx 0.72 - 0.89$, а $\sigma \approx 5.00 - 3.08$ відповідно.

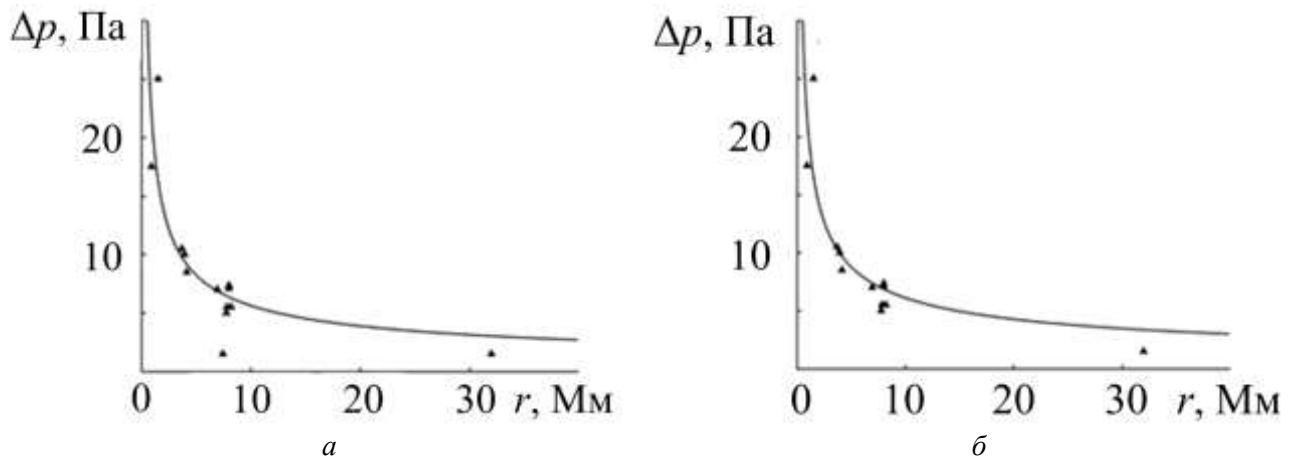


Рис. 3. Залежність амплітуди хвилі тиску, згенерованої виверженням вулкану Св. Олена, від відстані між епіцентром і мікробарографом. Апроксимація степеневим законом: *а* – за 13 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 4.77r^{-1} + 16.3r^{-0.5}$, $R \approx 0.86$, $\sigma \approx 3.46$; *б* – за 12 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм), Akita), $\Delta p = 2.35r^{-1} + 18.57r^{-0.5}$, $R \approx 0.87$, $\sigma \approx 3.21$.

4. Обговорення

4.1. Залежність амплітуди від відстані

Апроксимації, показані на рис. 1 і 2, не є задовільними, тому що вони погано описують значення амплітуди інфразвуку для більшості (одинадцяти) станцій, віддалених від вулкану на відстань $r \approx 4 - 8$ Мм. Це означає, що на відстанях $r \geq 1$ Мм сферична розбіжність фронту хвилі не мала місце. Регресії, наведені на рис. 2, крім того, не є фізичними, тому що $\Delta p(\infty) \neq 0$.

Апроксимації на рис. 3 добре описують закон зміни $\Delta p(r)$ при $r \approx 1 - 8$ Мм і, дещо гірше, при $r \approx 32 - 39$ Мм. При $r \geq 0.1 - 0.2$ Мм має місце циліндрична розбіжність фронту хвилі. На користь такої розбіжності свідчать і апроксимації, показані на рис. 4, 5 і 6. Зауважимо, що регресії, наведені на рис. 5, б, в и з, мають дещо більші значення R і менші значення σ , ніж ці ж параметри на рис. 4. Однак, регресії на рис. 5 мають той же недолік, оскільки вони не задовольняють умові $\Delta p(\infty) = 0$.

Регресії, показані на рис. 6, враховують як циліндричну розбіжність фронту хвилі, так і загасання інфразвуку. При цьому $\gamma \approx 0.03$ Мм⁻¹, а глибина загасання $L = \gamma^{-1} \approx 33$ Мм відповідно. Достовірність оцінок γ і L – порівняно невисока, оскільки вони отримані фактично за вимірюваннями на одній зі станцій (DeBilt, довга траса, $r \approx 32.049$ Мм). Більш точну оцінку можна отримати, якщо врахувати, що при $r \approx 4$ Мм маємо $\Delta p \approx 10$ Па, а при $r \approx 8$ Мм – в середньому $\Delta p \approx 6$ Па. Тоді $\gamma \approx 0.04$ Мм⁻¹, а $L \approx 24$ Мм. Отже, $\gamma \approx 0.03 - 0.04$ Мм⁻¹, а $L \approx 33 - 24$ Мм. На жаль, у даній вимірювальній кампанії повністю були відсутні спостереження в інтервалі відстаней $r \approx 8 - 32$ Мм.

Цікаво порівняти отриману залежність $\Delta p(r)$ з аналогічною залежністю для інших потужних джерел інфразвуку.

Під час вибуху Тунгуського космічного тіла 30 червня 1908 року на висотах 6–8 км з енергією 10–50 Мт ТНТ також спостерігалася залежність $\Delta p \sim r^{-0.5}$, тобто циліндрична розбіжність фронту хвилі в приземному хвилеводі [36, 37].

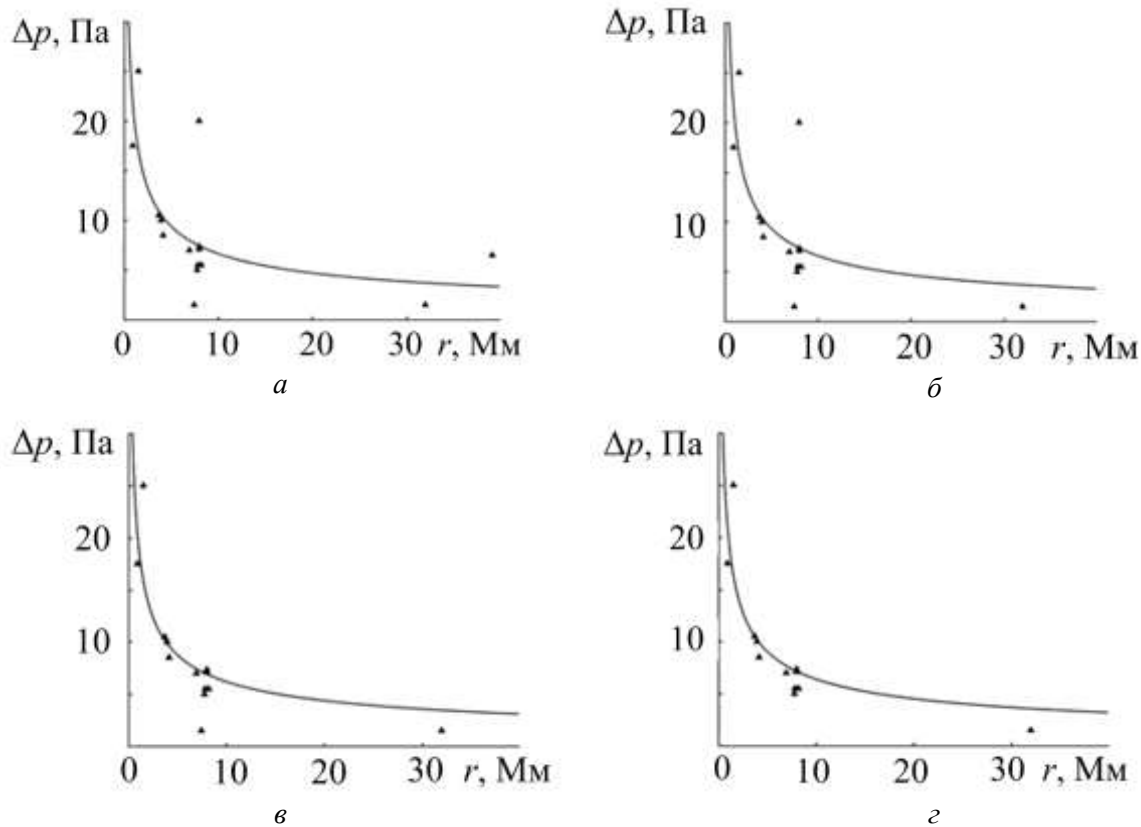


Рис. 4. Залежність амплітуди хвилі тиску, згенерованої виверженням вулкану Св. Олена, від відстані між епіцентром і мікробарографом. Апроксимація степеневим законом: *a* – за 15 трасами, $\Delta p = 21.03r^{-0.5}$, $R \approx 0.70$, $\sigma \approx 4.73$; *б* – за 14 трасами (опущено значення станції Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 20.89r^{-0.5}$, $R \approx 0.71$, $\sigma \approx 4.83$; *в* – за 13 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 19.59r^{-0.5}$, $R \approx 0.85$, $\sigma \approx 3.39$; *г* – за 12 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм), Akita), $\Delta p = 20.22r^{-0.5}$, $R \approx 0.87$, $\sigma \approx 3.08$.

Аналогічну залежність було отримано при апроксимації даних спостережень за амплітудою інфразвуку, згенерованого під час вибуху метеороїду на висоті близько 19 км з енергією ~ 33 кт ТНТ над Індонезією 8 жовтня 2009 року [38].

У той же час під час вибуху Челябінського метеороїду 15 лютого 2013 року на висоті близько 23 км з енергією близько 440 кт ТНТ був згенерований інфразвук, для якого залежність амплітуди від відстані краще описується залежністю $\Delta p \sim r^{-1}$ [36].

Слід зауважити, що вимірювання були виконані для широкого діапазону відстаней

($r \sim 1-10$ Мм), але перераховані джерела відрізнялися за своєю енергією на 1–3 порядки, до порядку величини відрізнялися й періоди переважаючих коливань, істотно відрізнялися й висоти вибуху. Різнилися також і погодні умови в приземній атмосфері. Все це могло привести до різних залежностей $\Delta p(r)$.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили твердження про те, що для інфразвукових сигналів найбільш мінливою характеристикою є залежність амплітуди хвилі від відстані.

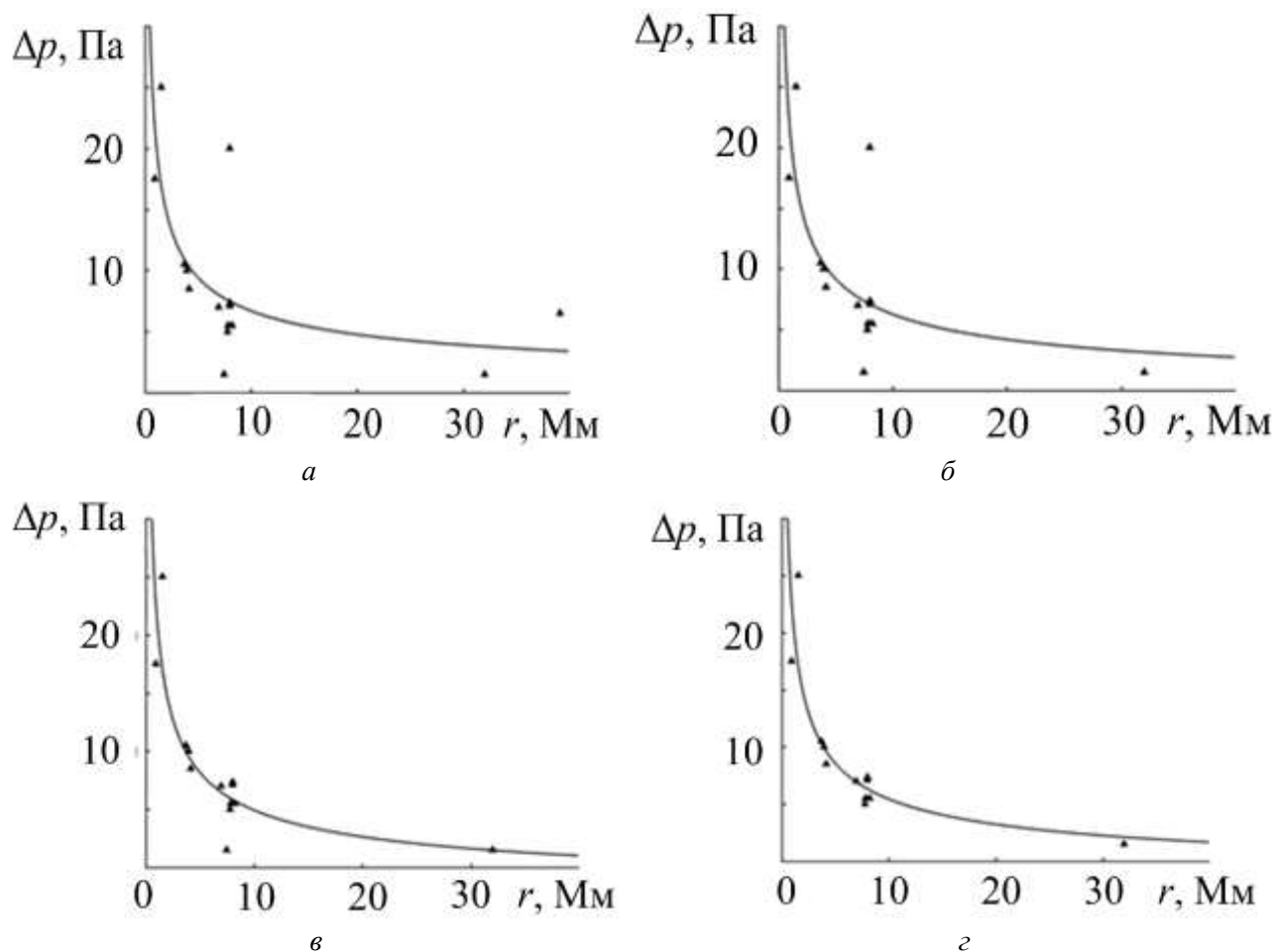


Рис. 5. Залежність амплітуди хвилі тиску, згенерованої виверженням вулкану Св. Олена, від відстані між епіцентром і мікробарографом. Апроксимація степеневим законом: *a* – за 15 трасами, $\Delta p = 20.87r^{-0.5} + 0.09$, $R \approx 0.70$, $\sigma \approx 4.90$; *б* – за 14 трасами (опущено значення станції Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 22.33r^{-0.5} - 0.80$, $R \approx 0.71$, $\sigma \approx 5.01$; *в* – за 13 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 24.67r^{-0.5} - 2.88$, $R \approx 0.87$, $\sigma \approx 3.29$; *г* – за 12 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм), Akita), $\Delta p = 23.84r^{-0.5} - 2.10$, $R \approx 0.89$, $\sigma \approx 3.08$.

4.2. Оцінка енергетики повітряної хвилі

Національна служба погоди США на станції Толедо (штат Вашингтон) зареєструвала часові варіації тиску в ударній хвилі від вибуху вулкана Св. Олени на відстані в 54 км від епіцентру [24]. Сигнал являв собою позитивний сплеск з амплітудою $\Delta p \approx 373$ Па тривалістю менше 1 хв. За ним слідувала фаза “розрідження” з $\Delta p_- \approx 394$ Па тривалістю $\Delta T_- \approx 13$ хв, а потім фаза “стиснення” з

$\Delta p_+ \approx 130$ Па тривалістю $\Delta T_+ \approx 60$ хв. Енергію вибухової хвилі можна оцінити за формулою [35]:

$$E = \frac{2\pi r^2 (\Delta p_-^2 \Delta T_- + \Delta p_+^2 \Delta T_+)}{\rho v_s}, \quad (1)$$

де $\rho \approx 1$ кг/м³ – середня густина повітря на трасі довжиною 54 км, $v_s \approx 330$ м/с – швидкість звуку. Співвідношення (1) передбачає сферичну розбіжність фронту хвилі, що є виправданим при $r \leq 0.1$ –

0.2 Мм. Наведена формула (1) не враховує незначний внесок першого позитивного сплеску тиску через його малу тривалість. Обчислення по співвідношенням (1) дають

$E \approx 10^{16}$ Дж ≈ 2.4 Мт ТНТ. При тривалості процесу близько 73 хв маємо середню потужність вибуху близько 2.3 ТВт.

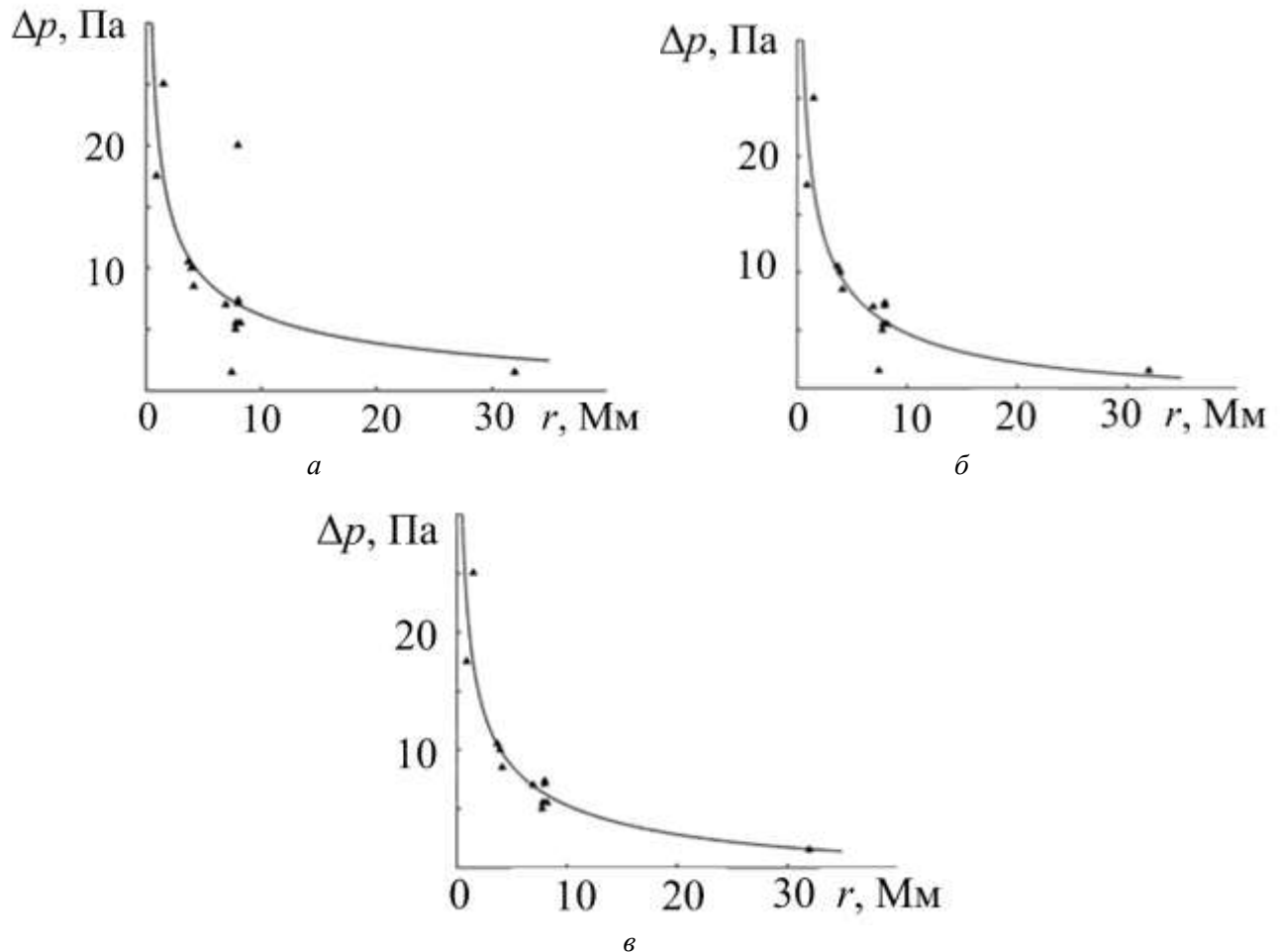


Рис. 6. Залежність амплітуди хвилі тиску, згенерованої виверженням вулкану Св. Олена, від відстані між епіцентром і мікробарографом. Апроксимація експоненційно-степеневим законом: *a* – за 14 трасами (опущено значення станції Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 21.87r^{-0.5}e^{-0.01r}$, $R \approx 0.72$, $\sigma \approx 5$; *b* – за 13 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм)), $\Delta p = 22.73r^{-0.5}e^{-0.04r}$, $R \approx 0.87$, $\sigma \approx 3.24$; *v* – за 12 трасами (опущені значення станцій DeBilt (коротка траса, $r \approx 7.982$ Мм), Berkeley (довга траса, $r \approx 39.106$ Мм), Akita), $\Delta p = 22.35r^{-0.5}e^{-0.03r}$, $R \approx 0.89$, $\sigma \approx 3.04$.

Оцінимо енергетику повітряної хвилі за вимірюваннями амплітуди інфразвукового сигналу. Більшість станцій розташовано на віддаленні $r \approx 8$ Мм від епіцентру, середнє значення для них $\Delta p \approx 6.5$ Па, а тривалість сигналу $\Delta T \approx 5 \cdot 10^3$ с. Тоді, враховуючи

хвилеводний характер поширення інфразвукового сигналу, маємо [35]

$$E \approx \frac{\pi r h \Delta p^2 \Delta T}{\rho v_s}. \quad (2)$$

Співвідношення (2) передбачає циліндричну розбіжність фронту хвилі. Для

стратосферного хвилеводу $h \approx 40$ км, в середньому по висоті $\rho \approx 0.7$ кг/м³, а $v_s \approx 300$ м/с. Тоді з (2) отримуємо, що $E \approx 10^{16}$ Дж ≈ 2.4 Мт ТНТ. При цьому середня потужність повітряної хвилі становить близько 2 ТВт.

Як і слід було очікувати, обидві енергетичні оцінки близькі між собою.

Зауважимо, що енергія вибуху вулкана приблизно на порядок перевищує енергію повітряної хвилі та, ймовірно, вона була близькою до 25 Мт ТНТ.

Додамо, що співвідношення (1) і (2) мають фізичний зміст і являють собою закон збереження енергії. Автори [20] використовують емпіричну формулу для оцінки E , отриману для точкових і «миттєвих» вибухів. За даними [20] $E \approx 35$ Мт ТНТ. Ця оцінка представляється надто завищеною. В роботі [22] теплова енергія виверження вулкану оцінена в 24 Мт ТНТ, а енергія вибухової хвилі – в 7 Мт ТНТ.

4.3. Оцінка періоду основного коливання

Скористаємося співвідношенням між енергією вибуху E і періодом T основного коливання, справедливим для точкового і «миттєвого» вибуху при $E > 40$ кт ТНТ, у вигляді [28, 46]:

$$\lg \frac{E}{2} = 4.014 \lg T - 3.61, \quad (3)$$

де E – в кт ТНТ, а T – в с.

З (3) випливає, що

$$T = 6.673E^{0.249}. \quad (4)$$

Обчислення за формулою (4) дають $T \approx 46$ с. Спостереження [20] показують, що період інфразвуку змінювався від десятків секунд до 3–4 хв. Це означає, що співвідношення (3) і (4) непридатні для розподілених у часі вибухів. Спектральний аналіз залежності $\Delta p(t)$ з роботи [24] для $r \approx 54$ км показав, що в спектрі містилися

гармоніки з періодами від ~ 10 с до 60 хв. Хвилі з таким періодом поширюються в атмосфері з дуже незначним ослабленням.

4.4. Оцінка ослаблення за рахунок розсіяння інфразвуку

Як відомо [4, 47], молекулярне поглинання інфразвуку з періодом $T \approx 50$ –200 с несуттєве. Цього не можна апіорі сказати про його ослаблення за рахунок розсіяння на турбулентних утвореннях в атмосфері. Вираз для γ приведено в роботі [5]:

$$\gamma = \frac{3\alpha\omega^4 L_0^3}{v_s^4 (9 + 5\omega^2 L_0^2 / v_s^2)} \left(\frac{\sigma_v}{v_s} \right)^2, \quad (5)$$

де $\alpha \approx 4.03$ – числовий коефіцієнт, $\omega = 2\pi/T$ – частота інфразвуку, L_0 – зовнішній масштаб турбулентності, σ_v^2 – дисперсія флуктуацій швидкості при турбулентному перемішуванні. При $T \approx 3$ –4 хв з (5) маємо:

$$\gamma \approx \frac{\alpha\omega^4 L_0^3}{3v_s^4} \left(\frac{\sigma_v}{v_s} \right)^2. \quad (6)$$

Масштаб L_0 близький до висоти кратера, покладемо для оцінок $L_0 \approx 1$ км. У хвилеводі «земля–стратосфера» в середньому $v_s \approx 330$ м/с, $\sigma_v \approx 1$ –7 м/с. Оцінки за формулою (6) при $T \approx 200$ с і $\gamma \approx 0.03$ Мм⁻¹ дають аномально велике значення σ_v . Це означає, що ослаблення інфразвуку з $T \sim 100$ –300 с не могло бути викликано його розсіянням на флуктуаціях атмосфери. Для складових з $T \sim 10$ –30 с в залежності від значення σ_v розсіяння було суттєвим (табл. 2).

Іншими механізмами ослаблення інфразвукових хвиль могли бути «висвічування» частини енергії з хвилеводу, який не є ідеальним, а також втрати при відбитті від стінок хвилеводу.

Таблиця 2. Залежність параметрів загасання інфразвуку від періоду коливань ($L_0 = 1$ км)

σ_v , М/с	T , с	10	20	30	50	100	200	300
1	γ , Мм ⁻¹	$5.33 \cdot 10^{-2}$	$6.70 \cdot 10^{-3}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$	$2.39 \cdot 10^{-4}$	$1.61 \cdot 10^{-5}$	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-7}$
	L , Мм	18.7	149	614	$4.2 \cdot 10^3$	$6.2 \cdot 10^4$	10^6	$5 \cdot 10^6$
3	γ , Мм ⁻¹	0.48	$6.03 \cdot 10^{-2}$	$1.47 \cdot 10^{-2}$	$2.15 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$
	L , Мм	2.1	1.66	68.2	465	$6.9 \cdot 10^3$	$1.11 \cdot 10^5$	$5.55 \cdot 10^5$
5	γ , Мм ⁻¹	1.33	0.17	$4.1 \cdot 10^{-2}$	$5.98 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
	L , Мм	0.75	6.0	24.5	167	$2.5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
7	γ , Мм ⁻¹	2.61	0.33	0.08	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$9.8 \cdot 10^{-6}$
	L , Мм	0.38	3.0	12.5	85.4	$12 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	10^5

5. Основні результати

1. За даними вимірювань амплітуди тиску у вибуховій хвилі, згенерованій початком виверження вулкана Св. Олена, виконаних на 13 станціях, віддалених на відстані близько 0.9 – 39 Мм, зроблено спробу знаходження регресії, яка описує залежність амплітуди від відстані. Встановлено, що найкращою є регресія, заснована на припущенні хвилеводного поширення інфразвуку з його ослабленням у результаті прояву низки механізмів.

2. За даними спостережень за ударною хвилею від вибуху вулкана Св. Олена оцінено її енергію ($\sim 10^{16}$ Дж) та середню потужність (~ 2.3 ТВт).

3. За даними вимірювань амплітуди та тривалості цугу інфразвукової хвилі, згенерованої вибухом вулкана Св. Олена, оцінено енергію (близько 10^{16} Дж) та середню потужність (~ 2 ТВт) повітряної хвилі.

4. За енергією вибухової хвилі не вдалося оцінити період переважаючого коливання в діапазоні інфразвукового сигналу через розтягнутість “вибуху” в часі.

5. З отриманої регресії оцінено глибину загасання інфразвукової хвилі за рахунок її розсіяння турбулентними утвореннями атмосфери (близько 33 Мм).

6. Виходячи з теоретичної залежності коефіцієнту ослаблення інфразвукової хвилі турбулентністю атмосфери, оцінено значення глибини загасання інфразвуку з періодами 10 – 300 с. Для періодів 20 – 300 с (в залежності від значення σ_v^2) це значення виявилось більшим за значення, оцінене з даних спостережень. Для періодів, менших за 20 – 50 с (в залежності від σ_v^2) цей механізм ослаблення може бути суттєвим.

7. Альтернативними механізмами ослаблення інфразвукових хвиль можуть бути “висвічування” частини енергії хвилі з хвилеводу внаслідок його неідеальності, втрати енергії при відбитті від стінок хвилеводу.

Робота Л. Ф. Черногора частково фінансувалася в рамках держбюджетної НДР установ МОН України (номер держреєстрації 0119U002538), а також за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 “Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера”.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. Москва: Мир, 1978. 532 с.
2. Куличков С. Н., Буш Г. А., Попов О. Е., Распопов О. М., Ривелл Д. О., Уитекер Р. В., Авилон К. В., Барышников А. К. Об аномально быстрых инфразвуковых приходах на больших расстояниях от наземных взрывов. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1982. Т. 28, №4. С. 339–359.
3. Ponomarev E. A., Erushchenkov A. I. Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1977. Vol. 20, no. 12. Pp. 1218–1229.
4. Infrasonic Monitoring for Atmospheric Studies / Eds.: A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne. Switzerland AG, Springer Nature, 2019. XXVIII, 1167 p.
5. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
6. Donn W. L., Ewing M. Atmospheric waves from nuclear explosions, I, The Soviet test of 30 October 1961. *Journal Geophysical Research*. 1962. Vol. 67. Pp. 1952–1961.
7. Donn W. L., Ewing M. Atmospheric waves from nuclear explosions, II, The Soviet test of 30 October 1961. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1962. Vol. 19. Pp. 264–273.
8. Donn W. L., Shaw D. M., Hubbard A. C. The microbarograph detection of nuclear explosions. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1963. Vol. 10. Pp. 285–296.
9. Che I. Y., Park J., Kim I., Kim T. S., Lee H. I. Infrasonic signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophysical Journal International*. 2014. Vol. 198, no. 1. Pp. 495–503.
10. Donn W. L., Posmentier E., Fehr U., Balachandran N. K. Infrasonic at long range from Saturn V, 1967. *Science*. 1968. Vol. 162, № 3858. Pp. 1116–1120.
11. Balachandran N. K., Donn W. L. Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets. *Geophysical Journal International*. 1971. Vol. 26, Is. 1–4. Pp. 135–148.
12. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*. 1977. Vol. 197, no. 4298. Pp. 47–49.
13. Donn W. L. Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *American Scientist*. 1978. Vol. 66, no. 6. Pp. 724–733.
14. Pichon A., Garcés M., Blanc E., Barthélémy M., Drob D. P. Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111, no. 1. Pp. 629 – 641.
15. Olson J. Infrasonic rocket signatures. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. 2012. Vol. 1. Pp. 638 – 645.
16. Cook R. K., Young J. M. Strange Sounds in the Atmosphere. Part II. *Sound: Its Uses and Control*. 1962. Vol. 1, no. 3. Pp. 25–33.
17. Landès M., Ceranna L., A. Le Pichon, Matoza R. S. Localization of microbarom sources using the IMS infrasonic network. *Journal Geophysical Research*. 2012. Vol. 117, Paper no. D06102, doi:10.1029/2011JD016684.
18. Le Pichon A., Herry P., Mialle P., Vergoz J., Brachet N., Garcés M., Drob D., Ceranna L. Infrasonic associated with 2004–2005 large Sumatra earthquakes and tsunami. *Geophysical Research Letter*. 2005. Vol. 32. Paper no. L19802. DOI:10.1029/2005GL023893.
19. Bolt B. A., Tanimoto T. Atmospheric oscillations after the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens. *Eos Trans. AGU*. 1981. Vol. 62. Pp. 529–530.
20. Donn W. L., Balachandran N. K. Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield. *Science*. 1981. Vol. 213, no. 4507. Pp. 539–541.
21. Edman D. A., Selin R. A note on the Mount St. Helens volcanic eruption. *Monthly Weather Review*. 1981. Vol. 109. Pp. 1103–1110.
22. Kieffer S. W. Blast dynamics at Mount St. Helens on 18 May 1980. *Nature*. 1981. Vol. 291, Pp. 568–570.
23. Banister J. R. Pressure wave generated by the Mount St. Helens eruption. *Journal Geophysical Research*. 1984. Vol. 89. Pp. 4895–4904.
24. Reed J. W. Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. *Journal Geophysical Research*. 1987. Vol. 92, no. D10. Pp. 11979–11992. DOI:10.1029/JD092iD10p11979.
25. Balachandran N. K. Infrasonic signals from thunder. *Journal Geophysical Research*. 1979. Vol. 84, no. C4. Pp. 1735–1745.
26. Maeda K., Young J. Propagation of pressure waves produced by auroras. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 1966. Vol. 18, no. 2. Pp. 275 – 299.
27. ReVelle D. O. On meteor-generated infrasonic. *Journal of Geophysical Research*. 1976. Vol. 81, no. 7. Pp. 1217–1230.
28. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic gravity waves. *Near-Earth Objects*. Ed. J. Remo. *Annals of the New-York Academy of Science*. 1997. Vol. 822, no. 1. Pp. 284–302.

29. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых эффектов, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Радіофізика та електроніка"*. 2016. Т. 25. С. 70–73.
30. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2017. №8. С. 427–436.
31. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. Т. 22, №1. С. 53–66.
32. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Кинематика и физика небесных тел*. 2017. Т. 33, №2. С. 60–72.
33. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г. *Кинематика и физика небесных тел*. 2017. Т. 33, №6. С. 34–54.
34. ElGabry M. N., Korrat I. M., Hussein H. M., Namama I. H. Infrasound detection of meteors. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. 2017. Vol. 6, no. 1. Pp. 68–80.
35. Черногор Л. Ф. Параметры акустических сигналов, сгенерированных атмосферным взрывом метеороида над Румынией 7 января 2015 г. *Астрономический вестник*. 2018. Т. 52, №3. С. 201–212.
36. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23, №1. С. 24–35.
37. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной Тунгусским космическим телом, от расстояния. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. Т. 23, №2. С. 94–103.
38. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. *Кинематика и физика небесных тел*. 2018. Т. 34, №3. С. 59–75.
39. Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Липецким метеороидом: результаты статистического анализа. *Кинематика і фізика небесних тіл*. 2020. Т. 36, №4. – С. 58–71.
40. Черногор Л. Ф., Лящук О. І., Шевелев М. Б. Параметри інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським метеороїдом. *Кинематика і фізика небесних тіл*. – 2020. – Т. 36, № 5. – С. 31–54.
41. Chum, J., Liu, J.-Y., Podolská, K., Šindelářová, T. Infrasound in the ionosphere from earthquakes and typhoons. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2018. Vol. 171. Pp. 72–82. doi:/10.1016/j.jastp.2017.07.022
42. Dolgikh, G. I., Chupin, V. A. & Gusev, E. S. Infrasound Strain Perturbations Caused by Typhoons. *Izv., Phys. Solid Earth*. 2019. Vol. 55. Pp. 792–800. <https://doi.org/10.1134/S1069351319050033>
43. Roberts D. H., Klobuchar J. A., Fougere P. F., Hendrickson D. H. A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, explosion of Mount St. Helens. *JGR: Space Physics*. 1982. Vol. 87, no. A8. Pp. 6291–6301. DOI: 10.1029/JA087iA08p06291
44. Roberts D. H., Rogers A. E. E., Allen B. R., Bennett C. L., Burke B. F., Greenfield P. E., Lawrence C. R., Clark T. A. Radio Interferometric Detection of a Traveling Ionospheric Disturbance Excited by the Explosion of Mount St. Helens. *JGR: Space Physics*. 1982. Vol. 87, no. A8. Pp. 6302–6306. DOI: 10.1029/JA087iA08p06302
45. Liu C. H., Klostermeyer J., Yeh K. C., Jones T. B., Robinson T., Holt O., Leitinger R., Ogawa T., Sinno K., Kato S., Ogawa T., Bedard A. J., Kersley L. Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980. *JGR: Space Physics*. 1982. Vol. 87, no. A8. Pp. 6281–6290. DOI: 10.1029/JA087iA08p06281
46. Glasstone S., Dolan P. J. The effects of nuclear weapons. Washington, DC: US Department of Defense and US Department of Energy, US Government Printing Office, 1977. 653 p.
47. Reed J. W. Atmospheric attenuation of explosion waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1977. Vol. 61. Pp. 39–47.

REFERENCES

- 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.
- Kulichkov, S. N., Bush, G. A., Popov, O. E., Raspopov, O. M., ReVelle, D. O., Whitaker, R. W.,

- Avilov, K. V., & Baryshnikov, A. K. (1982). On anomalously fast infrasonic arrivals at long distances from surface explosions. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 28(4), 339–359.
3. Ponomarev, E. A. & Erushchenkov, A. I. (1977). Infrasonic waves in the Earth's atmosphere (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*, 20(12), 1218–1229.
 4. Le Pichon, A., Blanc, E., & Hauchecorne, A. eds. (2019). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. New York: Springer.
 5. Chernogor, L. F., (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
 6. Donn, W. L. & Ewing, M. (1962). Atmospheric waves from nuclear explosions, I, The Soviet test of 30 October 1961. *Journal Geophysical Research*, 67, 1952–1961.
 7. Donn, W. L. & Ewing, M. (1962). Atmospheric waves from nuclear explosions, II, The Soviet test of 30 October 1961. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19, 264–273.
 8. Donn, W. L., Shaw, D. M., & Hubbard, A. C. (1963). The microbarograph detection of nuclear explosions. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 10, 285–296.
 9. Che, I. Y., Park, J., Kim, I., Kim, T. S., Lee, H. I. (2014). Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophysical Journal International*, 198(1), 495–503.
 10. Donn, W. L., Posmentier, E., Fehr, U., & Balachandran, N. K. (1968). Infrasound at long range from Saturn V, 1967. *Science*, 162(3858), 1116–1120.
 11. Balachandran, N. K. & Donn, W. L. (1971). Characteristics of Infrasonic Signals from Rockets. *Geophysical Journal International*, 26(1–4), 135–148.
 12. Balachandran, N. K., Donn, W. L., & Rind, D. H. (1977). Concorde sonic booms as an atmospheric probe. *Science*, 197(4298), 47–49.
 13. Donn, W. L. (1978). Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *American Scientist*, 66(6), 724–733.
 14. Pichon, A., Garcés, M., Blanc, E., Barthélémy, M., & Drob, D. P. (2002). Acoustic propagation and atmosphere characteristics derived from infrasonic waves generated by the Concorde. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(1), 629–641.
 15. Olson, J. (2012). Infrasound rocket signatures. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 1, 638–645.
 16. Cook, R. K. & Young, J. M. (1962). Strange Sounds in the Atmosphere. Part II. *Sound: Its Uses and Control*, 1(3), 25–33.
 17. Landès, M., Ceranna, L., Le Pichon, A., & Matoza, R. S. (2012). Localization of microbarom sources using the IMS infrasound network. *Journal Geophysical Research*, 117, D06102, doi:10.1029/2011JD016684.
 18. Le Pichon, A., Herry, P., Mialle, P., Vergoz, J., Brachet, N., Garcés, M., Drob, D., & Ceranna, L. (2005). Infrasound associated with 2004–2005 large Sumatra earthquakes and tsunamis. *Geophysical Research Letter*, 32, Article L19802. doi:10.1029/2005GL023893.
 19. Bolt, B. A. & Tanimoto, T. (1981). Atmospheric oscillations after the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens. *Eos Trans. AGU*, 62, 529–530.
 20. Donn, W. L. & Balachandran, N. K. (1981). Mount St. Helens eruption of 18 May 1980: Air waves and explosive yield. *Science*, 213(4507), 539–541.
 21. Edman, D. A. & Selin, R. (1981). A note on the Mount St. Helens volcanic eruption. *Monthly Weather Review*, 109, 1103–1110.
 22. Kieffer, S. W. (1981). Blast dynamics at Mount St. Helens on 18 May 1980. *Nature*, 291, 568–570.
 23. Banister, J. R. (1984). Pressure wave generated by the Mount St. Helens eruption. *Journal Geophysical Research*, 89, 4895–4904.
 24. Reed, J. W. (1987). Air pressure waves from Mount St. Helens eruptions. *Journal Geophysical Research*, 92(D10), 11979–11992, doi:10.1029/JD092iD10p11979.
 25. Balachandran, N. K. (1979). Infrasonic signals from thunder. *Journal Geophysical Research*, 84(C4), 1735–1745.
 26. Maeda, K. & Young, J. (1966). Propagation of pressure waves produced by auroras. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 18(2), 275–299.
 27. ReVelle, D. O. (1976). On meteor-generated infrasound. *Journal of Geophysical Research*, 81(7), 1217–1230.
 28. ReVelle, D. O. (1997). Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic gravity waves. *Near-Earth Objects / Ed. J. Remo. Annals of the New-York Academy of Science*, 822, 284–302.
 29. Chernogor, L. F. & Shevelev, M. B. (2016). Infrasonic effects parameters generated by the Chelyabinsk meteoroid on 15 February 2013. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics"*, 25, 70–73.

30. Lazorenko, O. V. & Chernogor, L. F. (2017). System Spectral Analysis of Infrasonic Signal Generated by Chelyabinsk Meteoroid. *Radioelectronics and Communications Systems*, 60(8), 331–338.
31. Chernogor, L. F. (2017). Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. *Radio Phys. Radio Astron.*, 22(1), 53–66 [In Russian].
32. Chernogor, L. F. & Liashchuk, O. I. (2017). Parameters of Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk Meteoroid on February 15, 2013. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 33(2), 79–87.
33. Chernogor, L. F. & Liashchuk, O. I. (2017). Infrasonic observations of the bolide explosion over Romania on January 7, 2015. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 33(6), 276–290.
34. ElGabry, M. N., Korrat, I. M., Hussein, H. M., & Hamama, I. H. (2017). Infrasound detection of meteors. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(1), 68–80.
35. Chernogor, L. F. (2018). Parameters of Acoustic Signals Generated by the Atmospheric Meteoroid Explosion over Romania on January 7, 2015. *Solar System Research*, 52(3), 206–222.
36. Chernogor, L. F. & Shevelev, M. B. (2018). Characteristics of the infrasound signal generated by Chelyabinsk celestial body: global statistics. *Radio Phys. Radio Astron.*, 23(1), 24–35 [In Russian].
37. Chernogor, L. F. & Shevelev, M. B. (2018). Infrasound wave generated by the Tunguska celestial body: amplitude dependence on distance. *Radio Phys. Radio Astron.*, 23(2), 94–103.
38. Chernogor, L. F. & Shevelev, M. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 34(3), 147–160.
39. Chernogor, L. F. & Shevelev, M. B. (2020). Characteristics of Infrasonic Signals Generated by the Lipetsk Meteoroid: Statistical Analysis. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 36(4), 186–194.
40. Chernogor, L. F., Liashchuk, O. I. & Shevelev, M. B. (2020). Parameters of the Infrasonic Signal Generated by the Kamchatka Meteoroid. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 36(5), 222–237.
41. Chum, J., Liu, J.-Y., Podolská, K., Šindelářová, T. (2018). Infrasound in the ionosphere from earthquakes and typhoons. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 171, 72–82. doi:10.1016/j.jastp.2017.07.022
42. Dolgikh, G. I., Chupin, V. A. & Gusev, E. S. (2019). Infrasound Strain Perturbations Caused by Typhoons. *Izv., Phys. Solid Earth*, 55, 792–800. <https://doi.org/10.1134/S1069351319050033>
43. Roberts, D. H., Klobuchar, J. A., Fougere, P. F., Hendrickson, D. H. (1982). A large-amplitude traveling ionospheric disturbance produced by the May 18, explosion of Mount St. Helens. *JGR: Space Physics*, 87(A8), 6291–6301. DOI: 10.1029/JA087iA08p06291
44. Roberts, D. H., Rogers, A. E. E., Allen, B. R., Bennett, C. L., Burke, B. F., Greenfield, P. E., Lawrence, C. R., Clark, T. A. (1982). Radio Interferometric Detection of a Traveling Ionospheric Disturbance Excited by the Explosion of Mount St. Helens. *JGR: Space Physics*, 87(A8), 6302–6306. DOI: 10.1029/JA087iA08p06302
45. Liu, C. H., Klostermeyer, J., Yeh, K. C., Jones, T. B., Robinson, T., Holt, O., Leiting, R., Ogawa, T., Sinno, K., Kato, S., Ogawa, T., Bedard, A. J., Kersley, L. (1982). Global dynamic responses of the atmosphere to the eruption of Mount St. Helens on May 18, 1980. *JGR: Space Physics*, 87(A8), 6281–6290. DOI: 10.1029/JA087iA08p06281
46. Glasstone, S. & Dolan, P. J. (1977). *The effects of nuclear weapons*. US Department of Defense and US Department of Energy, US Government Printing Office, Washington, DC.
47. Reed, J. W. (1977). Atmospheric attenuation of explosion waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 61, 39–47.

Parameters of the Infrasonic Signal Generated in the Atmosphere by Explosion of Powerful Volcano

L. F. Chernogor

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

The purpose of this work is to represent the results of performing regression analysis to fit the distance and the amplitude of the infrasonic signal generated by the explosion of St. Helens volcano, and to estimate a few signal and atmospheric parameters. The pressure amplitude in the explosion wave generated at the beginning of St. Helens volcano eruption was measured at 13 stations in the 0.9 – 39-Mm distance range; based on these data, an attempt has been made to perform a regression analysis to fit amplitude and distance. The regression based on the assumption that the infrasound

propagation takes place in a waveguide where it is subject to attenuation is determined to be the most preferable regression. Based on the observations of the shock from the St. Helens volcano eruption, the shock wave energy and mean power have been estimated to be $\sim 10^{16}$ J and ~ 2.3 TW, respectively. Based on the measurements of the amplitude and duration of the trains of the infrasonic wave generated by the St. Helens volcano eruption, the infrasonic wave energy and mean power have been estimated to be $\sim 10^{16}$ J and ~ 2 TW, respectively. Both estimates are in good agreement, but they are significantly different from those found in the literature; the latter seem to be overestimated. From the regression expression obtained, the penetration depth of the infrasonic wave is obtained to be about 33 Mm, whereas at other stations this scale length is estimated to be close to 24 Mm. Based on the theoretical dependence of the attenuation coefficient due to atmospheric turbulence, the attenuation length of the infrasound wave has been estimated for infrasound with 10–300-s periods. For 20–300-s periods, this value has been shown to be significantly larger than the values determined from the observations. Other mechanisms for attenuating the infrasonic signal are discussed (the partial radiation of the infrasonic energy through and losses due to the reflection from the waveguide walls). At the same time, the wave attenuation due to their scattering by turbulent fluctuations can be significant for the periods smaller than 20–50 s, depending on the turbulence intensity. Comparison of the regression functions obtained with the corresponding regression expressions for other sources of infrasound waves propagating in the atmosphere has been made.

Key words: volcano eruption, infrasonic wave, shock wave, signal amplitude, regression, signal attenuation

Параметры инфразвукового сигнала в атмосфере, сгенерированного взрывом мощного вулкана

Л. Ф. Черногор

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

Целью настоящей работы является изложение результатов построения регрессий, описывающих зависимость амплитуды инфразвукового сигнала, сгенерированного при взрыве вулкана St. Helens, от расстояния и оценка ряда параметров сигнала и атмосферы. По данным измерений амплитуды давления во взрывной волне, сгенерированной

началом извержения вулкана Св. Елена, выполненных на 13 станциях, удаленных на расстояния около 0.9 – 39 Мм, предпринята попытка нахождения регрессии, описывающей зависимость амплитуды от расстояния. Установлено, что наиболее предпочтительной является регрессия, основанная на предположении волноводного распространения инфразвука с его ослаблением. По данным наблюдений за ударной волной от взрыва вулкана Св. Елена оценена энергия воздушной волны ($\sim 10^{16}$ Дж) и её средняя мощность (~ 2.3 ТВт). По данным измерений амплитуды и длительности цуга инфразвуковой волны, сгенерированной взрывом вулкана Св. Елена, оценены её энергия (порядка 10^{16} Дж) и средняя мощность (~ 2 ТВт). Обе оценки хорошо согласуются между собой, но существенно отличаются от приведенных в литературе. Последние представляются сильно завышенными. Из полученной регрессии оценена глубина затухания инфразвуковой волны (около 33 Мм). По измерениям на других станциях этот масштаб близок к 24 Мм. Исходя из теоретической зависимости коэффициента ослабления инфразвуковой волны турбулентностью атмосферы, оценено значение глубины затухания инфразвука с периодами 10–300 с. Для периодов 20–300 с это значение оказалось намного больше значения, оцененного из данных наблюдений. Обсуждаются другие механизмы ослабления инфразвукового сигнала (высвечивание части энергии из волновода, потери при отражении от стенок волновода). В то же время механизм ослабления инфразвуковых волн за счет их рассеяния на турбулентных образованиях может быть существенным для периодов, меньших 20–50 с (в зависимости от интенсивности турбулизации). Проведено сравнение полученной регрессии с соответствующими регрессиями для других источников инфразвуковых волн, распространяющихся в атмосфере.

Ключевые слова: взрыв вулкана, инфразвуковая волна, ударная волна, амплитуда сигнала, регрессии, ослабление сигнала

Стаття надійшла до редакції 23.09.2020