

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.04.058>

УДК 551.558, 551.596, 534.221

Л. Ф. Черногор, М. Б. Шевелев

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

Характеристики інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом: результати статистичного аналізу

Метою роботи є побудова основних кореляційних полів і відповідних регресійних залежностей для характеристик інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом. Космічне тіло вторгнулось до атмосфери Землі 21 червня 2018 р. о 01:16:20 UT. Початкова швидкість метеороїда становила 14.4 км/с, маса — близько 113 т, розмір — близько 4 м, а кінетична енергія дорівнювала 2.8 кт ТНТ. Згенеровані космічним тілом інфразвукові хвилі спостерігались у глобальних масштабах. Ці хвилі зареєстровані міжнародною системою моніторингу (IMS) ядерних випробувань, яка належить Організації за Договором про всеосяжну заборону ядерних випробувань (CTBTO). Для обробки даних використовувались методи математичної статистики. Дослідження показали, що час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався при збільшенні горизонтальної відстані від епіцентра вибуху метеороїда до станцій за лінійним законом. При цьому середня за всіма трасами швидкість приходу сигналу була близькою до 304...305 м/с. Швидкість приходу інфразвукового сигналу при збільшенні відстані спочатку достатньо швидко зменшувалась, а на відстанях 4.5...8.66 Мм флукувала біля значення 302 м/с. Залежність тривалості інфразвукового сигналу від відстані була спадною за лінійним законом. Дисперсійне розширення сигналу було несуттєвим на відстанях 5...8 Мм. Середні значення періодів інфразвукового сигналу, які не залежать від відстані та які оцінено за різними регресіями, дорівнювали 6.28 ± 0.98 та 6.14 ± 0.76 с. Середнє значення початкової кінетичної енергії метеороїда, отримане з інфразвукових спостережень періоду коливань, становить 2.26...2.43 кт ТНТ, що несуттєво відрізняється від незалежних даних НАСА (2.8 кт ТНТ). Апроксимація швидкості приходу інфразвукового сигналу від синуса

азимутального кута показала, що скориговане значення швидкості приходу сигналу становило приблизно 300 м/с, а середнє значення тропосферно-стратосферного вітру було близьким до 25...31 м/с. Аналіз кореляційних полів виявив стійкий статистичний зв'язок між спостережуваним та істинним азимутами джерела інфразвуку. Відмічено, що мала місце тенденція до збільшення рівня флуктуацій азимута при збільшенні відстані.

Ключові слова: Липецький метеороїд, інфразвук, параметри сигналу, регресії, кореляційні поля.

ВСТУП

Вторгнення до атмосфери Землі будь-якого достатньо великого космічного тіла та викликані ним фізичні ефекти заслуговують уважного вивчення. Нещодавною подією став політ і вибух Липецького метеороїда [9].

Дане космічне тіло вторгнулось до атмосфери Землі поблизу м. Липецьк (Росія) 21 червня 2018 р. о 01:06:20 UT (тут і далі всесвітній час) та вибухнуло на висоті приблизно 27 км [9]. Його політ і вибух зафіксовано системою контролю космічного простору США [9] та чисельними відеореєстраторами на відстанях понад 300 км. Виміряні проекції швидкості дорівнювали: $v_x = -8.9$ км/с, $v_y = -4.3$ км/с, $v_z = -10.5$ км/с, а модуль швидкості — 14.4 км/с. Енергія світлового свічення дорівнювала $1.22 \cdot 10^{12}$ Дж ≈ 0.29 кт ТНТ, її координати: 52.8 N, 38.1 E. Знайдені фрагменти космічного тіла свідчили про те, що метеорит належить до класу звичайних хондритів з щільністю 3.3 т/м³. За енергією свічення оцінено початкову кінетичну енергію тіла $E = 1.17 \cdot 10^{13}$ Дж ≈ 2.8 кт ТНТ, за енергією та швидкістю обчислено масу метеороїда (113 т), а за масою та щільністю — об'єм (34.2 м³) та розмір (≈ 4 м).

Липецькому метеороїду присвячено низку робіт, у яких промодельовані механічні, оптичні та газодинамічні ефекти [1], — термодинамічні, плазмові ефекти, а також ефекти турбулентності та плюму [2], — магнітні, електричні, електромагнітні, сейсмічні, іоносферні ефекти, а також ефекти акустико-гравітаційних хвиль [3]. У роботі [4] описано результати спостережень і аналізу іоносферних ефектів Липецького метеороїда, а в роботах [6, 8] — результати спостережень і аналізу магнітних ефектів цього метеороїда.

У роботі [10] за даними 10 інфразвукових станцій знайдено період інфразвукових коливань 5.38 ± 2.95 с, початкову енергію Липецького метеороїда (у роботі він іменується метеоритом «Озерки») в 0.3...8.8 кт ТНТ (середнє 2.4 кт ТНТ), маса 10...380 т (середнє 98 т) та розмір 1.8...6.6 м (середнє 3.8 м). Ці значення є досить близькими до значень, наведених у роботі [1].

Метою цієї роботи є побудова основних кореляційних полів і від-

повідних регресійних залежностей для характеристик інфразвукового сигналу, який було згенеровано Липецьким метеороїдом.

Методика дослідження в цій роботі подібна до методик, описаних у роботах [5, 7].

Додамо, що початкова кінетична енергія Челябінського метеороїда дорівнювала 440 кт ТНТ, Індонезійського — 70–20 кт ТНТ, а Липецького — 2.8 кт ТНТ. Становить інтерес порівняння результатів статистичного аналізу характеристик інфразвукових сигналів, згенерованих метеороїдами, початкова кінетична енергія яких відрізнялась більш ніж на порядок величини.

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТЕОРОЇД

Основні відомості про 10 інфразвукових станцій СТВТО, які зареєстрували інфразвукові сигнали, та характеристики цих сигналів наведено у табл. 1 та 2. Схему розташування станцій показано на рис. 1. Видно, що більшість станцій лежить на заході, а одна станція — на сході від місця вибуху Липецького метеороїда. Таке розташування станцій дозволяє простежити залежність характеристик інфразвуку від азимута.

З табл. 1 видно, що віддалення r інфразвукових станцій від джерела інфразвуку змінювалось від 0.53 до 8.66 Мм, час запізнення сигналу

Таблиця 1. Загальні відомості про інфразвукові станції та характеристики інфразвукових сигналів

| Станція | Координати станції | r , Мм | f , Гц | T , с | A_{tr} | A_{obs} | A |
|---------|--|----------|-------------|--------------|----------|-----------|--------|
| I43RU | Дубна, Росія (56.7°N, 37.3°E) | 0.53 | 0.05...6 | 0.17...20 | 176.0° | 173.30° | -2.70° |
| I26DE | Freung, Німеччина (48.9°N, 13.7°E) | 1.74 | 0.15...6 | 0.17...6.63 | 69.4° | 68.1° | -1.30° |
| I37NO | Bardufoss, Норвегія (69.1°N, 18.6°E) | 2.16 | 0.02...6 | 0.17...50 | 142.4° | 139.90° | -2.50° |
| I48TN | Kesra, Туніс (35.8°N, 9.3°E) | 2.88 | 0.035...6 | 0.17...28.6 | 42.5° | 40.5° | -2.00° |
| I18DK | Qaanaaq, Гренландія (77.5°N, 69.3°W) | 4.82 | 0.11...0.82 | 1.2...9 | 59.5° | 59.0° | -0.50° |
| I42PT | Azores, Graziosa Island, Португалія (37.8°N, 25.5°W) | 5.15 | 0.04...3.39 | 0.30...20 | 51.3° | 54.40° | 3.10° |
| I17CI | Dimbokro, Кот-д'Івуар (6.7°N, 4.9°W) | 6.35 | 0.06...0.35 | 2.86...16.67 | 29.9° | 31.00° | 1.10° |
| I53US | Fairbanks, США (64.9°N, 147.9°W) | 7.05 | 0.20...0.82 | 1.2...5 | 356.1° | 358.6° | 2.50° |
| I10CA | Lac du Bonnet, Канада (50.2°N, 95.9°EW) | 7.89 | 0.06...0.82 | 1.22...16.67 | 28.2° | 29.70° | 1.50° |
| I56US | Newport, США (48.3°N, 117.1°W) | 8.66 | 0.06...1.08 | 0.93...16.67 | 15.6° | 13.10° | -2.50° |

Таблиця 2. Загальні відомості про характеристики інфразвукових сигналів

| Станція | t , хв | v , м/с | T , хв | T_{amp} , с | Примітка |
|---------|----------|-----------|----------|---------------|---|
| I43RU | 22.87 | 387.70 | 6.65 | 1.65 | Аномально велика швидкість, аномально малий період, аномальний азимут |
| I26DE | 83.22 | 347.67 | 21.05 | 5.80 | Велика швидкість |
| I37NO | 106.12 | 339.08 | 40.55 | 12.00 | Аномально великий період, аномально велика тривалість |
| I48TN | 147.72 | 324.37 | 23.95 | 4.60 | |
| I18DK | 263.05 | 305.46 | 4.88 | 5.10 | Аномальна тривалість |
| I42PT | 286.55 | 299.54 | 11.75 | 8.85 | Аномальний азимут |
| I17CI | 358.08 | 295.56 | 9.60 | 10.10 | Аномально великий період |
| I53US | 384.28 | 305.85 | 1.38 | 3.95 | Вузька смуга приладу, аномально мала тривалість |
| I10CA | 433.68 | 303.10 | 4.72 | 5.60 | |
| I56US | 473.90 | 304.53 | 6.55 | 5.15 | |

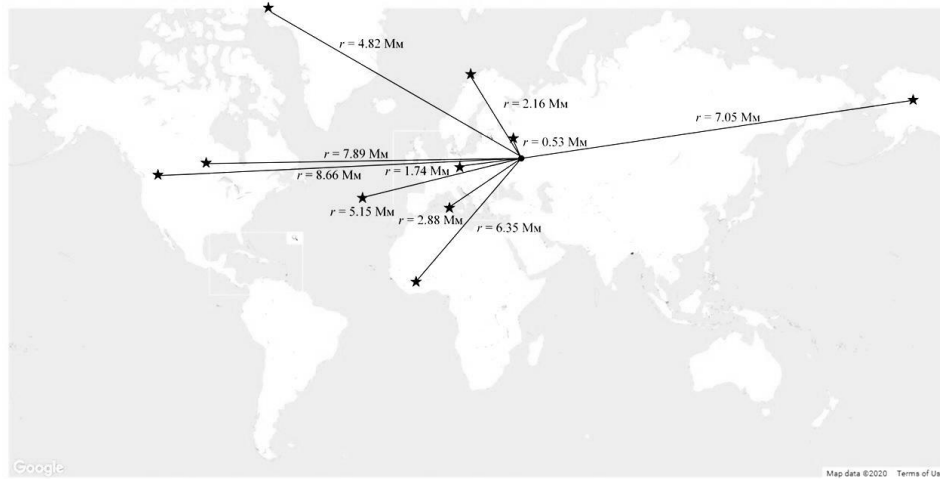


Рис. 1. Схема розташування інфразвукових станцій відносно місця вибуху метеороїда

t — від 22.87 до 473.90 хв, швидкість приходу інфразвуку — від 387.70 до 304.53 м/с, тривалість T сигналу — від 1.38 до 40.55 хв, період T — від 1.65 до 12.00 с, флуктуації азимута A — від -2.7 до 3.1 . Відмітимо, що лише на одній станції I53US (Fairbanks, США) смуга пропускання фільтра f була менше смуги частот інфразвукового сигналу.

З табл. 2 випливає, що аномально низькі тривалості інфразвукового сигналу (1.38 хв) були зареєстровані на станції I53US (Fairbanks, США). У той же час аномально велика тривалість сигналу (40.55 хв) спостерігалась на станції I37NO (Bardufoss, Норвегія). Аномально малий період коливань інфразвуку (1.65 с) відмічено на станції I43RU (Дубна, Росія), а аномально великий період (12.00 с) — на станціях I37NO (Bardufoss, Норвегія) та 10.10 с — на станції I17CI (Dimbokro, Кот-д’Івуар). Найбільші флуктуації азимута спостерігались на стан-

ціях I43RU (Дубна, Росія) та I42PT (Azores, Португалія), де вони становили -2.7 та 3.1 відповідно.

РЕЗУЛЬТАТИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Час запізнення сигналу. Час запізнення сигналу t розраховувався як різниця між моментами часу приходу переднього фронту цугу коливань інфразвукового сигналу та часу вторгнення метеороїда до атмосфери Землі. Залежність часу запізнення від горизонтальної відстані r між місцем спалаху метеороїда та місцем розташування інфразвукової станції показано на рис. 2. Видно, що при збільшенні r збільшу-

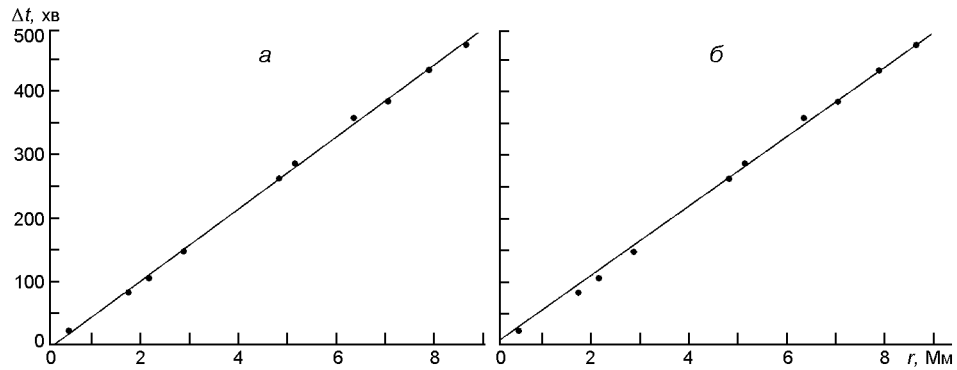


Рис. 2. Залежність часу запізнення інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом, від відстані. Апроксимація: а — за 10 точками лінійним законом $t = 54.78r$, коефіцієнт достовірності апроксимації $R = 0.9987$, середнє квадратичне відхилення 7.93 хв; б — $t = 54.54r + 1.4$, $R = 0.9985$, 8.48 хв

вався час запізнення t . Середня швидкість приходу інфразвукового сигналу для всіх трас оцінюється за формулою

$$v = \frac{d}{dr} t^{-1}.$$

Кореляційне поле « t — r » апроксимувалося такими регресіями:

$$t = 54.78r, \quad R = 0.9987, \quad \sigma = 7.93 \text{ хв}, \quad (1)$$

$$t = 54.54r + 1.4, \quad R = 0.9985, \quad \sigma = 8.48 \text{ хв}, \quad (2)$$

де t вимірюється у хвиликах, r — у Мм, R — коефіцієнт достовірності апроксимації, σ — стандартне відхилення апроксимації.

Обчислення v за співвідношеннями (1) та (2) дають значення 304.2 та 305.4 м/с відповідно.

Швидкість приходу сигналу. Кореляційне поле « v — r » показано на рис. 3. Видно, що спостерігається тенденція до зменшення швидкості приходу інфразвукового сигналу при збільшенні відстані r . Залежність $v(r)$ апроксимовано трьома регресіями:

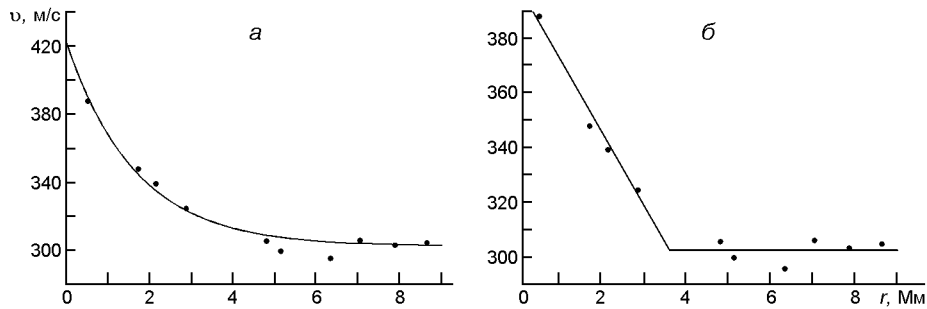


Рис. 3. Залежність швидкості приходу інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом, від відстані. Апроксимація: *a* — експоненційним законом $v = 120.6 \exp(-0.6032r) + 302.3$, $R = 0.9850$, $v = 5.04$ м/с; *б* — комбінацією лінійної залежності для малих відстаней $r < 4.5$ Мм ($v = -27.33r + 399.6$, $R = 0.9908$, $v = 4.50$ м/с) та константи для великих відстаней $r > 4.5$ Мм ($v = 302.30$, $v = 4.03$ м/с)

$$v = 120.60 \exp(-0.6032r) + 302.3, R = 0.9850, v = 5.04 \text{ м/с}, \quad (3)$$

$$v = 27.33r + 399.60, R = 0.9908, v = 4.50 \text{ м/с}, r < 4.5 \text{ Мм}, \quad (4)$$

$$v = 302.30 \text{ м/с}, v = 4.03 \text{ м/с}, r > 4.5 \text{ Мм},$$

$$v = 2.507r^2 + 32.03r + 399, R = 0.9899, v = 4.68 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Тут v вимірюється у м/с, а r — у Мм.

Тривалість сигналу. Залежність тривалості T інфразвукового сигналу від відстані r наведено на рис. 4. Видно значний розкид точок. Ця обставина серйозно ускладнює вибір апроксимаційної залежності $T(r)$. За такі обрано лінійну та квадратичну залежності. Рівняння регресії мають вигляд

$$T = 2.475r + 24.79, R = 0.5734, T = 10.48 \text{ хв}, \quad (6)$$

$$T = 2.792r + 26.02, R = 0.829, T = 4.89 \text{ хв}, \quad (7)$$

$$T = 0.3646r^2 + 0.9007r + 19.55, R = 0.6011, T = 10.92 \text{ хв}, \quad (8)$$

$$T = 0.4533r^2 + 7.498r + 35.89, R = 0.8729, T = 4.67 \text{ хв}, \quad (9)$$

де T вимірюється у хвилинали, а r — у Мм.

Період коливань. Кореляційне поле « T — r » наведено на рис. 5. Помітно значний розкид точок: період змінювався на різних інфразвукових станціях від 1.65 до 12.00 с. Це не могло не відбитися на виборі адекватної регресії. Найбільш розумним виявилось припущення, що $T(r) = \text{const}$. Рівняння регресії при використанні 10 та 8 точок мають вигляд

$$T = 6.280 + 0.983r, T = 3.11 \text{ с}, \quad (10)$$

$$T = 6.144 + 0.764r, T = 2.16 \text{ с}, \quad (11)$$

де T — в секундах.

Азимут. Знання координат місця спалаху метеороїда та місця розташування інфразвукової станції дозволяє розрахувати істинний ази-

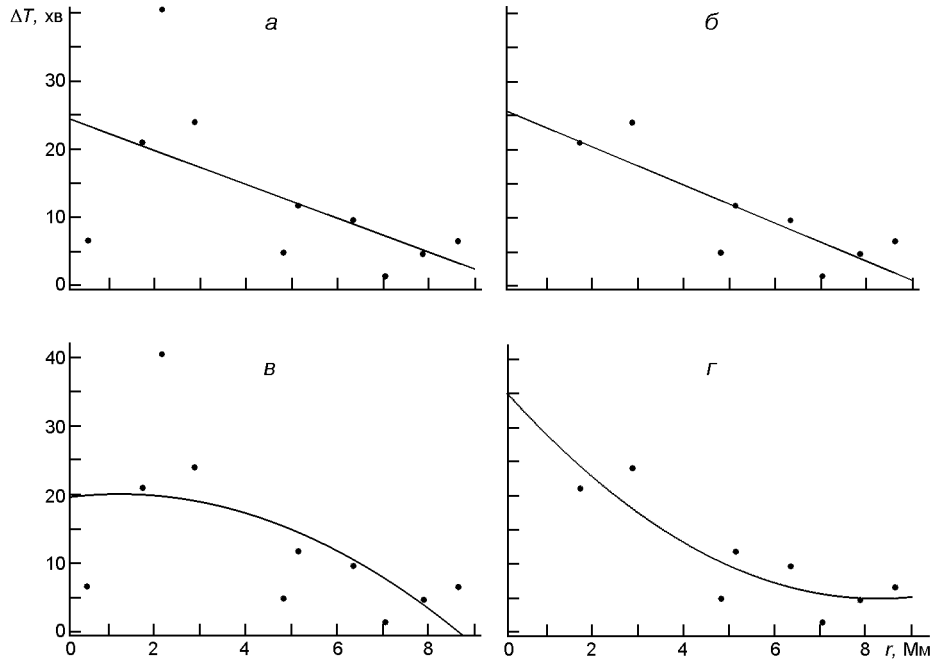


Рис. 4. Залежність тривалості інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом, від відстані. Апроксимація: *a* — лінійним законом за 10 точками $T = -2.475r + 24.79$, $R = 0.5734$, 10.48 хв; *б* — лінійним законом за 8 точками $T = -2.792r + 26.02$, $R = 0.8290$, 4.888 хв (без станцій Дубна та Bardufoss); *в* — квадратичним законом за 10 точками $T = 0.3646r^2 + 0.9007r + 19.55$, $R = 0.6011$, 10.92 хв; *г* — квадратичним законом за 8 точками $T = 0.4533r^2 - 7.498r + 35.89$, $R = 0.8729$, 4.67 хв (без станцій Дубна та Bardufoss)

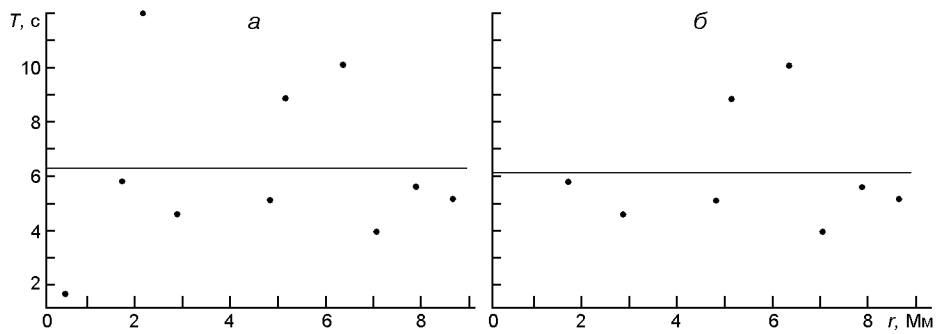


Рис. 5. Залежність періоду інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом, від відстані. Апроксимація: *a* — за 10 точками $T = 6.28$ с, 3.11 с, оцінка похибки середнього значення 0.98 с; *б* — за 8 точками $T = 6.144$ с, 2.16 с, оцінка похибки середнього значення 0.76 с

мут A_{tr} , який помітно відрізняється від спостережуваного A_{obs} . Кореляційне поле « $A_{obs} — A_{tr}$ » наведено на рис. 6. Видно, що розкид точок незначний, рівняння регресії добре апроксимується лінійною залежністю:

$$A_{obs} = 1.004A_{tr} - 0.6943, R = 0.9998, \sigma = 2.31, \quad (12)$$

де A_{obs} та A_{tr} вимірюються в градусах.

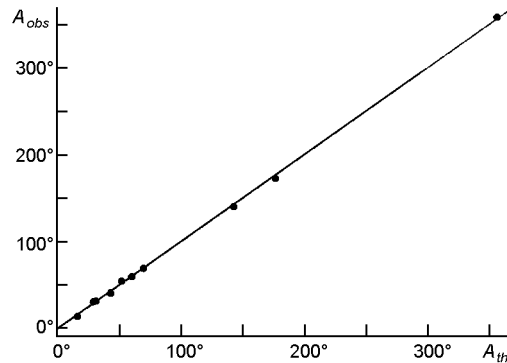


Рис. 6. Залежність спостережуваного азимута кута приходу інфразвукового сигналу від істинного азимута. Апроксимація лінійним законом: $A_{obs} = 1.004A_{tr} - 0.6943$, $R = 0.9998$, 2.31

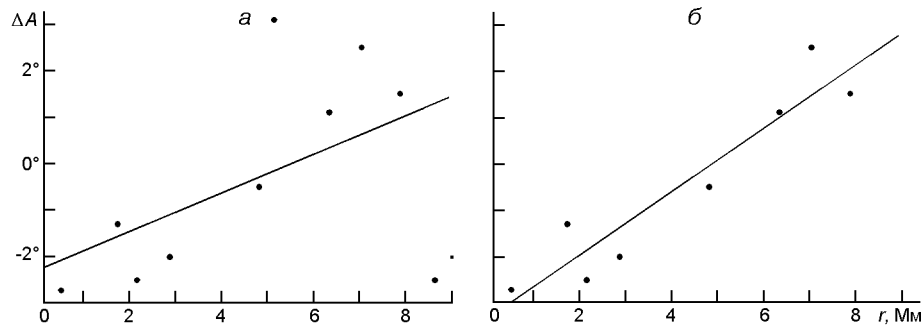


Рис. 7. Залежність флуктуацій азимута від відстані. Апроксимація лінійним законом: *а* — за 10 точками: $A = 0.4142r - 2.286$, $R = 0.5235$, $\sigma = 2.00$; *б* — за 8 точками: $A = 0.68r - 3.328$, $R = 0.9402$, $\sigma = 0.73$ (без станцій Azores та Newport)

Флуктуації азимута. Кореляційне поле « $A — r$ », де $A = A_{obs} - A_{tr}$, наведено на рис. 7. Видно, що має місце значний розкид точок. Рівняння лінійної регресії, побудованої за даними 10 станцій, має вигляд

$$A = 0.4142r - 2.286, R = 0.5235, \sigma = 2.00, \quad (13)$$

A вимірюється в градусах, а r — в Мм.

Якщо ж виключити станції I56US (Newport, США) та I42PT (Azores, Португалія), тоді рівняння регресії набуде вигляду

$$A = 0.68r - 3.328, R = 0.9402, \sigma = 0.73. \quad (14)$$

Зауважимо, що кореляційне поле « $|A| — r$ » має значний розкид точок та не допускає розумної апроксимації.

Залежність швидкості від азимута. Кореляційне поле « $\sin A_{tr}$ » наведено на рис. 8. Можна бачити значний розкид точок, який ускладнює вибір апроксимаційного співвідношення. Для лінійної регресії, побудованої за даними дев'яти станцій (крім I43RU) та восьми станцій (крім I43RU та I17CI), справедливі такі співвідношення:

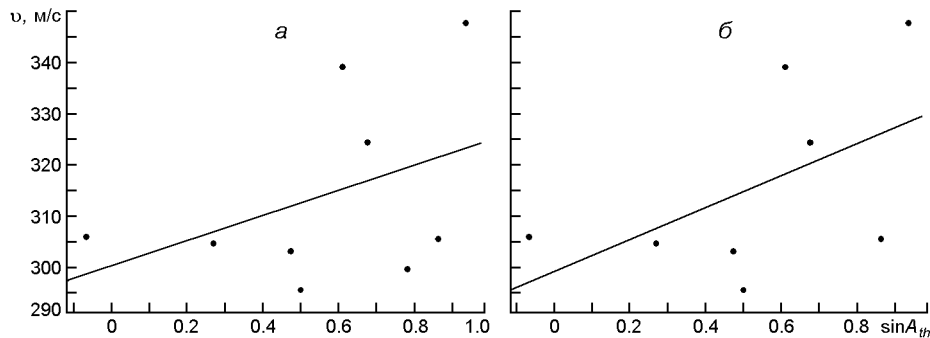


Рис. 8. Залежність швидкості приходу інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким космічним тілом, від синуса істинного азимута. Апроксимація лінійним законом: *а* — за 9 точками, $v = 24.53 \sin A_{tr} + 300.2$, $R = 0.4139$, $v = 18.10$ м/с (без станції Дубна); *б* — за 8 точками, $v = 31.24 \sin A_{tr} + 299.1$, $R = 0.5311$, $v = 17.42$ м/с (без станцій Дубна та Azores)

$$24.53 \sin A_{tr} + 300.2, R = 0.4139, v = 18.10 \text{ м/с}, \quad (15)$$

$$31.24 \sin A_{tr} + 299.1, R = 0.5311, v = 17.42 \text{ м/с}, \quad (16)$$

де азимут вимірюється в градусах, а швидкість — у м/с.

ОБГОВОРЕННЯ

Час запізнення сигналу. Як і слід було очікувати, час запізнення сигналу при збільшенні відстані r збільшується практично за лінійним законом. Обидві регресії (1) та (2) виявляються задовільними, але перевагу слід віддати залежності (2), оскільки при $r = 0$ маємо $t_0 = 1.40$ хв. При висоті вибуху $z_r = 27$ км отримуємо, що характерна швидкість $z_r / t_0 = 321$ м/с. Ця швидкість близька до швидкості хвилі, згенерованої при вибуху метеороїда, а час t_0 — близький до часу поширення цієї хвилі до поверхні Землі.

Додамо, що залежність (2) достатньо близька до залежностей $t(r)$, отриманих у роботах [6, 7]. Близькі також значення середньої швидкості \bar{v} : 304...305 м/с в даній роботі та 297 і 291 м/с в роботах [6] і [7] відповідно. Відмінність значень \bar{v} зумовлена тим, що в нашому випадку $r_{\max} = 8.66$ Мм, а в роботах [6] і [7] — 17.5 і 15 Мм відповідно. Певну роль також грають флуктуаційні ефекти.

Швидкість приходу сигналу. Зменшення швидкості приходу інфразвукового сигналу при збільшенні відстані пов'язане зі збільшенням шляху, який проходять інфразвукові промені при їхньому багаторазовому відбитті від стінок хвилеводів Земля — стратосфера та Земля — термосфера.

Апроксимації (3) та (4) виявляються задовільними, але не цілком фізичними. Залежність (4) показує, що при $r > 4.5$ Мм швидкість слабо залежить від відстані, вона більше залежить від стану атмосфери на трасі поширення.

Регресія (5) також не є фізичною. При $r = 6.4$ Мм має місце мінімум швидкості $v_{\min} = 297$ м/с. Підкреслимо, що для Челябінського [7] та Індонезійського [6] метеороїдів для $r < 5$ Мм також спостерігалось зменшення швидкості приходу. При $r > 5$ Мм значення флукутували поблизу 290 та 295 м/с відповідно.

Тривалість сигналу. Залежність тривалості сигналу від відстані залежить від низки факторів: від багатомодовості сигналу, багаточисельних перевідбиттів сигналу в атмосферних хвилеводах, дисперсійного розпливання хвильового пакету, згенерованого метеороїдом, від відношення сигнал/шум, а також від різної пропускну здатності хвилеводів, різного ослаблення спектральних складових. Дисперсійне розпливання істотне для широкосмугових, точніше надширокосмугових інфразвукових сигналів. Таким був сигнал від Челябінського метеороїда, для нього діапазон періодів становив 10...100 с [7]. Зменшення відношення сигнал/шум неминуче призводить до позірною укорочення сигналу. Названі фактори здатні послаблювати один одного. Для Челябінського метеороїда скоріше переважало дисперсійне розпливання та залежність $T(r)$ для 10 станцій була зростаючою [7]. При різниці фазових швидкостей складових сигналу, яка досягала 20 м/с, та $r = 10$ Мм маємо дисперсійне розширення 35 хв.

Для Індонезійського метеороїда залежність $T(r)$ була спадною [6]. Діапазон періодів становив 5...25 с, середнє значення $\bar{T} = 13...14$ с [6]. При цьому різниця фазових швидкостей різних складових не перевищувала $v = 10$ м/с, а дисперсійне розширення при $r = 10$ Мм не перевищувало 18 хв.

У випадку Липецького метеороїда при $T = 2...14$ с, $\bar{T} = 6$ с, $v = 8$ м/с маємо для дисперсійного розширення значення, яке дорівнює приблизно 7...11 хв для $r = 5...8$ Мм.

Як бачимо, дисперсійне розширення для всіх трьох метеороїдів могло бути істотним. Для Індонезійського та Липецького метеороїдів воно, однак, частково компенсувалось перерахованими вище протидіючими факторами. У кінцевому підсумку для цих двох метеороїдів залежність $T(r)$ була спадною.

Залежності (6) та (8) варто визнати незадовільними. Залежності (7) та (9) практично рівноцінні.

Період коливань. Відсутність яскраво вираженої залежності $T(r)$ свідчить про те, що період основного коливання на трасах різної протяжності та орієнтації залишається майже постійним і визначається співвідношеннями (10) та (11), які виявилися дуже близькими.

Додамо, що значний розкид періодів інфразвукового сигналу був властивим і для сигналів, згенерованих Челябінським та Індонезійським метеороїдами. Для всіх трьох метеороїдів переважною виявилася залежність $T(r) = \text{const}$.

Використовуючи співвідношення з роботи [11] для енергії інфразвукового джерела, справедливого при $E/2 < 100$ кт ТНТ, можна за значенням періоду оцінити енергію E :

$$\lg \frac{E}{2} = 3.34 \lg T - 2.58. \quad (17)$$

При $T = 6.28 \pm 0.98$ с з (17) маємо $E = 2.43 \cdot 10^{1.52/1.05}$ кт ТНТ. Якщо ж $T = 6.14 \pm 0.76$ с, тоді з (17) отримаємо $E = 2.26 \cdot 10^{1.08/0.81}$ кт ТНТ. Як видно з цих оцінок, $\bar{E} = 2.26 \dots 2.43$ кт ТНТ майже не відрізняється від даних, отриманих НАСА (2.8 кт ТНТ) [9].

Азимут. Між спостережуваним A_{obs} та істинним A_{tr} значеннями азимута спостерігається сильний статистичний зв'язок, який виражається лінійною регресією (12). Подібна залежність мала місце і для Індонезійського метеороїда [6].

Флуктуації азимута. Через істотну відмінність напрямків поширення інфразвукового сигналу та уздовж траси мали місце знакозмінні флуктуації A . Для Липецького метеороїда спостерігалась тенденція до збільшення A при збільшенні r (див. (13) та (14)). Середнє значення $\bar{A} = 1.9 \pm 2.1$. Для Індонезійського метеороїда $\bar{A} = 3.1 \pm 11.7$. Якщо ж виключити з розгляду інфразвукові станції I39PW ($A = 34$) та I56US ($A = 29$), то для Індонезійського метеороїда $\bar{A} = 0.2 \pm 3.5$.

Залежність швидкості від азимута. Залежність швидкості приходу інфразвукового сигналу від $\sin A_{tr}$ дається виразами (15) та (16). Причиною появи такої залежності є вплив тропосферно-стратосферно-термосферного вітру. Швидкість приходу пов'язана зі швидкістю вітру w таким співвідношенням [6]:

$$w \cos A,$$

де $w \cos A$ — добавка до істинної швидкості приходу сигналу, $A_w = A_w - A$, A_w та A — азимуту напрямку вітру та джерела інфразвуку. Для західного вітру $A_w = 270$, а для східного — $A_w = 90$. Тоді

$$w \cos(270 - A) = w \sin A, \quad (18)$$

$$w \cos(90 - A) = w \sin A. \quad (19)$$

З (18) та (19) можна отримати також наслідки. Для станцій, розташованих на схід від джерела інфразвуку, $A > 180$, $\sin A < 0$ та $w < 0$, тобто наявність вітру збільшує A . При цьому ж розташуванні та східному вітрі $w < 0$. При східному вітрі для станцій, розташованих на захід від джерела інфразвуку, $A < 180$, $\sin A > 0$ та $w > 0$. При аналогічному розташуванні, але західному вітрі, $w < 0$.

Таким чином, маючи регресійні залежності (15) і (16), а також співвідношення (18) та (19), можна оцінити середню швидкість атмосферного вітру та істинну швидкість приходу сигналу, яка була б при відсутності вітру.

Для Липецького метеороїда у припущенні, що в літній час переважає східний вітер, з порівняння (15), (16) з (19) отримаємо, що $w = 25 \dots 31$ м/с, а $w_{tr} = 299 \dots 300$ м/с. Ці значення видаються цілком прийнятними.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

З використанням даних вимірювань 10 станцій міжнародної системи моніторингу ядерних випробувань Організації за Договором про всеосяжну заборону ядерних випробувань наведено аналіз часових залежностей тиску в інфразвуковій хвилі, згенерованій протягом падіння 21 червня 2018 г. Липецького метеороїда та встановлено таке.

1. Час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався при збільшенні горизонтальної відстані від епіцентра вибуху метеороїда до станцій за лінійним законом. При цьому середня за всіма трасами швидкість приходу сигналу була близькою до 304...305 м/с.

2. Швидкість приходу інфразвукового сигналу при збільшенні відстані спочатку достатньо швидко зменшувалася, а на відстанях 4.5...8.66 Мм вона флюктувала біля значення 302 м/с.

3. Залежність тривалості інфразвукового сигналу від відстані була спадною за лінійним законом. Дисперсійне розширення сигналу було несуттєвим на відстанях 5...8 Мм.

4. Середні значення періодів інфразвукового сигналу, які не залежать від відстані та які оцінено за різними регресіями, становили 6.28 ± 0.98 та 6.14 ± 0.76 с.

5. Середнє значення початкової кінетичної енергії метеороїда, отримане з інфразвукових спостережень періоду коливань, становило 2.26...2.43 кт ТНТ, що майже не відрізняється від незалежних даних НАСА (2.8 кт ТНТ).

6. Апроксимація швидкості приходу інфразвукового сигналу від синуса азимутального кута показала, що скориговане значення швидкості приходу сигналу становило приблизно 300 м/с, а середнє значення тропосферно-стратосферного вітру дорівнювало 25...31 м/с.

7. Аналіз кореляційних полів виявив стійкий статистичний зв'язок між спостережуваним та істинним азимутами джерела інфразвуку. Відмічено тенденцію до збільшення рівня флюктуацій азимута при збільшенні відстані.

ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота фінансувалася в рамках держбюджетної НДР установ МОН України, номер держреєстрації 0119U002538.

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 1. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2019. 35, № 4. С. 35—56.
2. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 2. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2019. 35, № 5. С. 25—47.
3. Черногор Л. Ф. Физические эффекты Липецкого метеороида. 3. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2019. 35, № 6. С. 34—61.
4. Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты Липецкого метеороида. *Геомагнетизм и астрономия.* 2020. 60, № 1. С. 83—92.
5. Черногор Л. Ф. Эффекты Липецкого метеороида в геомагнитном поле. *Геомаг-*

- нетизм и астрономия*. 2020. 60, № 3.
6. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвукового сигнала, сгенерированного метеороидом над Индонезией 8 октября 2009 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2018. 34, № 3. С. 59—75.
 7. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. 23, № 1. С. 24—35.
 8. Черногор Л. Ф. Геомагнітні варіації, викликані прольотом і вибухом Липецького метеороїда: результати вимірювань. *Кинематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 2. С. 58—81.
 9. *Center for Near Earth Object Studies*. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>
 10. Ott T., Drolshagen E., Koschny D., Mialle P., Pilger C., Vaubaillon J., Drolshagen G., Poppe B. Combination of infrasound signals and complementary data for the analysis of bright fireballs. *Planet. and Space Sci.* 2019. 179, Paper No. 104715 <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104715>
 11. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1997. 822, Is. 1. P. 284—302. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1997.tb48347.x

REFERENCES

1. Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. 1. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(4). 174—188.
2. Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. 2. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(5). 217—230.
3. Chernogor L. F. (2019). The physical effects of Lipetsk meteoroid. 3. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 35(6). 271—285.
4. Chernogor L. F. (2020). Ionospheric effects of the Lipetsk Meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 60(1). 80—89.
5. Chernogor L. F. (2020). Lipetsk meteoroid effects in geomagnetic field. *Geomagnetism and Aeronomy*. 60(3) [In Press].
6. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2018). Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 34(3). 147—160.
7. 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).
8. Chernogor L. F. (2020). Geomagnetic variations caused by Lipetsk meteoroid passage and explosion: Measurement results. *Kinematics Phys. Celestial Bodies*. 36(2). 79—93.
9. *Center for Near Earth Object Studies*. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/>
10. Ott T., Drolshagen E., Koschny D., Mialle P., Pilger C., Vaubaillon J., Drolshagen G., Poppe B. (2019). Combination of infrasound signals and complementary data for the analysis of bright fireballs. *Planet. and Space Sci.* 179, Paper No. 104715 <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104715>
11. ReVelle D. O. (1997). Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 822(1), 284—302. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1997.tb48347.x

Л. Ф. Черногор, Н. Б. Шевелев

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

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА,
СГЕНЕРИРОВАННОГО ЛИПЕЦЬКИМ МЕТЕОРОИДОМ:
РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Целью настоящей работы является построение основных корреляционных полей и соответствующих регрессионных зависимостей для характеристик инфразвукового сигнала, сгенерированного Липецким метеороидом. Космическое тело вторглось в атмосферу Земли 21 июня 2018 г. в 01:16:20 UT. Начальная скорость метеороида составляла 14.4 км/с, масса — около 113 т, размер — около 4 м, а кинетическая энергия — около 2.8 кт ТНТ. Сгенерированные космическим телом инфразвуковые волны наблюдались в глобальных масштабах. Эти волны зарегистрированы международной системой мониторинга (IMS) ядерных испытаний, принадлежащей Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СДВТО). Для обработки данных применялись методы математической статистики. Основные результаты исследований сводятся к следующему. Время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось при увеличении горизонтального расстояния от эпицентра взрыва метеороида до станций по линейному закону. При этом средняя по всем трассам скорость прихода сигнала была близка к 304...305 м/с. Скорость прихода инфразвукового сигнала при увеличении расстояния сначала достаточно быстро убывала, а на расстояниях 4.5...8.66 Мм флуктуировала около значения 302 м/с. Зависимость длительности инфразвукового сигнала от расстояния была убывающей по линейному закону. Дисперсионное уширение сигнала было несущественным на расстояниях 5...8 Мм. Средние значения периодов инфразвукового сигнала, не зависящие от расстояния и оцененные по различным регрессиям, равнялись 6.28 0.98 и 6.14 0.76 с. Средняя начальная кинетическая энергия метеороида, определенная по инфразвуковым наблюдениям периода колебаний, составляла 2.26... 2.43 кт ТНТ, что несущественно отличается от независимых данных НАСА (2.8 кт ТНТ). Аппроксимация скорости прихода инфразвукового сигнала от синуса азимутального угла показала, что скорректированное значение скорости прихода сигнала составляло около 300 м/с, а среднее значение тропосферно-стратосферного ветра было около 25...31 м/с. Анализ корреляционных полей обнаружил устойчивую статистическую связь между наблюдаемым и истинным азимутами источника инфразвука. Отмечено, что имела место тенденция к увеличению уровня флуктуаций азимута при увеличении расстояния.

Ключевые слова: Липецкий метеороид, инфразвук, параметры сигнала, регрессии, корреляционные поля

L. F. Chernogor, M. B. Shevelev

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

CHARACTERISTICS OF INFRASONIC SIGNAL GENERATED
BY THE LIPETSK METEOROID: STATISTICAL ANALYSIS

The purpose of this paper is to construct basic scatter diagrams and plot the corresponding regression functions for the parameters of the infrasonic signals launched by the Lipetsk meteoroid. The celestial body that entered the Earth's atmosphere at 01:16:20 UT on June 21, 2018 had the following initial parameters: speed 14.4 km/s, mass about 113 t, size about 4 m, and kinetic energy about 2.8 kt TNT. The infrasonic signals generated by the celestial body were observed on a global scale, and they were recorded by the International Monitoring System (IMS) set up by Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization's International Monitoring System (CTBTO). For data processing, techniques of mathematical statistics have been invoked. The basic results of the study are as follows. The infra-

sonic signal exhibits a linear dependence of the infrasonic signal time delay on the horizontal distance from the meteoroid explosion epicenter, and the signal celerity averaged over all propagation paths is estimated to be approximately 304...305 m/s. The infrasonic signal celerity first shows a rapid enough decrease with distance, but over the 4.5...8.66-Mm distance range exhibits fluctuations about the 302 m/s value. The duration of the infrasonic signal shows a linear decrease with distance, and the signal duration dispersion is insignificant in the 5...8 Mm distance range. The mean periods of the infrasonic signal, independent of distance and averaged over various regression functions, are estimated to be 6.28 0.98 s and 6.14 0.76 s. The mean of the initial kinetic energy estimated using the oscillation period of the infrasonic signal is 2.26...2.43 kt TNT, which differs insignificantly from the NASA estimates (2.8 kt TNT). The approximation for the dependence of celerity vs. sine of the back-azimuth angle of arrival shows that the corrected value of the celerity is about 300 m/s, and the mean of the troposphere-stratosphere wind is approximately 25...31 m/s. Analysis of the scatter diagrams has shown that a steady statistical link exists between the true and observed back-azimuth angles of infrasound sources. It is noted that the level of fluctuations in the azimuth tends to increase with distance.

Key words: Lipetsk meteoroid, infrasound, signal parameters, regression, scatter diagrams.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2020

Після доопрацювання 21.02.2020

Прийнята до друку 13.04.2020