

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.04.035>

УДК 551.558, 551.596, 534.221

**Л. Ф. Черногор**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Україна  
пл. Свободи 4, Харків, 61022, Україна  
Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

### **Статистичний аналіз параметрів інфразвуку, згенерованого Челябінським метеороїдом**

*Проліт Челябінського метеороїда викликав цілий комплекс фізичних ефектів у всіх підсистемах системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Раніше вивчено ефекти Челябінського метеороїда в атмосфері, іоносфері, геомагнітному полі. Значну увагу також приділено особливостям поширення інфразвукового сигналу, згенерованого Челябінським метеороїдом. У той же час в літературі відсутні результати статистичного аналізу параметрів інфразвукового сигналу. Метою цієї роботи є побудова кореляційних полів для основних параметрів глобально поширюваного інфразвукового сигналу (відношення сигнал/шум, часу запізнення, швидкості приходу, тривалості, амплітуди, періоду) в залежності від відстані між джерелом інфразвуку та місцем його реєстрації або від азимутального кута джерела, а також отримання відповідних регресійних залежностей. Для аналізу залучалися дані 15 інфразвукових станцій Міжнародної системи моніторингу ядерних випробувань при Організації з Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (СВТО). В окремих випадках ці дані доповнювалися даними інфразвукових станцій, розміщених в євразійських геофізичних обсерваторіях. Побудовано кореляційні поля для основних параметрів глобально поширюваного інфразвукового сигналу. Наводяться регресійні залежності цих параметрів від відстані або від азимутального кута. Отримано середні по всіх трасах поширення оцінки швидкості приходу інфразвукового сигналу (близько 280 м/с) та швидкості тропосферно-стратосферного вітру (близько 30 м/с). Обговорюються переваги та недоліки запропонованих регресійних залежностей.*

**Ключові слова:** інфразвуковий сигнал, кореляційні поля, відношення

*сигнал / шум, час запізнення, швидкість приходу, тривалість сигналу, амплітуда сигналу, період сигналу, азимут, регресійні залежності.*

## ВСТУП

Падіння і вибух Челябінського метеороїда — важлива астрономічна і геофізична подія, що стоїть в одному ряду із вторгненням в атмосферу Землі тунгуського космічного тіла. Ефектам Челябінського метеороїда присвячено велику кількість робіт, зокрема [1—35, 37—41]. У цих роботах представлено результати спостережень і моделювання ряду фізичних ефектів, ініційованих прольотом Челябінського метеороїда. Результати моделювання процесу руйнування космічного тіла описано в роботах [19, 20, 22, 38, 40, 42]. Системний підхід до аналізу багатьох фізичних ефектів в системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера викладено в роботах [18—20, 22, 35]. Ефекти газопилового сліду вивчаються в роботах [6—8, 25].

Результати спостережень ефектів Челябінського метеороїда в іоносфері описані в роботах [4, 5, 9, 13, 23, 26—28, 30], а магнітний ефект обговорюється в роботах [20, 21].

Серед інших фізичних ефектів важливе місце займає інфразвуковий ефект Челябінського метеороїда [10, 11, 15, 16, 24, 29, 31—34, 39]. У роботі [39] приведено дані вимірювань інфразвукового сигналу, отримані на 20 станціях Міжнародної системи моніторингу, оцінено швидкість приходу і діапазон періодів сигналу (близько 20...70 с). Зазначено, що максимальна дальність  $r$  поширення сигналу дорівнювала 86663 км (сигнал обігнув Земну кулю більш ніж удвічі). При  $r$

40000 км амплітуда інфразвукового сигналу була близькою до 0.1 Па [39]. У роботі [31] проведено спектральний аналіз зареєстрованого на станціях I31KZ, I43RU, KPDA і I27DE інфразвукового сигналу з використанням віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є, вейвлет-перетворення; вивчено також часово-періодну структуру сигналу. В роботі [29] за даними чотирьох інфразвукових станцій (IS31, IS46, MAAG2 і IS27) отримано основні параметри сигналу (час запізнення, тривалість, спектральний склад, швидкість приходу, дисперсійна залежність).

У роботі [11] наведено результати вивчення тонкої структури сигналу за допомогою системного спектрального аналізу, що використовує ряд лінійних і нелінійних інтегральних перетворень, часових реєстрацій інфразвукового сигналу, згенерованого Челябінським метеороїдом і зареєстрованого станцією IS27 в Антарктиді. У роботі [24] за даними дев'яти євразійських інфразвукових станцій, віддалених на 530...5780 км від джерела інфразвуку, визначено основні параметри сигналу (час запізнення, швидкість приходу, тривалість сигналу, період переважного коливання). Проведено порівняння результатів оцінок і моделювання з результатами спостережень.

Становить інтерес більш детальне вивчення у глобальних масштабах особливостей інфразвукових сигналів, зареєстрованих більшою кількістю станцій, ніж у роботах [24, 29, 32]. Метою цієї роботи є побудова кореляційних полів для основних параметрів інфразвукового сигналу, який глобально поширювався (відношення сигнал/шум, часу запізнення, швидкості приходу, тривалості, амплітуди, періоду) в залежності від відстані між джерелом інфразвуку і місцем його реєстрації або від азимутального кута джерела, а також отримання відповідних регресійних залежностей. Для аналізу залучалися дані 15 інфразвукових станцій Міжнародної системи моніторингу. В окремих випадках ці дані доповнювалися даними інфразвукових станцій, розміщених у євразійських геофізичних обсерваторіях.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Як відомо, Челябінський метеороїд вторгся в атмосферу Землі 15 лютого 2013 р. о 03:20:22 UT (тут і далі всесвітній час). Космічне тіло рухалося з південного сходу на північний захід (азимут становив близько 290°) під кутом до горизонту близько 20°. Початкова маса тіла  $m_0 = 11$  кт, початкова швидкість  $v_0 = 18.5$  км/с, а початковий діаметр —  $d_0 = 18$  м [2, 3, 40, 41]. Знайдені осколки метеорита свідчать про те, що він був кам'яним, точніше хондритом типу LL5, у складі якого були металічне залізо, олівін і сульфіти. Залишки тіла впали в озеро Чебаркуль і поблизу нього.

**Таблиця 1. Основні відомості про інфразвукові станції**

Станція			$r$ , Мм	$A_{tr}$	$A_{obs}$
I31KZ	50.4 N	58.03 E	0.53	22	29
I43RU	56.7 N	37.3 E	1.502	88	97
I46RU	53.95 N	84.82 E	1.532	283	268
I34MN	47.80 N	106.41 E	3.185	301	230
I26DE	48.85 N	13.71 E	3.257	60	56
I18DK	77.47 N	69.29 W	4.893	39	17
I45RU	43.7 N	131.9 E	5.022	310	305
I44RU	51.1 N	158.8 E	5.798	314	302
I53US	64.8 N	146.9 W	6.481	341	339
I10CA	50.2 N	96.0 W	8.147	14	355
I33MG	18.8 S	47.5 E	8.311	8	12
I56US	48.3 N	117.1 W	8.554	1	352
I57US	34.07 N	120.58 W	10.182	1	2
I59US	19.59 N	155.89 W	11.03	339	316
I27DE	70.68 S	8.27 W	14.983	49	61

**Таблиця 2. Основні відомості про параметри інфразвукового сигналу (в дужках наведено скориговані значення  $t$ , і  $T$ )**

Станція	$q$	$t$ , мин	$v$ , м/с	$T$ , с	$p$ , Па	$T_{amp}$ , с	$T_{PSD}$ , с	$T$ , Гц
I31KZ	76.9	27.77 (32)	318.1 (270)	1026 (390)	6.12	37.99	45.51	0.01...4
I43RU	13.67	101.78 (103)	245.9 (245)	2142 (660)	0.79	38.48	30.06	0.01...3
I46RU	35.76	84.13 (85)	303.5 (298)	701 (660)	1.26	21.08	16.72	0.02...4
I34MN	4.4	174.55	304.1	924	0.25	22.79	30.34	0.03...2
I26DE	2.89	230.15	235.9	812	0.485	28.98	29.26	0.03...3
I18DK	13.75	296.85	274.7	1948	1.365	49.99	69.72	0.01...3
I45RU	1.07	275.08	304.3	887	0.67	38.45	21.01	0.02...3
I44RU	4.03	330.55 (322)	292.3 (299)	1471 (1770)	0.45	19.28	60.68	0.02...3
I53US	165.14	376.13	287.2	1660	6.31	25.69	19.74	0.02...4
I10CA	5.55	489.58	277.3	1107	1.375	32.53	36.41	0.01...1
I33MG	2.07	480.22	288.4	720	0.97	47.96	43.12	0.01...0.2
I56US	7.61	494.77	288.1	1621	0.795	29.45	30.91	0.015...3
I57US	3.42	589.63	287.8	2000	0.795	28.45	27.31	0.01...1
I59US	2.48	622.37	295.4	377	0.195	84.7	81.92	0.01...0.1
I27DE	3.76	870.35	286.9	830	0.93	45.15	44.28	0.01...0.1

Для аналізу параметрів інфразвукового сигналу залучалися дані станцій, перелік яких наведено в табл. 1 [37]. Основні параметри інфразвукового сигналу перераховано у табл. 2.

### КОРЕЛЯЦІЙНІ ПОЛЯ І РЕГРЕСІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ

За даними табл. 2 для 14 інфразвукових станцій побудовано залежність відношення сигнал/шум  $q$  (відношення енергії сигналу до енергії шуму) від горизонтальної відстані  $r$  між джерелом інфразвуку і місцем спостереження (рис. 1). При цьому з розгляду виключено станцію I53US, для якої відношення сигнал/шум набувало аномально великого значення ( $q = 165.14$ ). Як і слід було очікувати, регресійні залежності  $q(r)$  описуються швидко спадними функціями. Ці залежності мають вигляд

$$q = 21.48r^{-2} + 5.51, R = 0.944, \sigma = 7.074, \quad (1)$$

$$q = 7.10r^{-2} - 28.44r^{-1} + 0.17, R = 0.959, \sigma = 6.345. \quad (2)$$

Тут і далі  $r$  дається у Мм,  $R$  — коефіцієнт достовірності,  $\sigma$  — стандартне відхилення.

Залежність часу запізнення сигналу  $t$  від відстані  $r$  наведено на рис. 2. Регресійні залежності даються такими співвідношеннями:

$$t = 57.266r + 6.324 \text{ хв}, R = 0.998, \sigma = 15.06 \text{ хв}, \quad (3)$$

$$t = 56.800r + 9.979 \text{ хв}, R = 0.998, \sigma = 14.81 \text{ хв}. \quad (4)$$

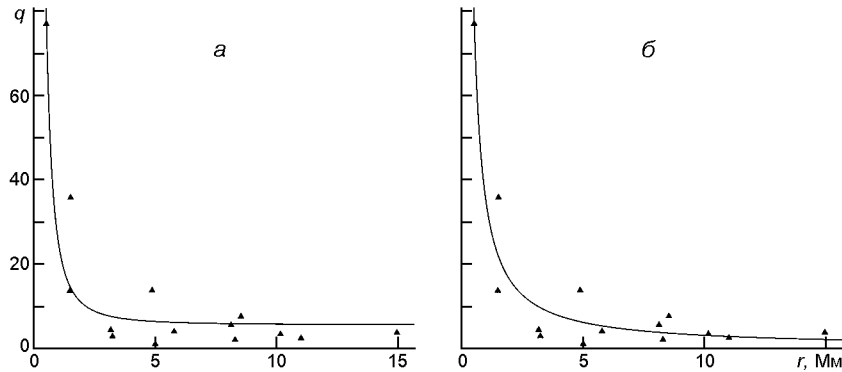


Рис. 1. Залежність відношення сигнал/шум від відстані без урахування даних американської станції I53US: *a* — апроксимація законом  $q = 21.48r^2 + 5.51$ ,  $R = 0.944$ ,  $\sigma = 7.074$ ; *б* — апроксимація законом  $q = 7.1r^2 - 28.44r + 0.169$ ,  $R = 0.959$ ,  $\sigma = 6.345$

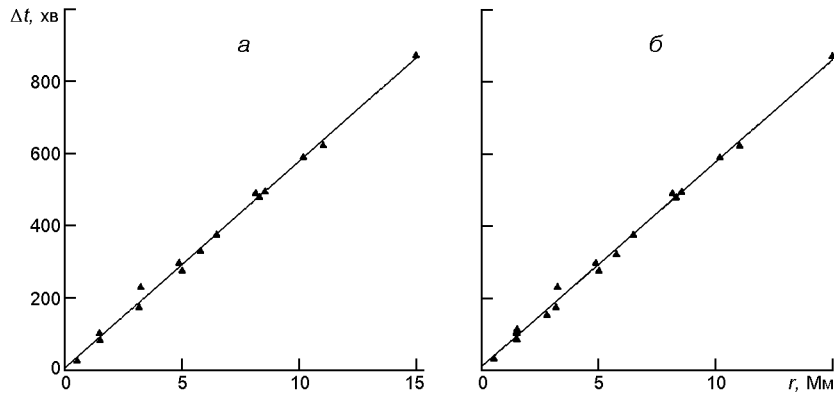


Рис. 2. Залежність часу запізнення інфразвукового сигналу від відстані: *a* — апроксимація лінійним законом  $t = 57.27r + 6.324$ ,  $R = 0.998$ ,  $\sigma = 15.06$  хв; *б* — апроксимація лінійним законом  $t = 56.8r + 9.979$ ,  $R = 0.998$ ,  $\sigma = 14.81$  хв (з урахуванням даних роботи [24])

**Таблиця 3. Параметри інфразвукових станцій і акустичних сигналів**

Станція			$r$ , Мм	$t$ , хв	$v$ , м/с	$T$ , хв
Споруда ІДГ РАН (м. Москва)	55.7N	37.6E	1.5	106	236	11
ТДУ (м. Томськ)	56.5N	84.9E	1.5	87	287	11
ГФО ІДГ РАН «Міхньово»	54.9N	37.7E	1.5	103	243	12
НПО «Тайфун» (м. Обнінськ)	55.1N	36.6E	1.52	114	222	12
ГФО ІСЗФ РАН (м. Іркутськ)	51.8N	103.1E	2.78	152	305	16...17

Зауважимо, що при побудові рис. 2*a* використано дані 15 станцій з табл. 2, а при побудові рис. 2*б* додатково залучалися дані геофізичних обсерваторій ІДГ РАН (м. Москва), ГФО ІДГ РАН (Міхньово), НВО «Тайфун» (м. Обнінськ), ТГУ (м. Томськ) і ГФО ІСЗФ РАН (м. Іркутськ), тобто всього 20 станцій (дані для  $r = 1.5$  Мм на рисунку зливаються). Значення  $t$  для останніх п'яти станцій, взяті з роботи [24], наведено в табл. 3. Зауважимо, що для станцій I43RU, I46RU і станцій

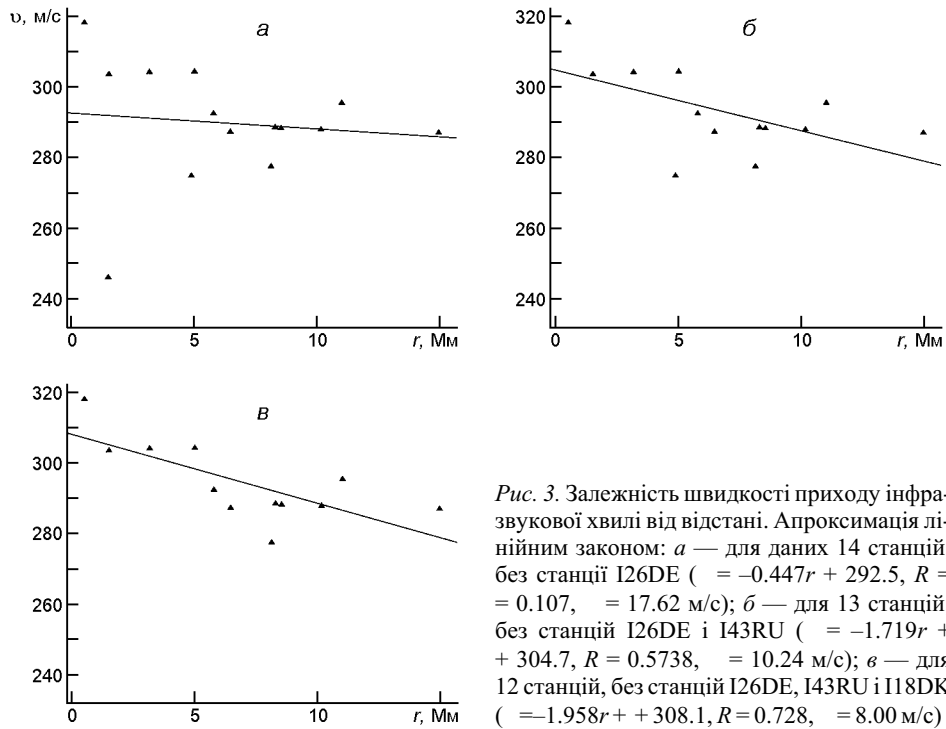


Рис. 3. Залежність швидкості приходу інфразвукової хвилі від відстані. Апроксимація лінійним законом: *a* — для даних 14 станцій, без станції I26DE ( $v = -0.447r + 292.5$ ,  $R = 0.107$ ,  $v_0 = 17.62$  м/с); *б* — для 13 станцій, без станцій I26DE і I43RU ( $v = -1.719r + 304.7$ ,  $R = 0.5738$ ,  $v_0 = 10.24$  м/с); *в* — для 12 станцій, без станцій I26DE, I43RU і I18DK ( $v = -1.958r + 308.1$ ,  $R = 0.728$ ,  $v_0 = 8.00$  м/с)

із геофізичних обсерваторій використовувалися скориговані значення  $t$  (див. табл. 2).

Як і слід було очікувати, залежність  $t(r)$  близька до лінійної.

Залежність швидкості приходу інфразвукової хвилі від відстані  $r$  показано на рис. 3. При побудові рис. 3а, 3б і 3в послідовно виключались станції I26DE, I43RU і I18DK. Відповідні регресійні залежності мають вигляд

$$v = -0.447r + 292.5 \text{ м/с}, R = 0.107, v_0 = 17.62 \text{ м/с}, \quad (5)$$

$$v = -1.719r + 304.7 \text{ м/с}, R = 0.574, v_0 = 10.24 \text{ м/с}, \quad (6)$$

$$v = -1.958r + 308.1 \text{ м/с}, R = 0.728, v_0 = 8.00 \text{ м/с}. \quad (7)$$

Залежність швидкості приходу інфразвукової хвилі від синуса теоретично розрахованого азимутального кута  $A_{th}$  для 15, 13 і 12 станцій наведено на рис. 4. Видно, що залежність описується спадною функцією. Це означає, що швидкість приходу для станцій, розташованих на захід від джерела інфразвуку (тобто  $0 < A_{th} < 180^\circ$ ), швидкість приходу менша, ніж для станцій, розташованих на схід від джерела ( $180^\circ < A_{th} < 360^\circ$ ). Відповідні регресійні залежності мають вигляд

$$v = -22.562 \sin A_{th} + 286.06 \text{ м/с}, R = 0.685, v_0 = 16.25 \text{ м/с}, \quad (8)$$

$$v = -25.540 \sin A_{th} + 284.10 \text{ м/с}, R = 0.732, v_0 = 16.50 \text{ м/с}, \quad (9)$$

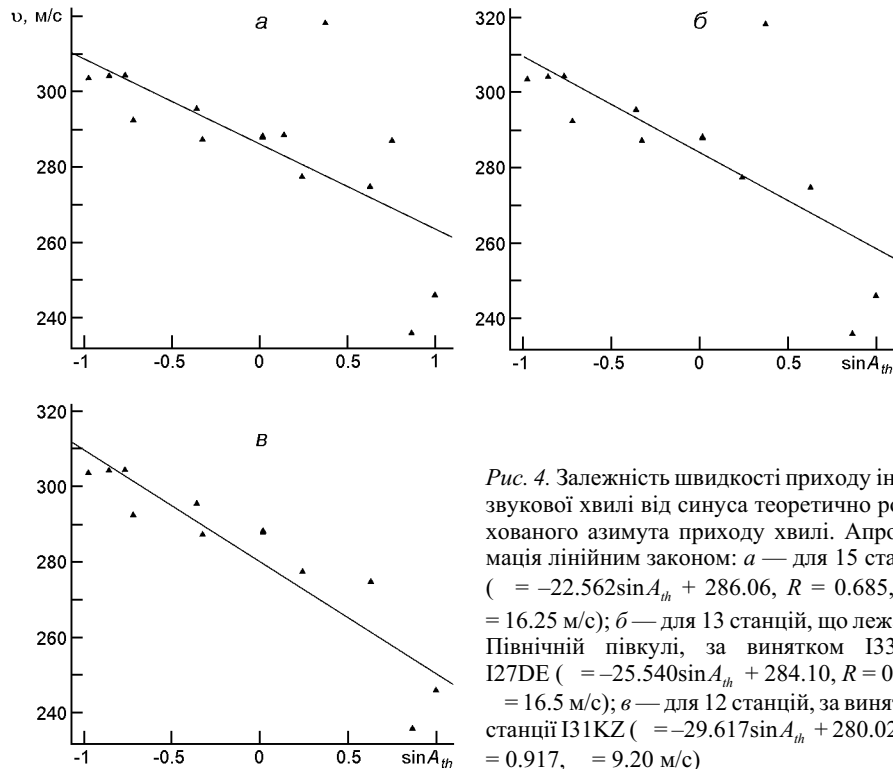


Рис. 4. Залежність швидкості приходу інфразвучової хвилі від синуса теоретично розрахованого азимута приходу хвилі. Апроксимація лінійним законом: *a* — для 15 станцій ( $v = -22.562 \sin A_{th} + 286.06$ ,  $R = 0.685$ ,  $v = 16.25$  м/с); *б* — для 13 станцій, що лежать у Північній півкулі, за винятком I33MG, I27DE ( $v = -25.540 \sin A_{th} + 284.10$ ,  $R = 0.732$ ,  $v = 16.5$  м/с); *в* — для 12 станцій, за винятком станції I31KZ ( $v = -29.617 \sin A_{th} + 280.02$ ,  $R = 0.917$ ,  $v = 9.20$  м/с)

$$v = -29.617 \sin A_{th} + 280.02 \text{ м/с}, \quad R = 0.917, \quad v = 9.20 \text{ м/с}. \quad (10)$$

Зауважимо, що рис. 4*a* побудовано за даними всіх 15 станцій з табл. 2, а рис. 4*б* і 4*в* — за винятком станцій, що лежать у Південній півкулі (I33MG, I27DE). Крім того, на рис. 4 відсутні дані станції I31KZ. Виключення цих станцій призвело до помітного збільшення  $R$ , а після виключення станції I31KZ — до суттєвого зменшення  $v$ .

На рис. 5 для тих же станцій показано залежність швидкості приходу інфразвучової хвилі від синуса спостережуваного азимутального кута  $A_{obs}$ . Відповідні регресійні залежності мають вигляд

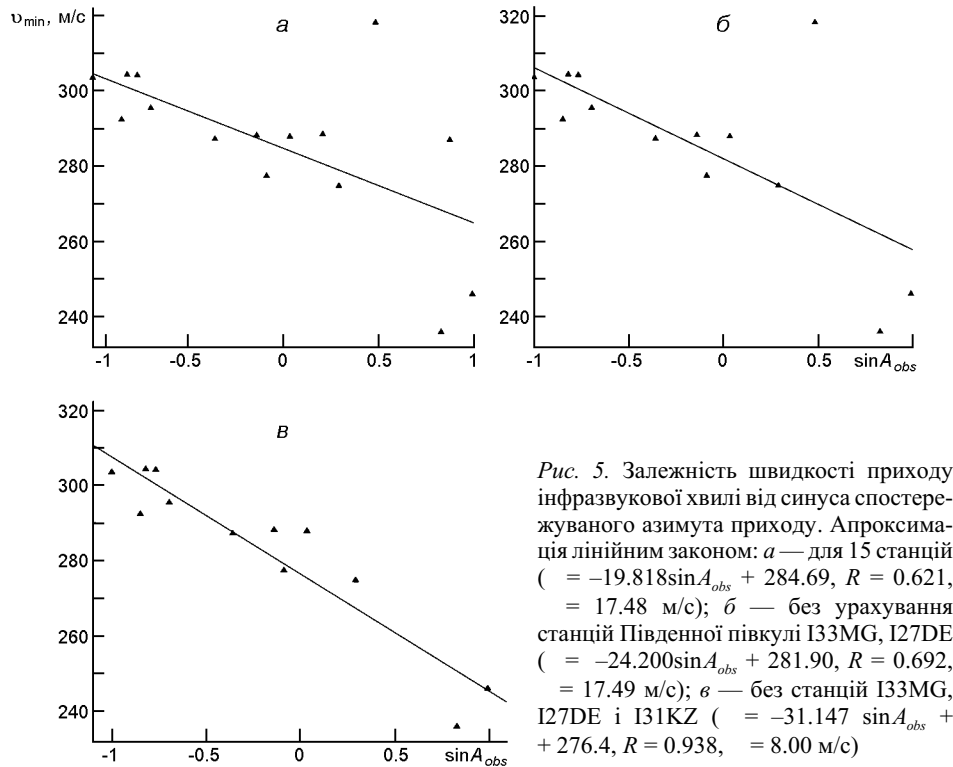
$$v = -19.818 \sin A_{obs} + 284.69 \text{ м/с}, \quad R = 0.621, \quad v = 17.48 \text{ м/с}, \quad (11)$$

$$v = -24.200 \sin A_{obs} + 281.90 \text{ м/с}, \quad R = 0.692, \quad v = 17.49 \text{ м/с}, \quad (12)$$

$$v = -31.147 \sin A_{obs} + 276.40 \text{ м/с}, \quad R = 0.938, \quad v = 8.00 \text{ м/с}. \quad (13)$$

При отриманні виразу (12) використовувалися станції, розташовані у Північній півкулі. З порівняння (13) з (11) і (12) видно, що виключення станцій I31KZ, I33MG і I27DE призвело до помітного збільшення  $R$  і суттєвого зменшення  $v$ .

Залежність тривалості інфразвучового сигналу від відстані  $r$  за даними 20 станцій з табл. 2 і 5 станцій, розташованих у геофізичних обсерваторіях (табл. 3), наведено на рис. 6 (точки з  $r = 1.5$  Мм на ри-



сунку зливаються). З рис. 6а видно значний розкид точок. Після виключення станцій I33MG, I59US, I27DE, I18DK і I10CA коефіцієнт достовірності збільшився майже утричі, а значення  $\sigma$  зменшилося у 2.7 раза. Регресійні залежності мають вигляд

$$T = 40.52r + 804.70 \text{ с}, R = 0.323, \sigma = 488.2 \text{ с}, \quad (14)$$

$$T = 157.38r + 441.63 \text{ с}, R = 0.936, \sigma = 180.2 \text{ с}. \quad (15)$$

Кореляційне поле « $\sin A_{\text{th}} - \sin A_{\text{obs}}$ », побудоване за даними для 15 станцій, показано на рис. 7. Регресійна залежність дається лінійною функцією:

$$\sin A_{\text{obs}} = 1.004 \sin A_{\text{th}} - 0.069, R = 0.972, \sigma = 0.16, \quad (16)$$

де  $A_{\text{obs}}$  і  $A_{\text{th}}$  наводяться в градусах.

Видно, що точність оцінки  $A_{\text{obs}}$  є досить високою. Стандартне відхилення  $A_{\text{obs}}$  і  $A_{\text{th}}$ , отримане без даних станції I34MN, становить 12.9°. Для станції I34MN різниця  $A_{\text{th}} - A_{\text{obs}} = 71^\circ$ .

Залежність  $A_{\text{obs}}$  від  $A_{\text{th}}$  для 15 і 14 (без I34MN) станцій наведена на рис. 8. Як і слід було очікувати, регресійна залежність описується лінійною функцією:

$$A_{\text{obs}} = 0.937 A_{\text{th}} + 2.244, R = 0.992, \sigma = 18.44, \quad (17)$$



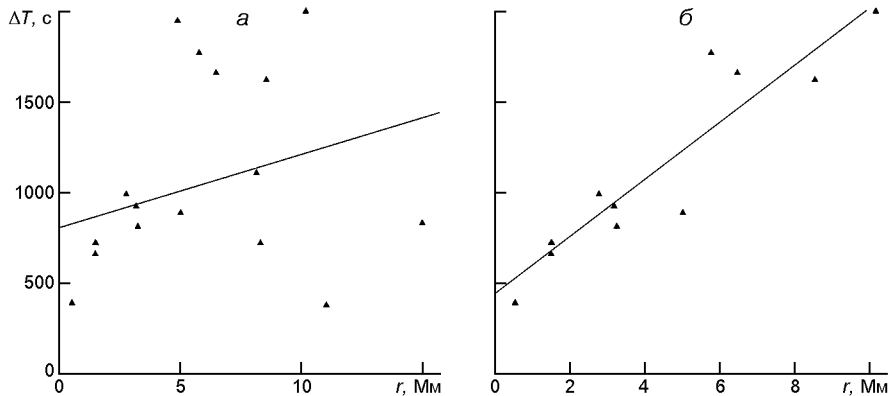


Рис. 6. Залежність тривалості інфразвукового сигналу від відстані до 20 станцій: *a* — апроксимація  $T = 40.52r + 804.70$ ,  $R = 0.323$ ,  $\tau = 488.2$  с; *б* — апроксимація після виключення станцій I33MG, I59US, I27DE, I18DK і I10CA ( $T = 157.38r + 441.63$ ,  $R = 0.936$ ,  $\tau = 180.2$  с)

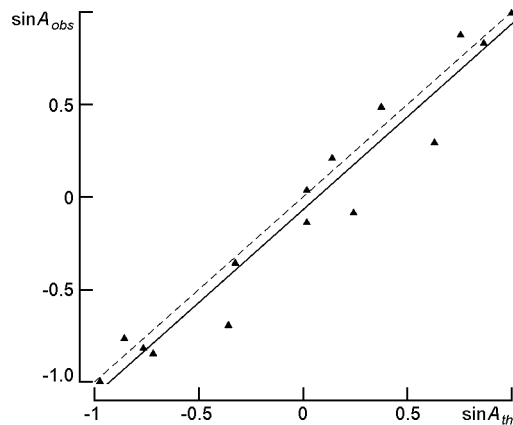


Рис. 7. Кореляційна залежність синуса спостережуваного азимутального кута від синуса теоретично розрахованого азимутального кута для 15 станцій [37]. Апроксимація лінійним законом  $\sin A_{obs} = 1.004 \sin A_{th} - 0.069$ ,  $R = 0.972$ ,  $\tau = 0.16$ . Штрихова лінія — теоретична апроксимація

$$A_{obs} = 0.957 A_{th} + 2.401, R = 0.998, \tau = 9.761 . \quad (18)$$

Виключення станції I34MN призвело до зменшення приблизно удвічі.

Перейдемо до аналізу періоду переважного коливання в інфразвуковому сигналі. Період у Міжнародному центрі даних оцінюється за двома методиками. По-перше, за амплітудою тієї частини цуга коливань, де амплітуда максимальна. Цей період у табл. 2 позначено як  $T_{amp}$ . По-друге, за максимумом спектральної щільності потужності сигналу (період  $T_{PSD}$ ).

Кореляційне поле « $T_{PSD}$  —  $T_{amp}$ » наведено на рис. 9. Видно, що значення  $T_{amp}$  і  $T_{PSD}$  можуть суттєво відрізнятися одне від іншого. Наприклад, для станції I44RU значення  $T_{PSD}$  більше, ніж  $T_{amp}$ , у 3.15 раза, а для станції I18DK — у 1.39 раза. При побудові рис. 9а станція

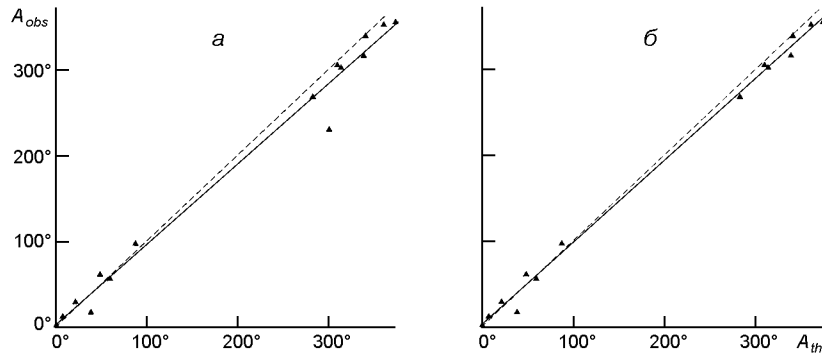


Рис. 8. Кореляційна залежність спостережуваного азимута від теоретично розрахованого. Апроксимація лінійним законом: *а* — для 15 станцій ( $A_{obs} = 0.937A_{th} + 2.244$ ,  $R = 0.9924$ ,  $\sigma = 18.44$ ); *б* — для 14 станцій із виключеною станцією I34MN ( $A_{obs} = 0.957A_{th} + 2.401$ ,  $R = 0.998$ ,  $\sigma = 9.76$ ). Штрихова лінія — теоретична залежність

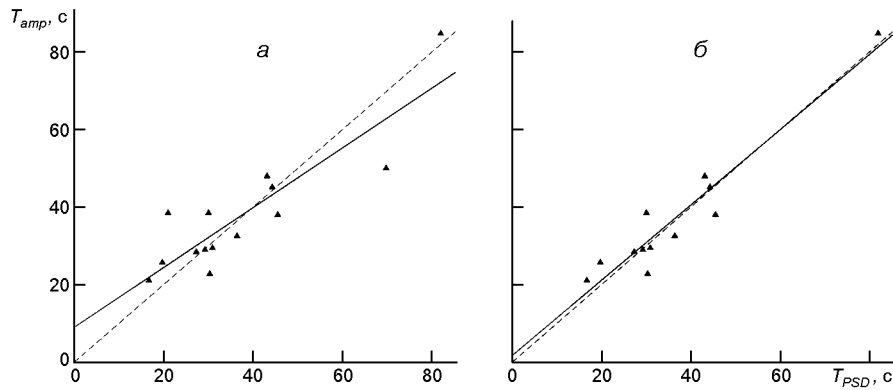


Рис. 9. Корелятивна залежність періоду  $T_{amp}$  від періоду  $T_{PSD}$ . Апроксимація лінійним законом: *а* — для 14 станцій із виключеною станцією I44RU ( $T_{amp} = 0.771T_{PSD} + 8.980$ ,  $R = 0.884$ ,  $\sigma = 7.88$  с); *б* — для 12 станцій, крім станцій I44RU, I18DK і I45RU ( $T_{amp} = 0.970T_{PSD} + 1.725$ ,  $R = 0.956$ ,  $\sigma = 5.31$  с). Штрихова лінія — теоретична залежність

I44RU виключалася з розгляду. Для станції I45RU, навпаки, період  $T_{amp}$  більший від  $T_{PSD}$  у 1.83 раза. З цієї причини рис. 9б, на відміну від рис. 9а, будувався без залучення станцій I18DK і I45RU. Відповідні регресійні залежності, апроксимовані лінійною функцією, мають вигляд

$$T_{amp} = 0.771T_{PSD} + 8.980 \text{ с}, \quad R = 0.884, \quad \sigma = 7.88 \text{ с}, \quad (19)$$

$$T_{amp} = 0.970T_{PSD} + 1.725 \text{ с}, \quad R = 0.956, \quad \sigma = 5.31 \text{ с}. \quad (20)$$

Виключення з розгляду станцій I18DK і I45RU призвело до помітного збільшення  $R$  і зменшення  $\sigma$ . Зауважимо, що для станції I45RU відношення  $q = 1.07$  (див. табл. 2).

Залежності періодів  $T_{amp}$  і  $T_{PSD}$  від відстані між джерелом інфразвуку і місцем розташування станції наведено відповідно на рис. 10 і

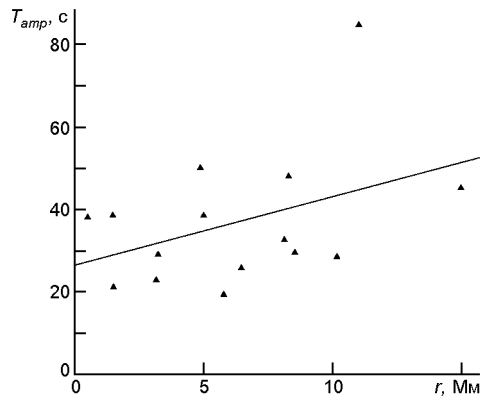


Рис. 10. Залежність періоду  $T_{amp}$  від пройдені хвилю відстані. Апроксимація лінійним законом для 15 станцій ( $T_{amp} = 1.664r + 26.37$ ,  $R = 0.410$ ,  $\sigma = 15.48$  с)

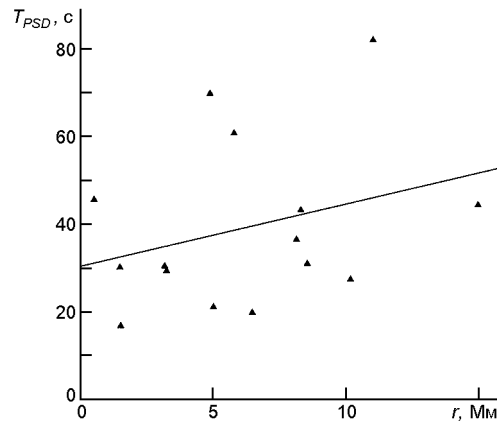


Рис. 11. Залежність періоду  $T_{PSD}$  від пройдені хвилю відстані. Апроксимація лінійним законом для 15 станцій ( $T_{PSD} = 1.419r + 30.30$ ,  $R = 0.303$ ,  $\sigma = 18.68$  с)

11. Видно, що кореляційні поля « $T_{amp} — r$ » і « $T_{PSD} — r$ » дуже «розмиті». Спробу лінійної апроксимації показано на рисунках. Регресійні залежності мають вигляд

$$T_{amp} = 1.664r + 26.37 \text{ с}, \quad R = 0.410, \quad \sigma = 15.48 \text{ с}, \quad (21)$$

$$T_{PSD} = 1.419r + 30.30 \text{ с}, \quad R = 0.303, \quad \sigma = 18.68 \text{ с}. \quad (22)$$

Видно, що значення  $R$  — доволі малі, а значення  $\sigma$  — великі.

Далі розглянемо кореляційне поле «відстань між джерелом інфразвуку і місцем його реєстрації  $r$  — амплітуда тиску в дозвуковій хвилі  $p$ » (рис. 12). Рис. 12 побудовано без урахування аномально великої амплітуди сигналу на станції I53US. Дійсно, при  $r = 6.481$  Мм  $p = 6.31$  Па. Приблизно таку ж амплітуду зареєстровано на станції I31KZ, віддаленої всього на 530 км від місця генерації інфразвуку (див. табл. 2). Три можливі апроксимації залежності  $p(r)$  за даними 14 станцій наведено на рис. 12. Як і слід було очікувати, залежності

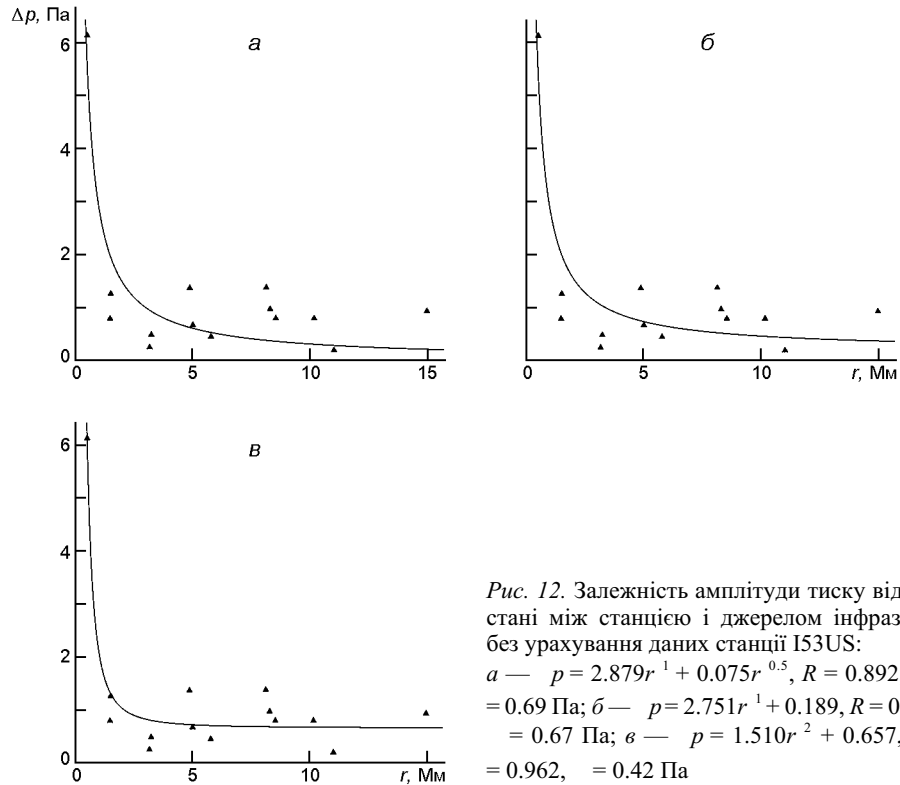


Рис. 12. Залежність амплітуди тиску від відстані між станцією і джерелом інфразвуку без урахування даних станції I53US:

*a* —  $p = 2.879r^{-1} + 0.075r^{0.5}$ ,  $R = 0.892$ ,  $p = 0.69$  Па; *б* —  $p = 2.751r^{-1} + 0.189$ ,  $R = 0.898$ ,  $p = 0.67$  Па; *в* —  $p = 1.510r^{-2} + 0.657$ ,  $R = 0.962$ ,  $p = 0.42$  Па

$p(r)$  є швидко спадними:

$$p = 2.879r^{-1} + 0.075r^{0.5} \text{ Па}, \quad R = 0.892, \quad p = 0.69 \text{ Па}, \quad (23)$$

$$p = 2.751r^{-1} + 0.189 \text{ Па}, \quad R = 0.898, \quad p = 0.67 \text{ Па}, \quad (24)$$

$$p = 1.51r^{-2} + 0.657 \text{ Па}, \quad R = 0.962, \quad p = 0.42 \text{ Па}. \quad (25)$$

## ОБГОВОРЕННЯ

Залежність відношення сигнал/шум від відстані. Регресійна залежність (1) досить добре описує залежність відношення сигнал/шум від відстані при  $r = 15$  Мм. Залежність  $q = r^{-2}$  є фізичною. У цьому випадку має місце сферична розбіжність хвилі, і  $p = r^{-1}$ . Однак при  $r = 15$  залежність (1) стає нефізичною.

Більш адекватною видається регресійна залежність (2). На відстанях  $r \ll r_0 = 0.25$  Мм  $p = r^{-2}$ , а при  $r \gg r_0$  амплітуда  $p = r^{-0.5}$ , тобто сферична розбіжність хвилі змінюється циліндричною. Остання має місце при хвильоводному поширенні інфразвуку. Для антарктичної станції при поширенні уздовж довгої дуги  $r = 25$  Мм маємо значення  $q = 1.3$ . Якщо ж  $r = 40$  Мм, то  $q = 0.9$ . Такі значення  $q$  видаються розумними.

У цілому ж залежність  $q(r)$  буде корисною лише тоді, коли потужність шуму для різних інфразвукових станцій близька, що, на жаль, далеко від дійсності.

Залежність часу запізнення від відстані. Регресійні залежності, що даються співвідношеннями (3) і (4), приводять до близьких результатів. Нахил прямої на рис. 2 характеризує середню по всіх трасах швидкість приходу  $\bar{v}$  інфразвуку:

$$\bar{v} = \frac{dr}{dt}$$

З (3) і (4) маємо для  $\bar{v}$  значення 291 і 293 м/с.

Залежність швидкості приходу від відстані. Цю залежність представлено на рис. 3. Значний розкид швидкостей обумовлений відмінностями на трасах поширення: впливом вітру, напрямком викривлення траєкторії (до Землі, від Землі), температурним режимом атмосфери і т. п. Найменше значення швидкості приходу (236 м/с) спостерігалося для німецької станції I26DE при  $\bar{v} = 290$  м/с. Найбільше значення швидкості (318 м/с) за даними табл. 2 зареєстроване для казахстанської станції I31KZ. Після уточнення часу запізнення, рівного 32 хв, для цієї станції отримуємо оцінку  $\bar{v} = 270$  м/с.

Через значний розкид швидкостей регресійні залежності (5) і (6) видаються далекими від істини. Для них  $R$  становить близько 0.107 і 0.574. Кращою є залежність (7), для якої  $R = 0.728$ .

Залежність швидкості приходу інфразвуку від азимута джерела. Оскільки швидкість приходу інфразвукової хвилі істотно залежить від величини і напрямку вітру, аналіз виконано з урахуванням даних всіх станцій (див. рис. 4а) і з виключенням з розгляду даних станцій, що лежать у Південній півкулі (див. рис. 4б і 4в). Крім того, на рис. 4в з розгляду виключено станцію I31KZ, для якої  $\bar{v} = 318$  м/с.

Швидкість приходу хвилі пов'язана з істинною (без урахування впливу вітру) швидкістю приходу  $v_0$  таким співвідношенням [29]:

$$v_0 = w \cos \alpha, \quad (26)$$

де  $w$  — швидкість вітру,  $\alpha = A_w + A$ ,  $A_w$  і  $A$  — азимутальні кути напрямків вітру і джерела інфразвуку.

Узимку у північній півкулі переважає західний вітер, при цьому  $A_w = 270^\circ$ . Тоді вираз (26) зводиться до такого:

$$v_0 = w \sin A. \quad (27)$$

Для співвідношень (8), (9), (11) і (12) коефіцієнт достовірності недостатньо високий (від 0.621 до 0.732). У той же час для регресій (10) і (13) маємо  $R = 0.917$  і 0.938. Для цих же регресій значення приблизно в два рази менші, ніж для регресій (8), (9), (11) і (12).

З порівняння (10) з (27) отримуємо, що  $w = 29.6$  м/с, а  $v_0 = 280$  м/с, порівняння (13) і (27) дає  $w = 31.1$  м/с і  $v_0 = 276$  м/с. Видно, що значен-

ня  $w$  і  $v_0$ , отримані такими способами, дуже близькі. Швидкість  $v_0$  також слабо відрізняється від  $\bar{v} = 291...293$  м/с.

Важливо, що оцінка середньої швидкості вітру  $w = 30$  м/с в цілому узгоджується з результатами метеоспостережень [15].

Залежність тривалості сигналу від відстані. Інфразвук генерується при прольоті метеороїда у щільних шарах атмосфери. Максимальна висота генерації інфразвуку близька до висоти, де починає генеруватися балістична ударна хвиля, тобто при  $z_1 = 70$  км. Мінімальна висота, де ще інфразвук генерується, близька до висоти вибуху метеороїда, тобто  $z_2 = 23$  км [40]. Тоді діапазон висот  $z = 47$  км. Довжина джерела інфразвуку  $L = z/\sin \alpha$ , де  $\alpha = 20^\circ$  — кут нахилу траєкторії до горизонту. При цьому  $L = 137$  км. При середній по висоті швидкості звуку  $v_s$ , рівній 300 м/с, маємо тривалість випромінювання джерелом інфразвуку  $T_0 = L/v_s = 460$  с  $\approx 7.6$  хв.

У процесі поширення інфразвуків пакету відбувається його розширення на величину  $T_1$ . Причиною розширення служить частотна дисперсія середовища, багаторазові перевідбиття хвилі (реверберація) у хвилеводі, неоднорідність траси поширення і т. п. Відомо, що інфразвуковий пакет, згенерований Челябінським метеороїдом, був надширококутовим: у його спектрі утримувалися складові з періодами приблизно від 20 до 90...100 с [11, 29, 39]. При цьому швидкість поширення гармонік з  $T = 20$  с була меншою на величину  $\Delta v = 10...15$  м/с, ніж швидкість поширення гармонік з  $T = 90...100$  с [29]. Тоді подовження сигналу тільки за рахунок дисперсії дається співвідношенням [29]

$$T_1 = \frac{r}{v_{\min} - v_{\max}}, \quad (28)$$

де  $v_{\min}$  і  $v_{\max} = v_{\min} + \Delta v$  — відповідно швидкості поширення гармонік з  $T_{\min} = 20$  с і  $T_{\max} = 90...100$  с. Значення  $v_{\min}$  і  $v_{\max}$  залежали від траси поширення [29]. При  $\bar{v} = 290$  м/с і  $\Delta v = 13$  м/с, тобто  $v_{\min} = 283.5$  м/с і  $v_{\max} = 296.5$  м/с із (28) дістанемо, що

$$T_1 = 155r,$$

де  $r$  дається у Мм,  $T_1$  — у секундах. Тоді повна тривалість сигналу

$$T = T_0 + T_1 = 460 + 155r. \quad (29)$$

Порівнюючи співвідношення (29) і (15), бачимо, що коефіцієнти в обох залежностях досить близькі. Це означає, що для станцій, для яких побудовано залежність (16), основним механізмом розширення сигналу є частотна дисперсія каналу поширення інфразвуку.

Важливо також і те, що значення  $T_0$ , отримані розрахунковим шляхом (460 с) і з даних спостережень (442 с), близькі.

Регресійну залежність (14) слід визнати незадовільною через низьке значення  $R = 0.323$  і велике значення  $\sigma = 488.2$  с.

Кореляційне поле для розрахованого і виміряного азимутів. З рис. 7 і 8 видно досить сильний статистичний зв'язок між  $A_{th}$  і  $A_{obs}$ . При цьому коефіцієнт достовірності отриманих регресійних залежностей дорівнює 0.972 (для синусів азимутального кута) і 0.998 (для азимута). Середня похибка оцінки  $A_{obs}$  становила близько 12.9 (без урахування станції І34МН, для якої різниця  $A_{th} - A_{obs} = 71$  була аномально великою).

Кореляційне поле для періодів. При урахуванні даних 14 станцій (крім І44RU, для якої  $T_{PSD}/T_{amp} = 3.15$ ) коефіцієнт достовірності  $R = 0.884$ ,  $a = 7.88$  с (див. співвідношення (19)). Після виключення з розгляду ще двох станцій (І18DK і І45RU, для якої  $q = 1.07$ ) регресійна залежність (20) помітно покращилася. При цьому  $R = 0.956$ ,  $a = 5.31$  с. Коефіцієнт, що описує нахил лінії регресії, відрізнявся від теоретичного на 3 %. Середня помилка оцінки періоду стає близькою до 1.7 с. При середньому періоді  $\bar{T} = 34$  с вона дорівнює 5 %. Додамо, що точність оцінки періоду має велике значення, бо по ньому обчислюється початкова кінетична енергія  $E$  метеороїда [36, 39, 42]. При помилці оцінки  $T$  на 10...20 % маємо помилку обчислення  $E$ , рівну 41...83 %.

Залежність періоду від відстані. Регресійні залежності  $T_{amp}(r)$  і  $T_{PSD}(r)$  даються співвідношеннями (21) і (22). Коефіцієнт достовірності невеликий (близько 0.410 і 0.303), а значення  $a$  — великі. Можна припустити, що значення періоду у процесі поширення інфразвуку не змінюються. Якщо все ж період змінюється за законами (21) і (22), то при  $r = 10$  Мм його збільшення досягає 16.6 с або 14.2 с, тобто 63 % або 47 % відповідно. Фізичною причиною зменшення вкладу в сигнал гармонік з меншими періодами може бути «висвічування» цих мод з хвилеводу «Земля — стратосфера» у міру поширення хвилі, тобто ослаблення інтенсивності хвильового пакета без його поглинання.

Кореляційне поле «відстань — амплітуда». Отримано три можливі регресійні залежності  $p(r)$  (див. вирази (23) — (25)). Для всіх залежностей коефіцієнт достовірності має значне значення (від 0.892 до 0.962) і відносно невеликі значення  $a$ .

Залежність (23) має простий фізичний зміст — на малих відстанях переважає сферична розбіжність хвилі, а на великих — циліндрична розбіжність, властива хвилеводному поширенню інфразвуку. Крім того, виконується природна вимога  $p(0) = 0$ . Регресія (23) має той істотний недолік, що перехід від переважно сферичної розбіжності до циліндричної відбувається при нереально великих значеннях відстані  $r = 1470$  Мм. Це означає, що у регресії (23) циліндрична розбіжність для всіх мислимих  $r$  не настає.

Регресійна залежність (24) описує тільки сферичну розбіжність хвилі і не враховує можливість хвилеводного поширення. Для антарктичної станції при  $r = 25$  Мм з (24) маємо значення  $p = 0.30$  Па, яке за порядком величини близьке до дійсного [11].

Регресійна залежність (25), незважаючи на високе значення  $R = 0.962$ , не має розумного фізичного пояснення, тому що  $p \propto r^{-2}$ , тобто амплітуда зменшується набагато швидше, ніж при сферичній розбіжності, а при  $r > 2 \dots 3$  Мм падіння  $p$  різко сповільнюється. При  $r$  маємо скінченне значення  $p = 0.657$  Па. Для антарктичної станції при  $r = 25$  Мм з (25) маємо значення  $p = 0.66$  Па, яке перевищує спостережні значення.

Таким чином, найбільш адекватною є регресійна залежність (24).

## ВИСНОВКИ

1. З використанням бази даних інфразвукових станцій Міжнародної системи моніторингу виконано статистичний аналіз залежностей основних параметрів поширення у глобальних масштабах інфразвукового сигналу (відношення сигнал/шум, часу запізнення, швидкості приходу, тривалості, амплітуди, періоду), згенерованого Челябінським метеороїдом і зареєстрованого на 15 інфразвукових станціях. Крім станцій Міжнародної системи моніторингу, у ряді випадків залучалися дані ще п'яти інфразвукових станцій, розміщених у євразійських геофізичних обсерваторіях.

2. Побудовано кореляційні поля для відношення сигнал/шум, часу запізнення, швидкості приходу, тривалості, амплітуди, періоду коливань в залежності від відстані між джерелом інфразвуку і місцем реєстрації або від азимутального кута джерела.

3. Побудовано регресійні залежності перерахованих вище параметрів від відстані від азимутального кута.

4. Отримано середні по всіх трасах поширення оцінки швидкості приходу інфразвукового сигналу (близько 280 м/с) і швидкості тропосферно-стратосферного вітру (близько 30 м/с), яка в цілому узгоджується з даними метеоспостережень.

## ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

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

1. Алпатов В. В., Буров В. А., Вагин Ю. П. и др. *Геофизические условия при взрыве Челябинского (Чебаркульского) метеороида 15.02.2013 г.* М.: ФГБУ ИПГ, 2013. 37 с.
2. *Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль. Материалы конференции.* Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.). Челябинск: Край Ра, 2013. 168 с.
3. *Астрономический вестник.* 2013. 47. № 4. (Тематический выпуск).



4. Бернгардт О. И., Добрынина А. А., Жеребцов Г. А., Михалев А. В., Перевалова Н. П., Ратовский К. Г., Рахматулин Р. А., Саньков В. А., Сорокин А. Г. Геофизические явления, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Докл. Акад. наук.* 2013. 452, № 2. С. 205—207.  
DOI: 10.7868/80869565213270157
5. Гивишвили Г. В., Лещенко Л. Н., Алпатов В. В., Григорьева С. А., Журавлев С. В., Кузнецов В. Д., Кусонский О. А., Лапшин В. Б., Рыбаков М. В. Ионосферные эффекты, стимулированные Челябинским метеоритом. *Астрон. вестн.* 2013. 47, № 4. С. 304—311.
6. Горькавый Н. Н., Лихарев Д. С., Миннибаев Д. Н. Цветовые вариации аэрозольного следа Челябинского болида. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 118—123.
7. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А. Взаимодействие Челябинского болида с атмосферой. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции* [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 124—129.
8. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А., Проворникова Е. А., Горькавый И. Н., Ахметвалеев М. М. Аэрозольный шлейф Челябинского болида. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции* [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 130—135.
9. Гохберг М. Б., Ольшанская Е. В., Стеблов Г. М., Шалимов С. Л. Челябинский метеороид: отклик ионосферы по измерениям GPS. *Докл. Акад. наук.* 2013. 452 (2). С. 208—212.
10. Емельяненко В. В., Попова О. П., Чугай Н. Н., Шеляков М. А., Пахомов Ю. В., Шустов Б. М., Шувалов В. В., Бирюков Е. Е., Рыбнов Ю. С., Маров М. Я., Рыжлова Л. В., Нароенков С. А., Карташова А. П., Харламов В. А., Трубецкая И. А. Астрономические и физические аспекты челябинского события 15 февраля 2013 года. *Астрон. вестн.* 2013. 47, № 4. С. 262—277.
11. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*, 2017. № 8. С. 427—436.
12. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции*. [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. — Челябинск, Д. Графов, 2014.—694 с.
13. Перевалова Н. П., Шестаков Н. В., Жупитяева А. С., Ясюкевич Ю. В., Воейков С. В., Кутелев К. А. Вариации полного электронного содержания в ионосфере во время падения и взрыва Челябинского метеороида. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции* [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, 2014. С. 182—190.
14. Попова О. П., Шувалов В. В., Рыбнов Ю. С., Харламов В. А., Глазачев Д. О., Емельяненко В. В., Карташова А. П., Дженнискенс П. Параметры Челябинского метеороида: анализ данных. *Динамические процессы в геосферах. Сб. науч. тр. ИДГ РАН.* М.: Геос. 2013. Вып. 4. С. 1—10.
15. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А. и др. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям. *Динамические процессы в геосферах. Сб. науч. тр. ИДГ РАН.* М.: Геос, 2013. Вып. 4. С. 21—31.
16. Сорокин А. Г. Инфразвуковое излучение Челябинского метеороида. *Солнечно-земная физика.* 2013. № 24. С. 58—63.
17. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника.*

2013. 4(18). № 3. С. 47—54.
18. Черногор Л. Ф. Основные физические явления при полете Челябинского космического тела. *Материалы конференции “Астероиды и кометы. Челябинское событие и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль”*. Международная научно-практическая конференция (Чебаркуль, 21—22 июня 2013 г.) — Челябинск: Край Ра. 2013. С. 148—152.
  19. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита “Челябинск”. *Инж. физ.* 2013. № 8. С. 23—40.
  20. Черногор Л. Ф. Физические эффекты пролета Челябинского метеорита. *Доп. Національної академії наук України*. 2013. № 10. С. 97—104.
  21. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в геомагнитном поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2014. 54. № 5. С. 658—669.
  22. Черногор Л. Ф. Основные эффекты падения метеорита Челябинск: результаты физико-математического моделирования. *Метеорит Челябинск — год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции* [редкол.: Н. А. Антипин и др.; сост. Н. А. Антипин]. Челябинск, Д. Графов, 2014. С. 229—264.
  23. Черногор Л. Ф. Эффекты Челябинского метеороида в ионосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. 55. № 3. С. 370—385.
  24. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2017. 22. № 1. С. 53—66.
  25. Черногор Л. Ф. Атмосферные эффекты газопылевого следа Челябинского метеороида 2013 года. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2017. 53. № 3. С. 296—306.
  26. Черногор Л. Ф. Возмущения в нижней ионосфере, сопровождавшие падение Челябинского космического тела. *Космич. исслед.* 2017. 55. № 5. С. 342—352.
  27. Черногор Л. Ф., Барабаш В. В. Ионосферные возмущения, сопровождавшие пролет Челябинского тела. *Кинематика и физика небес. тел.* 2014. 30. № 3. С. 27—42.
  28. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П. Возмущения в геокосмосе, сопровождавшие падение метеорита “Челябинск”. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2013. 18. № 3. С. 231—243.
  29. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Параметры инфразвуковых волн, сгенерированных Челябинским метеороидом 15 февраля 2013 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. 33. № 2. С. 60—72.
  30. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Федоренко В. Н., Цымбал А. М. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита. *Космічна наука і технологія*. 2013. 19. № 6. С. 38—46.
  31. 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. Вип. 25. С. 70—73.
  32. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радіофізика та радіоастрономія*. 2018. 23. № 1. С. 24—35.
  33. Antolik M., Ichinose G., Creasey J., Clauter D.: Seismic and infrasonic analysis of the major bolide event of 15 February 2013. *Seismol. Res. Lett.* 2014. 85. № 2. P. 334—343.
  34. Avramenko M. I., Glazyrin I. V., Ionov G. V., Karpeev A. V. Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2014. 119. is. 12. P. 7035—7050.

35. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol.* 2013. 86. № 4. P. 136—139.
36. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. 68. P. 1136—1160.
37. Gi N. *Using bolide airwaves to estimate meteoroid source characteristics and window damage potential.* 2017. 165 p.
38. Grigoryan S. S., Ibodov F. S., Ibadov S. I. Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar System Res.* 2013. 47. № 4. P. 268—274.
39. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C. et al. Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.* 2013. 40. № 14. P. 3732—3737.
40. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G. Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science.* 2013. 342. P. 1069—1073.
41. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkorn N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. *Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization.* 2013. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1)
42. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic gravity waves. *Ann. New-York Acad. Sci.* (Near-Earth Objects, Ed. J. Remo). 1997. 822. P. 284—302.

## REFERENCES

1. Alpatov V. V., Burov V. N., Vagin J. P., Galkin K. A., Givishvili G. V., Gluhov J. V., Davidenko D. V., Zubachev D. S., Ivanov V. N., Karhov A. N., Kolomin M. V., Korshunov V. A., Lapshin V. B., Leshenko L. N., Lysenko D. A., Minligareev V. T., Morozova M. A., Perminova E. S., Portnyagin J. I., Rusakov J. S., Stal N. L., Syroeshkin A. V., Tertyshnikov A. V., Tulinov G. F., Chichaeva M. A., Chudnovsky V. S., Shtyrkov A. Y. (2013). *Geophysical conditions at the explosion of the Chelyabinsk (Chebarkulsky) meteoroid in February 15, 2013.* (FGBU "IPG" Publ., Moscow, Russia, 2013) (in Russian).
2. *Materials and reports of international scientific practical conference "Asteroids and comets. Chelyabinsk event and the study of meteorite falling into the lake"*

- Chebarkul'*, 21—22 June 2013, Chebarkul, 168 p. (2013) (in Russian).
3. *Solar System Research*. 47 (4). (Special issue) (2013) (in Russian).
  4. Bergardt O. I., Zherebtsov G. A., Mikhalev A. V., Perevalova N. P., Ratovskii K. G., Rakhmatulin R. A., Sorokin A. G., Dobrynina A. A., San'kov V. A. (2013) Geophysical phenomena accompanying the Chelyabinsk meteoroid impact. *Doklady Earth Sciences*. 452(2). 945—947.
  5. Givishvili G. V., Leshchenko L. N., Alpatov V. V., Grigor'eva S. A., Zhuravlev S. V., Kuznetsov V. D., Kusonskii O. A., Lapshin V. B., Rybakov M. V. (2013) Ionospheric effects induced by the Chelyabinsk meteor. *Sol. Syst. Res.* 47. 280—287.
  6. Gor'kavyj N. N., Liharyov D. S., Minnibayev D. N. (2014) The aerosol trace colour variations of the Chelyabinsk meteoroid. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Antipin N. A. ed., 118—123 (Chelyabinsk, 2014) (in Russian).
  7. Gor'kavyj N. N., Tajdakova T. A. (2014) The interaction of the Chelyabinsk meteoroid with atmosphere. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. ed. Antipin N. A. 124—129 (Chelyabinsk, 2014) (in Russian).
  8. Gor'kavyj N. N., Tajdakova T. A., Provornikova E. A., Gor'kavyj I. N., Ahmetvaleev M. M. (2014) The aerosol plume of the Chelyabinsk meteoroid. *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. ed. Antipin N. A., 130—135 (Chelyabinsk, 2014) (in Russian).
  9. Gokhberg M. B., Ol'shanskaya E. V., Steblou G. M., Shalimov S. L. (2013) The Chelyabinsk meteorite: Ionospheric response based on GPS measurements. *Doklady Earth Sciences*. 452 (2). 948—952.
  10. Emel'yanenko V. V., Popova O. P., Chugaj N. N., Sheljakov M. A., Pahomov Yu. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Birjukov E. E., Rybnov Yu. S., Marov M. Ya., Ryhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Harlamov V. A., Trubeckaja I. A. (2013) Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event. (February 15, 2013). *Solar System Research*. 47 (4). 240—254.
  11. Lazorenko O. V., Chernogor L. F. (2017) System Spectral Analysis of Infrasonic Signal Generated by Chelyabinsk Meteoroid. *Radioelectron. Commun. Syst.* 60 (8). 331—338. DOI: 10.3103/S0735272717080015
  12. Antipin N. A., ed. (2014) *The Chelyabinsk Meteorite — one year on the Earth: Proceedings of All-Russian Scientific Conference*. Chelyabinsk, Russia: Kamennyi poyas Publ., 694 p. (Chelyabinsk, 2014) (in Russian).
  13. Perevalova N. P., Shestakov N. V., Zhupityaeva A. S., Yasyukevich Yu. V., Voeikov S. V. (2014) TEC variations in the ionosphere during the fall and explosion of the Chelyabinsk meteoroid, in *Meteorite Chelyabinsk — god na Zemle: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii (The Chelyabinsk Meteorite — A Year on the Earth: Proceedings of a Scientific Conference)*, Ed. Antipin N. A., Chelyabinsk: Kamennyi poyas, 2014, 182—190.
  14. Popova O. P., Shuvalov V. V., Rybnov Y. S., Harlamov V. A., Glazachev D. O., Emelianenko V. V., Kartashova A. P., Jenniskens P. (2013). Chelyabinsk meteoroid parameters: Data analysis. In: *Dinamicheskie protsessy v geosferah: sb. nauch. tr. IDG RAN*. Moscow, Russia: Geos Publ. 4, 10—21 (in Russian).
  15. Rybnov Y. S., Popova O. P., Harlamov V. A., Soloviev A. V., Rusakov Y. S., Glukhov A. G., Silber E., Podobnaya E. D., Surkova D. V. (2013). Energy estimation of Chelyabinsk bolide using infrasound measurements. In: *Dinamicheskie protsessy v geosferah: Sb. nauch. tr. IDG RAN*. Moscow, Russia: Geos Publ. 4, pp. 21—32 (in Russian).
  16. Sorokin A. G. (2013) Infrasonic radiation of Chelyabinsk meteoroid. *Solar-Terr. Phys.* 24 (137). 58—63 (in Russian).

17. Chernogor L. F. (2013) Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite event. *Radiofizika i electronica*. 4(18) (3), 47—54 (in Russian).
18. Chernogor L. F. (2013) *The main physical effects associated with the Chelyabinsk bolide passage*. In: *Asteroids and comets. Chelyabinsk event and study of the meteorite falling into the lake Chebarkul: Proceedings of the international scientific-practical conference. Chelyabinsk, Russia: Krai Ra Publ.*, 148—152 (in Russian).
19. Chernogor L. F. (2013) Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite «Chelyabinsk». *Engineering Physics*. 8, 23—40 (in Russian).
20. Chernogor L. F. (2013) Physical effects of the Chelyabinsk meteorite passage. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 10, 97—104 (in Russian).
21. Chernogor L. F. (2014) Geomagnetic Field Effects of the Chelyabinsk Meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 54 (5), 613—624.
22. Chernogor L. F. (2014) Main effects of Chelyabinsk meteorite falling: physics and mathematics calculation results. *Meteorit Cheljabinsk — god na Zemle: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii*. Eds.: Antipin N. A., Chelyabinsk 229—264 (in Russian).
23. Chernogor L. F. (2015) Ionospheric effects of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 55(3). 353—368.
24. Chernogor L. F. (2017) Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. *Radio Phys. Radio Astron*. 22 (1). 53—66.
25. Chernogor L. F. (2017) Atmospheric effects of the gas-dust plume of the Chelyabinsk meteoroid of 2013. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 53 (3). 259—268.
26. Chernogor L. F. (2017) Disturbance in the Lower Ionosphere That Accompanied the Reentry of the Chelyabinsk Cosmic Body. *Cosmic Research*. 55 (5), 323—332.
27. Chernogor L. F., Barabash V. V. (2014) Ionosphere disturbances accompanying the flight of the Chelyabinsk body. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 30 (3), 126—136.
28. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2013) Disturbances in geospace associated with the Chelyabinsk meteorite passage. *Radio Phys. Radio Astron*. 18 (3), 231—243 (in Russian).
29. 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.
30. Chernogor L. F., Mylovanov Yu. B., Fedorenko V. N., Tsymbal A. M. (2013) Satellite observations of ionospheric disturbances which followed the Chelyabinsk meteorite passage. *Space Sci. and Technol*. 19 (6). 38—46. (In Russian).
31. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2016) The parameters of infrasound effects generated by Chelyabinsk meteoroid 15 February, 2013. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics"*. 25. 70—73.
32. 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).
33. Antolik M., Ichinose G., Creasey J., Clauter D. (2014) Seismic and infrasonic analysis of the major bolide event of 15 February 2013. *Seismol. Res. Lett*. 85 (2). 334—343.
34. Avramenko M. I., Glazyrin I. V., Ionov G. V., Karpeev A. V. (2014) Simulation of the airwave caused by the Chelyabinsk superbolide. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 119 (12). 7035—7050.
35. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2013) The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage. *Probl. Atomic Sci. and Technol*. 86 (4). 136—139.

36. Edwards W. N., Brown P. G., ReVelle D. O. (2006) Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 68. 1136—1160.
37. Gi N. (2017) Using bolide airwaves to estimate meteoroid source characteristics and window damage potential. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. 165.
38. Grigoryan S. S., Ibadov F. S., Ibadov S. I. (2013) Physical mechanism of Chelyabinsk superbolide explosion. *Solar System Res.* 47 (4). 268—274.
39. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C. et al. (2013) Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.* 40 (14). 3732—3737.
40. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G. Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkom N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. (2013) Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 342. 1069—1073.
41. Popova O. P., Jenniskens P., Emelyanenko V., Kartashova A., Biryukov E., Khaibrakhmanov S., Shuvalov V., Rybnov Y., Dudorov A., Grokhovsky V. I., Badyukov D. D., Yin Q.-Z., Gural P. S., Albers J., Granvik M., Evers L. G., Kuiper J., Harlamov V., Solovyov A., Rusakov Y. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Y., Glazachev D., Mayer A. E., Gisler G., Gladkovsky S. V., Wimpenny J., Sanborn M. E., Yamakawa A., Verosub K. L., Rowland D. J., Roeske S., Botto N. W., Friedrich J. M., Zolensky M. E., Le L., Ross D., Ziegler K., Nakamura T., Ahn I., Lee J. I., Zhou Q., Li X. H., Li Q. L., Liu Y., Tang G.-Q., Hiroi T., Sears D., Weinstein I. A., Vokhmintsev A. S., Ishchenko A. V., Schmitt-Kopplin P., Hertkom N., Nagao K., Haba M. K., Komatsu M., Mikouchi T. (2013) *Supplementary material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization*. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1)
42. ReVelle D. O. (1997) Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic gravity waves. *Ann. New-York Acad. Sci.* (Near-Earth Objects, Ed. J. Remo). 822. 284—302.

Л. Ф. Черногор

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

#### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАЗВУКА, СГЕНЕРИРОВАННОГО ЧЕЛЯБИНСКИМ МЕТЕОРОИДОМ

Пролет Челябинского метеороида вызвал целый комплекс физических эффектов во всех подсистемах системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. Ранее изучены эффекты Челябинского метеороида в атмосфере, ионосфере, геомагнитном поле. Значительное внимание также уделено особенностям распространения инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. В то же время в литературе отсутствуют результаты статистического анализа параметров инфразвукового сигнала. Целью настоящей работы является построение корреляционных полей для основных параметров глобально распространявшегося инфразвукового сигнала (отношения сигнал/шум, времени запаздывания, скорости прихода, длительности, амплитуды, периода) в зависимости от расстояния между источником инфразвука и местом его регистрации либо от азимутального угла источника, а

также получение соответствующих регрессионных зависимостей. Для анализа привлекались данные 15 инфразвуковых станций Международной системы мониторинга ядерных испытаний при Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СВТО). В отдельных случаях эти данные дополнялись данными инфразвуковых станций, размещенных в евразийских геофизических обсерваториях. Построены корреляционные поля для основных параметров глобально распространяющегося инфразвукового сигнала. Приводятся регрессионные зависимости этих параметров от расстояния либо от азимутального угла. Получены средние по всем трассам распространения оценки скорости прихода инфразвукового сигнала (около 280 м/с) и скорости тропосферно-стратосферного ветра (около 30 м/с). Обсуждаются достоинства и недостатки предложенных регрессионных зависимостей. **Ключевые слова:** инфразвуковой сигнал, корреляционные поля, отношение сигнал/шум, время запаздывания, скорость прихода, длительность сигнала, амплитуда сигнала, период сигнала, азимут, регрессионные зависимости.

*L. F. Chernogor*

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

#### THE STATISTICAL ANALYSIS OF INFRASONIC PARAMETERS GENERATED BY THE CHELYABINSK METEOROID

The passage of the Chelyabinsk meteoroid generated a wide variety of physical effects in all subsystems in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. Earlier studies have been conducted in order to examine Chelyabinsk meteoroid effects in the atmosphere, ionosphere, and the geomagnetic field. Particular attention has been given to the features of the infrasound signal generated by the Chelyabinsk meteoroid. At the same time, the results of the statistical analysis of infrasonic parameters are absent in the literature. The purpose of this paper is to construct correlation diagrams for basic infrasonic parameters of the signal propagating globally (such as signal-to-noise ratios, time lags, celerity, time durations, amplitudes, and periods per cycle) on either the distance between the infrasound source and the sensor or the source back-azimuth, as well as to fit respective regression lines. The data have been retrieved from 15 infrasound stations of the International Monitoring System (IMS) set up by the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (CTBTO). On individual occasions, these data have been complemented by the data acquired by the infrasound stations located at the Eurasia geophysical observatories. The correlation diagrams have been constructed for basic parameters of the infrasonic signal propagating globally. The estimated regression lines superimposed on the scatter diagrams of these parameters versus distance or back-azimuth are shown. Averaged over all propagation paths, estimates of the celerity (approximately 280 m/s) and tropospheric-stratospheric wind (about 30 m/s) have been determined. The advantages and disadvantages of the regression lines proposed are discussed.

**Key words:** infrasonic signal, correlation diagram, signal-to-noise ratio, time lag, celerity, signal duration, signal amplitude, signal period per cycle, azimuth, regression line.

Стаття надійшла до редакції 01.08.2019

Після доопрацювання 01.08.2019

Прийнята до друку 13.04.2020