

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.05.031>

УДК 551.558, 551.596, 534.221

**Л. Ф. Чорногор<sup>1</sup>, О. І. Лящук<sup>2</sup>, М. Б. Шевелєв<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Харків, Україна  
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

<sup>2</sup>Головний центр спеціального контролю НЦУВКЗ ДКА України,  
смт. Городок, Україна

## **Параметри інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським метеороїдом**

*Об'єкт дослідження — інфразвуковий сигнал, який згенерувався 18 грудня 2018 р. у процесі падіння та вибуху високошвидкісного (32 км/с), високоенергійного (173 кт ТНТ), великого (9.4 м) космічного тіла, яке отримало назву Камчатського метеороїда. Предмет дослідження — параметри інфразвукового сигналу, який продукувався Камчатським метеороїдом. Як вихідні використовувалися дані про часові залежності тиску в інфразвуковій хвилі, зареєстрованій станціями міжнародної системи моніторингу ядерних випробувань Організації з Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (153US, 130JP, 159US, 146RU, 157US і МААГ2). Результати вимірювань перетворювалися з відносних одиниць в абсолютні. Потім часові залежності тиску в інфразвуковій хвилі піддавалися фільтрації в діапазоні періодів 1...40 с. Після цього здійснювався системний спектральний аналіз відфільтрованих часових залежностей за допомогою взаємодоповнювальних інтегральних перетворень: віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення з материнською функцією Морле. У результаті досліджень виявилось, що амплітуда інфразвукового сигналу досить швидко спадала при збільшенні відстані від місця вибуху метеороїда до місця реєстрації сигналу. Час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався в міру збільшення відстані між місцем вибуху космічного тіла та місцем реєстрації сигналу. Швидкість приходу сигналу залежала від вказаної відстані та орієнтації траси і змінювалася у межах 269...308 м/с. Тривалість інфразвукового сигналу практично не залежала від відстані між місцем генерації та місцем реєстрації сигналу. Спектри інфразвукового сигналу були широкосмуговими, у них виявлялись періоди приблизно від 5 до 40 с. Разом з тим найбільша*

*енергія припадала на виділені періоди 12...15 і 28...33 с. Побудовано кореляційні поля та регресії для основних параметрів інфразвуку. За переважним періодом інфразвуку оцінено кінетичну енергію (179 кт ТНТ) та акустичну ефективність (~4 %) космічного тіла.*

## ВСТУП

Вивчення генерації та поширення інфразвукових хвиль має значне наукове та практичне значення. У літературі описано та досліджено багато джерел інфразвуку природного та техногенного походження [2, 23, 24]. Серед них особливе місце займає інфразвук, який генерується при вторгненні до атмосфери крупних космічних тіл [23, 24].

Вперше інфразвук, згенерований великим космічним тілом, а точніше — тунгуським тілом, зареєстровано 30 червня 1908 р. [2]. Аналізу інфразвукового сигналу тунгуського тіла присвячено роботи [11, 16].

Згодом інфразвукові сигнали, згенеровані метеороїдами метрового розміру, активно вивчалися багатьма дослідниками. Було створено Американську та Європейську мережі інфразвукових станцій [26, 30]. Головну роль у вивченні інфразвукових сигналів грає глобальна система засобів, створена відповідно до Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань (СТВТО) [22].

Прикладом докладного вивчення може служити метеороїд Моравка, який вибухнув над Чехією 6 травня 2002 р. [21]. Іншим прикладом є інфразвуковий сигнал від Вітимського метеороїда, який зіткнувся з Землею 24 вересня 2002 р. [1, 10]. Достатньо детально вивчено параметри інфразвукового сигналу Індонезійського метеороїда, який вибухнув в атмосфері Землі 8 жовтня 2009 р. [17, 31]. Значно краще за інших досліджено параметри інфразвукового сигналу Челябінського метеороїда, який вторгнувся до атмосфери Землі 15 лютого 2013 р. [3—8, 12, 14, 18, 20, 25, 28, 29]. У роботах [13, 15] описано інфразвукові ефекти Румунського метеороїда, який вибухнув в атмосфері Землі 7 січня 2015 р. У роботі [27] за даними інфразвукового сигналу оцінено період і початкову кінетичну енергію Липецького метеороїда, який вторгнувся до атмосфери нашої планети 21 червня 2018 р. У роботі [19] визначено статистичні характеристики інфразвукового сигналу, згенерованого цим метеороїдом.

Багаторічні дослідження показали, що параметри інфразвукового сигналу сильно залежать від параметрів метеороїда, стану атмосфери, швидкості та напрямку вітру в атмосфері, напрямку на інфразвукову станцію та метеоумов на трасі поширення. Вивчення інфразвукових сигналів від великих космічних тіл дозволяє уточнити параметри тіла, перш за все його енергію, а також параметри атмосфери на трасі поширення. Тому аналіз інфразвукових сигналів від кожного нового космічного тіла є актуальною задачею.

Мета цієї роботи — викладення результатів вивчення параметрів інфразвукових сигналів, згенерованих протягом падіння Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р. Унікальність даного метеороїда полягає в його значній швидкості (32 км/с), величезній енергії (173 кт ТНТ) та близькій до вертикальної траєкторії (зенітний кут становив  $11^\circ$ ).

За своєю енергією Камчатський метеороїд поступається лише тунгуському (25...50 Мт ТНТ) та челябінському (~440 кт ТНТ) космічним тілам.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МЕТЕОРОЇД

18 грудня 2018 р. о 23:48:20 UT (тут і далі всесвітній час) поблизу Камчатського півострова (Росія) до атмосфери вторгнулось космічне тіло, яке природно назвати Камчатським метеороїдом. Геостационарні ШСЗ контролю космічного простору США дозволили виміряти координати метеороїда (56.9 N, 172.4 E), висоту (25.6 км), три проекції початкової швидкості ( $v_x = 6.3$  км/с,  $v_y = -3$  км/с,  $v_z = -31.2$  км/с), енергію оптичного випромінювання ( $1.3 \cdot 10^{14}$  Дж) вибуху [<https://sneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>]. Модуль початкової швидкості метеороїда дорівнював 32 км/с, початкова кінетична енергія  $E_k = 173$  кт ТНТ  $= 7.24 \cdot 10^{14}$  Дж. Знаючи  $v$  та  $E_k$ , можна обчислити масу тіла  $m = 1.41 \cdot 10^6$  кг. Висота спалаху (25.6 км) свідчила про те, що метеороїд був, скоріше за все, кам'яним. Беручи до уваги, що його щільність дорівнювала  $3.3$  т/м<sup>3</sup>, отримаємо об'єм  $V = 428.5$  м<sup>3</sup>. Вважаючи, що форма метеороїда була близькою до сферичної, отримуємо оцінку діаметра космічного тіла  $d = 9.4$  м.

### ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу інфразвукових сигналів, згенерованих у процесі польоту та вибуху Камчатського метеороїда, використовувались дані, зареєстровані станціями міжнародної системи моніторингу (IMS) ядерних випробувань Організації за Договором про всеосяжну заборону ядерних випробувань (СТВТО) [22]. Аналіз часових залежностей тиску  $p$  в інфразвуковій хвилі виконано для шести станцій: I53US, I30JP, I59US, I46RU, I57US та МААГ2 (Україна) (табл. 1). Місця вибуху та дислокації інфразвукових станцій показано на рис. 1.

Методика виявлення інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським метеороїдом, була такою. За координатами місця вибуху та інфразвукових станцій розраховувався теоретичний азимут (табл. 1) та очікуваний час запізнення інфразвукового сигналу за швидкістю приходу  $v_s = 250...350$  м/с. Потім за даними індикатора кругового огляду (рис. 2) та результатами міжканальної обробки визначався часовий інтервал з шуканим інфразвуковим сигналом. Міжканальна

**Таблиця 1.** Відстань від місця вибуху Камчатського метеороїда ( $56.9^{\circ}\text{N}$ ,  $172.4^{\circ}\text{E}$ ) до інфра звукових станцій, а також розрахунковий і вимірний азимуту приходу інфра звукових сигналів

Назва (Шифр)	Географічні координати	Відстань, км	Азимут (розрахунок)	Азимут (вимірювання)
I53US	$64.9^{\circ}\text{N}$ , $147.9^{\circ}\text{W}$	2275	$266^{\circ}$	$269 \pm 5^{\circ}$
I30JP	$36.1^{\circ}\text{N}$ , $140.10^{\circ}\text{E}$	3327	$36^{\circ}$	$37 \pm 7^{\circ}$
I59US	$19.6^{\circ}\text{N}$ , $155.9^{\circ}\text{W}$	4895	$336^{\circ}$	$331 \pm 3^{\circ}$
I46RU	$53.95^{\circ}\text{N}$ , $84.82^{\circ}\text{E}$	5145	$49^{\circ}$	$42 \pm 1^{\circ}$
I57US	$34.07^{\circ}\text{N}$ , $120.58^{\circ}\text{W}$	5530	$319^{\circ}$	$314 \pm 5^{\circ}$
МАОГ2	$48.56^{\circ}\text{N}$ , $26.46^{\circ}\text{E}$	7869	$19^{\circ}$	$15 \pm 11^{\circ}$

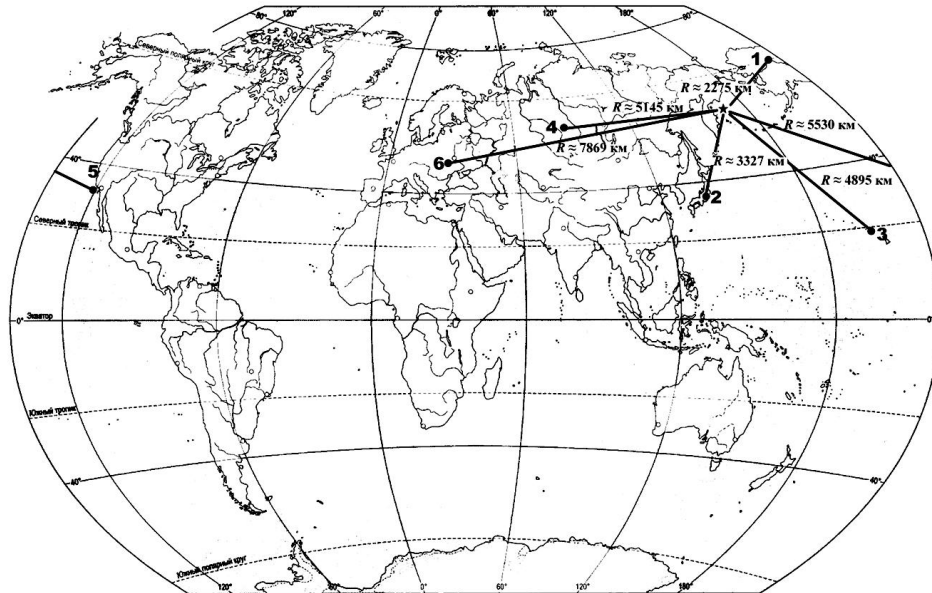


Рис. 1. Схема розташування інфра звукових станцій: 1 — I53US, 2 — I30JP, 3 — I59US, 4 — I46RU, 5 — I57US, 6 — МАОГ2; зірочкою показано координати вибуху метеороїда

обробка дозволила оцінити коефіцієнт взаємної кореляції сигналів у різних каналах, азимут і швидкість приходу (див. рис. 2).

Приклад хвильових форм інфра звукового сигналу для восьмиканальної станції I53US, показано на рис. 3. Відношення  $q$  сигнал/шум (за потужністю) було не меншим за 100.

Далі результати вимірювань  $p(t)$  перетворювалися з відносних одиниць в абсолютні. Потім залежність  $p(t)$  піддавалася фільтрації в діапазоні періодів 1...40 с. Після цього здійснювався системний спектральний аналіз (ССА) відфільтрованих залежностей  $p(t)$  за допомогою взаємодоповнювальних інтегральних перетворень: віконного перетворення Фур'є (ВФ), адаптивного перетворення Фур'є (АФ) та вейвлет-перетворення (ВП) з материнською функцією Морле [9].

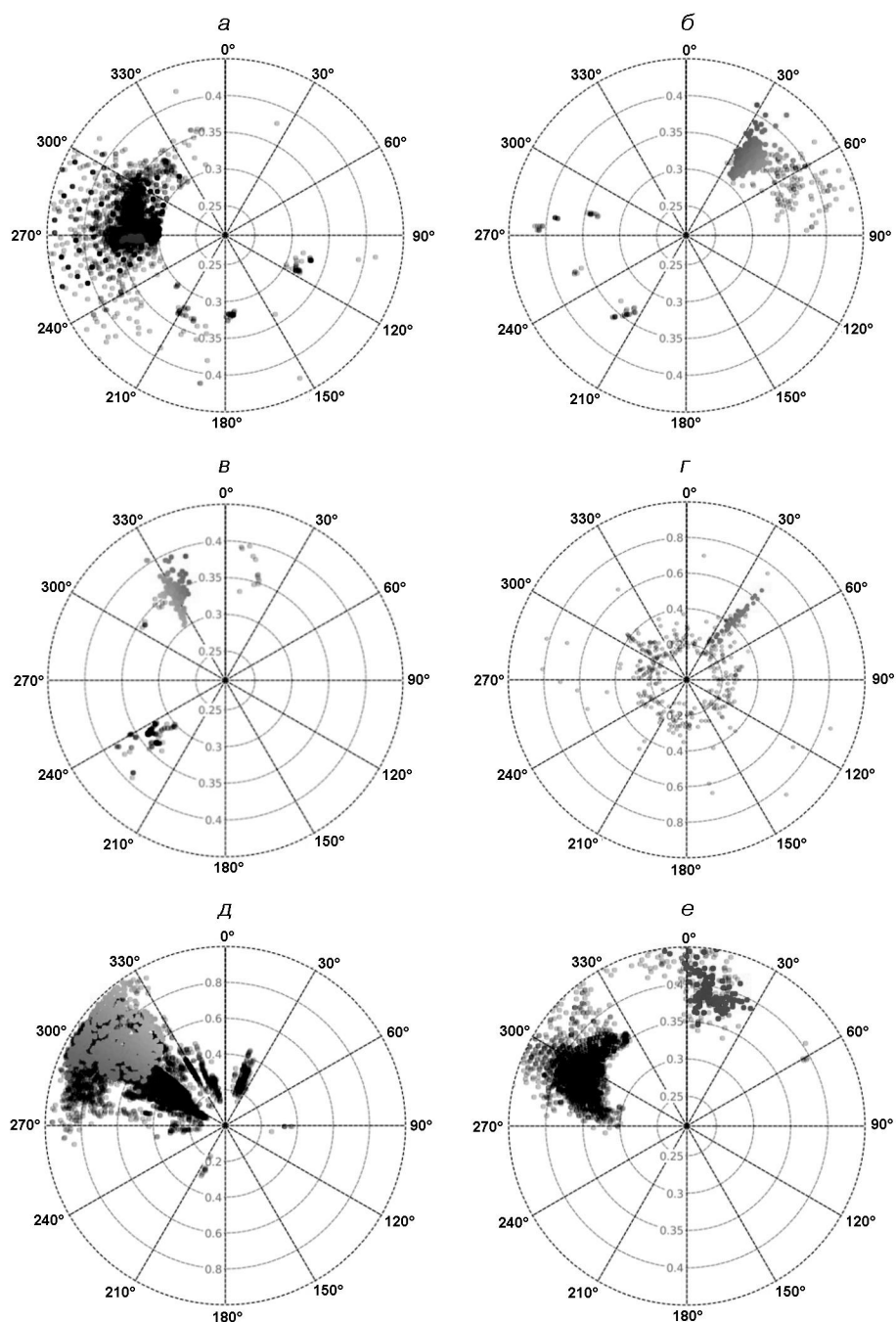


Рис. 2. Панель індикатора кругового огляду для визначення азимута джерела інфразвуку: а — 153US, б — 130JP, в — 159US, г — 146RU, д — 157US, е — МААГ2. Уздовж радіуса відкладено швидкість (у кілометрах за секунду), кутова координата — азимут. На індикаторах видно сліди від акустичних сигналів, які спостерігались після вибуху Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р., а також завади

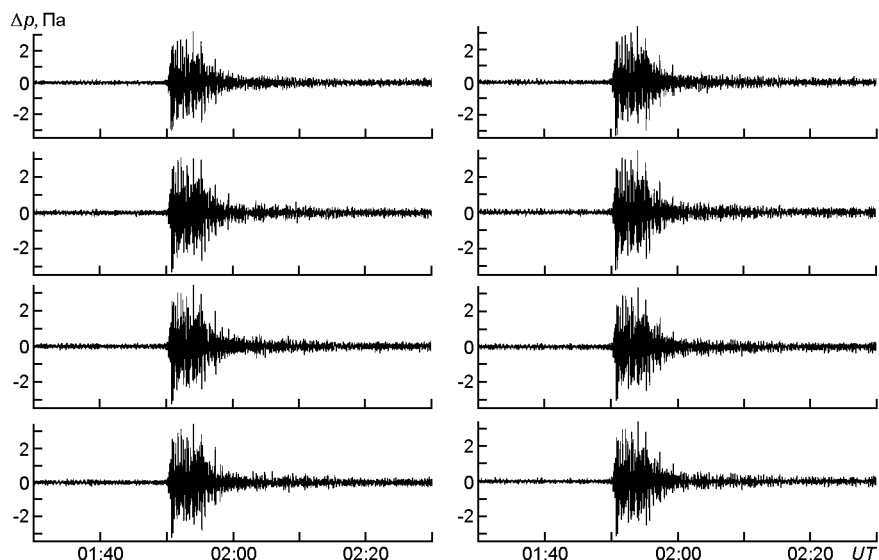


Рис. 3. Приклад хвильових форм інфразвукового сигналу для восьмиканальної станції I53US

### РЕЗУЛЬТАТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Часові залежності тиску в інфразвуковій хвилі, зареєстровані в різних каналах, мало відрізняються один від одного. Це саме можна сказати і про їхні частотні діапазони. Тому далі наводяться результати аналізу лише для одного з каналів.

**Станція I53US.** Хвильова форма інфразвукового сигналу, а також результати спектральної обробки наведено на рис. 4. Інфразвуковий сигнал, який відповідав азимуту  $269 \pm 5^\circ$ , спостерігався з 01:31 19 грудня 2018 р. Тривалість  $T$  його основної частини становила не менше 20 хв. Максимальне відношення сигнал/шум дорівнювало 400. Пізніше протягом декількох десятків хвилин відношення сигнал/шум помітно перевищувало одиницю. Спектр сигналу був широкосмуговим і займав діапазон періодів  $T$  від 5 до 35 с. Найбільшу енергію мали складові з  $T = 10 \dots 20$  с. Другий максимум, виражений менше, мав місце при  $T = 25 \dots 27$  с.

**Станція I30JP.** Залежність  $p(t)$ , а також результати спектрального аналізу наведено на рис. 5. Тривалість сигналу, що розпочався о 03:14 19 грудня 2018 р., становила не менше 20 хв. Максимальне відношення сигнал/шум досягало приблизно 50, а мінімальне — 10. Вимірюваний азимут дорівнював  $37 \pm 7^\circ$ . Інфразвуковий сигнал був широкосмуговим, його складові мали періоди приблизно від 5 до 40 с і більше. У спектрі спостерігалися два максимуми з  $T_1 = 28$  с і  $T_2 = 12$  с. Період  $T_3 = 5$  с, найімовірніше, не пов'язаний з вибухом метеороїда. Він спостерігався і до приходу інфразвуку від метеороїда.

Станція I59US. Хвильова форма інфразвукового сигналу та результати спектрального аналізу показані на рис. 6. Інфразвуковий сигнал, який мав вимірний азимут  $331 \pm 3$ , спостерігався в інтервалі часу 04:28...04:48 UT. Відношення сигнал/шум становило 3...9. Спектр сигналу займав діапазон періодів від 5 до 40 с. У спектрі виділялися два максимуми з  $T_1 = 23$  с і  $T_2 = 5$  с. Коливання з періодом 5 с спостерігалися і до приходу інфразвукового сигналу, викликаного падінням Камчатського метеороїда.

Станція I46RU. Залежність тиску в інфразвуковій хвилі від часу, а також результати ССА наведено на рис. 7. Азимут приходу інфразвукового сигналу становив  $42 \pm 1$ , відношення сигнал/шум — 5...6. Час запізнення сигналу був близьким до 326 хв, а його тривалість — 20...25 хв. У спектрі сигналу були наявні гармоніки від 20 с і більше, а максимум енергії припав на  $T = 33$  с.

Станція I57US. Хвильові форми інфразвукового сигналу, а також результати ССА показано на рис. 8. Відношення сигнал/шум при азимуті  $314 \pm 5$  становило 4...5. Сигнал спостерігався в інтервалі часу з 05:08 до 05:28 UT. Спектр сигналу займав діапазон періодів від 5 до 40 с. Відзначалися два максимуми з  $T_1 = 15$  с і  $T_2 = 30$  с.

Станція MAAG2. Часова залежність тиску в інфразвуковій хвилі та результати ССА наведено на рис. 9. Вимірний азимут інфразвукового сигналу був близьким до  $15 \pm 11$ , а відношення сигнал/шум не перевищувало 3...4. Сигнал спостерігався в інтервалі часу 07:24...07:44. У спектрі сигналу містилися гармоніки від 5 до 40 с і більше. Виділялися два максимуми з  $T_1 = 32$  с і  $T_2 = 8$  с, причому коливання з меншим періодом спостерігалося й до приходу сигналу від метеороїда.

## КОРЕЛЯЦІЙНІ ПОЛЯ. РЕГРЕСІЇ

Кореляційне поле «відношення сигнал/шум — відстань». Залежність  $q$  від  $r$  показано на рис. 10. При апроксимації кореляційного поля регресією передбачались дві моделі послаблення енергії хвилі — циліндрична та сферична розбіжності хвилі, а також її загасання при поширенні. Отримані регресії мають вигляд

$$q = 12250r^{0.5} \exp(-1.53r), \quad R = 0.9995, \quad 3.38, \quad (1)$$

$$q = 12230r^{-1} \exp(-1.35r), \quad R = 0.9995, \quad 3.21, \quad (2)$$

де  $R$  — коефіцієнт достовірності, — середнє квадратичне відхилення апроксимації.

Кореляційне поле «час запізнення сигналу — відстань». Залежність  $t$  від  $r$  наведено на рис. 11. Рівняння лінійної регресії має вигляд:

$$t = 55.27r + 14.33, \quad R = 0.9888, \quad 18.01 \text{ хв.} \quad (3)$$

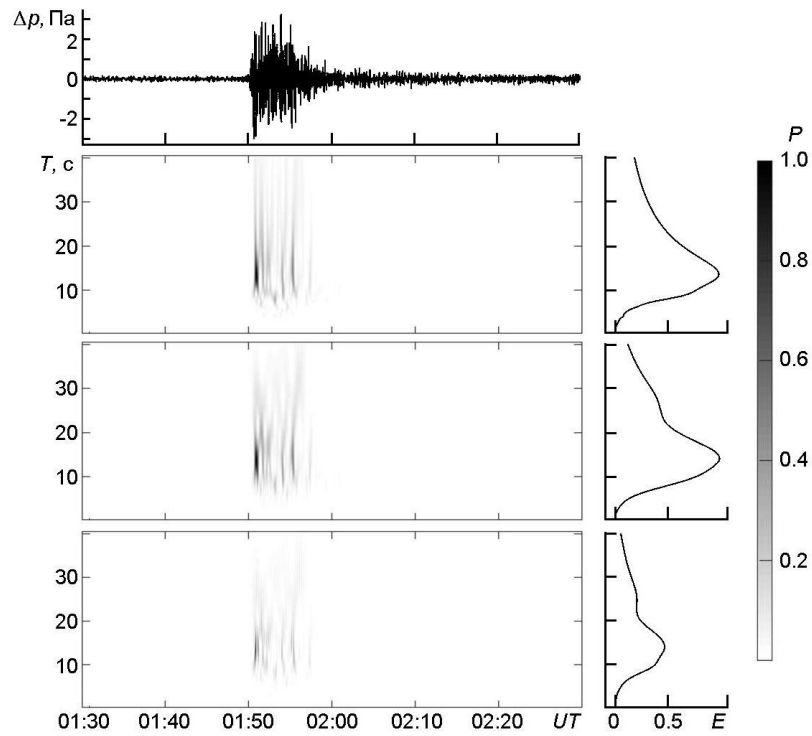


Рис. 4. Результати смугової фільтрації та ССА залежності  $p(t)$ , зареєстрованої 18 грудня 2018 р. на станції I53US. Тут і далі панелі зверху вниз: хвильова форма, результати ВПФ, АПФ та ВПІ. Справа показано енергограми,  $P$  — інтенсивність сигналу

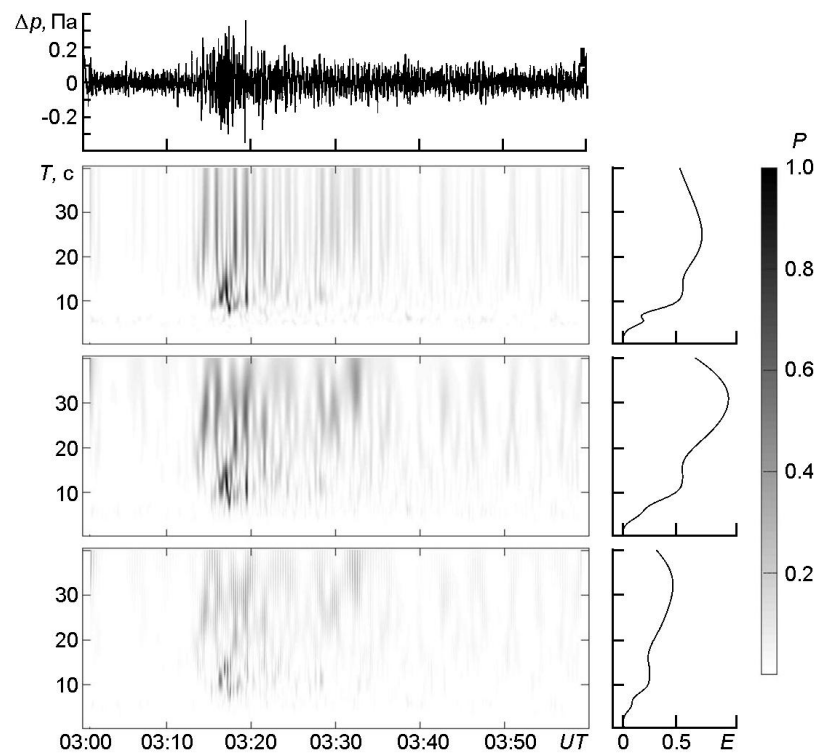


Рис. 5. Те ж для станції I30JP



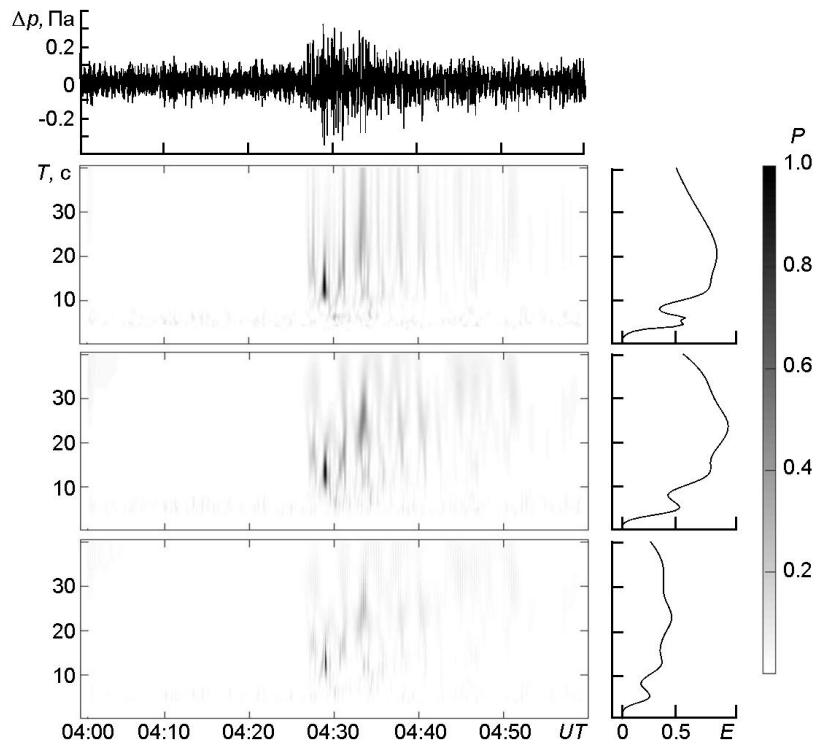


Рис. 6. Те ж для станції I59US

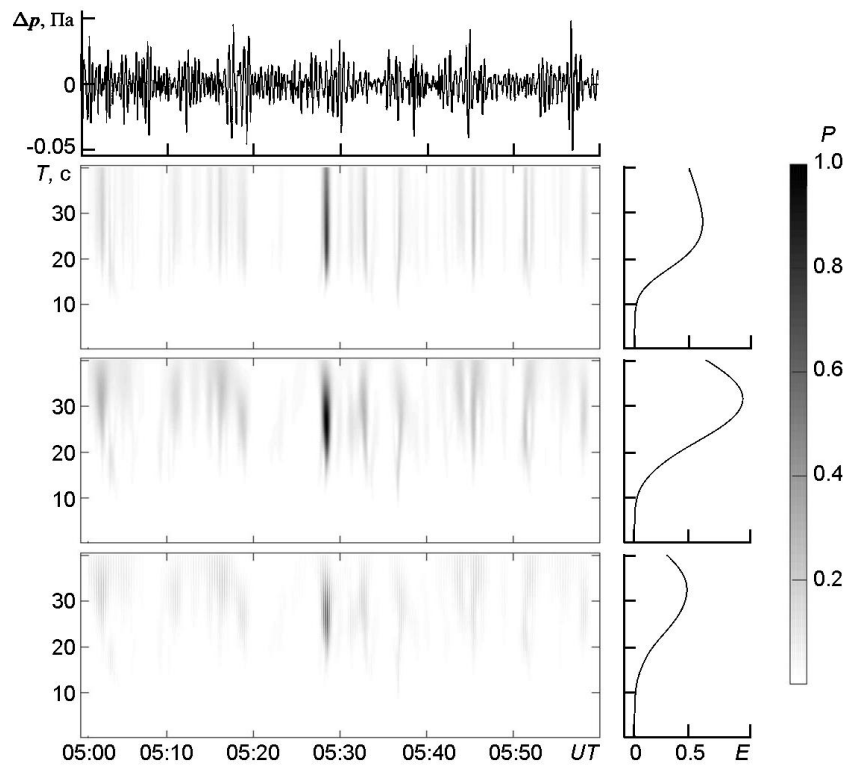


Рис. 7. Те ж для станції I46RU

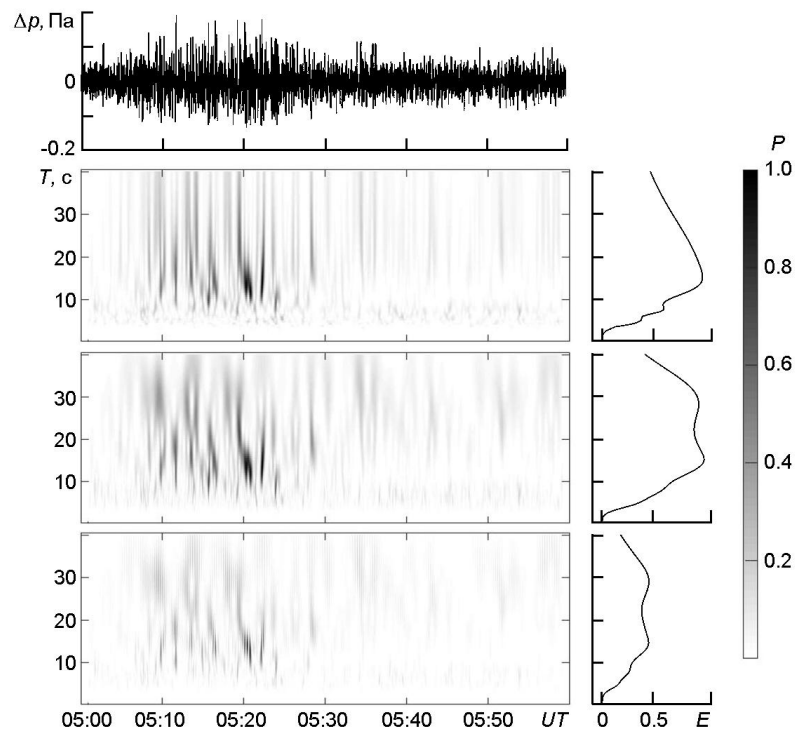


Рис. 8. Те ж для станції I57US

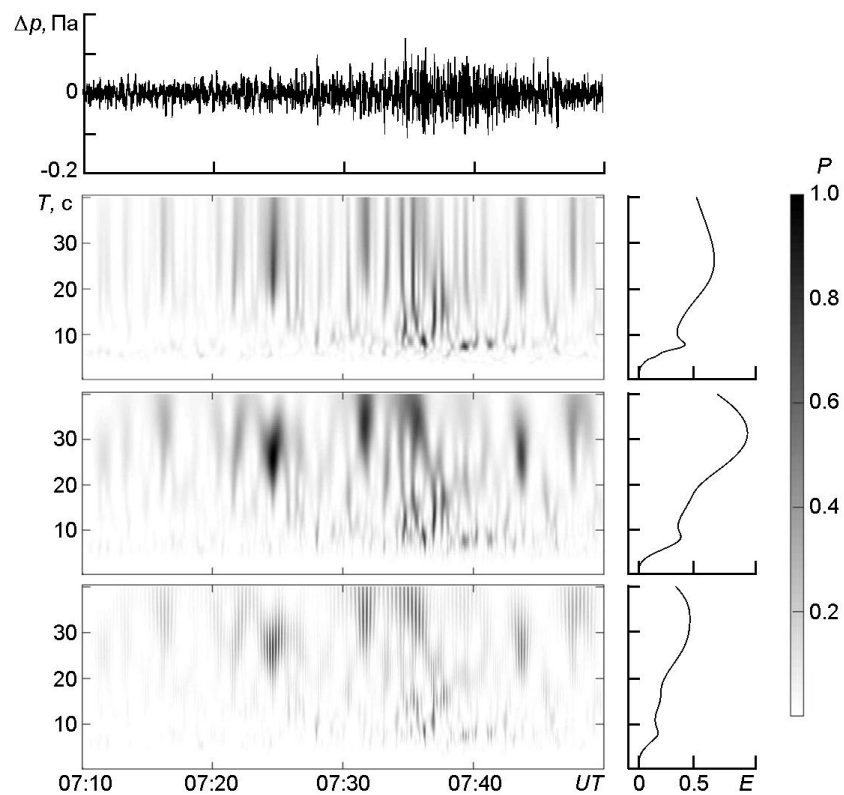


Рис. 9. Те ж для станції МААГ2

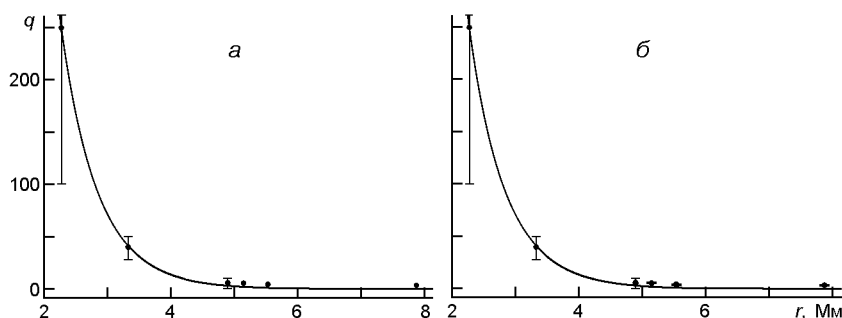


Рис. 10. Залежність відношення сигнал/шум в інфразвуковій хвилі, згенерованій вибухом Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р., від відстані. Апроксимація: *a* — законом  $q = 12250r^{0.5} \exp(-1.53r)$ ,  $R = 0.9995$ ,  $3.38$ ; *б* — законом  $q = 12230r^{-1} \exp(-1.35r)$ ,  $R = 0.9995$ ,  $3.21$

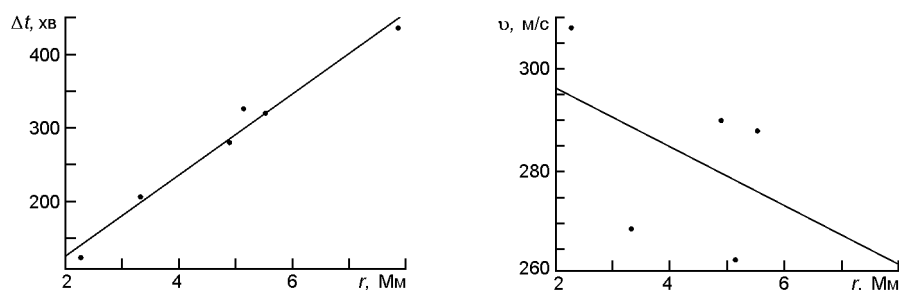


Рис. 11. Залежність часу запізнення сигналу від відстані між місцем спалаху метеороїда та інфразвуковою станцією. Апроксимація лінійним законом:  $t = 55.27r + 14.33$ ,  $R = 0.9888$ ,  $8.01$  xv

Рис. 12. Залежність швидкості переднього фронту акустичного сигналу від відстані. Апроксимація лінійним законом за 5 точками:  $v = -5.70r + 307.8$ ,  $R = 0.4375$ ,  $18.67$  м/с

Кореляційне поле «швидкість приходу — відстань». Залежність від  $r$  показано на рис. 12. Можна бачити, що має місце значний розкид точок, який ускладнює вибір рівняння для регресії. Якщо ж виключити найбільш віддалену станцію МААГ2, для якої  $r = 7.869$  Мм, то рівняння регресії набуде вигляду

$$v = -5.70r + 307.8, \quad R = 0.4375, \quad 18.67 \text{ м/с.} \quad (4)$$

Кореляційне поле «швидкість приходу — синус азимутального кута». Відповідні кореляційні поля « $v$  —  $\sin A_{ob}$ » та « $v$  —  $\sin A_r$ » наведено на рис. 13. Незважаючи на значний розкид точок, мають місце лінійні регресії, які задовільно описують кореляційні поля:

$$v = -18.32 \sin A_{ob} + 284.4, \quad R = 0.7446, \quad 19.12 \text{ м/с,} \quad (5)$$

$$v = -18.23 \sin A_r + 285.3, \quad R = 0.7459, \quad 13.09 \text{ м/с.} \quad (6)$$

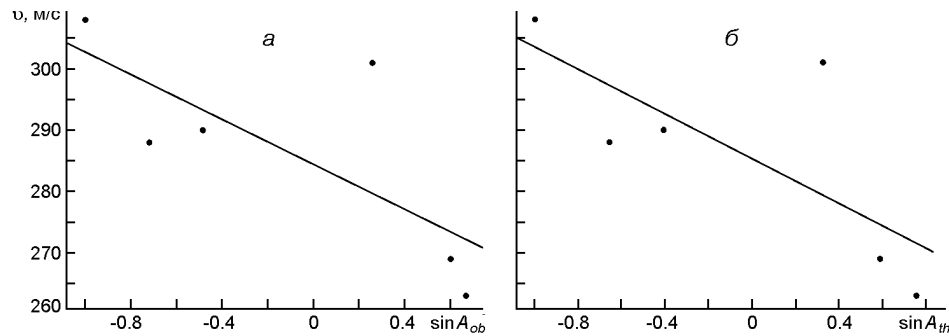


Рис. 13. Залежність швидкості переднього фронту інфразвукової хвилі, згенерованої вибухом Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р., від синуса: *a* — спостережуваного азимута  $= -18.32 \sin A_{ob} + 284.4$ ,  $R = 0.7446$ ,  $19.12$  м/с; *б* — теоретичного (розрахованого) азимута:  $= -18.23 \sin A_{tr} + 285.3$ ,  $R = 0.7459$ ,  $13.09$  м/с

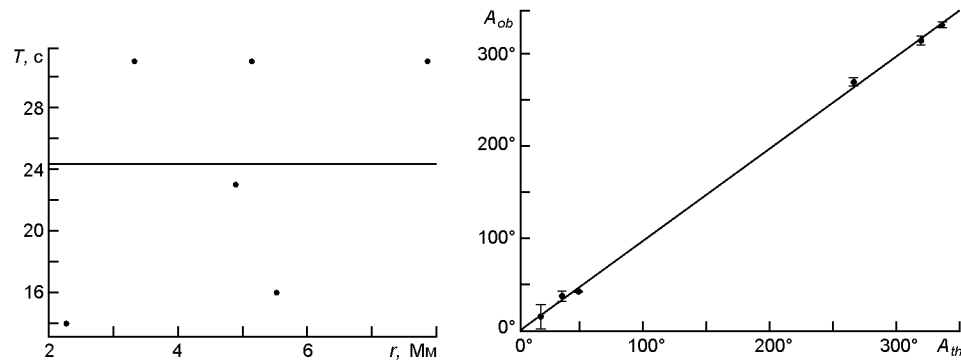


Рис. 14. Залежність періоду акустичного сигналу від відстані. Апроксимація константою:  $\bar{T} = 24.33$  с,  $7.891$  с, оцінка похибки середнього значення  $3.22$  с

Рис. 15. Залежність виміряного азимута приходу інфразвукової хвилі, згенерованої вибухом Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р., від теоретично розрахованого азимута. Апроксимація лінійним законом:  $A_{ob} = A_{tr} - 2.90$ ,  $R = 0.9996$ ,  $4.38$

Кореляційне поле «період — відстань». Кореляційне поле « $T — r$ » наведено на рис. 14. Можна бачити, що має місце значний розкид точок. Залежність  $T(r)$  доцільно апроксимувати константою

$$\bar{T} = 24.3 \text{ с}, \quad 7.9 \text{ с}. \quad (7)$$

При цьому середнє квадратичне відхилення оцінки  $\bar{T}$  складає  $3.2$  с.

Кореляційне поле «спостережуваний азимут — істинний азимут». Відповідне кореляційне поле « $A_{ob} — A_{tr}$ » показано на рис. 15. Видно, що поле добре апроксимується лінійною регресією

$$A_{ob} = A_{tr} - 2.90, \quad R = 0.9996, \quad 4.38. \quad (8)$$

Кореляційне поле «флуктуації азимута — відстань». Відповідне кореляційне поле показано на рис. 16. Видно значний розкид точок,

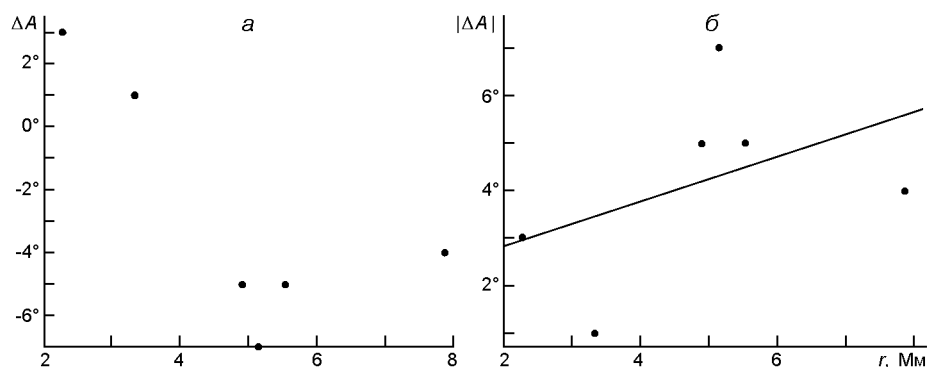


Рис. 16. Залежність флуктуацій азимута приходу інфразвукової хвилі, згенерованої вибухом Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р., від відстані. Апроксимація лінійним законом:  $|A| = 0.47r + 1.89$ ,  $R = 0.4450$ ,  $\sigma = 2.04$

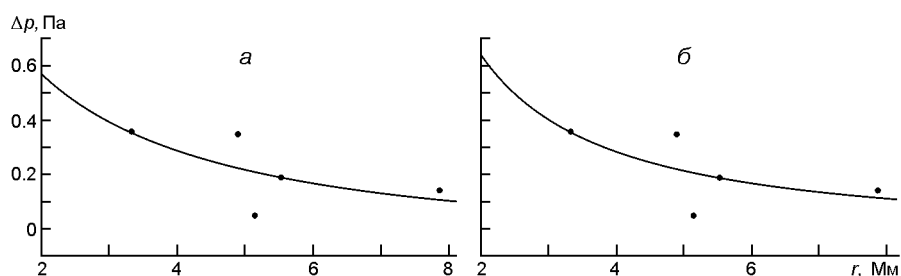


Рис. 17. Залежність амплітуди тиску акустичного сигналу, згенерованого вибухом Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р., від відстані. Апроксимація залежностями за 5 точками: а —  $p = 1.13r^{0.5} \exp(-0.168r)$ ,  $R = 0.64$ ,  $\sigma = 0.12$  Па; б —  $p = 1.14r^{-1} \exp(-0.059r)$ ,  $R = 0.65$ ,  $\sigma = 0.12$  Па

який не допускає розумної апроксимації  $A(r)$  (рис. 16а). Залежність  $|A|$  від  $r$  можна апроксимувати такою регресією (рис. 16б):

$$|A| = 0.47r + 1.89, \quad R = 0.4450, \quad \sigma = 2.04. \quad (9)$$

Кореляційне поле «амплітуда сигналу — відстань». Кореляційне поле « $p$  —  $r$ » наведено на рис. 17. При побудові регресії передбачалося дві моделі: циліндрична розбіжність хвилі та її загасання (див. рис. 17а); сферична розбіжність хвилі та її загасання (див. рис. 17б). Рівняння регресій мають вигляд:

$$p = 295r^{0.5} \exp(-1.8r), \quad R = 0.9895, \quad \sigma = 0.20 \text{ Па}, \quad (10)$$

$$p = 285r^{-1} \exp(-1.6r), \quad R = 0.9896, \quad \sigma = 0.20 \text{ Па}. \quad (11)$$

Якщо ж виключити найбільш віддалену точку з аномально великою амплітудою ( $p = 0.33$  Па), то отримаємо регресії

$$p = 1.13r^{0.5} \exp(-0.168r), \quad R = 0.64, \quad \sigma = 0.12 \text{ Па}, \quad (12)$$

$$p = 1.14r^{-1} \exp(-0.059r), \quad R = 0.65, \quad \sigma = 0.12 \text{ Па}. \quad (13)$$

## ОБГОВОРЕННЯ

Азимут сигналу. Як видно з рис. 2, азимут приходу інфразвукового сигналу досить сильно флюктував. Найбільші флюктуації мали місце для інфразвукових станцій I59US, I30JP та МААГ2. Для цих станцій середнє квадратичне відхилення азимутального кута змінювалося від 5 до 11 (див. табл. 1). В цілому ж результати розрахунків і вимірювань азимута відповідали один одному. Найбільша відмінність спостерігалася для станції МААГ2. Флюктуації азимута, мабуть, викликані неоднорідностями атмосфери на трасі поширення. Що довша траса, то більше флюктував азимут інфразвукового сигналу.

Відношення сигнал/шум. З табл. 2 видно, що в міру збільшення відстані між місцем вибуху метеороїда та інфразвуковою станцією відношення сигнал/шум зменшувалася від декількох сотень для станції I53US до декількох одиниць для станції МААГ2. І якщо рівень потужності інфразвукового сигналу повинен був зменшуватися зі збільшенням зазначеної відстані, то потужність шуму залежала від місця розташування інфразвукової станції, стану погоди, орієнтації траси і т. п. При зменшенні відношення сигнал/шум похибка оцінки параметрів сигналу збільшувалася.

Час запізнення сигналу. Швидкість приходу. При збільшенні відстані між місцем вибуху метеороїда та місцем розташування інфразвукової станції спостерігалася тенденція до збільшення часу запізнення. Відхилення від цієї тенденції було пов'язане, найімовірніше, з різними метеоумовами на трасі поширення, і зокрема зі впливом вітру на швидкість поширення інфразвукового сигналу.

Залежність швидкості приходу інфразвукового сигналу від зазначеної вище відстані не настільки очевидна. Як видно з табл. 2, швидкість приходу інфразвукового сигналу змінювалася приблизно від 263 до 308 м/с. Такі варіації швидкості пов'язані з тими ж причинами, що зумовили варіації часу запізнення інфразвукового сигналу.

Тривалість сигналу. Як видно з табл. 2, тривалість інфразвукового сигналу була близькою до 20 хв. Дисперсійне подовження сигналу при збільшенні відстані між місцем вибуху та місцем розташування інфразвукової станції від 3327 до 7869 км практично не позначилося.

Таблиця 2. Параметри інфразвукового сигналу

Станція	Відношення сигнал/шум	Час запізнення, хв	Швидкість приходу, м/с	Тривалість сигналу, хв	T, с
I53US	100...400	123	308	20	12, 28
I30JP	30...50	206	269	20	12, 29
I59US	3...9	280	290	20	23
I46RU	5...6	326	263	20...25	33
I57US	4...5	320	288	20	15, 30
МААГ2	3...4	436	301	20	32

Зауважимо, що під час вибуху Челябінського космічного тіла дисперсійне подовження було помітно вираженим [12].

*Переважаючі періоди коливань.* Системний спектральний аналіз показав, що для всіх інфразвукових станцій у спектрі спостерігалися періоди від 5 до 40 с. Відмітимо, що у спектрі інфразвукового сигналу від Челябінського метеороїда містилися коливання з періодами 10...100 с. У випадку Камчатського метеороїда переважали коливання з періодом від 23 до 32 с. При цьому середнє для всіх станцій значення періоду становило  $29.2 \pm 1.8$  с. Крім того, на трьох станціях (I53US, I30JP та I57US) спостерігалися також періоди від 12 до 15 с (середнє  $13.0 \pm 1.0$  с).

Необхідно додати, що більший період був близький до переважного періоду коливань, які спостерігалися під час вибуху челябінського космічного тіла [12]. Натомість енергії вибуху відрізнялися у  $2.54$  разів. Згідно з теорією періоди повинні були відрізнятися у  $2.54^{1/3} \approx 1.37$  разів. При цьому розрахункове значення періоду для Камчатського метеороїда становить  $21.2 \pm 1.3$  с. Розрахований із регресії (7) період дорівнює  $24.3 \pm 3.2$  с. Незначна відмінність розрахункового періоду від спостережуваного може бути пов'язана з відмінністю у висотах вибухів метеороїдів (23.3 км для Челябінського метеороїда та 25.6 км для Камчатського метеороїда), в кутах нахилу траєкторії до поверхні Землі (18° для Челябінського космічного тіла і 79° для Камчатського космічного тіла), а також з похибками оцінки величини періоду (однієї секунди).

Важче пояснити значення меншого періоду (12...15 с). Можливо, цей період пов'язаний з нелінійним перетворенням частоти поблизу місця вибуху, де ударна хвиля, що є джерелом інфразвуку, наперед є нелінійною. Якщо період  $24.3 \pm 3.2$  с відповідав частоті основної гармоніки, то період 12...15 с — подвоєній частоті гармоніки.

*Кореляційне поле «відношення сигнал/шум — відстань».* Значний рівень довірчих інтервалів на рис. 10 свідчить про різний рівень шуму у місцях розташування мікробарографів. Природно, що при цьому мали місце і флуктуації рівня сигналу, що залежать від стану атмосфери на кожній із трас.

Регресії (1) та (2) однаково добре описують залежність  $q(r)$ . Однак через аномально великі значення  $q$  (а значить, й  $p$ ) на станції I53US регресії (1) та (2) слід визнати незадовільними (див. нижче).

*Кореляційне поле «час запізнення сигналу — відстань».* Із співвідношення (3) випливає, що середня для всіх трас швидкість приходу дорівнює

$$= \frac{d}{dr} t^{-1} = 301.5 \text{ м/с.}$$

Згідно з регресією (3) при  $r = 0$  час запізнення  $t_0 = 14.3 \pm 18.0$  хв, тобто через великі значення його не можна визначити. З оцінок

впливає, що при висоті вибуху метеороїда  $z_e = 25.6$  км та середній швидкості звуку  $c_s = 0.3$  км/с час запізнення  $t_0 = z_e / c_s$  повинен бути близьким до 1.4 хв. Оскільки для всіх трас  $t_0 = t$ , значення  $t_0$  не можна визначити з регресії (3).

Кореляційне поле «швидкість приходу — відстань». Через збільшення довжини траєкторії при багаторазовому відбитті від стінок хвилеводу при збільшенні  $r$  зазвичай спостерігається спадна залежність  $\langle r \rangle$  [18, 19]. При сферичній розбіжності хвилі спадної залежності не спостерігається, відмічаються лише сильні флуктуації, пов'язані з різним станом атмосфери на трасі. Хвилеводному поширенню відповідає регресія (4), яку слід визнати не повною мірою задовільною через низькі значення  $R$  та великі значення  $\sigma$ . При сферичній розбіжності  $\langle \sigma \rangle = 286.5 \pm 7.2$  м/с, а  $\sigma = 17.6$  м/с. Це значення помітно відрізняється від  $\sigma = 301.5$  м/с.

Кореляційне поле «швидкість приходу — синус азимутального кута». Наявність такої залежності пояснюється у першу чергу впливом вітру на швидкість приходу сигналу, а в другу чергу — відмінністю в стані атмосфери на різних трасах. При переважанні зонального вітру залежність від синуса азимутального кута має вигляд [12, 17, 19]

$$w \sin A, \quad (14)$$

де  $w$  — спостережувана швидкість сигналу,  $A$  — його швидкість за відсутності вітру,  $w$  — швидкість вітру, знаки «плюс» та «мінус» відповідають східному та західному вітру відповідно.

Порівнюючи (5) та (6) з (14), отримуємо, що при західному вітрі  $w = 18$  м/с, а  $\sigma = 284 \dots 285$  м/с. Значення  $\sigma$  є дуже близьким до  $\langle \sigma \rangle = 286.5 \pm 7.2$  м/с. Швидкість вітру  $w = 18$  м/с є розумною для тропосферно-стратосферних висот.

Кореляційне поле «період — відстань». За отриманим значенням в (7)  $\bar{T} = 24.3 \pm 3.2$  с, використовуючи співвідношення з роботи [30], можна оцінити початкову кінетичну енергію Камчатського метеороїда. Співвідношення при  $E > 40$  кт ТНТ має вигляд

$$\lg \frac{E}{2} = 4.014 \lg T - 3.61,$$

де  $E$  дається в кт ТНТ, а  $T$  — в секундах. Розрахунки дають оцінку  $E = 179^{+115}_{-77}$  кт ТНТ. При  $\bar{T} = 24.3$  с маємо  $E = 179$  кт ТНТ. Середнє значення 179 кт ТНТ відрізняється від значення енергії, даного НАСА (173 кт ТНТ), на 3.5 %.

Кореляційне поле «спостережуваний азимут — істинний азимут». Регресійна залежність (8) має дуже високий коефіцієнт достовірності  $R = 0.9996$ . Значення  $\sigma$  досить велике, що пов'язано з флуктуаціями азимутального кута.

Кореляційне поле «флуктуації азимута — відстань». Флуктуації — знакові, немає чіткої залежності  $A(r)$ . Для абсолютних зна-



чень флуктуацій  $|A|$  регресія набуде вигляду (9). При цьому мають місце невисокий коефіцієнт достовірності та значна величина  $r$ .

Кореляційне поле «амплітуда сигналу — відстань». Залежності (10) і (11) мають дуже високий коефіцієнт достовірності. Їх, однак, не можна вважати достовірними, оскільки глибина загасання становить 0.56 и 0.63 Мм, а коефіцієнти загасання нереально великі (1.8 і 1.6 Мм<sup>-1</sup>). Останнє обумовлено аномально великою амплітудою сигналу ( $p = 3.3$  Па) на станції I53US, що могло бути пов'язано з фокусуванням інфразвукових променів у неоднорідній атмосфері. Якщо виключити з розгляду амплітуду хвилі для цієї станції, то регресії набудуть вигляду (12) і (13). Для них коефіцієнти загасання дорівнюють 0.168 и 0.059 Мм<sup>-1</sup>, а глибина загасання — 6 і 16 Мм відповідно.

Щоб віддати перевагу одній з регресій, (12) чи (13), обчислимо енергію акустичної хвилі  $E_{a0}$  при циліндричній та сферичній розбіжностях хвилі [13]:

$$E_a = \frac{r h \overline{p^2} T}{2 \rho_s}, \quad (15)$$

$$E_a = \frac{2 r^2 \overline{p^2} T}{\rho_s}, \quad (16)$$

де  $h$  — висота хвилеводу,  $T$  — тривалість сигналу,  $\overline{p^2}$  — середній квадрат амплітуди сигналу,  $\rho_s$  — щільність повітря біля поверхні Землі,  $c_s$  — середня швидкість звуку. Нехай  $h = 60$  км,  $c_s = 320$  м/с,  $\rho_s = 1.25$  кг/м<sup>3</sup>,  $r = 3.327$  Мм,  $\overline{p^2} = 0.12$  Па<sup>2</sup>,  $T = 20$  хв (для станції I30JP), тоді з (15) та (16) отримаємо  $E_a = 1.1 \cdot 10^9$  і  $2.55 \cdot 10^{13}$  Дж. Урахування загасання призведе до зменшення енергії інфразвукових хвиль

$$E_a = E_{a0} e^{-2r}, \quad (17)$$

де  $r$  —

Із (17) отримаємо, що при відсутності загасання

$$E_{a0} = E_a e^{2r}.$$

При циліндричній та сферичній розбіжностях маємо  $E_{a0} = 1.55 \cdot 10^9$  та  $2.9 \cdot 10^{13}$  Дж відповідно. При кінетичній енергії Камчатського метеороїда  $E = 7.24 \cdot 10^{14}$  Дж коефіцієнт акустичної ефективності

$$\eta_a = \frac{E_{a0}}{E}$$

становить близько  $2 \cdot 10^{-6}$  та  $4 \cdot 10^{-2}$  відповідно. Для циліндричної розбіжності коефіцієнт акустичної ефективності видається занадто малим. Зазвичай в енергію інфразвукової хвилі перетворюється 0.1...1 % кінетичної енергії космічного тіла [12].

Таким чином, перевагу слід надати регресії (13).

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

З використанням даних вимірювань шести станцій міжнародної системи моніторингу ядерних випробувань Організації з Договору про всеосяжну заборону ядерних випробувань наведено аналіз часових залежностей тиску в інфразвуковій хвилі, згенерованій протягом падіння Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р. і встановлено таке.

1. Амплітуда інфразвукового сигналу та відношення сигнал/шум досить швидко зменшувалися при збільшенні відстані від місця вибуху метеороїда до місця реєстрації сигналу. Перевагу слід надати регресійній залежності (13).

2. Час запізнення інфразвукового сигналу збільшувався у міру збільшення відстані між місцем вибуху космічного тіла та місцем реєстрації сигналу. Швидкість приходу сигналу залежала від вказаної відстані та орієнтації траси і змінювалася у межах 269...308 м/с. Середня для всіх трас швидкість приходу становила 301.5 м/с.

3. Тривалість інфразвукового сигналу практично не залежала від відстані між місцем генерації та місцем реєстрації сигналу. Дисперсійне розширення хвильового цугу було несуттєвим.

4. Спектри інфразвукового сигналу були широкосмуговими, в них спостерігались періоди приблизно від 5 до 40 с. Разом з тим найбільша енергія припадала на виділені періоди 12...15 і 28...33 с. Значення періоду практично не залежало від відстані. Середнє значення періоду становило  $24.3 \pm 3.2$  с. Йому відповідала початкова кінетична енергія Камчатського метеороїда, яка дорівнювала 179 кт ТНТ. Це значення практично не відрізнялося від енергії, отриманої НАСА (173 кт ТНТ).

5. Найімовірніше, мала місце сферична розбіжність хвилі. Про це свідчать регресії (2) і (13), яким варто надати перевагу, а також те, що швидкість приходу сигналу практично не залежала від відстані. Середнє значення швидкості становило  $286.5 \pm 7.2$  м/с.

6. Регресійна залежність швидкості приходу від азимутального кута дозволила оцінити напрямок (західний), середню швидкість (18 м/с) тропосферно-стратосферного вітру та істинну швидкість приходу інфразвукового сигналу (284...285 м/с).

7. Виявлено стійкий статистичний зв'язок між спостережуваним та істинним значеннями азимута джерела інфразвукового сигналу. Абсолютні значення флуктуацій азимута мали тенденцію до збільшення при збільшенні відстані.

8. У припущенні сферичної розбіжності хвилі отримано оцінку акустичної енергії (приблизно  $2.9 \cdot 10^{13}$  Дж) та коефіцієнта акустичної ефективності (приблизно 0.04).

Автори вдячні співробітникам Міжнародної системи моніторингу ядерних випробувань Організації за Договором про всеосяжну заборону ядерних випробувань за надання первинних даних спостережень.

## ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Робота Черногора Л. Ф. та Шевелева М. Б. фінансувалася в рамках держбюджетної НДР установ МОН України, номер держреєстрації 0119U002538.

1. Адушкин В. В., Попова А. П., Рыбнов Ю. С., Кудрявцев В. Н. Мальцев А. Л., Харламов В. А. Геофизические эффекты Витимского болида 24.09.2002 г. *Доклады Академии наук*. 2004. 397, № 5. С. 685—688.
2. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. Москва: Мир, 1978. 532 с.
3. 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., Рыжкова 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.
4. Лазоренко О. В., Черногор Л. Ф. Системный спектральный анализ инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским метеороидом. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2017. № 8. С. 427—436.
5. 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. В. 4. С. 10—21.
6. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А., Соловьев А. В., Русаков Ю. С., Глухов А. Г., Silber E., Подобная Е. Д., Суркова Д. В. Оценка энергии Челябинского болида по инфразвуковым измерениям. *Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН*. М.: ГЕОС. 2013. Вып. 4. С. 21—32.
7. Рыбнов Ю. С., Попова О. П., Харламов В. А. Оценка энергии Челябинского болида по спектру мощности длиннопериодных колебаний атмосферного давления. *Динамические процессы в геосферах: Сб. науч. тр. ИДГ РАН*. М.: Геос, 2014. Вып. 5. С. 78—86.
8. Сорокин А. Г. Инфразвуковое излучение Челябинского метеороида. *Солнечно-земная физика*. 2013. № 24. С. 58—63.
9. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. 48, № 5. С. 681—702.
10. Черногор Л. Ф. Колебания геомагнитного поля, вызванные пролетом Витимского болида 24 сентября 2002 г. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. 51, № 1. С. 119—132.
11. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
12. Черногор Л. Ф. Акустические эффекты Челябинского метеороида. *Радиофиз. и радиоастрон.* 2017. 22, № 1. С. 53—66.
13. Черногор Л. Ф. Параметры акустических сигналов, сгенерированных атмосферным взрывом метеороида над Румынией 7 января 2015 г. *Астрон. вестн.* 2018. 52, № 3. С. 201—212.
14. 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.
15. Черногор Л. Ф., Лящук А. И. Инфразвуковые наблюдения взрыва болида над Румынией 7 января 2015 г. *Кинематика и физика небес. тел.* 2017. 33, № 6. С. 34—54.
16. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Зависимость амплитуды инфразвуковой волны, сгенерированной Тунгусским космическим телом, от расстояния. *Ради-*

- офизика и радиоастрономия*. 2018. 23, № 2. С. 94—103.
17. 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.
  18. Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Характеристики инфразвукового сигнала, сгенерированного Челябинским космическим телом: глобальная статистика. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2018. 23, №1. С. 24—35.
  19. Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Характеристики інфразвукового сигналу, згенерованого Липецьким метеороїдом: результати статистичного аналізу. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2020. 36, № 4. С. 58—72.
  20. 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, 12. P. 7035—7050.
  21. Brown P. G., Kalenda P., ReVelle D. O., Borovička J. The Morávka meteorite fall: 2. Interpretation of infrasonic and seismic data. *Meteoritics and Planet. Sci.* 2003. 38, № 7. P. 989—1003.
  22. Christie D. R., Campus P. The IMS infrasound network: Design and establishment of infrasound stations. In: A. Le Pichon, E. Blanc, and A. Hauchecorne, eds. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Dordrecht: Springer, 2010. P. 27—73.
  23. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Le Pichon A., Blanc E., and Hauchecorne A. (Eds.). — Dordrecht Heidelberg, London, New York: Springer. 2010. XIX, 735 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5
  24. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Le Pichon, A., Blanc, E. and Hauchecorne A. (Eds.). — Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. 2019. XXVIII, 1167 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75140-5
  25. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., Brachet N. The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.* 40, is. 14. P. 3732—3737. DOI: 10.1002/grl.50619
  26. Oberst J., Molau S., Heinlein D., Gritznier C., Schindler M., Spurny P., Cepelcha Z., Rendtel J., Betlem H. The “European Fireball Network”: Current status and futures prospects. *Meteoritics and Planet. Sci.* 1998. 33. P. 49—56.
  27. 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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104715>
  28. 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, № 6162. P. 1069—1073. DOI: 10.1126/science.1242642
  29. 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 materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 2013. 342. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1) (Last accessed 30 Jan. 2017).
30. 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
31. Silber E. A., Pichon A. L., Brown P. G. Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009. *Geophys. Res. Lett.* 2011. 38. L12201, doi: 10.1029/2011GL047633

## REFERENCES

- Adushkin V. V., Popova O. P., Rybnov Yu. S., Kudryavtsev V. I., Mal'tsev A. L., Kharlamov V. A. (2004) Geophysical effects of the Vitim bolide. *Dokl. Earth Sci.* 397 (6), 861—864.
- Gossard E. E., Hooke W. H. (1975). *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation* (Developments in Atmospheric Science). Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co., 456 p.
- Emelianenko V. V., Popova O. P., Chugaj N. N., Sheljakov M. A., Pahomov Yu. V., Shustov B. M., Shuvalov V. V., Birjukov E. E., Rybnov Ju. S., Ryhlova L. V., Naroenkov S. A., Kartashova A. P., Harlamov V. A., Trubeckaja I. A. (2013). Astronomical and physical aspects of Chelyabinsk event February 15, 2013. *Solar System Res.* 47 (4), 240—254.
- Lazorenko O. V., Chernogor L. F. (2017) System Spectral Analysis of Infrasonic Signal Generated by Chelyabinsk Meteoroid. *Radioelectronics and Communications Systems.* 60 (8), 331—338.
- Popova O. P., Rybnov Y. S., Harlamov V. A., Glazachev D. O., Emelianenko V. V., Kartashova A. P., Jenniskens P. (2013). Chelyabinsk meteoroid parameters: Data analysis. *Dinamicheskie protsessy v geosferah: sb. nauch. tr. IDG RAN.* Moscow, Russia: Geos Publ. 4, 1—10 (in Russian).
- Popova O. P., Harlamov V. A., Soloviev A. V., Rybnov Y. S., Rusakov Y. S., Glukhov A. G., Silber E., Podobnaya E. D., Surkov D. V. (2013). Energy estimation of Chelyabinsk bolide using infrasound measurements. *Dinamicheskie protsessy v geosferah: Sb. nauch. tr. IDG RAN.* Moscow, Russia: Geos Publ. 4, 21—32 (in Russian).
- Rybnov Yu. S., Popova O. P., Harlamov V. A. (2014). The energy estimation of the Chelyabinsk meteoroid by the power spectra of long-periods oscillations of the atmospheric pressure. *Dinamicheskie protsessy v geosferah: Sb. nauch. tr. IDG RAN.* Moscow, Russia: Geos Publ. 5, 78—86 (in Russian).
- Sorokin A. G. (2014). On infrasonic radiation of Chelyabinsk meteoroid. In: Kurkin V. I., ed. *Radio Waves Propagation: Proceedings of 24th All-Russian Scientific Conference.* Irkutsk, Russia, 29 Jun — 5 Jul 2014, 242—245 (in Russian).
- Chernogor L. F. (2008) Advanced Methods of Spectral Analysis of Quasiperiodic Wave-Like Processes in the Ionosphere: Specific Features and Experimental Results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 48 (5), 652—673.
- Chernogor L. F. (2011) Oscillations of the Geomagnetic Field Caused by the Flight of Vitim Bolide on September 24, 2002. *Geomagnetism and Aeronomy.* 51 (1), 116—130.

11. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 556 p. (in Russian).
12. Chernogor L. F. (2017). Chelyabinsk meteoroid acoustic effects. *Radio Phys. Radio Astron.* 22 (1), 53—66 (In Russian).
13. Chernogor L. F. (2018) Parameters of Acoustic Signals Generated by the Atmospheric Meteoroid Explosion over Romania on January 7, 2015. *Solar System Res.* 52 (3), 206—222.
14. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., (2017) Parameters of Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk Meteoroid on February 15, 2013. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 33 (2), 79—87.
15. Chernogor L. F., Liashchuk O. I. (2017) Infrasound observations of the bolide explosion over Romania on January 7, 2015. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 33 (6), 276—290.
16. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2018) Infrasound wave generated by the Tunguska celestial body: amplitude dependence on distance. *Radio Phys. Radio Astron.* 23 (2), 94—103 (in Russian).
17. Chernogor L. F., Shevelev N. B. (2018) Parameters of the infrasound signal generated by a meteoroid over Indonesia on October 8, 2009. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 34 (3) 147—160.
18. 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).
19. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2020). Characteristics of Infrasonic Signal Generated by the Lipetsk Meteoroid: Statistical Analysis. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 36(4) 58—72.
20. 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.: Atmos.* 119 (12), 7035—7050.
21. Brown P. G., Kalenda P., ReVelle D. O., Borovička J. (2003) The Morávka meteorite fall: 2. Interpretation of infrasonic and seismic data. *Meteoritics and Planet. Sci.* 38 (7), 989—1003.
22. Christie D. R., Campus P. (2010). The IMS infrasound network: Design and establishment of infrasound stations. In: A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne, eds. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Dordrecht: Springer, 27—73.
23. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. (2010). (Eds Le Pichon, A., Blanc E., Hauchecorne A.). — Dordrecht Heidelberg, London, New York: Springer, XIX, 735 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-9508-5
24. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. (2019). (Eds Le Pichon A., Blanc E. Hauchecorne A.). — Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, XXVIII, 1167 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75140-5
25. Le Pichon A., Ceranna L., Pilger C., Mialle P., Brown D., Herry P., Brachet N. (2013). The 2013 Russian fireball largest ever detected by CTBTO infrasound sensors. *Geophys. Res. Lett.* 40 (14), 3732—3737. DOI: 10.1002/grl.50619
26. Oberst J., Molau S., Heinlein D., Gritzner C., Schindler M., Spurny P., Cepelch Z., Rendtel J., Betlem H. (1998). The “European Fireball Network”: Current status and futures prospects. *Meteoritics and Planet. Sci.* 33, 49—56.
27. 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 104715 <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.104715>
28. 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. (2013). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science*. 342 (6162), 1069—1073. DOI: 10.1126/science.1242642
29. 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. (2013). Supplementary materials for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite, and characterization. *Science [online]*. 342. URL: [www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1](http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/science.1242642/DC1) (Last accessed 30 January 2017).
30. 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
31. Silber E. A., Pichon A. L., Brown P. G. (2011) Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009. *Geophys. Res. Lett.* 38. L12201, doi: 10.1029/2011GL047633

Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, А. И. Ляцук<sup>2</sup>, Н. Б. Шевелев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Главный центр специального контроля НЦУИКС ГКА Украины, пгт. Городок, Украина

#### ПАРАМЕТРЫ ИНФРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА, СГЕНЕРИРОВАННОГО КАМЧАТСКИМ МЕТЕОРОИДОМ

Объект исследования — инфразвуковой сигнал, сгенерированный 18 декабря 2018 г. в процессе падения и взрыва высокоскоростного (32 км/с), высокоэнергичного (173 кт ТНТ), крупного (9.4 м) космического тела, получившего название Камчатский метеороид. Предмет исследования — параметры инфразвукового сигнала, произведенного Камчатским метеороидом. В качестве исходных использовались данные о временных зависимостях давления в инфразвуковой волне, зарегистрированные станциями международной системы мониторинга ядерных испытаний Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (I53US, I30JP, I59US, I46RU, I57US и МААГ2). Результаты измерений переводились из относительных единиц в абсолютные. Затем временные зависимости давления в инфразвуковой волне подверглась фильтрации в диапазоне периодов 1...40 с. После этого осуществлялся системный спектральный анализ отфильтрованных временных зависимостей при помощи взаимодополняющих интегральных преобразований: оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вей-

влет-преобразования с материнской функцией Морле. В результате исследований обнаружено, что амплитуда инфразвукового сигнала достаточно быстро убывала при увеличении расстояния от места взрыва метеороида до места регистрации сигнала. Время запаздывания инфразвукового сигнала увеличивалось по мере увеличения расстояния между местом взрыва космического тела и местом регистрации сигнала. Скорость прихода сигнала зависела от указанного расстояния и ориентации трассы и изменялась в пределах 269...308 м/с. Длительность инфразвукового сигнала практически не зависела от расстояния между местом генерации и местом регистрации сигнала. Спектры инфразвукового сигнала были широкополосными, в них регистрировались периоды от 5 до 40 с. Вместе с тем наибольшая энергия приходилась на выделенные периоды 12...15 и 28...33 с. Построены корреляционные поля и регрессии для основных параметров инфразвука. По преобладающему периоду инфразвука оценены кинетическая энергия (179 кт ТНТ) и акустическая эффективность (~4 %) космического тела.

*L. F. Chernogor<sup>1</sup>, O. I. Liashchuk<sup>2</sup>, M. B. Shevelev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Main Center of the Special Monitoring, Ukraine, Town of Gorodok, Ukraine

#### PARAMETERS OF THE INFRASONIC SIGNAL GENERATED BY THE KAMCHATKA METEOROID

The subject of this study is the infrasonic signal generated by a high-speed (32 km/s), high-energy (173 kt TNT), and large-sized (9.4 m) celestial body, later called the Kamchatka meteoroid, which entered the terrestrial atmosphere and exploded on 18 December 2018. The object of the study is the parameters of the infrasonic signal launched by the Kamchatka meteoroid. The study is based on the data on temporal dependences of pressure in the infrasonic wave collected by the I53US, I30JP, I59US, I46RU, I57US, and MAAG2 infrasonic stations included in the International Monitoring System (IMS) set up by Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization's International Monitoring System (CTBTO). The measurement data initially recorded on a relative scale have been converted into absolute values. Then, the temporal dependences of infrasonic wave pressure underwent filtering in the 1...40-s period range, and subsequently, were subjected to the system spectral analysis that includes the mutually complementary short-time Fourier transform, the Fourier transform in a sliding window with a width adjusted to be equal to a fixed number of harmonic periods, and the wavelet transform with the Morlet wavelet used as the basis function. In the research results we obtained that infrasonic signal amplitude exhibits a quite rapid decrease with distance from an infrasonic station to the meteoroid explosion point. The time delay of the infrasonic signal shows an increase with distance from the point of the celestial body explosion to the site of signal registration. The signal celerity exhibits a dependence on the distance and the path orientation, and it is estimated to be in the 269...308-m/s range. The infrasonic signal duration shows virtually no dependence on the distance from the detonation point to an infrasonic station. The infrasonic signal spectra exhibit a wide bandwidth, from ~ 5-s to ~ 40-s periods. At the same time, the greatest energy falls within the isolated period ranges of 12...15 s and 28...33 s. The scatter diagrams and regressions for infrasound main parameters was plotted. From infrasonic period the celestial body kinetic energy (179 kt TNT) and acoustic efficiency (~4 %) was estimated.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2020

Після доопрацювання 13.04.2020

Прийнята до друку 18.06.2020