

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2023.02.003>

УДК 550.385.37:550.388

У. Луо, Л. Ф. Черногор

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

Іоносферні ефекти Камчатського метеороїда: результати GPS-спостережень

Найважливішою подією в астрономії та фізиці небесних тіл на початку XXI століття було падіння Челябінського метеороїда з кінетичною енергією близько 440 кт ТНТ. Така подія відбувається в середньому раз на 65 років. Ефектам цього космічного тіла присвячено понад 200 наукових праць. Падіння 18 грудня 2018 р. о 23:48:20 UT іншого великого метеороїда, названого авторами Камчатським, присвячено не більше 25 робіт. Тим часом параметри цього метеороїда були досить унікальними. Проекції швидкості становили v_x 6.3 км/с, v_y -3 км/с, v_z -31.2 км/с, а модуль — 32 км/с. Інтегральна енергія світіння дорівнювала $1.3 \cdot 10^{14}$ Дж 31 кт ТНТ, висота спалаху — 26 км, його координати: 56.9 N, 172.4 E. Кут вторгнення в атмосферу по відношенню до горизонту був близьким до 68.6°. Початкова кінетична енергія метеороїда становила 173 кт ТНТ, маса — 1.41 кт, розмір — близько 9.4 м. Частота падіння таких тіл — один раз на 30 років. Становить інтерес подальше дослідження іоносферних ефектів та зіставлення результатів, отриманих наземними та супутниковими методами. Мета даної роботи — аналіз результатів GPS-спостережень іоносферних ефектів та їхнє зіставлення із результатами наземного методу похилого зондування іоносфери. Для спостережень за збуреннями в іоносфері, які слідували за падінням Камчатського метеороїда, використовувалась приймальна станція АС60 (географічні координати: 53 N, 173 E), віддалена на 450 км від місця вибуху Камчатського метеороїда, та шість GPS-супутників (PRN02, PRN05, PRN07, PRN09, PRN29 та PRN30). Основні результати досліджень такі. За допомогою GPS-технологій визначено часи запис-

© Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, 2023

© Видавець ВД «Академперіодика» Національної академії наук України, 2023

нення іоносферної реакції на вибух Камчатського метеороїда, горизонтальні швидкості поширення збурень (504...520 м/с), їхні періоди (11...18 хв), тривалості (22...35 хв), довжини хвиль (333... 530 км) і відносні амплітуди збурень концентрації електронів (3...4 %). Оцінки відносної амплітуди хвильових збурень концентрації електронів, отримані за допомогою наземного та супутникового способів, виявилися близькими (3...5 %). Близькі також їхні періоди (10...15 хв). За допомогою наземного та супутникового методів виявлено хвильові збурення, пов'язані як з атмосферними гравітаційними хвилями, так і з сейсмічними хвилями.

Ключові слова: Камчатський метеороїд, іоносфера, GPS-технологія, рухомі іоносферні збурення, атмосферна гравітаційна хвиля, сейсмічна хвиля.

ВСТУП

Найважливішою подією в астрономії та фізиці небесних тіл на початку XXI століття було падіння Челябінського метеороїда з кінетичною енергією близько 440 кт ТНТ. Така подія відбувається в середньому раз на 65 років. Ефектам цього космічного тіла присвячено понад 200 наукових праць (див., наприклад, [5—8, 14, 25—27]).

Падінню 18 грудня 2018 р. о 23:48:20 UT (тут і далі всесвітній час) іншого великого метеороїда, названого автором Камчатським, присвячено не більше 25 робіт [1, 3, 9—13, 16—24, 28]. Тим часом параметри цього метеороїда були достатньо унікальними. Проекції швидкості становили $v_x = 6.3$ км/с, $v_y = -3$ км/с, $v_z = -31.2$ км/с, а модуль — 32 км/с [15]. Інтегральна енергія світіння $E_r = 1.3 \cdot 10^{14}$ Дж = 31 кт ТНТ, висота спалаху $z_r = 26$ км, його координати: 56.9° N, 172.4° E [15]. Кут вторгнення в атмосферу по відношенню до горизонту був близько 68.6°. Початкова кінетична енергія метеороїда становила 173 кт ТНТ, маса — 1.41 кт, розмір — близько 9.4 м. Частота падіння таких тіл — один раз на 30 років [9—12, 16—20]. Камчатський метеороїд також називають Берингоморським [21, 23].

У наших роботах [10, 16, 17, 20] теоретично описано основні фізичні ефекти, супутні падінню Камчатського метеороїда. У роботах [1, 11, 24] вивчено інфразвукові ефекти Камчатського космічного тіла. Геомагнітні ефекти метеороїда вивчались у роботах [12, 21], а у роботах [19, 22, 23] за допомогою багаточастотного багатотрасового когерентного радіотехнічного комплексу та GPS-технологій вивчались іоносферні ефекти Камчатського (Берингоморського) метеороїда. Робота [3] — науково-популярна.

Становить інтерес подальше дослідження іоносферних ефектів та зіставлення результатів, отриманих наземними та супутниковими методами.

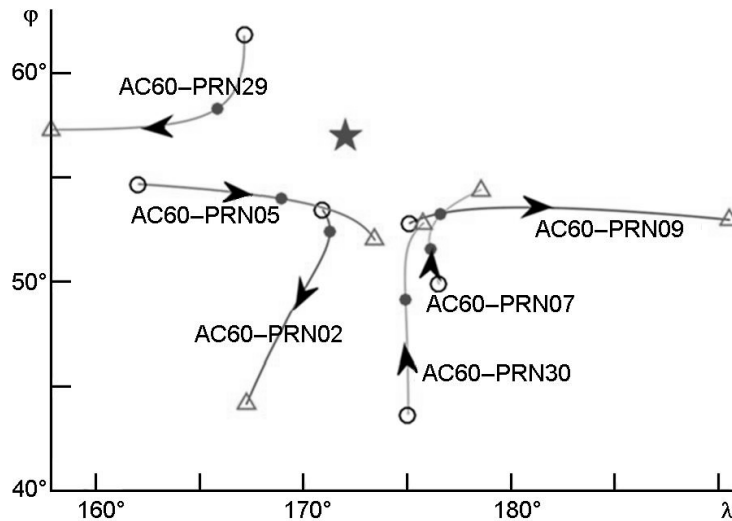


Рис. 1. Карта траєкторій підіоносферних точок. Зірка — положення точки вибуху, кола — початкові точки треків підіоносферної точки, трикутники — кінцеві точки треків підіоносферної точки, точки — положення підіоносферної точки в момент вибуху метеороїда, стрілки позначають напрямок руху підіоносферної точки [23]

Мета даної роботи — аналіз результатів GPS-спостережень іоносферних ефектів та їхнє зіставлення з результатами наземного методу похилого зондування іоносфери.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

У роботі [23] наведено результати GPS-спостережень збурень в іоносфері, які слідували за падінням Камчатського метеороїда. Для досліджень було використано приймальну станцію АС60 (географічні координати: 53 N, 173 E), віддалену на 450 км від місця вибуху Камчатського метеороїда, та шість GPS-супутників (PRN02, PRN05, PRN07, PRN09, PRN29 та PRN30).

Схему розташування траєкторій підіоносферних точок для супутників PRN02, PRN05, PRN07, PRN09, PRN29 та PRN30 по відношенню до точки вибуху метеороїда наведено на рис. 1. Для аналізу використовувалися лише дані перших чотирьох супутників. Прийом сигналів здійснювався на станції АС60.

Часові залежності приростів вертикального повного електронного вмісту (ПЕВ) N_V для чотирьох супутників наведено на рис. 2. Видно, що з певним часом запізнення після вибуху метеороїда виникали квазіперіодичні варіації ПЕВ, що свідчать про генерацію рухомих іоносферних збурень (РІЗ). Амплітуда варіацій не перевищувала 0.11... 0.15 TECU при середньому значенні ПЕВ N_{V0} 11...15 TECU. Період коливань становив 11...18 хв, їхня тривалість — 22...35 хв.

Параметри варіацій ПЕВ наведено в таблиці.

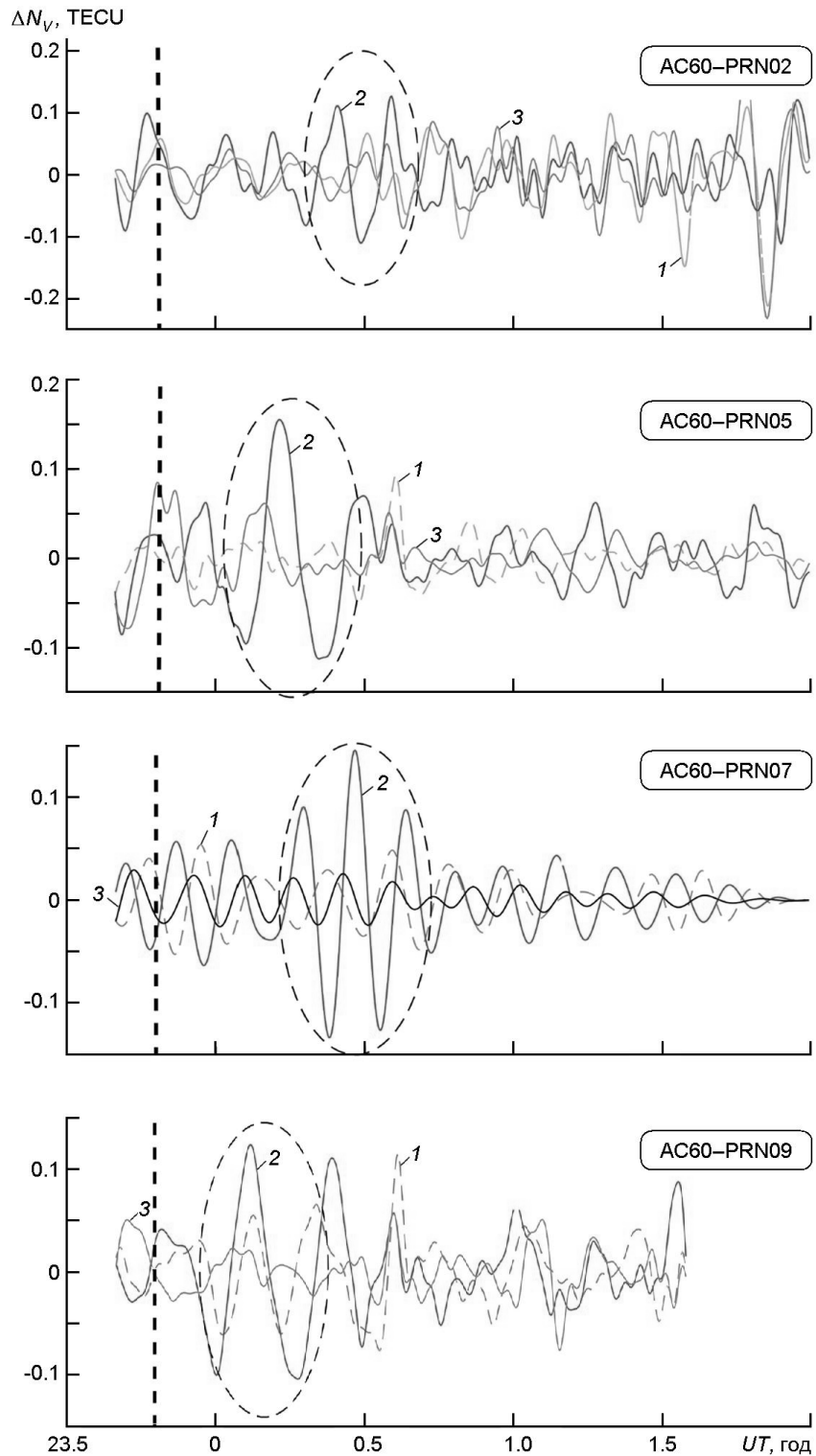


Рис. 2. Графіки варіацій збурень ПЕВ. Вертикальна штрихова лінія — момент вибуху метеороїда, еліпс — збурення, лінія 1 — значення $N_v(t)$ за добу до вибуху (17—18 грудня 2018 р.), лінія 2 — $N_v(t)$ у день вибуху (18—19 грудня 2018 р.), лінія 3 — $N_v(t)$ через добу після вибуху (19—20 грудня 2018 р.) [23]

Просторовий розподіл і параметри рухомих іоносферних збурень (φ λ — координати підіоносферної точки, R — відстань між РІЗ і точкою вибуху, A — азимут, h — кут піднесення)

| Номер треку | φ λ | R , км | T , хв | h | T , хв | A | N_f , TECU | t , хв | w , м/с | R , км |
|-------------|------------------------|----------|-------------|-------|-------------|---------|--------------|----------|-----------|---------------|
| AC60-PRN02 | 51.61°N 171.10°E | 596 | 11 | 44.12 | 22 | 188.70° | 0.13 | 27.7 | 504 | 333 |
| AC60-PRN05 | 53.66°N 170.50°E | 381 | 14... 17 | 43.82 | 28... 34 | 199.30° | 0.16 | 20.2 | 520 | 437... 530 |
| AC60-PRN07 | 52.42°N 176.13°E | 575 | 10.5 | 60.08 | 30 | 152.70° | 0.14 | 27.0 | 504 | 318 |
| AC60-PRN09 | 53.62°N 178.50°E | 532 | 14... 18 | 45.53 | 30... 35 | 130.80° | 0.13 | 12 | 2000 | |

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

У роботі [23] описано результати спостереження іоносферних ефектів Камчатського метеороїда, для чого було проаналізовано варіації ПЕВ у вертикальному стовпі, отримані за допомогою GPS-технологій.

Часові варіації ПЕВ наведено на рис. 2. Автори визначили періоди T , тривалості T , часи запізнення збурень t , скориговані значення горизонтальної швидкості w та довжин хвиль λ (див. таблицю). Швидкість w оцінювалась із співвідношення

$$\frac{R}{t - t_0},$$

де R — відстань від області вибуху до збурення в іоносфері, t_0 — час поширення збурення від висоти вибуху до висоти генерації іоносферного збурення.

Залежність $t(R)$ побудовано за даними для трьох супутників — PRN02, PRN05, PRN07 (рис. 3). Четверта станція не враховувалась, оскільки для неї значення t виявилось аномально малим (~ 12 хв). Це свідчило про те, що швидкість поширення належала до збурень іншої фізичної природи.

З рис. 3 видно, що при $R = 0$ км час запізнення $t_0 = 7.6$ хв. Цей час необхідний для передачі збурення від області вибуху метеороїда до висоти генерації іоносферного збурення:

$$t_0 = \int_{z_e}^z \frac{dz}{w(z)}.$$

Тут w — вертикальна швидкість поширення хвильового збурення. Вона пов'язана дисперсійним співвідношенням зі швидкістю звуку в атмосфері:

$$w = \sqrt{\frac{k_B T_n(z)}{M_n(z)}},$$

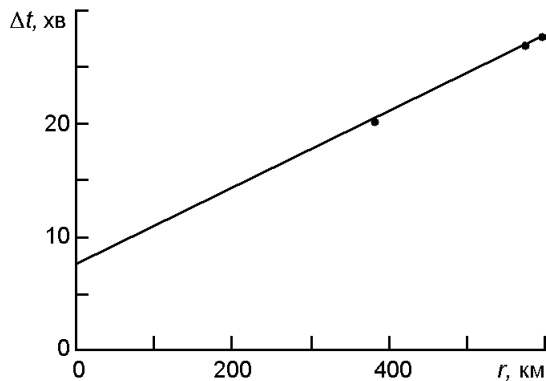


Рис. 3. Залежність часу запізнення іоносферного збурення від відстані між точкою вибуху та точкою спостереження: $t = 0.03362r + 7.6$ (t — у хв, r — у км). Коефіцієнт достовірності апроксимації $R^2 = 0.9985$, середнє квадратичне відхилення 0.1618 хв

де k_B — показник адіабати, k_B — стала Больцмана, T_n і M_n — температура та середня маса нейтральних частинок. Від висоти вибуху $z_e = 25$ км до висоти генерації $z = 250$ км M_n зменшується майже вдвічі, а T_n , немонотонно змінюючись у стратосфері, мезосфері та термосфері, збільшується приблизно від 300 до 1000...1200 К. За рахунок цього швидкість v_s немонотонно змінюється від 300 до 700...800 м/с. Разом із v_s змінюється й швидкість v_w , яка априорі не перевищує швидкість звуку.

Із таблиці видно, що період хвильового збурення становив $T = 11...18$ хв, горизонтальна швидкість дорівнювала 504...520 м/с, а довжина хвилі $\lambda = 318...530$ км. Такі параметри в атмосфері мають атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ) [2].

Далі оцінимо амплітуду АГХ. Амплітуда хвильових збурень ПЕВ $N_V = 0.11...0.15$ TECU. При значенні в середині дня ПЕВ $N_{V0} = 11...15$ TECU маємо для відносної амплітуди

$$N_V = \frac{N_V}{N_{V0}} = 0.01,$$

або $N_V = 1\%$. Врахуємо, що

$$N_V = N \frac{z_w}{z_0},$$

де N — середнє за висотою значення відносної амплітуди хвильового збурення N , z_w — ефективна товщина шару іоносфери з АГХ, z_0 — ефективна товщина шару іоносфери, який дає основний внесок у ПЕВ. При $z_w = 100$ км, $z_0 = 300...400$ км отримаємо, що $N = 0.03...0.04$, або 3...4 %.

Додамо, що за допомогою багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери ми знайшли три групи швидкостей: 310...500 м/с, 620...700 м/с і 1.9...2.9 км/с. Для перших двох груп $T = 10...15$ хв. Дані GPS-технологій дали $v = 504...520$ м/с та $T = 11...18$ хв. Для супутника PRN09 маємо $v = 2.2$ км/с.

ОБГОВОРЕННЯ

За допомогою наземного методу похилого зондування іоносфери в роботі [22] виявлено та описано 2-3 групи часів запізнення реакції іоносфери на вибух Камчатського метеороїда. Їм відповідали позірні горизонтальні швидкості поширення збурень: 1.9...2.9 км/с, 620...770 м/с та 310...500 м/с. Найбільша швидкість, мабуть, пов'язана з генерацією та поширенням сейсмічної хвилі Релея, яка має приблизно таку саму швидкість [22]. Значення швидкості 620...770 м/с і періоду 10...15 хв характерні для швидких атмосферних хвиль у F-області іоносфери (висота близько 300 км). Швидкість 310...500 м/с типова для АГХ на висотах 100...200 км.

За даними GPS-спостережень для супутників PRN02, PRN05 та PRN07 визначено швидкість $v = 504...520$ м/с. Ця швидкість характерна для висот порядку 200 км, де амплітуда АГХ максимальна. Саме ці висоти дають основний внесок у квазіперіодичні варіації ПЕВ. Для супутника PRN09 цугу з найбільшою амплітудою відповідав час запізнення $t = 12$ хв. При $t_0 = 7.6$ хв маємо $v = 2$ км/с. Для інших супутників також спостерігалися квазіперіодичні варіації з $N_V = 0.05...0.07$ TECU та $t = 11...12$ хв. Для них $v = 2...2.6$ км/с. Ця швидкість близька до швидкості поверхневих сейсмічних хвиль.

Таким чином, результати наземного та супутникового методів добре узгоджуються між собою.

Порівняємо далі відносні амплітуди N хвильових збурень концентрації електронів в іоносфері. Для GPS-спостережень $N = 0.03...0.04$.

Оцінимо N , наприклад, для радіотрас Чіба/Нагара — Харбін (частота $f = 6.055$ МГц) і Пекін — Харбін (частота $f = 6.175$ МГц). Для першої радіотраси довжиною $R = 1613$ км маємо для амплітуди доплерівського зміщення частоти $f_{da} = 0.20...0.25$ Гц і $T = 10...15$ хв [22]. Для другої радіотраси $f_{da} = 0.25$ Гц, $T = 15$ хв, $R = 1044$ км [22].

Для оцінки N скористаємося формулою з роботи [4]:

$$N = \frac{K}{4} \frac{cT}{L} \frac{f_{da}}{f}$$

Тут

$$K = \frac{1}{1 - 2 \operatorname{tg}^2 \theta}, \quad \theta = \frac{z_r}{R_E}$$

де θ — кут на вході в іоносферу між траєкторією та вертикаллю, z_r — висота відбиття радіохвилі, $R_E = 6400$ км — радіус Землі, L — товщина шару іоносфери, що дає основний внесок у доплерівське зміщення частоти.

Оцінки для першої траси при $L = 15$ км дають $N = 0.035...0.037$, для другої — при $L = 20$ км $N = 0.033...0.050$. Як видно з цих оцінок, значення амплітуд, отриманих за допомогою наземного та супутникового методів, досить близькі (близько 0.03...0.04 або 3...5 %).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. За допомогою GPS-технологій визначено часи запізнення іоносферної реакції на вибух Камчатського метеороїда, горизонтальні швидкості поширення збурень (504...520 м/с), їхні періоди (11...18 хв), тривалості (22...35 хв), довжини хвиль (333...530 км) і відносні амплітуди ($N_V = 1$ %, $N = 3...4$ %).

2. Оцінки відносної амплітуди хвильових збурень концентрації електронів, отримані за допомогою наземного та супутникового способів виявилися близькими (близько 3...5 %). Близькі також їхні періоди (близько 10...15 хв).

3. За допомогою наземного та супутникового методів виявлено хвильові збурення, пов'язані як з АГХ, так і з сейсмічними хвилями.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 та 0122U001476).

1. Гордеев Е. И., Куличков С. Н., Фирстов П. П., Попов О. Е., Чунчузов И. П., Будилов Д. И., Чебров Д. В. Инфразвуковые волны и оценка энергии взрыва Беринговоморского метеороида 19 декабря 2018 г. *Доклады Академии наук*. 2019. 489, № 4. С. 409—413. DOI: 10.31857/S0869-56524894409-413
2. Госсард Э. Э., Хук У. Х. *Волны в атмосфере*. М.: Мир, 1978. 532 с.
3. Скрипко К. А. Гигантский взрыв метеора над Беринговым морем. *Жизнь Земли*. 2019. 41, № 2.
4. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
5. Черногор Л. Ф. Крупномасштабные возмущения магнитного поля Земли, сопровождавшие падение Челябинского метеороида. *Радиофизика и электроника*. 2013. 4 (18), № 3. С. 47—54.
6. 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.). 2013. С. 148—152.
7. Черногор Л. Ф. Плазменные, электромагнитные и акустические эффекты метеорита «Челябинск». *Инженерная физика*. 2013. № 8. С. 23—40.

8. Черногор Л. Ф. Эффекты в магнитосфере при подлете Челябинского метеороида. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018. 58, № 2. С. 267—280.
9. Черногор Л. Ф. Эффекты Камчатского метеороида в системе литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. *Материалы 13-й международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса» (24—27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия)*. С. 400—410.
10. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Розуменко В. Т., Zheng Y. Ионосферные эффекты Камчатского метеороида: результаты многотрассового наклонного зондирования. *Материалы 13-й международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса» (24—27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия)*. С. 380—388.
11. Черногор Л. Ф. Ефекти Камчатського метеороїда в геомагнітному полі. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2022. 38, № 1. С. 37—72.
DOI: 10.15407/kfnt2022.01.037
12. Черногор Л. Ф., Лящук О. І., Шевелев М. Б. Параметри інфразвукового сигналу, згенерованого Камчатським метеороїдом. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2020. 36, № 5. С. 31—54.
13. Borovička J., Setvák M., Roesli H., Kerkmann J. K. Satellite observation of the dust trail of a major bolide event over the Bering Sea on December 18, 2018. *Astron. and Astrophys.* 2020. 644, № A58. DOI: 10.1051/0004-6361/202039393
14. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M. B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., De Groot-Hedlin C., Drob D. P., Edwards W., Evers L. G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D. E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R. E., Spurný P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R. J., Whitaker R., Krzeminski Z. 500-kilotone airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*. 2013. 503, № 7475. P. 238—241.
DOI: 10.1038/nature12741
15. *Center for Near Earth Object Studies*. URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Дата доступу: 11.07.2021.
16. Chernogor L. F. Physical effects of the Kamchatka meteoroid. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts*. May 27 — 29, 2020. Kyiv, Ukraine. P. 70—71.
17. Chernogor L. F. Lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere effects of the Kamchatka meteoroid. *13th International Conference and School «Problems of Geocosmos»*. March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terr. Phys. STP004.
<https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP004.html>
18. Chernogor L. F. Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. In: Kosterov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds). *Probl. of Geocosmos-2020. Springer Proc. in Earth and Environ. Sci. Springer, Cham.*, 2022. P. 365—377.
DOI: 10.1007/978-3-030-91467-7_27
19. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V., Zheng Yu. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid. *13th Int. Conf. and School «Probl. of Geocosmos»*. March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terr. Phys. STP002.
<https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP002.html>
20. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. Infrasonic effects of the Kamchatka meteoroid. *Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. Book of Abstrs*. May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. P. 71—72.

21. Gavrilov B. G., Pilipenko V. A., Poklad Y. V., Ryakhovsky I. A. Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russ. J. Earth Sci.* 2020. 20, № 6. ES6009. DOI: 10.2205/2020ES000748
22. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2020. 207. no. 105336. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
23. Luo Y., Yao Y., Shan L. Analysis of ionospheric disturbances caused by the 2018 Bering Sea meteor explosion based on GPS observations. *Sensors.* 2020. 20, № 11. no. 3201. DOI: 10.3390/s20113201
24. Pilger C., Gaebler P., Hupe P., Ott T., Drolshagen E. Global monitoring and characterization of infrasound signatures by large fireballs. *Atmosphere.* 2020. 11, № 1. no. 83. DOI: 10.3390/atmos11010083
25. Popova O. P. Chelyabinsk Meteorite. *Oxford Res. Encycl. Planet. Sci.* 2021. DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.22
26. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko 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., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., 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 Yu, 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.
27. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko 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., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., 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 Yu, 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 recovery, and characterization. *Science.* 2013. 342. 146 p.
28. Redd N. T. Fireball over the Bering Sea. *Eos.* 2019. 100. DOI: 10.1029/2019EO119503

REFERENCES

1. Gordeev E. I., Kulichkov S. N., Firstov P. P., Popov O. E., Chunchuzov I. P., Budilov D. I., Chebrov D. V. (2019). Infrasonic waves and assessment of the explosion energy of the Bering Sea meteoroid on December 19, 2018. *Dokl. Earth Sciences.* 489, 2, 1436—1439. DOI: 10.1134/S1028334X19120043
2. Gossard E. E., Hooke Y. X. (1975). *Waves in the atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves, their generation and propagation* (Developments in Atmospheric Science). Elsevier Scientific Pub. Co., 472.

3. Skripko K. A. (2019). Bering Sea Meteor Huge Explosion. *Earth's Life*. 41 (2).
4. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. (Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.) [in Russian].
5. Chernogor L. F. (2013). Large-scale disturbances in the Earth's magnetic field associated with the Chelyabinsk meteorite. *Radiofizika i elektronika*. 4 (18) (3), 47—54 [in Russian].
6. 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., June 21 — 22, 2013, 148—152 [in Russian].
7. Chernogor L. F. (2013). Plasma, electromagnetic and acoustic effects of meteorite Chelyabinsk. *Inzhenernaja fizika*. 8, 23—40 [in Russian].
8. Chernogor L. F. (2018). Magnetospheric effects during the approach of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 58 (2), 252—265.
9. Chernogor L. F. (2021). Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. *13th Int. School-Conf. «Problems of Geocosmos». Abstracts*. (March 24—27, 2021, St. Petersburg, Russia), 400—410 [In Russian].
10. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2021). Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: results of multiple-path oblique incidence. *13th Int. School-Conf. «Problems of Geocosmos». Abstrs*. (March 24—27, 2021, St. Petersburg, Russia), 380—388 [In Russian].
11. Chernogor L. F. (2022). Kamchatka meteoroid effects in the geomagnetic field. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 38 (1), 25—48.
DOI: 10.3103/S0884591322010032
12. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2020). Parameters of the infrasonic signal generated by the Kamchatka meteoroid. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 36 (5), 222—237. DOI: 10.3103/S0884591320050037
13. Borovička J., Setvák M., Roesli H., Kerkmann J. K. (2020). Satellite observation of the dust trail of a major bolide event over the Bering Sea on December 18, 2018. *Astron. and Astrophys.* 644, A58. DOI: 10.1051/0004-6361/202039393
14. Brown P. G., Assink J. D., Astiz L., Blaauw R., Boslough M. B., Borovička J., Brachet N., Brown D., Campbell-Brown M., Ceranna L., Cooke W., De Groot-Hedlin C., Drob D. P., Edwards W., Evers L. G., Garces M., Gill J., Hedlin M., Kingery A., Laske G., Le Pichon A., Mialle P., Moser D. E., Saffer A., Silber E., Smets P., Spalding R. E., Spurný P., Tagliaferri E., Uren D., Weryk R. J., Whitaker R., Krzeminski Z. (2013). 500-kilotone airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*. 503 (7475). 238—241.
DOI: 10.1038/nature12741
15. *Center for Near Earth Object Studies*. (2021)
URL: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/> Access Date: 11.07.2021.
16. Chernogor L. F. (2020). Physical effects of the Kamchatka meteoroid. *Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. Book of Abstrs*. May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. 70—71.
17. Chernogor L. F. (2021). Lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere effects of the Kamchatka meteoroid. *13th Int. Conf. and School «Problems of Geocosmos»*. March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terrestrial physics. STP004.
<https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP004.html>

18. Chernogor L. F. (2022). Kamchatka meteoroid effects in the lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. In: Kosterov A., Bobrov N., Gordeev E., Kulakov E., Lyskova E., Mironova I. (eds). *Probl. Geocosmos-2020. Springer Proc. in Earth and Environ. Sci. Springer, Cham.* 365—377.
DOI: 10.1007/978-3-030-91467-7_27
19. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V., Zheng Yu. (2021). Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid. *13th Int. Conf. and School «Problems of Geocosmos»*. March 24—27, 2021. St. Petersburg, St. Petersburg University. Section STP. Solar-Terrestrial physics. STP002.
<https://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/2020/data/data/htmls/STP/STP002.html>
20. Chernogor L. F., Liashchuk O. I., Shevelev M. B. (2020). Infrasonic effects of the Kamchatka meteoroid. *Astron. and Space Phys. in the Kyiv Univ. Book of Abstr.* May 27—29, 2020. Kyiv, Ukraine. 71—72.
21. Gavrilov B. G., Pilipenko V. A., Poklad Y. V., Ryakhovsky I. A. (2020). Geomagnetic effect of the Bering Sea meteoroid. *Russ. J. Earth Sci.* 20 (6), ES6009.
DOI: 10.2205/2020ES000748
22. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Shulga S. N., Zheng Y. (2020). Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 207, 105336.
DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105336
23. Luo Y., Yao Y., Shan L. (2020). Analysis of ionospheric disturbances caused by the 2018 Bering Sea meteor explosion based on GPS observations. *Sensors.* 20 (11), 3201. DOI: 10.3390/s20113201
24. Pilger C., Gaebler P., Hupe P., Ott T., Drolshagen E. (2020). Global monitoring and characterization of infrasound signatures by large fireballs. *Atmosphere.* 11(1), 83.
DOI:10.3390/atmos11010083
25. Popova O. P. (2021). Chelyabinsk meteorite. *Oxford Res. Encycl. Planet. Sci.*
DOI: 10.1093/acrefore/9780190647926.013.22
26. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko 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., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., 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 Yu, 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. 1069—1073.
27. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko 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., Kharlamov V., Solovyov A., Rusakov Yu. S., Korotkiy S., Serdyuk I., Korochantsev A. V., Larionov M. Yu., 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 Yu, 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 material for Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science.* 342. 146.

28. Redd N. T. (2019). Fireball over the Bering Sea. *Eos*. 100.
DOI: 10.1029/2019EO119503

Y. Luo, L. F. Chernogor

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

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

IONOSPHERIC EFFECTS OF THE KAMCHATKA METEOROID: GPS OBSERVATIONS

The most important event in astronomy and in the physics of celestial bodies at the beginning of the twenty-first century was the Chelyabinsk meteoroid entry into the terrestrial atmosphere with kinetic energy equal to about 440 kt of TNT. Such an event occurs at a rate of about one per 65 years. The effects from this celestial body were dealt with in more than 200 scientific papers. The entry into the atmosphere of another large meteoroid on December 18, 2018, which has been termed the Kamchatka meteoroid by the author, was reported in less than 25 scientific papers. Meanwhile, the parameters of this meteoroid are quite unique. Its velocity components are estimated to be $v_x = 6.3$, $v_y = -3$, $v_z = -31.2$ km/s yielding the velocity magnitude of 32 km/s, the total optical radiated energy $1.3 \cdot 10^{14}$ J \approx 31 kt TNT, the fireball explosion altitude 26 km over the 56.9° N, 172.4° E geographic location, the trajectory directed at an angle of about 68.6° with respect to the horizon. The initial kinetic energy is estimated to be 173 kt TNT, mass 1.41 kt, and size 9.4 m. The occurrence rate of such a body atmospheric entry is estimated to be one per 30 years. Further studies of the ionospheric effects and the intercomparisons of the results obtained with ground-based and satellite techniques are of interest. The purpose of the present work is to analyze GPS observations of the ionospheric effects and to intercompare them with the results obtained by the ground-based technique for observations of the ionosphere at oblique incidence. One AC60 receiving station at the 53° N, 173° E geographic location at a 450-km distance from the Kamchatka meteoroid explosion and six GPS satellites, PRN02, PRN05, PRN07, PRN09, PRN29 and PRN30, have been used for observing the disturbances that followed the Kamchatka meteoroid entry. The main results are summarized as follows. The time delays of the ionospheric response to the Kamchatka meteoroid explosion have been determined using GPS technology, the horizontal velocities of disturbances have been estimated to be 504...520 m/s, their periods to be 11...18 min, durations 22...35 min, wavelengths 333...530 km, and the amplitudes of disturbances in the electron density 3...4 %. The estimates of wave disturbance relative amplitudes obtained by the ground-based technique substantially in agreement (3...5 % uncertainty) with those obtained by the satellite technique. Their periods are also in fair agreement (about 10...15 min). The wave disturbances associated with both atmospheric gravity waves and seismic waves have been detected using the ground-based and satellite techniques.

Key words: Kamchatka meteoroid, ionosphere, GPS technology, traveling ionospheric disturbance, atmospheric gravity wave, seismic wave.

Стаття надійшла до редакції 23.03.2022

Після доопрацювання 23.03.2022

Прийнята до друку 20.12.2022