

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-05>

УДК 537.86

## ГЕОМАГНІТНИЙ ЕФЕКТ АЛБАНСЬКОГО ЗЕМЛЕТРУСУ

26 ЛИСТОПАДА 2019 р.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, М. Ю. Голуб, С. Г. Леус, М. Б. Шевелев, Y. Luo

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

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

Надійшла до редакції 2 жовтня 2020 р.

**Актуальність.** Відомо, що основною причиною геомагнітних збурень є космічні джерела, процеси в сонячному вітрі, в міжпланетному середовищі, а також падіння великих космічних тіл. До геомагнітного ефекту також призводять землетруси. Згідно системної парадигми, об'єкт Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера являє собою єдину систему, в якій мають місце прямі та зворотні, позитивні та негативні зв'язки. Механізм впливу землетрусів на магнітне поле вивчено недостатньо. Вважається, що до цього призводять розтріскування порід, флюктууючий рух у поровій рідині, розряди статичної електрики та інші фізичні процеси. При землетрусах генеруються сейсмічні, акустико-гравітаційні та магнітогідродинамічні хвилі, які забезпечують взаємодію підсистем у системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера.

**Метою** цієї роботи є опис можливої реакції рівня геомагнітного поля на землетрус, який мав місце 26 листопада 2019 р. в Албанії.

**Методи і методологія.** Вимірювання виконано за допомогою магнітометра-флюксометра, розміщеного в Магнітометричній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Він має високу чутливість (0.5–500 пТл в діапазоні періодів 1–1000 с відповідно) і досить широку смугу досліджуваних частот (від 0.001 до 1 Гц). Для детального дослідження квазіперіодичних процесів використовувався системний спектральний аналіз часових варіацій рівня  $H$  і  $D$  компонент геомагнітного поля. Він заснований на одночасному застосуванні віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. В останньому використовувався материнський вейвлет у вигляді функції Морле.

**Результати.** Квазіперіодичні варіації рівня геомагнітного поля, які мають час запізнення близько 6 хв і тривалість 70–80 хв, могли бути викликані землетрусом. Переносником збурень в цьому випадку могли бути магнітогідродинамічні хвилі. Квазіперіодичні збурення, які мають час запізнення 97–106 хв і тривалість близько 130–140 хв, швидше за все, викликані землетрусом. За перенесення збурень відповідали акустико-гравітаційні хвилі, які мають період 7–14 хв. Відносне збурення концентрації електронів у полі акустико-гравітаційної хвилі було близько 5.3%. Результати спостережень за албанським і турецьким землетрусами в цілому узгоджуються між собою.

**Висновки.** Вивчено магнітні варіації в діапазоні періодів 1–1000 с, що супроводжували підготовку ЗТ та саму сейсмічну подію.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** землетрус, магнітометр-флюксометр, квазіперіодичні збурення, сейсмічні хвилі, акустико-гравітаційні хвилі, МГД імпульс

## GEOMAGNETIC EFFECT OF THE ALBANIAN EARTHQUAKE ON NOVEMBER 26, 2019

L. F. Chernogor, K. P. Garmash, M. Yu. Holub, S. G. Leus, M. B. Shevelev, Y. Luo

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

**Background.** The main cause of geomagnetic disturbances is known to be space sources, processes acting in the solar wind and in the interplanetary medium, as well as falling large celestial bodies. Earthquakes also give rise to geomagnetic effects. In accordance with the systems paradigm, the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system comprises the single system where direct and reverse, positive and negative coupling take place. The mechanism of the earthquake effect on the magnetic field is poorly understood. A rock cracking, a fluctuating movement of fluids in pores, a corona discharge of the high-voltage static charge, etc., are thought to be the processes that give rise to the geomagnetic effect. In the course of earthquakes, seismic, acoustic, atmospheric gravity, and magnetohydrodynamic waves are generated, which provide for coupling between the subsystems in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere system.

**Purpose of Work.** The paper describes the possible response in the level of the geomagnetic field to the earthquake of 26 November 2019 that took place in Albania.

**Techniques and Methodology.** The measurements were taken with the fluxmeter magnetometer at the V. N. Karazin Kharkiv National University Magnetometer Observatory. It delivers 0.5 – 500 pT sensitivity in the 1–1000 s period range over a quite large frequency band of 0.001 to 1 Hz. To study the quasi-periodic processes in detail, the systems spectral analysis of the temporal dependences of the horizontal ( $H$ ,  $D$ ) geomagnetic field components has been employed. It includes the 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 wavelet transform, simultaneously. The wavelet transform employs the Morlet wavelet as a basis function.

**Results.** The quasi-periodic variations in the level of the geomagnetic field observed to appear with a 6 min lag and to last for 70–80 min could be due to the earthquake. These disturbances could be transferred by the magnetohydrodynamic waves. The quasi-periodic variations that were observed to appear with a 97–106 min lag and to last for about 130–140 min were most likely due to the earthquake. They were transferred by the atmospheric gravity waves with a period of 7–14 min. A relative disturbance in the electron density in the atmospheric gravity wave field was observed to be approximately 5.3%. The results obtained from observations of Albanian and Turkish earthquakes show agreement.

**Conclusions:** The magnetic variations in the 1–1000 s period range that were observed to occur before and during the earthquake have been studied.

**KEY WORDS:** earthquake, fluxmeter magnetometer, quasi-periodic disturbances, seismic waves, acoustic waves, atmospheric gravity waves, magnetohydrodynamic pulse.

## ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ АЛБАНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 26 НОЯБРЯ 2019 г.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, М. Ю. Голуб, С. Г. Леус, Н. Б. Шевелёв, У. Луо

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина*

**Актуальность.** Известно, что основной причиной геомагнитных возмущений являются космические источники, процессы в солнечном ветре, в межпланетной среде, а также падения крупных космических тел. К геомагнитному эффекту также приводят землетрясения. Согласно системной парадигме, объект Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера представляет собой единую систему, в которой имеют место прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. Механизм воздействия землетрясений на магнитное поле изучен недостаточно. Считается, что к этому приводят растрескивание пород, флуктуирующее движение в поровой жидкости, разряды статического электричества и другие физические процессы. При землетрясениях генерируются сейсмические, акустико-гравитационные и магнитогидродинамические волны, обеспечивающие взаимодействие подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера.

**Целью** настоящей работы является описание возможной реакции уровня геомагнитного поля на землетрясение, которое имело место 26 ноября 2019 г. в Албании.

**Методы и методология.** Измерения выполнены при помощи магнитометра-флюксметра, размещённого в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Он обладает высокой чувствительностью (0.5 – 500 пТл в диапазоне периодов 1 – 1000 с соответственно) и достаточно широкой полосой исследуемых частот (от 0.001 до 1 Гц). Для детального исследования квазипериодических процессов использовался системный спектральный анализ временных вариаций уровня  $H$  и  $D$  компонент геомагнитного поля. Он основан на одновременном применении оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. В последнем использовался материнский вейвлет в виде функции Морле.

**Результаты.** Квазипериодические вариации уровня геомагнитного поля, имеющие время запаздывания около 6 мин и длительность 70–80 мин, могли быть вызваны землетрясением. Переносчиком возмущений в этом случае могли быть магнитогидродинамические волны. Квазипериодические возмущения, имеющие время запаздывания 97–106 мин и длительность около 130–140 мин, скорее всего, вызваны землетрясением. За перенос возмущений отвечали акустико-гравитационные волны, имеющие период 7–14 мин. Относительное возмущение концентрации электронов в поле акустико-гравитационной волны было около 5.3%. Результаты наблюдений за албанским и турецким землетрясениями в целом согласуются между собой.

**Выводы.** Изучены магнитные вариации в диапазоне периодов 1–1000 с, сопровождавшие подготовку ЗТ и само сейсмическое событие.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** землетрясение, магнитометр-флюксметр, квазипериодические возмущения, сейсмические волны, акустико-гравитационные волны, МГД импульс

## ВСТУП

Ще в 1970-ті рр. один з авторів (Л. Ф. Черногор) обґрунтував взаємозв'язок процесів в системах Сонце–міжпланетне середовище–магнітосфера–іоносфера–атмосфера–Земля (СМСМІАЗ) та Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера (ЗАІМ). Ним же було сформульовано системну парадигму (див., наприклад, [1–5]). Згідно цієї парадигми, обидві системи відносяться до відкритих динамічних і, головне, нелінійних систем. Такі системи мають нетривіальні властивості [1–5]. Завдяки наявності прямих і зворотних, позитивних і негативних зв'язків в системах можливі процеси самоорганізації, виникнення нестійкостей, тригерні механізми звільнення енергії, тощо [1–5]. Розгляд системи СМСМІАЗ є доцільним при вивченні впливу потоків енергії, речовини та випромінювання «зверху», наприклад, під час геокосмічних бур [6]. У разі потоків «знизу» досить обмежитися розглядом системи ЗАІМ. Потіки «знизу» виникають при впливі на систему потужних землетрусів, вивержень вулканів, потужних атмосферних процесів (циклонів, ураганів, торнадо, гроз), а також потужних техногенних джерел (польотів ракет і великих літаків, потужних вибухів і т.п.) [7–20].

Землетруси були першим джерелом, яке дозволило простежити виникнення збурень у атмосфері й іоносфері, тобто виявити взаємодію підсистем у системі ЗАІМ [21–25]. Як виявилось, збурення від літосфери до атмосфери й іоносфери переносяться електромагнітними й акустико-гравітаційними хвилями (АГХ) [21–24].

Досить довго та з перемінним успіхом ведеться пошук магнітних передвісників землетрусів. Огляд відповідних робіт виконано в [13]. Можливий механізм виникнення періодичного магнітного передвісника описаний в роботі [8]. У статті [13] аналізуються варіації рівня геомагнітного поля в діапазоні періодів 1–1000 с, які передували турецькому землетрусу 24 січня 2020 р. з магнітудою  $M \approx 6.7$ , а також після сейсмічної події. Авторами зроблено висновок, що землетрус міг викликати збурення, які поширюються в іоносфері зі швидкістю  $\sim 20$  км/с та  $\sim 230$ – $320$  м/с. Більшу швидкість мають МГД хвилі, а меншу – АГХ. Цікавим було б підтвердити результати роботи [13] шляхом аналізу часових варіацій рівня геомагнітного поля для інших землетрусів з близькою магнітудою.

Метою цієї роботи є описання можливої реакції рівня геомагнітного поля на землетрус, який мав місце 26 листопада 2019 р. в Албанії.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗЕМЛЕТРУС

Землетрус магнітудою  $M \approx 6.4$  стався о 02:54 (тут і далі – всесвітній час UT) 26 листопада 2019 р. в Албанії. Координати епіцентру землетрусу наступні:  $41.51^\circ$  півн.ш.,  $19.53^\circ$  сх.д. Глибина епіцентру – 22 км. За основною сейсмічною подією спостерігалися афтершоки: о 02:59 ( $M \approx 5.1$ ), 03:03 ( $M \approx 5.3$ ), 05:56 ( $M \approx 4.5$ ), 06:08 ( $M \approx 5.5$ ), 07:13 ( $M \approx 4.5$ ) та 07:27 ( $M \approx 4.9$ ). Афтершоки приблизно з такою ж магнітудою тривали протягом дня та ввечері 26 і 27 листопада 2019 р.

### ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

У даній роботі були використані засоби та методи такі самі ж, як і в роботі [13].

### СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

При пошуку магнітного передвісника землетрусу, а також реакції геомагнітного поля на землетрус, який відбувся, необхідний ретельний аналіз стану космічної погоди. 24, 25 та в першій половині доби 26 листопада 2019 р. концентрація заряджених частинок у сонячному вітрі флукутувала в межах  $(2-3) \cdot 10^6$  м<sup>-3</sup> (Рис. 1). З 25 по 27 листопада 2019 р. швидкість частинок в сонячному вітрі змінювалася від 350 до 450 км/с. Цієї ж доби температура частинок була в межах  $(0.5-1) \cdot 10^5$  К, а тиск частинок – 0.5–1.5 нПа.  $V_y$  та  $V_z$  компоненти міжпланетного магнітного поля флукутували від  $-2$  до 4 нТл. Значення функції Акасофу з 25 по 27 листопада 2019 р. не перевищували 1–3 ГДж/с. Цієї ж доби значення  $K_p$ -індексу змінювались від 2 до 3, а значення  $D_{st}$ -індексу варіювали від  $-15$  до  $-10$  нТл.

Таким чином, магнітна обстановка була скоріш спокійною, ніж збуреною. Ця обставина полегшила пошук реакції геомагнітного поля на сейсмічну подію.

### РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ

Далі опишемо варіації рівня геомагнітного поля в день землетрусу та в контрольні дні 25 і 27 листопада 2019 р. (Рис. 2–4). З Рис. 2а можна бачити, що 25 листопада 2019 р. в інтервалі часу 01:00–07:00 рівень  $H$ -компоненти змінювався від  $\sim 0.1$  до 0.2 нТл. У спектрі коливань переважали періоди від 600 до 850 с, але більш тривалий час (з 01:30 до 05:00) відзначалися періоди  $T \approx 350$ – $600$  с. Приблизно такі ж періоди були присутніми і в варіаціях  $D$ -компоненти (Рис. 2б). Крім того, з 02:00 до 03:30 реєструвалися сильні (з амплітудою до 0.2–0.3 нТл) коливання з  $T \approx 700$ – $1000$  с.

У день землетрусу приблизно до 03:00 рівень  $H$ -компоненти зазвичай не перевищував  $\sim 0.1$  нТл (Рис. 3а). З 03:00 і по 04:10 рівень дещо (до  $\sim 0.2$  нТл) виріс. Вдруге збільшення амплітуди флукутацій до  $\sim 0.2$  нТл мало місце в інтервалі часу 04:41–06:50. Переважали коливання з  $T \approx 600$ – $800$  с. Збільшення рівня  $D$ -компоненти до 0.2 нТл спостерігалося більш ніж за дві години до землетрусу (Рис. 3б). Ще більше (до 0.3–0.4 нТл) збільшення рівня  $D$ -компоненти мало місце в інтервалі часу 03:00–04:20. Переважали коливання з  $T \approx 700$ – $900$  с. Повторне збільшення рівня цієї компоненти відзначалося з 04:30 до 06:40, при цьому  $T \approx 300$ – $600$  с. 27 листопада 2019 р. рівень  $H$ -компоненти змінювався в цілому від 0.1 до 0.2 нТл (Рис. 4а). Лише в окремі моменти часу спостерігалися сплески рівня до 0.3–0.4 нТл. Період коливань варіював у широких межах: від 200 до 1000 с. Рівень  $D$ -компоненти найчастіше флукутував у межах 0.1–0.2 нТл (Рис. 4б). В окремі моменти часу він збільшувався до 0.3 і навіть до 0.5 нТл. В спектрі спостерігалися періоди від 200 до 1000 с.



*Можливість генерації МГД хвиль.* Збільшення рівня обох компонент після 03:00 протягом 70–80 хв могло бути обумовлено генерацією МГД хвиль. Першопричиною служать АГХ, які генеруються землетрусом. Ці хвилі досягають динамо-області іоносфери приблизно за час  $\Delta t_0 \approx 5$  хв. АГХ модулюють густину атмосфери, а заодно й концентрацію електронів, викликаючи МГД ефект. Далі ці хвилі поширюються в іоносфері, в тому числі й в напрямку магнітометра. На поверхні Землі прояви МГД хвиль в іоносфері реєструються як магнітні варіації, причому в  $D$ -компоненті (проекція Схід–Захід) ефект виражений сильніше. При швидкості МГД хвилі близько 20 км/с [7, 13] час поширення до магнітометра, віддаленого від епіцентру землетрусу на 1620 км, становить близько 80 с. В сумі час запізнення приблизно дорівнює 6.3 хв, а за даними спостережень менший час запізнення становив  $\Delta t_1 \approx 6$  хв.

*Можливість генерації АГХ.* Вдруге характер варіацій рівня  $H$  і  $D$  компонент змінювався через час  $\Delta t_2$ , рівний близько 106 та 97 хв для  $H$  і  $D$  компонент відповідно. Швидкість поширення цих збурень оцінимо з наступної формули:

$$v = \frac{R}{\Delta t_2 - \Delta t_0}$$

Вважаючи  $\Delta t_0 \approx 5$  хв і  $R \approx 1620$  км, отримуємо, що  $v$  є близькою до 230 та 290 м/с для  $H$  і  $D$  компонент відповідно. Таку швидкість і періоди 400–800 с або 7–14 хв мають АГХ (див., наприклад, [26]).

*Збурення концентрації електронів.* Рух газу в полі АГХ супроводжується захопленням зарядженої компоненти плазми, тобто періодичною модуляцією концентрації електронів  $N$ . Оцінимо відносну амплітуду  $\delta_N$  варіацій  $N$ . З роторного рівняння Максвелла випливає, що [13]:

$$\Delta B = \mu_0 \Delta j \Delta z = \mu_0 j_0 \delta_N \Delta z,$$

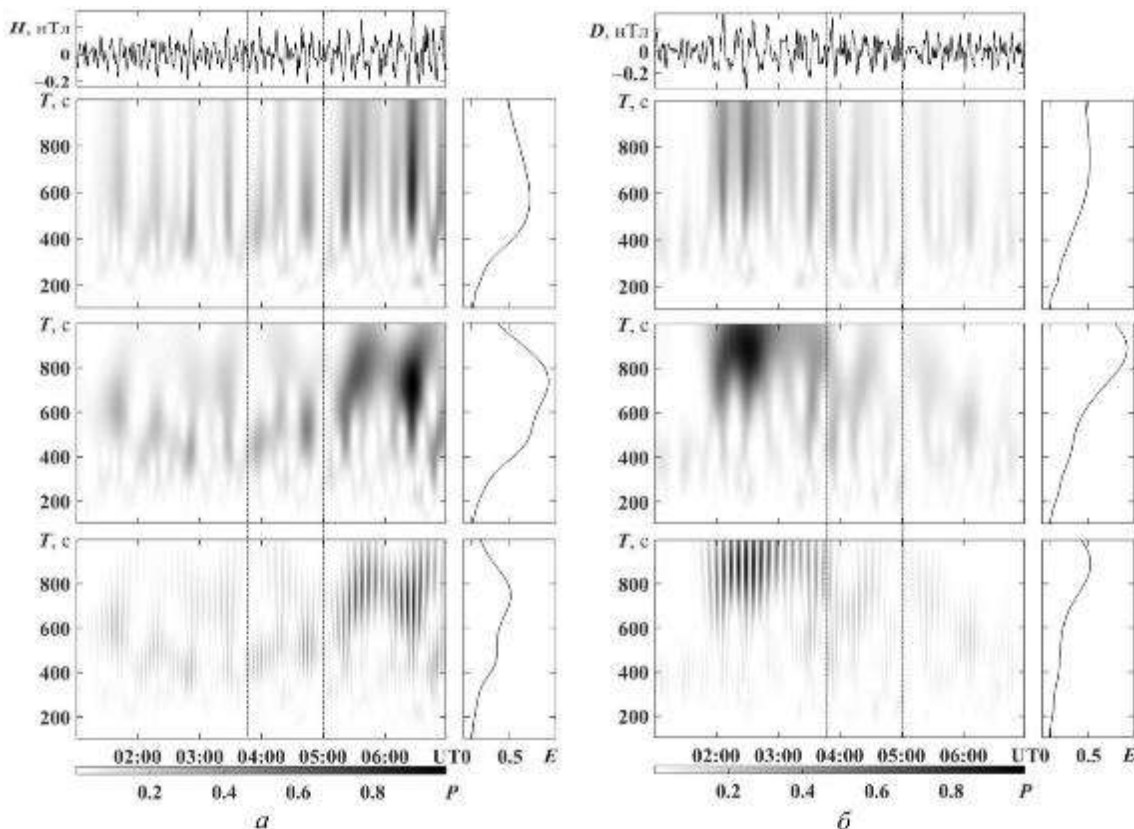


Рис. 2. Результати системного спектрального аналізу рівнів  $H$  (а) та  $D$  компонент (б) геомагнітного поля 25 листопада 2019 р. Панелі зверху вниз: аналізований сигнал, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення з материнською функцією в якості функції Морле. Праворуч показано енергограми (розподіл енергії сигналу за періодами). Штрихованими лініями позначено момент сходу Сонця на висоті 100 км та на рівні Землі в місці розташування обсерваторії.

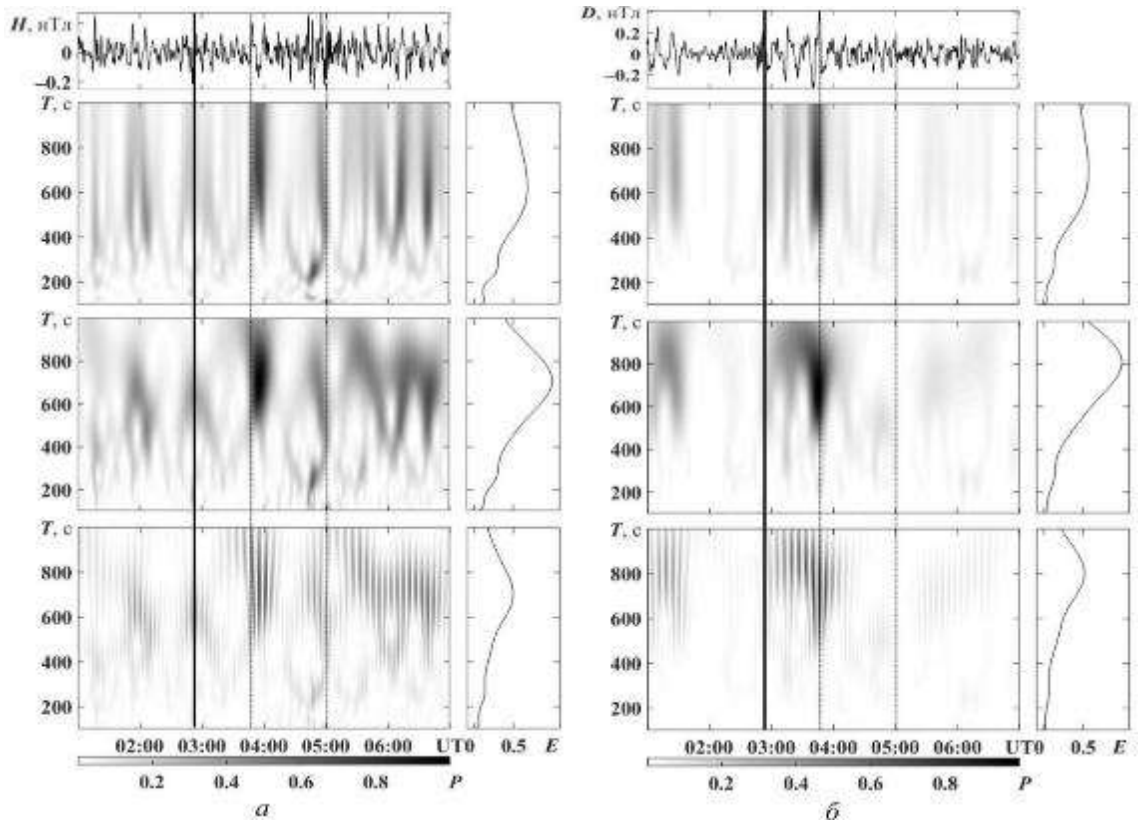


Рис. 3. Те саме, що і на Рис. 2, для 26 листопада 2019 р.  
Суцільною лінією показано час головного поштовху магнітудою 6.4.

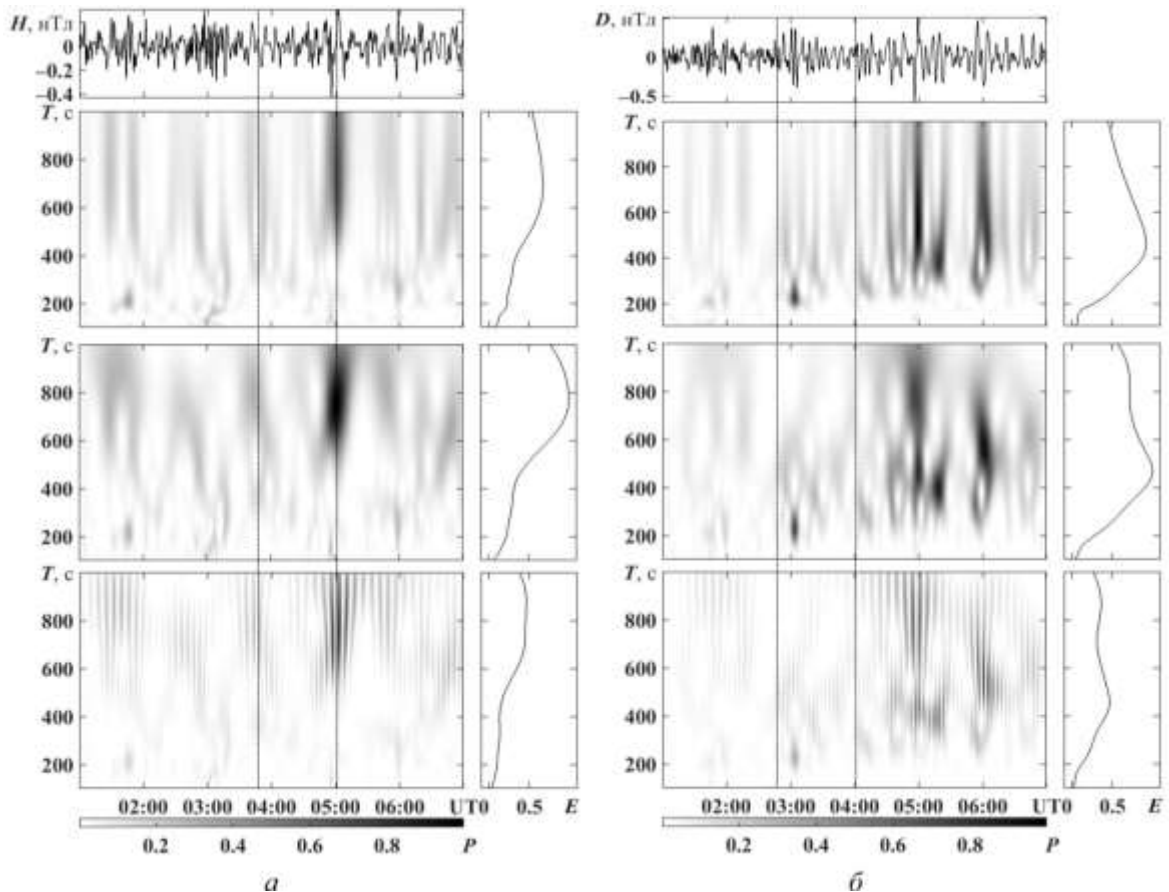


Рис. 4. Те ж саме, що й на Рис. 2, для 27 листопада 2019 р.



де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\Delta j$  – збурення густини іоносферного струму в динамо-області атмосфери,  $j_0$  – незбурене значення густини струму,  $\Delta z$  – товщина динамо-області. Припускаючи, що  $\Delta B \approx 0.2$  нТл,  $j_0 \approx 10^{-7}$  А/м<sup>2</sup>,  $\Delta z \approx 30$  км, отримуємо, що  $\delta_N \approx 5.3\%$ .

Описані в даній роботі результати в цілому узгоджуються з результатами роботи [13]. Однак у випадку албанського землетрусу магнітні ефекти виражені слабше. Цьому є кілька причин. По-перше, магнітуда албанського землетрусу була дещо меншою (6.4 проти 6.7). По-друге, відстань до магнітометра була дещо більшою (1620 км проти 1350 км). По-третє, глибина епіцентру албанського землетрусу була помітно більшою (22 км проти 10 км). По-четверте, реакція на албанський землетрус спостерігалася на тлі природних збурень ( $K_p = 3$ ).

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Квазіперіодичні варіації рівня геомагнітного поля, які мають час запізнення близько 6 хв і тривалість 70–80 хв, могли бути викликані землетрусом. Переносником збурень в цьому випадку могли бути МГД хвилі.

2. Квазіперіодичні збурення, які мають час запізнення 97–106 хв і тривалість близько 130–140 хв, скоріш за все, викликані землетрусом. За перенесення збурень відповідали АГХ, які мають період 7–14 хв.

3. Відносне збурення концентрації електронів у полі АГХ хвилі було близько 5.3%.

4. Результати спостережень за албанським і турецьким землетрусами в цілому узгоджуються між собою.

### ФІНАНСУВАННЯ РОБОТИ

Дослідження Черногора Л. Ф., Голуб М. Ю., Шевелева М. Б. та Yiyang Luo виконано в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Також робота Черногора Л. Ф., Гармаша К. П. та Шевелева М. Б. частково підтримана в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0118U002039, 0119U002538).

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

### Authors' ORCID ID

L. F. Chernogor  <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

K. P. Garmash  <https://orcid.org/0000-0002-0844-5456>

Y. Luo  <https://orcid.org/0000-0002-3376-5814>

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор ЛФ. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. Радиофизика и радиоастрономия. 2003;8(1):59-106. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/797/435>
2. Черногор ЛФ. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1. Нелинейный мир. 2006;4(12):655-697.
3. Черногор ЛФ. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2. Нелинейный мир. 2007;5(4):198-231.
4. Chernogor LF, Rozumenko VT. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. Radio Phys. Radio Astron. 2008;13(2):120-137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563/134>
5. Chernogor LF. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. International Journal of Remote Sensing. 2011;32(11):3199-3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
6. Черногор ЛФ, Домнін ІФ. Физика геокосмических бурь Харьков: Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина. 2014; 408 p.
7. Chernogor LF. Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. Geomagnetism and Aeronomy. 2019;59(1):62-75. <https://doi.org/10.1134/S0016793219010043>
8. Chernogor LF. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. Geomagn. Aeron. 2019 Jun 17;59(3):374-382.
9. Guo Q., Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
10. Luo Y, Guo Q, Zheng Yu, Гармаш КП, Черногор ЛФ, Шульга СН. Вариации характеристик радиоволн ВЧ диапазона над Китаем, сопровождавшие умеренное землетрясение в Японии 5 сентября 2018 г.

- Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». 2019;30:16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>
11. Luo Y., Garmash K. P., Chernogor L. F., Шульга С. Н. Флуктуации геомагнитного поля, сопровождавшие Чуйские землетрясения в сентябре–октябре 2003 г. Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Серия «Радиофизика и электроника». 2019;31:87-104. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-09>
  12. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Yu. Seismic-ionospheric effects: results of radio soundings at oblique incidence. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(3):218-230. [In Ukrainian].
  13. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP. Geomagnetic effect of Turkish earthquake of January 24, 2020. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(4): [In Press]. [In Ukrainian].
  14. Chernogor LF. *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.; 2012. 556 p. (Russian).
  15. Chernogor LF, Garmash KP. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018;58(5):673-685. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050031>
  16. Черногор ЛФ. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина 2009. 386 с.
  17. Chernogor LF, Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group; 2013. 542 p.
  18. Черногор ЛФ. О возможном воздействии запусков ракетно-космической техники на магнитное поле Земли. В кн.: *Воздействие ракетно-космической техники на окружающую природную среду*. Под общей ред. Адушкина ВВ, Козлова СИ, Сильникова МВ. Москва: ГЕОС. 2016. 795 с.
  19. Chernogor LF, Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG., Shamota MA. Consistent quasi-periodic variations of the geomagnetic pulsation level and doppler frequency shift of decametric radio waves aspect-scattered by artificial field-aligned ionospheric irregularities. *Radiophys. Quantum. El.* 2011;53(12):688-705. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9262-z>
  20. Черногор ЛФ. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина. 2014. 448 с.
  21. Bolt VA. Seismic Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *Nature.* 1964 Jun 13;202(4937):1095-1096. <https://doi.org/10.1038/2021095a0>
  22. Donn WL, Posmentier ES. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *J. Geophys. Res.* 1964 Dec 15;69(24):5357-5361. <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05357>
  23. Davies K, Baker DM. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1965 May;70(9):2251-2253. <https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>
  24. Row RV. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1966 Jan;71(1):343-345. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00343>
  25. Moore GW. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature.* 1964;203:508-509. <https://doi.org/10.1038/203508b0>
  26. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science)*. Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.

#### REFERENCES

1. Chernogor LF. Physics of the Earth, atmosphere and geocosmos in the light of the systemic paradigm. *Radiophysics and Radio Astronomy.* 2003;8(1):59-106. (Russian). <http://rpjournal.org.ua/index.php/ra/article/view/797/435>
2. Chernogor LF. Earth - atmosphere - ionosphere - magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system. 1. Non-linear world. 2006; 4 (12): 655-697. (Russian).
3. Chernogor LF. Earth - atmosphere - ionosphere - magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system. 2. Non-linear world. 2007; 5 (4): 198-231. (Russian).
4. Chernogor LF, Rozumenko VT. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* 2008;13(2):120-137. <http://rpjournal.org.ua/index.php/ra/article/view/563/134>
5. Chernogor LF. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *International Journal of Remote Sensing.* 2011;32(11):3199-3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
6. Chernogor LF, Domnin IF. *Physics of geocosmic storms* Kharkiv: Kharkiv National University. V.N. Karazin. 2014; 408 p. (Russian).
7. Chernogor LF. Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2019;59(1):62-75. <https://doi.org/10.1134/S0016793219010043>



8. Chernogor LF. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagn. Aeron.* 2019 Jun 17;59(3):374-382.
9. Guo Q., Chernogor LF, Garmash KP, Rozumenko VT, Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2019;186:88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>
10. Luo Y, Guo Q, Zheng Yu, Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SN. Variations in the characteristics of HF radio waves over China accompanying a moderate earthquake in Japan on September 5, 2018. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics".* 2019; 30: 16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02> (Russian)
11. Luo Y., Garmash KP, Chernogor LF, Shulga SN Geomagnetic field fluctuations accompanying the Chuya earthquakes in September – October 2003. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics".* 2019;31:87-104. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-09> (Russian).
12. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP, Guo Q, Zheng Yu. Seismic-ionospheric effects: results of radio soundings at oblique incidence. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(3):218-230. [In Ukrainian].
13. Luo Y, Chernogor LF, Garmash KP. Geomagnetic effect of Turkish earthquake of January 24, 2020. *Radio Phys. Radio Astron.* 2020;25(4): [In Press]. [In Ukrainian].
14. Chernogor LF. *Physics and Ecology of Disasters.* Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.; 2012. 556 p. (Russian).
15. Chernogor LF, Garmash KP. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018;58(5):673-685. <https://doi.org/10.1134/S0016793218050031>
16. Chernogor LF. Radiophysical and geomagnetic effects of missile launches: Monograph. Kharkiv: V.N.Karazinay Kharkiv National University 2009.386 p. (Russian).
17. Chernogor LF, Blaunstein N. Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group; 2013. 542 p.
18. Chernogor LF. On the possible impact of launches of rocket and space technology on the Earth's magnetic field. In the book: *The impact of rocket and space technology on the natural environment.* Ed. Adushkina VV, Kozlova SI, Silnikova MV. Moscow: GEOS. 2016. p. 795 (Russian).
19. Chernogor LF, Vertogradov GG, Uryadov VP, Vertogradova EG., Shamota MA. Consistent quasi-periodic variations of the geomagnetic pulsation level and doppler frequency shift of decametric radio waves aspect-scattered by artificial field-aligned ionospheric irregularities. *Radiophys. Quantum. El.* 2011;53(12):688-705. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9262-z>
20. Chernogor LF. Physics of powerful radio emission in the geocosmos: Monograph. Kharkiv: V.N.Karazin Kharkiv National University. 2014.448 p. (Russian).
21. Bolt BA. Seismic Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *Nature.* 1964 Jun 13;202(4937):1095-1096. <https://doi.org/10.1038/2021095a0>
22. Donn WL, Posmentier ES. Ground-Coupled Air Waves from the Great Alaskan Earthquake. *J. Geophys. Res.* 1964 Dec 15;69(24):5357-5361. <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05357>
23. Davies K, Baker DM. Ionospheric Effects Observed around the Time of the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1965 May;70(9):2251-2253. <https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>
24. Row RV. Evidence of Long-Period Acoustic Gravity Waves Launched into the F Region by the Alaskan Earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.* 1966 Jan;71(1):343-345. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00343>
25. Moore GW. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature.* 1964;203:508-509. <https://doi.org/10.1038/203508b0>
26. Gossard EE, Hooke YX. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves, Their Generation and Propagation (Developments in Atmospheric Science).* Elsevier Scientific Pub. Co., 1975. 472 p.