

<https://doi.org/10.15407/knit2024.03.080>  
УДК 551.515:550.38:551.594

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

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

## СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОФІЗИЧНИХ ПОЛІВ, ЗБУРЕНИХ ПОГОДНИМИ ФРОНТАМИ

*Утворення «Земля (внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера» (ЗАІМ) є єдиною системою з прямими та зворотними, позитивними та негативними зв'язками, а також їхньою комбінацією. Високоенергетичні джерела природного та антропогенного походження активізують взаємодію підсистем у системі ЗАІМ. Вплив на систему ЗАІМ джерел різної фізичної природи досить добре досліджено. Менше вивчено вплив на систему ЗАІМ погодних фронтів та інших потужних атмосферних джерел. Мета роботи — виклад результатів статистичного аналізу варіацій основних параметрів геофізичних полів, що супроводжували рух атмосферних фронтів. Аналіз гістограм перепаду атмосферного тиску, температури атмосфери, тривалості дії атмосферного фронту, швидкостей зміни тиску та температури, а також варіацій атмосферного електричного поля, щільності атмосферного струму та магнітного поля показав, що під впливом фронту ці параметри змінюються у широких межах. Середні значення цих параметрів відповідно дорівнюють 145 Па, 6 °С, 70 хв, 2.4 Па/хв, 0.23 °С/хв, 3.2 кВ/м, 63 нА/м<sup>2</sup> та 20 нТл. Аналіз кореляційних полів показав, що майже завжди кореляція між варіаціями фізичних параметрів відсутня. Це означає, що протягом руху атмосферного фронту єдиного керівного параметру немає. Отримано просте аналітичне співвідношення для оцінки збурення напруженості електричного поля атмосферним фронтом. Оцінки дали значення 6...60 кВ/м. Під час гроз ця величина збільшується на порядок. Показано, що у збурених умовах щільність атмосферного струму збільшується від 10<sup>-12</sup> до 10<sup>-11</sup>...10<sup>-10</sup> А/м<sup>2</sup>. Розглянуто три механізми збільшення збурень індукції магнітного поля під впливом атмосферного фронту: збурення стороннього струму, електромагнітна індукція, магнітний ефект турбулентності. Всі ці фактори дають величину ефекту у межах 1 нТл. Тільки магнітним збуренням іоносфери можна пояснити збільшення варіацій магнітного поля до 10...70 нТл. Оцінено енергетику баричного (10<sup>16</sup>...10<sup>17</sup> Дж, 10<sup>13</sup>...10<sup>14</sup> Вт), теплового (10<sup>18</sup>...10<sup>19</sup> Дж, 10<sup>15</sup>...10<sup>16</sup> Вт), електричного (10<sup>9</sup>...10<sup>11</sup> Дж, 10<sup>6</sup>...10<sup>8</sup> Вт) і магнітного (10<sup>10</sup>...10<sup>11</sup> Дж, 10<sup>7</sup>...10<sup>8</sup> Вт) полів. Обґрунтовано такі канали взаємодії підсистем у системі ЗАІМ під впливом атмосферних фронтів: перепад атмосферного тиску, перепад концентрації електронів у іоносфері, генерація інфразвукових і гравітаційних хвиль, генерація блискавками електромагнітного випромінювання та збурення глобального електричного кола.*

**Ключові слова:** *погодний фронт, приземна атмосфера, система ЗАІМ, геофізичні поля, статистичні характеристики, кореляційне поле, гістограма.*

Цитування: Чорногор Л. Ф. Статистичні характеристики геофізичних полів, збурених погодними фронтами. *Космічна наука і технологія*. 2024. 30, № 3 (148). С. 80—94. <https://doi.org/10.15407/knit2024.03.080>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## ВСТУП

Згідно із системною парадигмою, сформульованою автором у 1970—1980 рр., утворення «Земля (внутрішні оболонки) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера» (ЗАІМ) є єдиною системою з прямими та зворотними, позитивними та негативними зв'язками, а також їхньою комбінацією [16—18, 21]. Відомо, що високоенергетичні джерела природного та антропогенного походження активізують взаємодію підсистем у системі ЗАІМ. До природних джерел належать падіння метеороїдів [20], геокосмічні бурі [21, 53, 54], сонячні затемнення [43, 58], сонячний термінатор [7, 8], погодні фронти, циклони, торнадо, урагани (тайфуни) [15, 22, 23, 28, 29, 57, 65], грози [37, 64], вибухи та виверження вулканів [24, 46, 48, 61, 64], землетруси [39, 42, 44, 47, 52, 56, 60], цунамі [47] тощо.

До антропогенних джерел належать потужні ядерні [26, 33, 34, 38, 40, 44, 55, 59, 60, 63] та хімічні [19, 41] вибухи, пуски крупних ракет [27, 30—32, 45, 49—51], вплив потужного радіо- та акустичного випромінювання [2, 17, 18], приземлення космічних апаратів, польоти великих літаків [25, 35, 36], мегаполіси [5, 6, 9] тощо.

Вплив на систему ЗАІМ більшості з перерахованих джерел досить добре досліджено [16—18, 21, 44]. Менше вивчено вплив на систему ЗАІМ та її підсистеми погодних фронтів та інших потужних атмосферних джерел. Водночас саме підсистема Земля — атмосфера найбільше впливає на життєдіяльність людства. Саме у приземній атмосфері найбільша щільність, найбільша енергія аеродинамічних процесів. У підсистемі Земля — атмосфера найкраще вивчено процеси генерації та поширення сейсмічних хвиль, цунамі, акустичних і гравітаційних хвиль. Саме ці хвилі переносять енергію та імпульс і відповідають за взаємодію підсистем у системі ЗАІМ. Набагато гірше за хвильові процеси вивчено електричні, магнітні та електромагнітні процеси у приземній атмосфері. Їм присвячено лише окремі роботи [5, 6, 9—13]. Мало досліджено кореляцію збурень геофізичних полів (теплового, баричного, електричного, магнітного) під час потужних атмосферних процесів.

Мета цієї роботи — виклад результатів статистичного аналізу варіацій основних параметрів геофізичних полів, що супроводжували рух атмосферних фронтів.

## ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для статистичного аналізу використано результати синхронних вимірювань упродовж 2015—2021 рр., наведені в роботі [13]. Координати пунктів вимірювань приблизно такі: 55° пн. ш., 38° сх. д. Як високоенергетичне джерело збурень використано переміщення холодного атмосферного фронту з високих широт у середні широти.

Реєструвалися метеорологічні параметри: атмосферний тиск  $p$ , температура повітря  $T$ , швидкість вітру та вологість повітря у приземній атмосфері. Крім цих параметрів, реєструвалися три компоненти індукції геомагнітного поля  $B$ , вертикальний компонент напруженості електричного поля  $E$  та вертикальний компонент щільності атмосферного електричного струму  $j$ . Часова роздільна здатність становила 1 с.

Значення параметрів геофізичних полів, що супроводжували рух холодних фронтів, наведено у табл. 1.

На першому етапі будувалися гістограми для таких фізичних параметрів: збурення тиску  $\Delta p$ , збурення температури  $\Delta T$ , характерної тривалості дії погодного фронту  $\tau$ , швидкості зміни тиску  $\pi = \Delta \dot{p}$  (точка позначає похідну за часом), швидкості зміни температури  $\theta = \Delta \dot{T}$ , збурення напруженості електричного поля  $\Delta E$ , індукції геомагнітного поля  $\Delta B$  та щільності електричного струму  $\Delta j$ . За гістограмами оцінювалися найбільш імовірні (середні) значення.

На другому етапі будувалися такі кореляційні поля: залежність усіх інших параметрів від  $\Delta p$ , потім від  $\Delta T$ , потім від  $\theta$ , потім від  $\pi$ . Для електромагнітних параметрів будувалися кореляційні поля « $\Delta B - \Delta E$ », « $\Delta j - \Delta E$ » та « $\Delta B - \Delta j$ ». Там, де це було доцільно, знаходилися відповідні рівняння регресії.

## АНАЛІЗ ГІСТОГРАМ

Гістограми варіацій параметрів геофізичних полів наведено на рис. 1. Видно, що рух холодних фронтів супроводжувався зменшенням температури

на 4...10.5 °C (у середньому приблизно на 6 °C), тиску — від 30 до 400 Па (у середньому приблизно на 145 Па), тривалістю від 30 до 180 хв (у середньому приблизно 70 хв). Швидкість зміни температури змінювалася від 0.02 до 0.23 °C/хв, швидкість зміни тиску — від 1 до 8 Па/хв. У середньому  $\theta \approx 0.14$  °C/хв,  $\pi \approx 2.4$  Па/хв.

Рух холодних фронтів супроводжувався також електричними та магнітними збуреннями. Так, напруженість електричного поля варіювала від 0.85 до 4.8 кВ/м (у середньому 3.2 кВ/м), щільність атмосферного струму — від 10 до 80 пА/м<sup>2</sup> (у середньому 63 пА/м<sup>2</sup>), індукція магнітного поля — від 5 до 80 нТл (у середньому близько 20 нТл).

Таблиця 1. Значення параметрів геофізичних полів, що супроводжували рух холодних атмосферних фронтів

Дата	Час (UTC)	$\Delta T$ , °C	$\Delta p$ , Па	$\tau$ , хв	$\theta$ , °C/хв	$\pi$ , Па/хв	$\Delta E$ , В/м	$\Delta j$ , пА/м <sup>2</sup>	$\Delta B$ , нТл
15.06.2015	13:00	10.5	180	150	0.07	1.2	4000	10	75
02.07.2015	14:30	6	70	40	0.15	1.75	4700	80	15
11.07.2015	15:00	5.5	50	110	0.05	0.45	2000	70	40
13.07.2015	12:30	5	100	30	0.17	3.33	600	80	35
28.07.2015	13:00	7.5	170	53	0.14	4.86	—	—	35
11.06.2016	13:30	4	100	180	0.02	0.55	3000	60	25
27.06.2016	13:00	7	60	64	0.11	0.3	—	—	5
05.07.2016	13:30	6	120	90	0.06	1.33	6300	40	5
24.08.2016	14:00	5.5	270	30	0.18	9	—	—	10
30.08.2016	13:00	10	400	80	0.12	5	—	—	25
30.06.2017	12:20	9.5	290	55	0.17	5.27	—	—	30
30.07.2017	12:30	4	120	50	0.08	2.4	1300	70	10
12.06.2018	11:00	7	60	130	0.05	0.46	850	60	20
30.06.2018	11:30	9	100	40	0.23	2.5	4800	60	5
08.05.2019	14:30	6	260	35	0.17	7.43	15	3	5
09.05.2019	11:30	8.5	90	53	0.16	0.75	4400	65	20
23.05.2019	12:30	8	165	50	0.16	3.3	3400	75	10
08.06.2019	12:00	5.5	80	40	0.14	2	4000	70	15
09.07.2019	14:00	5.5	110	80	0.07	1.37	4500	75	30
16.07.2019	13:00	7.5	180	80	0.09	2.25	3500	80	15
04.05.2020	14:00	6.5	190	45	0.14	4.22	4300	50	5
12.06.2020	09:00	10.5	100	65	0.16	1.54	600	15	10
25.06.2020	15:00	6.5	—	65	0.10	—	—	40	10
04.07.2020	10:30	8.5	—	170	0.05	—	—	45	10
01.08.2020	11:00	6	30	50	0.12	0.6	4100	50	5
12.05.2021	14:00	6	180	100	0.06	1.8	—	—	80
15.05.2021	15:00	8	—	60	0.13	—	—	—	10
20.05.2021	12:00	5	—	60	0.08	—	—	—	40
13.06.2021	10:30	7	160	50	0.14	3.2	—	—	10
28.06.2021	10:00	7.5	—	70	0.11	—	—	—	5
15.07.2021	10:30	6	100	50	0.12	2	—	—	20
17.07.2021	11:00	7	40	55	0.13	0.73	—	—	10
02.08.2021	20:00	6.5	200	60	0.11	3.33	3600	—	50
18.08.2021	13:30	10.5	250	75	0.14	3.33	3000	—	10

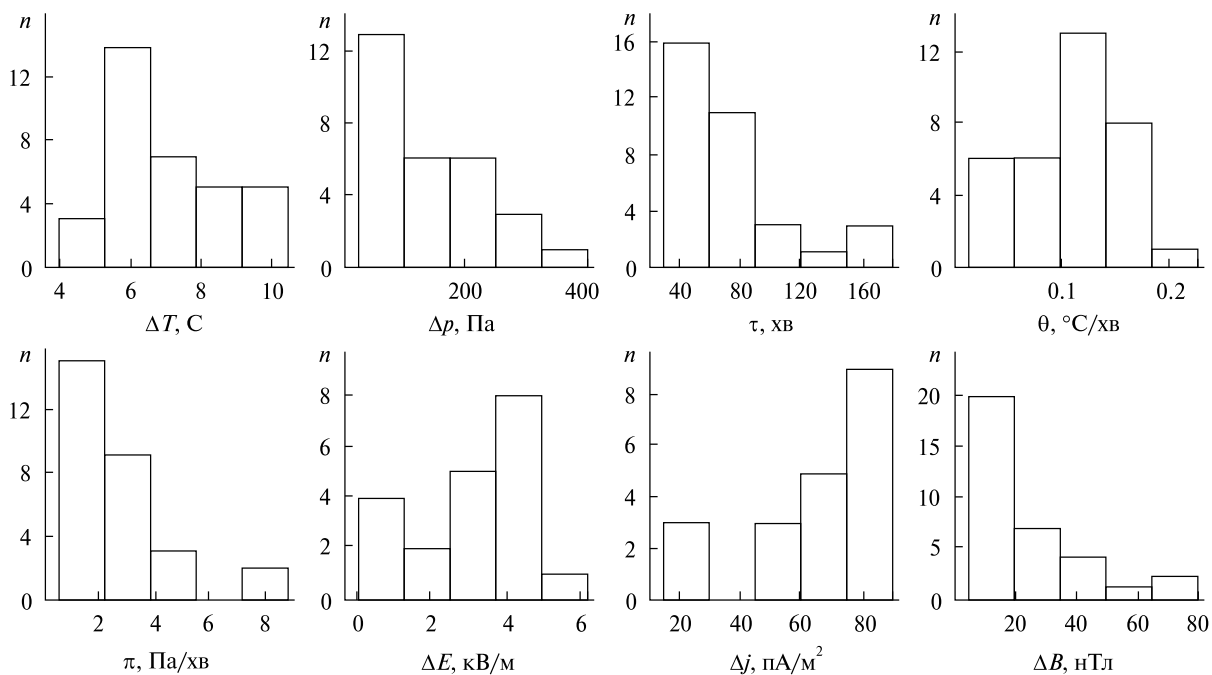


Рис. 1. Гістограми варіацій параметрів геофізичних полів

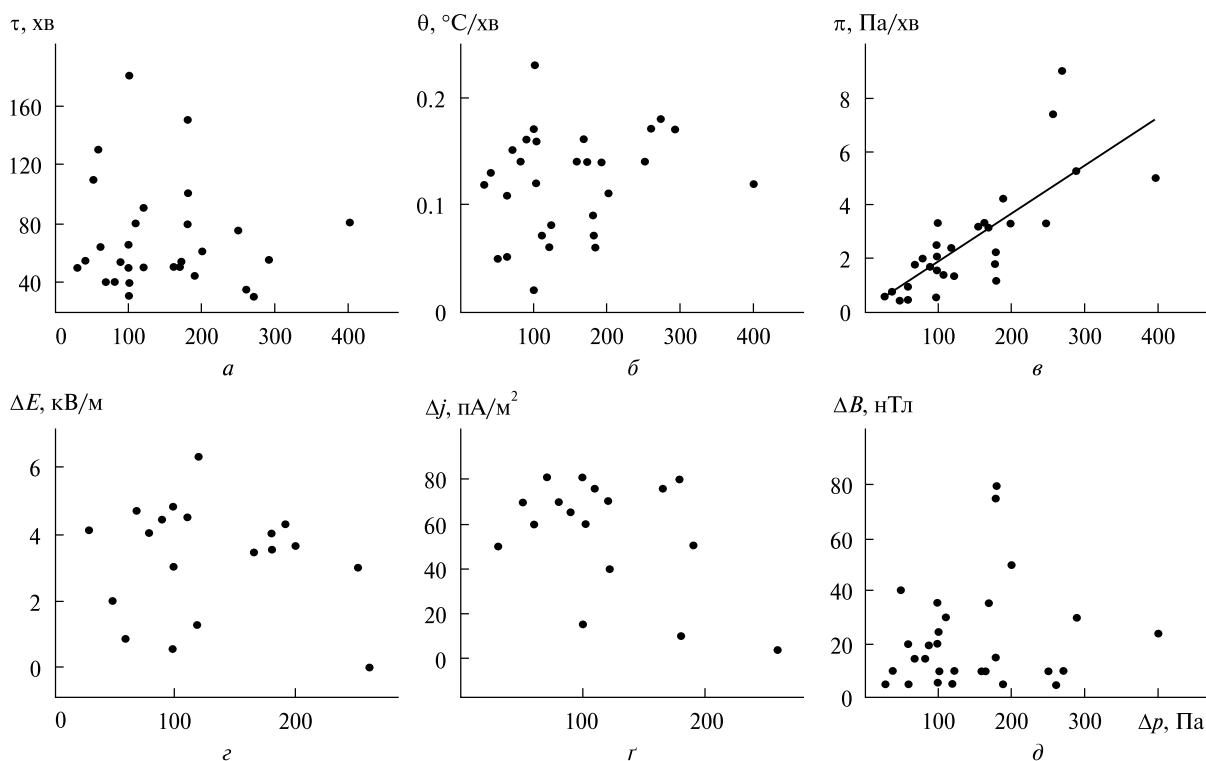


Рис. 2. Кореляційні залежності геофізичних параметрів від збурення атмосферного тиску. Рівняння регресії:  $\pi = -0.03 + 0.019\Delta p$ ;  $R^2 = 0.603$ ,  $\sigma = 1.30$

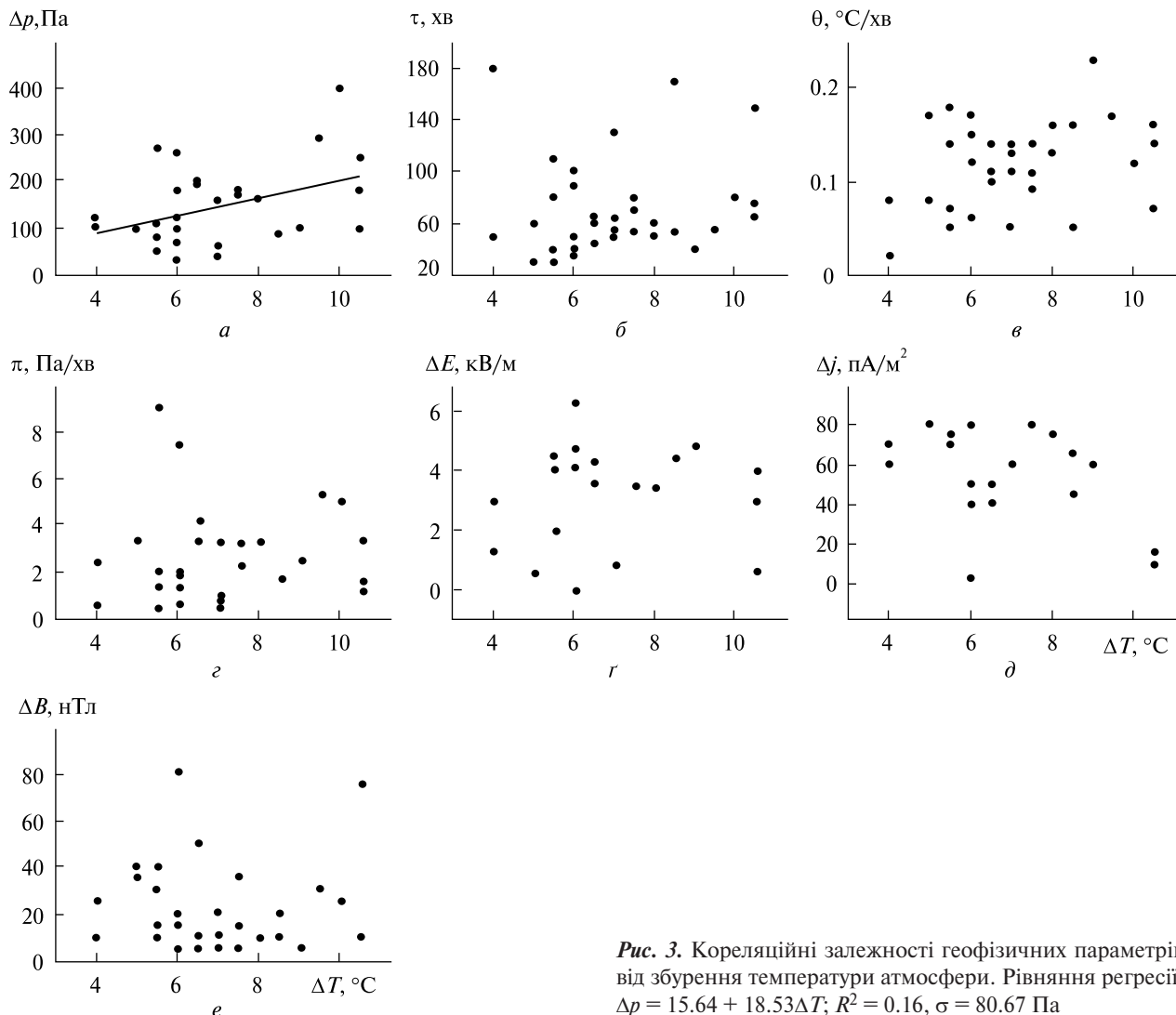


Рис. 3. Кореляційні залежності геофізичних параметрів від збурення температури атмосфери. Рівняння регресії:  $\Delta p = 15.64 + 18.53\Delta T$ ;  $R^2 = 0.16$ ,  $\sigma = 80.67$  Па

#### АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ПОЛІВ

**Залежності від збурення атмосферного тиску.** Кореляційні поля для  $\tau$ ,  $\theta$ ,  $\pi$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta j$  та  $\Delta B$  в залежності від  $\Delta p$  показано на рис. 2. Видно, що стійкої залежності тривалості реакції геофізичних полів від збурення тиску немає.

**Залежність від збурення температури приземної атмосфери.** Кореляційні поля для низки геофізичних параметрів у залежності від збурення  $\Delta T$  наведено на рис. 3. Значний розкид точок свідчить про фактичну відсутність кореляції. Незначна кореляція з коефіцієнтом достовірності  $R^2 = 0.16$  і  $\sigma = 80.67$  спостерігається для залежності « $\Delta p - \Delta T$ » (див. рис. 3, а).

**Залежність від швидкості збурення температури.** Кореляційні поля для  $\Delta p$ ,  $\Delta T$ ,  $\tau$ ,  $\pi$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta j$  і  $\Delta B$  у залежності від  $\theta$  наведено на рис. 4. Видно, що здебільшого має місце значний розкид точок. Винятком є кореляційні залежності « $\pi - \theta$ » і « $\tau - \theta$ ». Для першої залежності (рис. 4, з) спостерігається помірна кореляція з  $R^2 = 0.31$  і  $\sigma = 1.72$ . Для другої залежності (рис. 4, в) кореляція виражена більш яскраво:  $R^2 = 0.68$ , а  $\sigma = 21.63$ .

**Залежність від швидкості збурення атмосферного тиску.** Кореляційні поля для низки параметрів у залежності від значень  $\pi$  наведено на рис. 5, з якого видно, що кореляція практично відсутня. Деяким винятком є кореляційне поле

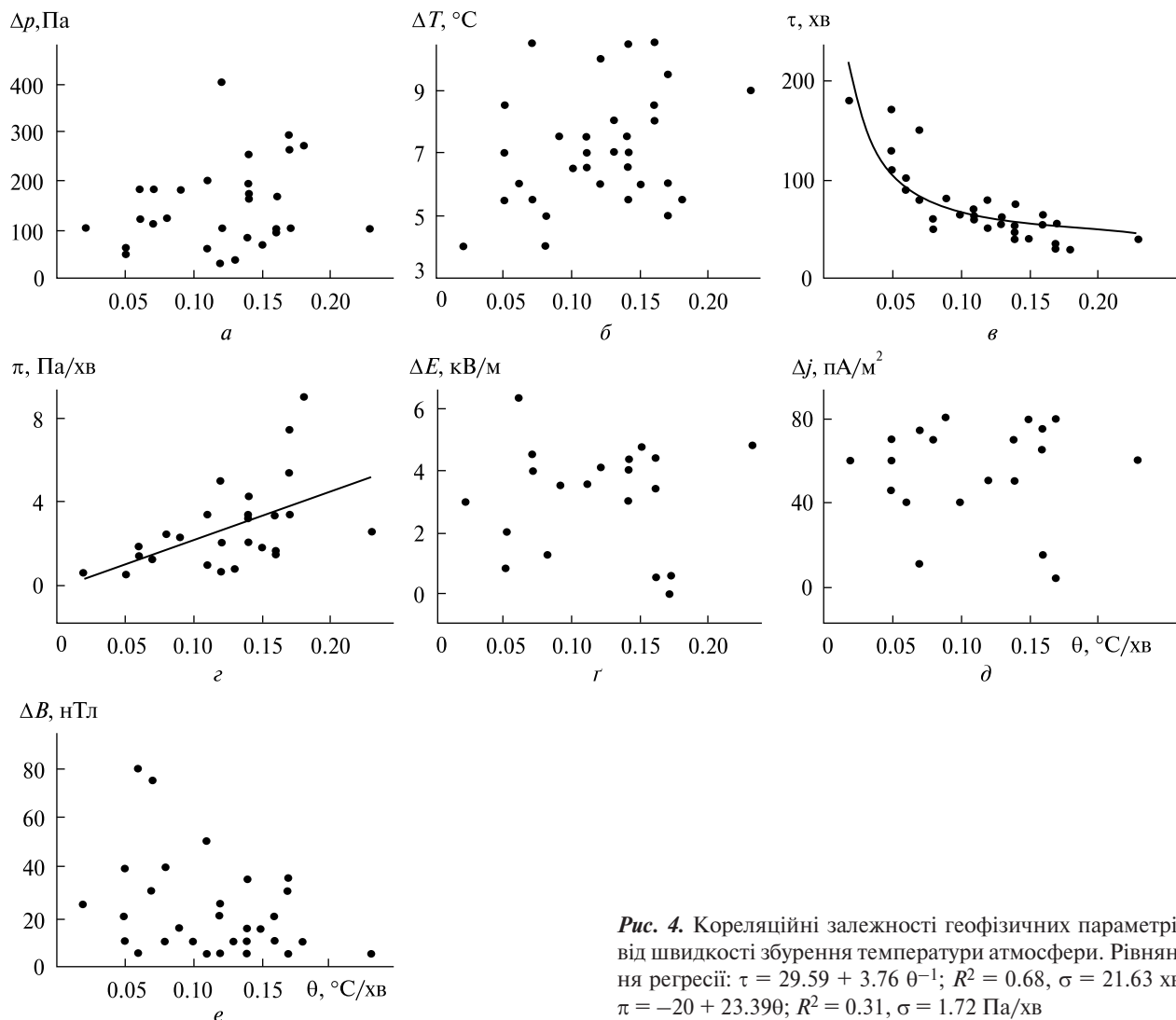


Рис. 4. Кореляційні залежності геофізичних параметрів від швидкості збурення температури атмосфери. Рівняння регресії:  $\tau = 29.59 + 3.76 \theta^{-1}$ ;  $R^2 = 0.68$ ,  $\sigma = 21.63$  хв;  $\pi = -20 + 23.39\theta$ ;  $R^2 = 0.31$ ,  $\sigma = 1.72$  Па/хв

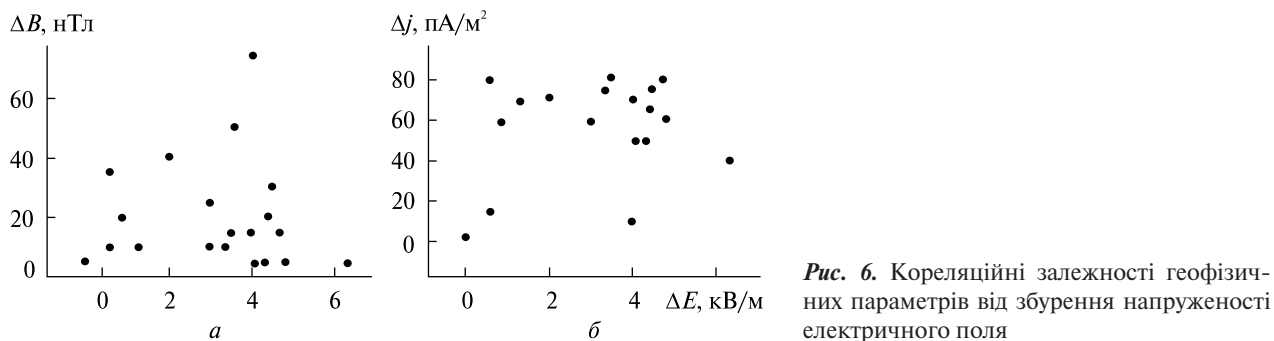
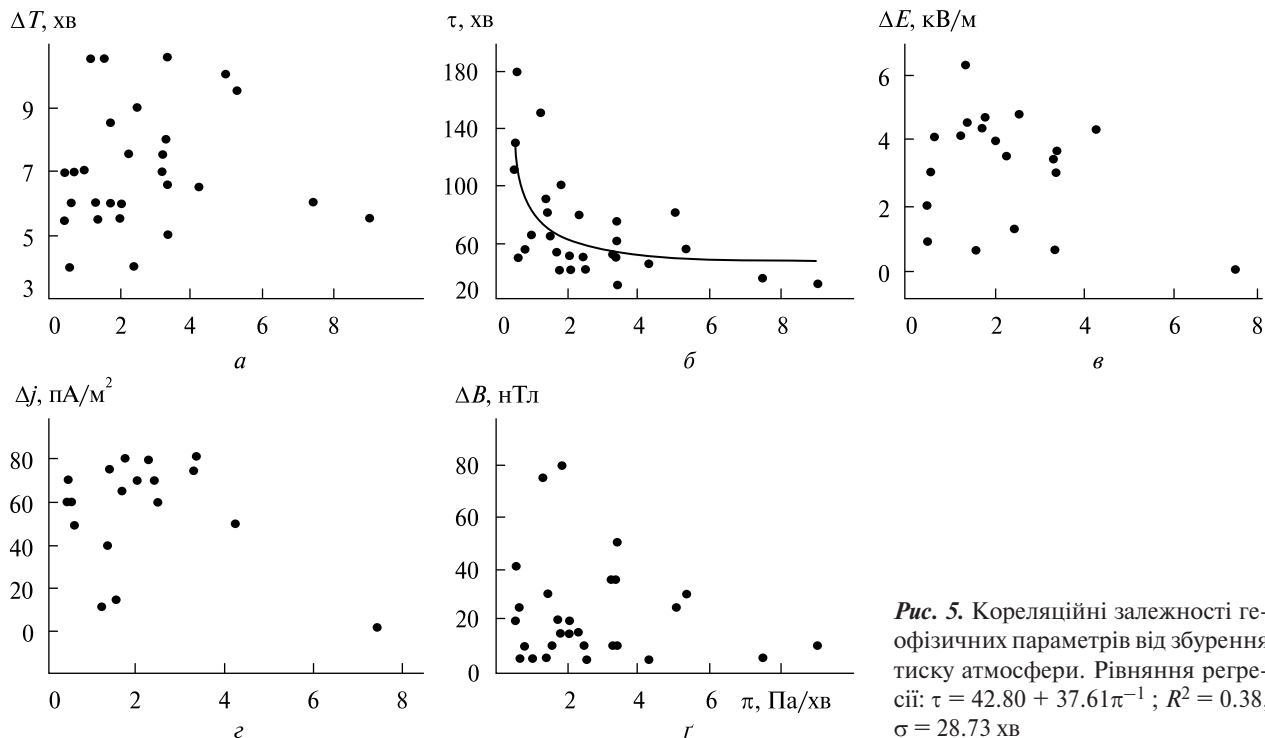
« $\tau - \pi$ » (рис. 5, б), для якого спостерігається помірна кореляція ( $R^2 = 0.38$ ,  $\sigma = 28.73$ ).

**Залежність електричних і магнітних збурень від збурень напруженості електричного поля та щільності атмосферного струму.** Кореляційні поля « $\Delta B - \Delta E$ » і « $\Delta j - \Delta E$ » наведено на рис. 6. Видно, що кореляція практично відсутня. Кореляційне поле « $\Delta B - \Delta j$ » (рис. 7) також свідчить, що  $\Delta B$  практично не залежить від  $\Delta j$ .

### ОБГОВОРЕННЯ

**Механізми збурень.** Аналіз кореляційних полів показав, що у більшості випадків кореляції між варіаціями фізичних величин не було. Певна ко-

реляція спостерігалася лише для залежностей « $\Delta p - \Delta T$ » ( $R^2 = 0.16$ ), « $\pi - \theta$ » ( $R^2 = 0.31$ ), « $\tau - \pi$ » ( $R^2 = 0.38$ ) і « $\tau - \theta$ » ( $R^2 = 0.68$ ). Це означає, що при переміщенні холодного фронту немає єдиного керівного параметра. Аеродинамічні ( $\Delta p$ ,  $\pi$ ), теплові ( $\Delta T$ ,  $\theta$ ), електричні ( $\Delta E$ ,  $\Delta j$ ) і магнітні процеси протікають практично незалежно один від одного. Горизонтальний рух холодного фронту призводить до підсилення конвективних потоків більш теплих повітряних мас і турбулентних процесів у цих потоках. Наявність пилинок (аерозолей) у повітрі та збільшення їхньої концентрації під дією вітру та конвекції призводить до інтенсифікації електризації, збільшення кон-



Таблиця 2. Параметри фізичних процесів у приземній атмосфері

Параметр	Незбурені умови	Збурені умови	Літературне джерело
Концентрація аерозолів, $\text{м}^{-3}$	$10^9 \dots 10^{11}$	$10^{10} \dots 10^{12}$	[1]
Надлишок концентрації важких іонів, $\text{м}^{-3}$	$10^8 \dots 10^9$	$10^9 \dots 10^{10}$	[1, 8, 17]
Питома електропровідність, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$10^{-14}$	$10^{-13} \dots 10^{-12}$	[1, 8, 17]
Щільність електричного струму, $\text{А}/\text{м}^2$	$10^{-12}$	$10^{-10} \dots 10^{-8}$	[1, 8, 17]
Щільність електричного заряду, $\text{Кл}/\text{м}^3$	$10^{-11}$	$10^{-10} \dots 10^{-8}$	[1, 8, 18]
Напруженість електричного поля, $\text{В}/\text{м}$	$10^2$	$10^3 \dots 10^4$	[1, 16]
Індукція геомагнітного поля, нТл	0.1...1	10...100	[16, 18]
Перепад температур, $^{\circ}\text{C}$	0.1...1	4...10	[1, 16]
Перепад тиску, Па	1...10	50...500	[1, 16]



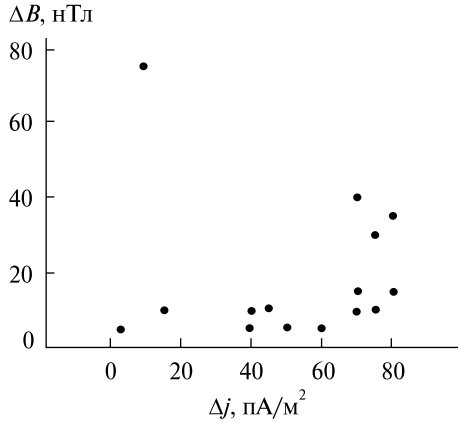


Рис. 7. Кореляційна залежність збурення магнітного поля від збурення щільності атмосферного струму

центрації важких іонів, питомої електропровідності  $\sigma$  атмосфери та атмосферного електричного струму. Збурена погодним фронтом атмосфера викликає збурення локальних (з характерним розміром 100...1000 км) електричного та магнітного полів. Збурення щільності електричного струму не є пропорційним до збурення електричного поля, тобто закон Ома не має місця. Більш імовірною залежністю є така:

$$\Delta j = \Delta \sigma E + \sigma \Delta E.$$

Таким чином вдається пояснити відсутність кореляції між  $\Delta j$  і  $\Delta E$ .

Перелік незбурених і збурених значень геофізичних полів та їхніх параметрів наведено в табл. 2.

**Збурення напруженості електричного поля.** Оцінимо величину збурень напруженості електричного поля за рахунок електризації частинок у повітрі. У незбурених умовах об'ємна щільність електричного заряду становить  $q \sim 10^{-11}$  Кл/м<sup>3</sup>, а у збурених збільшується до  $10^{-10}$ ... $10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup> [1, 4, 15]. Скористаємося законом Гаусса в такому вигляді:

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int q dV,$$

де  $S$  — поверхня, що охоплює об'єм  $V$ ,  $\epsilon_0$  — електрична стала.

Розглянемо об'єм  $V$  збуреної атмосфери з розмірами  $l_1$ ,  $l_2$  та  $h$  ( $l_1$  — довжина,  $l_2$  — ширина,  $h$  — висота холодного фронту). Тоді

$$S = 2(l_1 + l_2)h + 2l_1l_2, \quad V = l_1l_2h. \quad (1)$$

Оскільки  $l_1 \sim 1000$  км,  $l_2 \sim 100$  км,  $h \sim 10$  км, то з (1) випливає, що

$$S \approx 2l_1l_2 \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^2.$$

При цьому  $V \approx 10^{15}$  м<sup>3</sup>. Тоді для  $E$  маємо таке співвідношення

$$E = \frac{qh}{2\epsilon_0}.$$

У незбурених умовах  $q \approx 10^{-11}$  Кл/м<sup>3</sup>,  $h = 100$ ... $200$  м. Тоді  $E = 60$ ... $120$  В/м. У збурених умовах  $h = 1$ ... $10$  км. Для  $q \approx 10^{-10}$  Кл/м<sup>3</sup> маємо  $E = 6$ ... $60$  кВ/м. Під час гроз  $q = 10^{-9}$ ... $10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>. Тоді для  $h = 1000$  м маємо  $E = 60$ ... $600$  кВ/м.

Оцінимо щільність електричного струму. У незбурених умовах  $\sigma \approx 10^{-14}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, а  $E \approx 100$  В/м. Тоді  $j \sim 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>. У збурених умовах для  $\Delta \sigma \approx 10^{-13}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> та  $\Delta E = 1$ ... $10$  кВ/м маємо  $\Delta j \approx 10^{-11}$ ... $10^{-10}$  А/м<sup>2</sup>.

Приблизно такі значення напруженості електричного поля (1... $6$  кВ/м) і щільності електричного струму зареєстровано у роботі [13] ( $10^{-11}$ ... $10^{-10}$  А/м<sup>2</sup>).

Таким чином, спостережене збільшення  $E$  від  $0.1$  кВ/м до  $1$ ... $6$  кВ/м та  $j$  від  $\sim 1$  пА/м<sup>2</sup> до  $10$ ... $100$  пА/м<sup>2</sup> можна пояснити збільшенням об'ємної щільності заряду у результаті конвекції, електризації та розділення зарядів у приземній атмосфері під дією холодного погодного фронту.

**Збурення індукції магнітного поля.** Далі розглянемо можливі механізми локального збурення магнітного поля під дією холодного погодного фронту.

Скористаємося рівнянням Максвелла для вектора  $\vec{B}$  в інтегральній формі:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \oint \vec{j} d\vec{S} + \epsilon_0 \mu_0 \oint \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (3)$$

де  $d\vec{l}$  — елемент замкненого контуру,  $\mu_0$  — магнітна стала,  $\vec{j}$  — щільність стороннього струму,  $\vec{S}$  — поверхня, що охоплює об'єм зі струмом та напруженістю електричного поля.

**Збільшення сили стороннього струму.** Спочатку оцінимо величину магнітного ефекту за рахунок генерації стороннього струму. Оскільки

$$l = 2(l_1 + l_2) \approx 2l_1, \quad S \approx 2l_1l_2, \quad (4)$$

то співвідношення для  $\Delta B$  має вигляд

$$\Delta B \approx \mu_0 \Delta j l_2.$$



В умовах, що аналізуються у нашій роботі,  $\Delta j = 10^{-11} \dots 10^{-10} \text{ А/м}^2$ ,  $l_2 \approx 100 \text{ км}$ . Тоді  $\Delta B = 1.26 \dots 12.6 \text{ нТл}$ , що набагато менше від значень, отриманих під час вимірювань (10...70 нТл). Додамо, що максимальне значення  $j_{\max} \approx 10^{-8} \text{ А/м}^2$  [14]. Тоді для  $l_2 \approx 100 \text{ км}$  маємо  $\Delta B \approx 1.25 \text{ нТл}$ .

**Механізм електромагнітної індукції.** Розглянемо механізм електромагнітної індукції. У цьому випадку генерація збурень магнітного поля зумовлена часовими варіаціями електричного поля, тобто у рівнянні (3) членом з  $\partial \vec{E} / \partial t \neq 0$ . За рахунок конвекції висота об'єму з конвективними комірками  $h = h(t)$ . Тоді з (2) випливає, що

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{q}{2\varepsilon_0} \frac{dh}{dt} = \frac{qv_k}{2\varepsilon_0}, \quad (5)$$

де  $v_k$  — швидкість руху верхньої межі області атмосфери з конвективними комірками. Із (3) з урахуванням (4) та (5) маємо:

$$\Delta B = \frac{1}{2} \mu_0 q v_k l_2 = \mu_0 \Delta j_{eq} l_2, \quad (6)$$

де  $\Delta j_{eq} = q v_k / 2$ . Для  $q \approx 10^{-10} \text{ Кл/м}^3$ ,  $v_k = 1 \dots 10 \text{ м/с}$ ,  $l_2 = 100 \text{ км}$  маємо  $\Delta j_{eq} = 5 \cdot 10^{-11} \dots 5 \cdot 10^{-10} \text{ А/м}^2$ ,  $\Delta B = 6.3 \dots 62.8 \text{ нТл}$ . Якщо  $q = q_{\max} = 10^{-8} \text{ Кл/м}^3$ ,  $v_k = 1 \dots 10 \text{ м/с}$ , то  $\Delta B_{\max} = 0.6 \dots 6.3 \text{ нТл}$ . Цей механізм також не здатний пояснити величину виміряних значень  $\Delta B = 10 \dots 70 \text{ нТл}$ .

**Магнітний ефект турбулентності.** Об'ємна щільність енергії турбулентного руху заряджених частинок дається співвідношенням

$$\varepsilon_t = \frac{\rho_i v_t^2}{2}, \quad (7)$$

де  $\rho_i = M_i N_i$  — об'ємна щільність заряджених частинок,  $M_i$  — маса іона,  $N_i$  — концентрація іонів,  $v_t$  — швидкість турбулентного руху. Об'ємна щільність магнітного поля, викликаного турбулентним рухом заряджених об'ємів атмосфери становить

$$\varepsilon_B = \frac{\Delta B^2}{2\mu_0}, \quad (8)$$

Нехай  $\varepsilon_t \approx \varepsilon_B$ . Тоді з (7) і (8) маємо

$$\Delta B = \sqrt{\rho_i \mu_0} v_t = \sqrt{M_i N_i \mu_0} v_t.$$

Для маси важкого (кластерного) іона  $M_i \approx 10^{-23} \text{ кг}$ ,  $N_i = 10^9 \dots 10^{10} \text{ м}^{-3}$  [1] і  $v_t \approx 0.1 v$ , де  $v \approx 30 \text{ м/с}$  — швидкість руху фронту, маємо  $\Delta B = 0.3 \dots 1 \text{ нТл}$ .

Таким чином і цей механізм не може пояснити спостережувану величину магнітного ефекту ( $\Delta B = 10 \dots 70 \text{ нТл}$ ).

**Магнітний ефект іоносфери.** Перепад атмосферного тиску  $\Delta p = 30 \dots 300 \text{ Па}$ , поширюючись приблизно зі звуковою швидкістю, досягнув іоносферних висот ( $z \sim 100 \text{ км}$ ). Якщо не враховувати загасання, то

$$\delta_p(z) = \delta_p(0) e^I, \quad I = \int_0^z \frac{dz}{2H(z)},$$

де  $\delta_p(0) = \Delta p(0) / p(0)$ ,  $p(0) \approx 10^5 \text{ Па}$  — незбурений атмосферний тиск,  $H(z)$  — масштаб висот. Для  $\Delta p(0) = 30 \dots 300 \text{ Па}$  маємо  $\delta_p(0) = 3 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3}$ . Оскільки на висоті  $z \sim 100 \text{ км}$   $I \approx 6.9$ , то  $\delta_p(100) = 0.3 \dots 3$ . Насправді такі значення відносного перепаду тиску на висоті іоносфери спостерігатися не можуть. Справа в тому, що при  $\delta_p > 0.2 \dots 0.3$  акустичне збурення ефективно загасає за рахунок нелінійних ефектів самовпливу. Тому реальними є значення  $\delta_p(100) = 0.1 \dots 0.3$ . Це означає, що має місце ефект насичення, тобто значення  $\delta_p$  в іоносфері не збільшується зі збільшенням  $\delta_p(0)$ .

Рухоме збурення  $\delta_p$  викликає у іоносфері електричний струм зі щільністю

$$j_p = eNv_w = eNv_s \delta_p, \quad (9)$$

де  $N$  — концентрація електронів,  $v_w$  — масова швидкість частинок в акустичному збуренні,  $v_s$  — швидкість звуку на висоті  $z \sim 100 \text{ км}$ .

Із роторного рівняння Максвелла з урахуванням (9) можна отримати таку формулу для оцінки магнітного ефекту:

$$\Delta B \approx \mu_0 j_p \Delta z = \mu_0 e N v_s \delta_p \Delta z, \quad (10)$$

де  $j_p = eNv_s \delta_p$ ,  $\Delta z$  — товщина іоносферного шару зі струмом. Використовуючи співвідношення (10) для  $N \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ,  $v_s \approx 330 \text{ м/с}$ ,  $\delta_p = 0.1 \dots 0.3$  та  $\Delta z \approx 30 \text{ км}$  маємо  $\Delta B = 20 \dots 60 \text{ нТл}$ . Це значення дуже близьке до спостережуваного ( $\Delta B = 10 \dots 70 \text{ нТл}$ ). Важливо, що ефект насичення для  $\delta_p$  призводить до ефекту насичення для щільності струму та магнітного ефекту. Саме про це свідчать результати спостережень (див. рис. 2, д). Часто збільшення  $\Delta p$  від 30 до 300 Па призводило до варіацій  $\Delta B \approx 10 \text{ нТл}$ . Наявні флуктуації  $\Delta B$  порядку 10...80 нТл пов'язані, перш за все, з варіаціями  $N$ , а не  $\Delta p$ .

Таким чином, магнітний ефект, викликаний рухом холодного атмосферного фронту, вдається пояснити взаємодією підсистем атмосфера — іоносфера в системі ЗАІМ.

### ЕНЕРГЕТИКА ФРОНТУ

**Енергетика баричного поля.** Зменшення тиску на  $\Delta p$  у межах фронту з розмірами  $l_1$ ,  $l_2$  та  $h$  і об'ємом  $V$  призводить до зменшення енергії баричного поля на величину

$$\Delta E_p = \Delta p V.$$

За  $\Delta p = 30 \dots 300$  Па,  $V \approx 10^{15} \text{ м}^3$  маємо  $\Delta E_p = 3 \cdot 10^{16} \dots 3 \cdot 10^{17}$  Дж. За  $\tau \approx 70$  хв середня потужність дорівнює  $P_p = 7.1 \cdot 10^{12} \dots 7.1 \cdot 10^{13}$  Вт.

**Енергетика теплового поля.** Зменшення внутрішньої (теплової) енергії дається співвідношенням

$$\Delta E_T = C \rho_0 V_T \Delta T = C \rho_0 l_1 l_2 H_0 \Delta T,$$

де  $C \approx 10^3$  Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> — питома теплоємність повітря,  $\rho_0$  — щільність повітря на поверхні Землі,  $H_0 \approx 7.5$  км — висота однорідної атмосфери. За  $\rho_0 = 1.3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta T = 4 \dots 10$  К,  $l_1 = 1000$  км,  $l_2 = 100$  км маємо  $\Delta E_T = 4 \cdot 10^{18} \dots 10^{19}$  Дж. Для  $\tau \approx 70$  хв маємо середню потужність  $P_T = 10^{15} \dots 10^{16}$  Вт.

Як бачимо, енергетика погодного фронту є значною, що забезпечує виникнення не тільки локальних ефектів в атмосфері, але й великомасштабних (~1000 км) і глобальних (~10000 км).

**Енергетика електричного поля.** Об'ємна щільність енергії електричного поля

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_0 (\Delta E)^2}{2}.$$

Для  $\Delta E = 1 \dots 10$  кВ/м та  $V \approx 10^{15} \text{ м}^3$  маємо  $\varepsilon_e = 4.5 \cdot 10^{-6} \dots 4.5 \cdot 10^{-4}$  Дж/м<sup>3</sup>, а  $E_e = \varepsilon_e V = 4.5 \cdot 10^9 \dots 4.5 \cdot 10^{11}$  Дж. Тоді для середнього значення  $\tau \approx 70$  хв отримуємо середню потужність  $P_e = E_e / \tau = 10^6 \dots 10^8$  Вт.

**Енергетика магнітного поля.** Збурення об'ємної щільності енергії магнітного поля дається таким співвідношенням:

$$\varepsilon_m = \frac{B_0 \Delta B}{\mu_0},$$

де  $B_0 \approx 5 \cdot 10^{-5}$  Тл — індукція незбуреного магнітного поля. При  $\Delta B = 10 \dots 100$  нТл маємо  $\varepsilon_m = 4 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-6}$  Дж/м<sup>3</sup>. Оскільки збурення маг-

нітного поля не є локальним ефектом, то об'єм  $V_m$  зі збуреним магнітним полем значно більший за об'єм атмосфери з холодним фронтом  $V \approx 10^{15} \text{ м}^3$ . Покладемо  $V_m \approx 10^{17} \text{ м}^3$ . Тоді  $E_m = 4 \cdot 10^{10} \dots 4 \cdot 10^{11}$  Дж. При  $\tau \approx 70$  хв маємо середню потужність  $P_m \approx 10^7 \dots 10^8$  Вт.

Як бачимо, енергетика фізичних процесів, що супроводжують рух погодного фронту, є значною. Часто її достатньо, щоб викликати великомасштабні та глобальні процеси у системі ЗАІМ та активізацію взаємодії підсистем у цій системі.

### ВЗАЄМОДІЯ ПІДСИСТЕМ У СИСТЕМІ ЗАІМ

Існує декілька каналів, по яких може здійснюватися взаємодія підсистем у системі ЗАІМ.

**Перепад атмосферного тиску.** Перепад тиску у приземній атмосфері, подібно до поршня, призводить до поширення з акустичною швидкістю вторинних збурень тиску, відносна амплітуда яких збільшується зі збільшенням висоти. Саме такі збурення тиску на іоносферних висотах призводять до магнітного ефекту.

**Перепад концентрації електронів** на висотах  $z \sim 100$  км, викликані перепадом тиску, викликає збурення питомої електропровідності на висотах динамо-області, генерації альвенівського імпульсу. Цей імпульс поширюється вздовж магнітної силової лінії до магнітосфери та радіаційного поясу Землі, викликаючи вторинні процеси, зокрема висипання високоенергійних електронів з радіаційного поясу. Поширюючись далі, імпульс досягає магнітоспряженої області, відбивається та повертається назад. Потім процес повторюється.

**Генерація інфразвуку та гравітаційних хвиль.** Добре відомо, що погодний фронт, підсилена ним турбулентність є генератором інфразвукових хвиль з періодом  $T_{is} < 250$  с і гравітаційних хвиль з періодом  $T_g > 300$  с. Ці хвилі, поширюючись до іоносфери, викликають там вторинні процеси. Як інфразвук, так і гравітаційні хвилі, поширюються у глобальних масштабах з незначним загасанням. Їхнє поширення супроводжується генерацією квазіперіодичних збурень електричного та магнітного полів.

**Генерація електромагнітного випромінювання.** Прихід погодних фронтів часто супроводжуєть-

ся грозами та зливами, а взимку — снігопадами. Блискавки є генераторами збурень електричного поля. При цьому напруженість електричного поля збільшується до 1 МВ/м. Крім квазістатичної електрики, генеруються електромагнітні хвилі переважно у діапазоні частот  $f = 10 \dots 100$  кГц. Середня блискавка має енергію порядку  $10^9$  Дж і потужність  $10^9$  Вт. У енергію електромагнітного випромінювання перетворюється доля  $\eta_e \approx 10^{-4} \dots 10^{-3}$  [62]. Це випромінювання каналується вздовж магнітної силової лінії та поширюється до магнітосфери та радіаційного поясу Землі, стимулюючи вторинні процеси.

**Збурення глобального електричного кола (ГЕК).** Збільшення на декілька порядків щільності атмосферного струму (див. табл. 1) призводить до перебудови процесів у ГЕК.

Таким чином, є всі підстави вважати, що погодні фронти призводять до великомасштабних і глобальних збурень. Така точка зору принципово відрізняється від альтернативної точки зору [13], згідно з якою атмосферні фронти, на відміну від землетрусів, вибухів вулканів та інших джерел, викликають лише локальні збурення.

## ГОЛОВНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз гістограм для перепаду атмосферного тиску, температури атмосфери, тривалості дії атмосферного фронту, швидкостей зміни тиску та температури, а також для варіацій атмосферного електричного поля, щільності атмосферного струму та магнітного поля показав, що під впливом фронту ці параметри змінюються в широких межах. Середні значення цих параметрів відповідно дорівнюють 145 Па, 6 °С, 70 хв, 2.4 Па/хв, 0.23 °С/хв, 3.2 кВ/м, 63 пА/м<sup>2</sup> та 20 нТл.

2. Аналіз кореляційних полів показав, що майже завжди кореляції між варіаціями різних

фізичних параметрів не було. Це означає, що впродовж руху атмосферного фронту єдиного керівного параметру немає.

3. Отримано просте аналітичне співвідношення для оцінки збурення напруженості електричного поля атмосферним фронтом. Оцінки дали значення 6...60 кВ/м. Під час гроз ця величина збільшується на порядок.

4. Показано, що у збурених умовах щільність атмосферного струму збільшується від  $10^{-12}$  до  $10^{-11} \dots 10^{-10}$  А/м<sup>2</sup>.

5. Розглянуто три механізми збільшення збурень індукції магнітного поля під впливом атмосферного фронту: збурення стороннього струму, електромагнітна індукція, магнітний ефект турбулентності. Всі ці параметри дають величину ефекту, що не перевищує 1 нТл. Тільки магнітний ефект іоносфери може пояснити збільшення варіацій магнітного поля до 10...70 нТл.

6. Оцінено енергетику полів: баричного ( $10^{16} \dots 10^{17}$  Дж,  $10^{13} \dots 10^{14}$  Вт), теплового ( $10^{18} \dots 10^{19}$  Дж,  $10^{15} \dots 10^{16}$  Вт), електричного ( $10^9 \dots 10^{11}$  Дж,  $10^6 \dots 10^8$  Вт) і магнітного ( $10^{10} \dots 10^{11}$  Дж,  $10^7 \dots 10^8$  Вт).

7. Обґрунтовано канали, по яких здійснюється взаємодія підсистем у системі ЗАІМ під впливом атмосферних фронтів: перепад атмосферного тиску, перепад концентрації електронів у іоносфері, генерація інфразвукових і гравітаційних хвиль, генерація блискавками електромагнітного випромінювання та збурення глобального електричного кола.

*Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476 та 0124U000461).*

## REFERENCES

1. Avdyushin S. I., Sedunov Yu. S., Borisenkov E. P., et al. eds. (1991). *Atmosphere. Handbook. (Reference Data and Models)*. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
2. Burmaka V. P., Domnin I. F., Uryadov V. P., Chernogor L. F. (2009). Variations in the Parameters of Scattered Signals and the Ionosphere Connected with Plasma Modification by High-Power Radio Waves. *Radiophys. Quantum Electron.*, **52**(11), 774—795. DOI:10.1007/s11141-010-9191-2
3. Gossard E. E., Hooke W. H. (1975). *Waves in the Atmosphere*. New York: Elsevier, 456 p.
4. Imyanitov I. M., Shifrin K. S. (1962). Present State of Research on Atmospheric Electricity. *Phys. Usp.*, **76**(4), 593—642. DOI:10.3367/UFNr.0076.196204a.0593
5. Soloviev S. P., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A. (2015). The synchronic disturbances of the acoustic and electric fields caused by artificial and natural sources. *Abstracts of 3rd All-Russian Seminar-Meeting on Trigger Effects in Geosystems*. Eds V. V. Adushkin, G. G. Kocheryan. Moscow: GEOS Publ., 71 [in Russian].
6. Soloviev S. P., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A. (2015). The synchronic disturbances of the acoustic and electric fields caused by artificial and natural sources. *Trigger Effects in Geosystems. Proc. 3rd All-Russia Meeting*. Eds V. V. Adushkin, G. G. Kocheryan. Moscow, Russia: GEOS Publ., 317—326 [in Russian].
7. Somsikov V. M. (1983). *Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere*. Alma-Ata, Kazakhstan: Nauka Publ. [in Russian].
8. Somsikov V. M. (1991). Waves in the Atmosphere Caused by the Solar Terminator: A Review. *Geomag. Aeron.*, **31**(1), 1—12 [in Russian].
9. Spivak A. A., Loktev D. N., Rybnov Yu. S., Soloviev S. P., Kharlamov V. A. (2016). Geophysical fields of a megalopolis. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, **52**(8), 841—852. DOI:10.1134/S0001433816080107
10. Spivak A. A., Rybnov Yu. S., Soloviev S. P., Kharlamov V. A. (2017). Acoustic and electric precursors of heavy thunderstorm under megalopolis conditions. *Geophys. processes and biosphere*, **16**(4), 81—91 [in Russian]. DOI:10.21455/GPB2017.4-7
11. Spivak A. A., Rybnov Yu. S., Kharlamov V. A. (2018). Variations in Geophysical Fields during Hurricanes and Squalls. *Dokl. Earth Sci.*, **480**, 788—791. DOI:10.1134/S1028334X18060193
12. Spivak A. A., Riabova S. A., Kharlamov V. A. (2019). The Electric Field in the Surface Atmosphere of the Megapolis of Moscow. *Geomagn. Aeron.*, **59**(4), 467—478. DOI:10.1134/S0016793219040169
13. Spivak A. A., Riabova S. A. (2021). Electrical and Geomagnetic Effects during Powerful Atmospheric Fronts. *Dynamic processes in geospheres*, **13**, 123—131. DOI:10.26006/22228535\_2021\_1\_123
14. Chalmers J. A. (1967). *Atmospheric electricity*. Oxford, New York: Pergamon Press.
15. Chekryzhov V. M., Svirkunov P. N., Kozlov S. V. (2019). The Influence of Cyclonic Activity on the Geomagnetic Field Disturbance. *Geomagn. Aeron.*, **59**(1), 53—61. DOI:10.1134/S0016793219010031
16. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Engine Burn: Monograph*. Kharkiv, Ukraine: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [in Russian].
17. Chernogor L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [in Russian].
18. Chernogor L. F. (2014). *Physics of High-Power Radio Emissions in Geospace: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [in Russian].
19. Chernogor L. F., Garmash K. P. (2018). Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. *Geomagn. Aeron.*, **58**(5), 673—685. DOI:10.1134/S0016793218050031
20. Chernogor L. F. (2019). Physical Effects of the Lipetsk Meteoroid. Parts 1—3. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, Part 1, **35**(4), 174—188. DOI:10.3103/S0884591319040020, Part 2, **35**(5), 217—230. DOI:10.3103/S0884591319050027, Part 3, **35**(6), 271—285. DOI:10.3103/S0884591319060023
21. Chernogor L. F. (2021). Physics of geospace storms. *Space Sci. Technol.*, **27**(1), 3—77. DOI:10.15407/knit2021.01.003
22. Chernogor L. F. (2023). A Tropical Cyclone or Typhoon as an Element of the Earth—Atmosphere—Ionosphere—Magnetosphere System: Theory, Simulations, and Observations. *Remote Sensing*, **15**(20). id:4919. DOI:10.3390/rs15204919
23. Yampolski Yu. M., Zalizovskii A. V., Litvinenko L. M., Lizunov G. V., Groves K., Moldwin M. (2004). Magnetic Field Variations in Antarctica and the Conjugate Region (New England) Stimulated by Cyclone Activity. *Radio Phys. Radio Astron.*, **9**(2), 130—152 [in Russian].
24. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. (2022). The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098827. DOI:10.1029/2022GL098827
25. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. (1977). Concorde Sonic Booms as an Atmospheric Probe. *Science*, **197**(4298), 47—49. DOI:10.1126/science.197.4298.47
26. Che I.-Y., Park J., Kim I., Kim T. S., Lee H.-I. (2014). Infrasound signals from the underground nuclear explosions of North Korea. *Geophys. J. Int.*, **198**(1), 495—503. DOI:10.1093/gji/ggu150



27. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2014). *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.
28. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Y., Luo Y. (2021). Supertyphoon Hagibis action in the ionosphere on 6–13 October 2019: Results from multi-frequency multiple path sounding at oblique incidence. *Adv. Space Res.*, **67**(8), 2439–2469. DOI:10.1016/j.asr.2021.01.038
29. Chou M.-Y., Lin C. C. H., Yue J., Chang L. C., Tsai H.-F., Chen C.-H. (2017). Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016). *Geophys. Res. Lett.*, **44**(15), 7569–7577. DOI:10.1002/2017GL073961
30. Chou M.-Y., Lin C. C. H., Shen M.-H., Yue J., Huba J. D., Chen C.-H. (2018). Ionospheric Disturbances Triggered by SpaceX Falcon Heavy. *Geophys. Res. Lett.*, **45**(13), 6334–6342. DOI:10.1029/2018GL078088
31. Chou M.-Y., Shen M.-H., Lin C. C. H., Yue J., Chen C.-H., Liu J.-Y., Lin J.-T. (2018). Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the Launch of FORMOSAT-5 Satellite. *Space Weather*, **16**(2), 172–184. DOI:10.1002/2017SW001738
32. Ding F., Wan W., Mao T., Wang M., Ning B., Zhao B., Xiong, B. (2014). Ionospheric response to the shock and acoustic waves excited by the launch of the Shenzhou 10 spacecraft. *Geophys. Res. Lett.*, **41**(10), 3351–3358. DOI:10.1002/2014GL060107
33. Donn W. L., Ewing M. (1962). Atmospheric waves from nuclear explosions. *J. Geophys. Res.*, **67**(5), 1855–1866. DOI:10.1029/JZ067i005p01855
34. Donn W. L., Ewing M. (1962). Atmospheric Waves from Nuclear Explosions — Part II: The Soviet Test of 30 October 1961. *J. Atmos. Sci.*, **19**(3), 264–273. DOI:10.1175/1520-0469(1962)019%3C0264:AWFNEI%3E2.0.CO;2
35. Donn W. L. (1978). Exploring the Atmosphere with Sonic Booms: Or How I Learned to Love the Concorde. *Amer. Sci.*, **66**(6), 724–733.
36. Donn W. L., Rind D. (1979). Monitoring Stratospheric Winds with Concorde-Generated Infrasound. *J. Appl. Meteor.*, **18**(7), 945–952. DOI:10.1175/1520-0450(1979)018%3C0945:MSWWCG%3E2.0.CO;2
37. Farges T., Blanc E. (2010). Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **115**(A6), A00E31. DOI:10.1029/2009JA014700
38. Farkas E. (1962). Transit of Pressure Waves through New Zealand from the Soviet 50 Megaton Bomb Explosion. *Nature*, **193**(4817), 765–766. DOI:10.1038/193765a0
39. Garcés M., Caron P., Hetzer C., Le Pichon A., Bass H., Drob D., Bhattacharyya J. (2005). Deep infrasound radiated by the Sumatra earthquake and tsunami. *Eos*, **86**(35), 317–320. DOI:10.1029/2005EO350002
40. Gardiner G. W. (1962). Effects of the nuclear explosion of 30 October 1961. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **24**(11), 990–993. DOI:10.1016/0021-9169(62)90146-0
41. Gibbons S. J., Ringdal F., Kv rna T. (2007). Joint seismic-infrasound processing of recordings from a repeating source of atmospheric explosions. *J. Acoust. Soc. Amer.*, **122**(5), EL158. DOI:10.1121/1.2784533
42. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng, Yu. (2019). Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018. *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.*, **186**, 88–103. DOI:10.1016/j.jastp.2019.02.003
43. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. (2020). Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018. *Radio Sci.*, **55**(2), e2019RS006866. DOI: 10.1029/2019RS006866
44. *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. (2019). Eds A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. Switzerland: Springer Int. Publ. 1167 p. DOI:10.1007/978-3-319-75140-5
45. Kakinami Y., Yamamoto M., Chen C.-H., Watanabe S., Lin C., Liu J.-Y., Habu, H., (2013). Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **118**(8), 5184–5189. DOI:10.1002/jgra.50508
46. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., epic J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Belikov I. B., Gubanova D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. (2022). Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami. *Pure and Appl. Geophys.*, **179**, 1533–1548. DOI:10.1007/s00024-022-03046-4
47. Le Pichon A., Herry P., Mialle P., Vergoz J., Brachet N., Garc s M., Drob D., Ceranna L. (2005). Infrasound associated with 2004–2005 large Sumatra earthquakes and tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(19), L19802. DOI:10.1029/2005GL023893
48. Le Pichon A., Pilger C., Ceranna L., Marchetti E., Lacanna G., Souty V., Vergoz J., Listowski C., Hernandez B., Mazet-Roux G., Dupont A., Hereil P. (2021). Using dense seismo-acoustic network to provide timely warning of the 2019 paroxysmal Stromboli eruptions. *Scientific reports*, **11**, id:14464. DOI:10.1038/s41598-021-93942-x

49. Li Y. Q., Jacobson A. R., Carlos R. C., Massey R. S., Taranenko Y. N., Wu G. (1994). The blast wave of the Shuttle plume at ionospheric heights. *Geophys. Res. Lett.*, **21**(24), 2737–2740. DOI:10.1029/94GL02548
50. Lin C. H., Lin J. T., Chen C. H., Liu J. Y., Sun Y. Y., Kakinami Y., Matsumura M., Chen W. H., Liu H., Rau R. J. (2014). Ionospheric shock waves triggered by rockets. *Ann. Geophys.* **32**(9), 1145–1152. DOI:10.5194/angeo-32-1145-2014
51. Lin C. C. H., Shen M.-H., Chou M.-Y., Chen C.-H., Yue J., Chen P.-C., Matsumura M. (2017). Concentric traveling ionospheric disturbances triggered by the launch of a SpaceX Falcon 9 rocket. *Geophys. Res. Lett.*, **44**(15), 7578–7586. DOI:10.1002/2017GL074192
52. Luo Y., Chernogor L. F. (2020). Electromagnetic effects of acoustic and atmospheric gravity waves in the near-earth atmosphere. *Radio Phys. and Radio Astron.*, **25**(4), 290–307. DOI:10.15407/rpra25.04.290
53. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Yu. (2021). Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August – 2 September, 2019 geospace storm. *Annales Geophysicae*, **39**(4). DOI:10.5194/angeo-39-657-2021
54. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P. (2022). Magneto-Ionospheric Effects of the Geospace Storm of March 21–23, 2017. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **38**(4), 210–229.
55. Mccrory R. A. (1967). Atmospheric Pressure Waves from Nuclear Explosions. *J. Atmos. Sci.*, **24**(4), 443–447. DOI:10.1175/1520-0469(1967)024%3C0443:APWFNE%3E2.0.CO;2
56. Mutschlechner J. P., Whitaker R. W. (2005). Infrasound from earthquakes. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **110**(D1). D01108. DOI:10.1029/2004JD005067
57. Nishioka M., Tsugawa T., Kubota M., Ishii M. (2013). Concentric waves and short-period oscillations observed in the ionosphere after the 2013 Moore EF5 tornado. *Geophys. Res. Lett.* **40**(21), 5581–5586. DOI:10.1002/2013GL057963
58. Panasenko S. V., Otsuka Y., Van de Kamp M., Chernogor L. F., Shinbori A., Tsugawa T., Nishioka M. (2019). Observation and characterization of traveling ionospheric disturbances induced by solar eclipse of 20 March 2015 using incoherent scatter radars and GPS networks. *J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys.*, **191**, 105051. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.05.015
59. Rose G., Oksman J., Kataja E. (1961). Round-the-World Sound Waves produced by the Nuclear Explosion on October 30, 1961, and their Effect on the Ionosphere at Sodankyl. *Nature*, **192**(4808), 1173–1174. DOI:10.1038/1921173a0
60. Row R. V. (1967). Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake. *J. Geophys. Res.*, **72**(5), 1599–1610. DOI:10.1029/JZ072i005p01599
61. *The Encyclopedia of Volcanoes* (2015). (2<sup>th</sup> ed.). Academic Press, 1421 p. DOI:10.1016/B978-0-12-385938-9.00063-8
62. Watt A. D. (1967). International series of monographs in electromagnetic waves. New York: Pergamon, 724 p.
63. Wexler H., Hass W. A. (1962). Global atmospheric pressure effects of the October 30, 1961, explosion. *J. Geophys. Res.*, **67**(10), 3875–3887. DOI:10.1029/JZ067i010p03875
64. Yuen D. A., Scruggs M. A., Spera F. J., Zheng Y., Hu H., McNutt S. R., Thompson G., Mandli K., Keller B. R., Wei S. S., Peng Z., Zhou Z., Mulargia F., Tanioka Y. (2022). Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano. *Earthquake Res. Adv.*, **2**(3), 100134. DOI:10.1016/j.eqrea.2022.100134
65. Zheng Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Luo Y. (2022). Disturbances in the ionosphere and distortion of radio wave characteristics that accompanied the super typhoon Lekima event of 4–12 August 2019. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **127**, e2022JA030553. DOI:10.1029/2022JA030553

Стаття надійшла до редакції 13.10.2023

Після доопрацювання 31.01.2024

Прийнято до друку 28.04.2024

Received 13.10.2023

Revised 31.01.2024

Accepted 28.04.2024

L. F. Chernogor, Head of the Department of Space Radiophysics, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor  
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com  
V. N. Karazin Kharkiv National University  
4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

#### STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE GEOPHYSICAL FIELDS DISTURBED BY WEATHER FRONTS

The Earth (internal spheres) — atmosphere — ionosphere — magnetosphere (EAIM) formation is a single integrated system with direct and reverse, positive and negative coupling, as well as with their combination. The high-energy sources of natural and anthropogenic origins activate coupling between the components of the EAIM. The effects that the sources of various physical nature have on the EAIM system have been studied quite well, while the influence of the weather fronts and other powerful atmospheric sources on the EAIM system and its components has been studied only partly. The scientific objective of this study is to conduct a statistical analysis of variations in the basic parameters of the geophysical fields that accompany the movement of atmospheric fronts. The histograms have been constructed that show the atmospheric pressure difference, atmospheric temperature difference, duration of the action of the atmospheric front, and the rate of change in the pressure and temperature, as well as the histograms showing the distribution of variations in the atmospheric electric field, the atmospheric current density, and in the magnetic field. The analysis undertaken has shown that these parameters exhibit variations within a broad range of values. The mean values of these parameters are estimated to be 145 Pa, 6 °C, 70 min, 2.4 Pa/min, 0.23 °C/min, 3.2 kV/m, 63 nA/m<sup>2</sup>, and 20 nT, respectively. The analysis of the scatter diagrams shows that the correlation between the variation in physical parameters is almost always absent. This means that a single governing parameter along the path of the atmospheric front does not exist. A simplified analytical relation has been derived to estimate the perturbation in the electric field strength caused by the atmospheric front, which yields ~6–60 kV/m values that increase by an order of magnitude during thunderstorms. Under disturbed conditions, the atmospheric current density is shown to increase from 10<sup>-12</sup> A/m<sup>2</sup> to 10<sup>-11</sup>–10<sup>-10</sup> A/m<sup>2</sup>. The following three mechanisms of an increase in the magnetic induction under the influence of the atmospheric front are considered: the disturbances of the external current density, electromagnetic induction, and the magnetic effect of turbulence. All these mechanisms yield the value of the effect less than ~1 nT. Only the magnetic effect of the ionosphere can explain an increase of 10–70 nT in the magnetic field variations. The energetics of the pressure, temperature, electric, and magnetic fields has been estimated to be (~10<sup>16</sup>–10<sup>17</sup> J, ~10<sup>13</sup>–10<sup>14</sup> W), (~10<sup>18</sup>–10<sup>19</sup> J, 10<sup>15</sup>–10<sup>16</sup> W), (~10<sup>9</sup>–10<sup>11</sup> J, ~10<sup>6</sup>–10<sup>8</sup> W), (~10<sup>10</sup>–10<sup>11</sup> J, 10<sup>7</sup>–10<sup>8</sup> W), respectively. The following channels have been validated through which the components of the EAIM system couple under the action of atmospheric fronts: atmospheric pressure differences, ionospheric electron density differences, the generation of infrasound and gravity waves, the generation of electromagnetic waves by lightning flashes, and the perturbations in the global electric circuit.

**Keywords:** weather front, atmosphere at the air-earth boundary, EAIM system, geophysical fields, statistical characteristics, scatter diagram, histogram.