

УДК 550.383

DOI: <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322571>

Діагностика джерел геомагнітних варіацій супербури 10—11 жовтня 2024 р. за даними українських геомагнітних обсерваторій

Т.П. Сумарук, 2025

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Викладено результати аналізу магнітосферно-іоносферних джерел геомагнітних варіацій для супербури 10—11 жовтня 2024 р. Ця подія сталася у максимумі 25-го циклу сонячної активності Вольфа та на початку 100-річного циклу геомагнітної активності. У цей період відбуватимуться супербури, подібні до бур жовтня—листопада 2003 р.

Для аналізу джерел варіацій використано 1-хвилинні значення українських геомагнітних обсерваторій. Ідентифікацію джерел геомагнітних варіацій проведено за даними стосовно індексів геомагнітної активності та модельними розрахунками. Діагностовано вплив магнітосферних джерел та авроральних іоносферних електроструменів у варіацію середніх широт. Обчислено величину внеску кожного джерела у варіацію геомагнітного поля.

Ключові слова: сонячна та геомагнітна активність, сонячний цикл, магнітосферно-іоносферна система струмів.

Citation: Sumaruk, T.P. (2025). Diagnostics of the sources of geomagnetic variations for the superstorm of October 10—11, 2024 according to the Ukrainian geomagnetic observatories' data. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(2), 322—326. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i2.322571>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Вступ. Сонячні спалахи, що виникли в регіоні сонячних плям 3842, зокрема спалах класу X1.0 (пік якого досяг о 16:59 UTC 7 жовтня) і спалах класу X1.8 (пік о 21:56 UTC 8 жовтня), спричинили асиметричні викиди корональної маси повного гало. Ці явища зумовили велику геомагнітну бурю 10—11 жовтня 2024 р. з раптовим початком (SSC) ($D_{st} = -354$ нТл і $K_p = 8+$). (<https://nssdc.gsfc.nasa.gov>).

Об'єкти і методи дослідження. Об'єктом дослідження є магнітосферно-іоносферна система струмів та інші джерела геомагнітних варіацій. Діагностика джерел геомагнітних варіацій проводилась багатьма авторами [Laba, 2010; Sumaruk, 2024; Grandin, 2024], оскільки кожна подія в геомагнітному полі характеризується унікальним впливом цих джерел і має свої особливості. Супербура 10—11 жовтня 2024 р. трапилась у період, наближений до максимуму 25-го 11-річного циклу Вольфа. На нашу думку, вона не була найпотужнішою в цьому циклі, оскільки за прогнозами [Sumaruk, 2023] максимум циклу очікується у 2025—2026 роках. Відомо, що супербурі зазвичай відбуваються під час максимуму циклу або на початку його спаду, як це спостерігалось, наприклад, у випадку супербур 2003—2004 рр. Однією з причин виникнення супербур є можливий збіг напрямків великомасштабного магнітного поля Сонця та магнітного поля Землі в непарних сонячних циклах. Інші фактори включають збільшення частоти рекурентних геомагнітних збурень, або початок 100-річного циклу [Sumaruk, 2023], що також може істотно впливати на геомагнітну активність.

Для діагностики джерел магнітосферно-іоносферної системи струмів використано 1-хвилинні дані горизонтальної компо-

ненти $H(X)$ вектора індукції магнітного поля Землі (**B**) українських обсерваторій сітки INTERMAGNET (дані обсерваторій подано в табл. 1).

Як відомо, у горизонтальній компоненті найкраще відображаються варіації, спричинені зовнішніми джерелами. Величину нерегулярних варіацій поля можна визначити як

$$\Delta = H(X) - S_q, \quad (1)$$

де $H(X)$ — значення горизонтальної (північної) компоненти геомагнітного поля; S_q — спокійна сонячно-добова варіація.

Нерегулярну варіацію геомагнітного поля Δ , спричинену магнітосферно-іоносферною системою струмів, виражено рівнянням

$$\Delta = DR + DRP + DT + DCF + DP, \quad (2)$$

де DR — варіація від кільцевого магнітосферного струму; DRP — варіація від частинного кільцевого струму; DT — варіація від струмів у хвості магнітосфери; DCF — варіація від струмів на магнітопаузі; DP — варіація від іоносферних струмів у зоні полярних сьйв та їх зворотних струмів розтікання в середні широти.

Магнітосферні джерела (DR , DRP , DT) добре відображає D_{st} -індекс магнітної активності. Дані щодо D_{st} взято із сайту (<http://swdccb.kugi.kyoto-u.ac.jp>). У першому наближенні величину варіації від магнітосферних джерел (Δ_m) можна обчислити за формулою

$$\Delta_m = D_{st} \cos \Phi, \quad (3)$$

де Φ — геомагнітна широта обсерваторії.

Величину варіації від струмів на магнітопаузі DCF обчислено за модельними розрахунками. У цій роботі використано модель Міда. Внесок у північну компоненту поля виражено рівнянням

$$DCF_X = 25150 \frac{1}{r_b^3} \cos \varphi + 21000 \frac{1}{r_b^4} \cos t (2 \sin^2 \varphi - 1), \quad (4)$$

де величина r_b — геометрична віддаль до підсонячної точки магнітосфери; t — місцевий час, який відраховується від північного меридіана; φ — геомагнітна широта.

Таблиця 1. Обсерваторій сітки INTERMAGNET

IAGA code	Name	Geomag. lat. [deg]	Geomag. long. [deg]	Geogr. lat. [deg]	Geogr. long. [deg]
ODE	Odesa	43,720	112,430	46,783	30,883
LVV	L'viv	47,84	106,8	49,900	23,750

Обчислено варіації DCF_X для досліджуваних обсерваторій (табл. 2).

Таблиця 2. Варіація, спричинена струмами на магнітопаузі (DCF_X)

DCF_{ODE} , нТл		DCF_{LVV} , нТл	
max	min	max	min
62,6	10,5	57,4	9,7

Варіацію від іоносферних струмів у зоні полярних сьйв та їх зворотних струмів у середні широти (DP) описують за допомогою індексів авроральної активності AE , AU , AL . Як відомо, під час дуже великих магнітних бур ($D_{st} \leq -150$ нТл) фокуси авроральних іоносферних струмів зміщуються до середніх широт. Під час початку магнітної бурі середньоширотні обсерваторії перебувають під дією зворотних іоносферних струмів. При зростанні D_{st} обсерваторії потрапляють під пряму дію східного (AU) чи західного (AL) електроструменю залежно від місцевого часу. Вислано варіацію DP :

$$DP = \Delta - \Delta_m - DCF_X. \tag{4}$$

Результати та їх обговорення. На рис. 1 і 2 показано зміни $X-S_q$ (чорна крива) та $D_{st} \cos \Phi$ (червона крива (верхня панель) і зміни DCF_X та DP -варіацій (нижня панель) для обсерваторій LVV та ODE. Ідентифікація іоносферних джерел показана індексами: AL — варіація від західного аврорального електроструменя, AU — від східного аврорального електроструменя. Напрявлена вгору стрілка показує пряму дію електроструменя, направлена вниз — зворотну. О 15 год 50 хв UT 10 жовтня 2024 р. DP -варіація — додатна, пов'язана з SSC бурі і становить: 92 нТл (ODE), 101 нТл (LVV). О 18 год UT різко посилюється західний авроральний електрострум, розвивається кільцевий магнітосферний струм, збільшується AL -індекс. D_{st} -варіація для досліджуваних обсерваторій становить: $-240,6$ нТл (ODE), $-223,5$ нТл (LVV). Збільшення AL -індексу засвідчує, що посилились зворотні струми західного іоносферного електроструменя, на обсерваторіях реєстрували додатні значен-

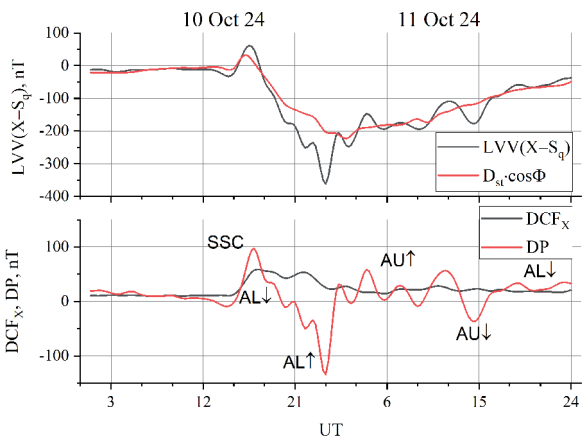


Рис. 1. Зміни $X-S_q$ (чорна крива) та $D_{st} \cos \Phi$ (червона крива) (верхня панель) і зміни DCF_X та DP -варіацій (нижня панель) на геомагнітній обсерваторії «Львів».

Fig. 1. Variations of $X-S_q$ (black curve) and $D_{st} \cos \Phi$ (red curve) (top panel) and the variations of DCF_X and DP variations (bottom panel) for the L'viv geomagnetic observatory.

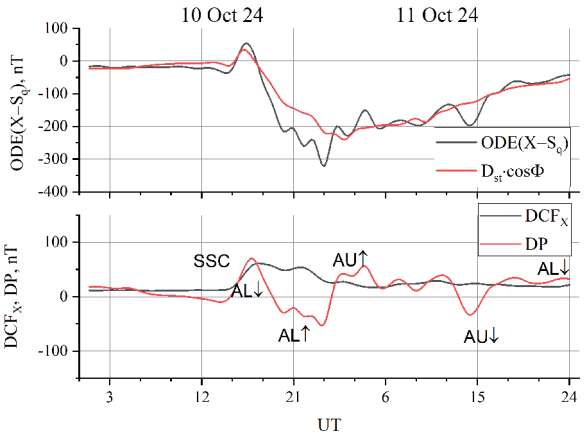


Рис. 2. Зміни $X-S_q$ (чорна крива) та $D_{st} \cos \Phi$ (червона крива) (верхня панель) і зміни DCF_X та DP -варіацій (нижня панель) на геомагнітній обсерваторії «Одеса».

Fig. 2. Variations of $X-S_q$ (black curve) and $D_{st} \cos \Phi$ (red curve) (top panel) and the variations of DCF_X and DP variations (bottom panel) for the Odesa geomagnetic observatory.

ня DP 17—18 год UT 10 жовтня. Подальше підсилення кільцевого струму обумовило переміщення авроральних електроструменів у середні широти, 22—24 год UT спостерігались від'ємні суббурі, генеровані прямою дією західного аврорального електроструменя. Максимальні значення DP постерігались ~ 24 год UT (-77 нТл (ODE), -133 нТл (LVV)), у той час значення індек-

сів AE , AU , AL різко зменшувались. Таке зменшення пов'язане із зсувом західного електроструменя в субавроральні широти ($D_{st} \leq -150$ нТл). Ланцюжок обсерваторій, за даними яких вираховують індекси, не реєструє максимуму струму, оскільки електрострумів перебуває у нижчих широтах. Протягом 2—13 год UT 11 жовтня спостерігалися додатні суббури, генеровані прямою дією східного аврорального електроструменя. Надалі величина кільцевого магнітосферного струму зменшується, авроральні електрострумені переміщуються на північ і магнітометр реєструє додатні та від'ємні бухти, спричинені зворотними струмами розтікання східного та західного електрострумів.

Висновки. Показано, що під час супербури 10—11 жовтня 2024 р. на досліджуваних обсерваторіях магнітосферні джерела варіацій, зокрема кільцевий магнітосферний струм, струм хвоста магнітосфери та

струм на магнітопаузі, роблять найбільший внесок у варіацію поля — близько 67 %. Іоносферні авроральні струми, а також їхні зворотні струми спричиняють варіацію поля у середніх широтах, що не перевищує ~33 %.

Геомагнітні варіації в середніх широтах можна розділити на складові частини відносно зовнішніх джерел, які їх генерують. Необхідно при цьому враховувати і внесок внутрішніх джерел. Зокрема, середній внесок авроральних струмів та їх зворотних струмів у варіації поля середніх широт різний для різних обсерваторій залежить від широти обсерваторії, проте не перевищує ~33 %. До цієї варіації також входить величина збурення, спричинена електричною неоднорідністю земної кори та іншими внутрішніми джерелами. Однак для оцінювання потенційного впливу внутрішніх джерел потрібно проводити додаткові дослідження.

Список літератури

Сумарук Т.П., Реда Я. Діагностика джерел геомагнітних варіацій для супербури 10—13 травня 2024 р. *Одеські астрономічні публікації*. 2024. Т. 37. С. 121—124. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2024.37.313647>.

Сумарук Т.П., Сумарук П.В., Неска А. Сонячна та геомагнітна активність у 19—25 циклах. *Одеські астрономічні публікації*. 2023. Т. 36. С. 188—192. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2023.36.288658>.

Grandin, M., Bruus, E., Ledvina, V.E., Partamies, N., Barthelemy, M., Martinis, C., Dayton-Oxland, R., Gallardo-Lacourt, B., Nishimura, Y., Herlingshaw, K., Thomas, N., Karvinen, E., Lach, D., Spijkers, M., & Bergstrand, C. (2024). The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. *EGU sphere [preprint]*. <https://doi.org/10.5194/egu-sphere-2024-2174>.

Diagnostics of the sources of geomagnetic variations for the superstorm of October 10—11, 2024 according to the Ukrainian geomagnetic observatories' data

T.P. Sumaruk, 2025

S. Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The paper analyses magnetospheric-ionospheric sources of geomagnetic variations for the superstorm of October 10—11, 2024. This event occurred at the maximum of the 25th Wolf cycle and the beginning of a 100-year cycle of geomagnetic activity. During this period, superstorms similar to the storms of October—November 2003 will occur.

To analyze the sources of variations, 1-minute values of Ukrainian geomagnetic observatories were used. The sources of geomagnetic variations were identified based on the

indices of geomagnetic activity and model calculations. The influence of magnetospheric sources and auroral ionospheric electric currents in the middle latitudes variations was diagnosed. The contribution of each sources calculated.

Key words: Solar and geomagnetic activity, solar cycle, magnetospheric-ionospheric current system.

References

- Sumaruk, T.P., & Reda, J. (2024). Diagnostics of the sources of geomagnetic variations for the superstorm of may 10—13, 2024. *Odessa Astronomical Publications*, 37, 121—124. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2024.37.313647> (in Ukrainian).
- Sumaruk, T.P., Sumaruk, P.V., & Neska, A. (2023). Solar and geomagnetic activity in 19—25 cycles. *Odessa Astronomical Publications*, 36, 188—192. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2023.36.288658> (in Ukrainian).
- Grandin, M., Bruus, E., Ledvina, V.E., Partamies, N., Barthelemy, M., Martinis, C., Dayton-Oxland, R., Gallardo-Lacourt, B., Nishimura, Y., Herlingshaw, K., Thomas, N., Karvinen, E., Lach, D., Spijkers, M., & Bergstrand, C. (2024). The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. *EGU sphere [preprint]*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2174>.