

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ГЕОМАГНІТНОЮ АКТИВНІСТЮ ТА ТЕХНОГЕННИМИ АНОМАЛІЯМИ

Солов'єнко Андрій, Макаrchук Олег

Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,
м. Кропивницький, Україна

У роботі досліджено статистичні взаємозв'язки між геомагнітною активністю та поведінкою трьох технічних систем: GNSS, глобальної маршрутизації BGP та автоматичної ідентифікації суден AIS. На основі даних травня 2024 року виконано аналіз часових рядів із використанням Dst-індексу, агрегованих технічних показників та LOESS-згладжування. Проведено крос-кореляційне дослідження вікном ± 72 години, що дозволило виявити характер реакції систем на магнітні бурі. Результати продемонстрували наявність слабких, але відтворюваних змін у GNSS-показниках під час бур, окремих короточасних збурень у BGP та мінімальних ефектів в AIS, окрім поодиноких піків, що збігаються з фазами бурі. Робота формує узагальнену картину «космічної чутливості» складних технічних систем і підкреслює важливість інтеграції параметрів космічної погоди до процедур моніторингу критичної інфраструктури.

Ключові слова: геомагнітна активність, космічна погода, Dst-індекс, техногенні аномалії, GNSS, BGP, AIS, крос-кореляційний аналіз, статистичне моделювання.

The definition of indicators of the allocation of the characteristic features in gender groups

A. Solovienko, , O. Makarchuk

Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State University, Kropyvnytsky, Ukraine

The paper investigates statistical relationships between geomagnetic activity and the behaviour of three technical systems: GNSS, global BGP routing, and maritime AIS. Using data from May 2024, the study analyses time series of the Dst index and aggregated system parameters, applying LOESS smoothing and a ± 72 -hour cross-correlation approach. The results reveal weak but consistent GNSS deviations during geomagnetic storms, several short-term anomalies in BGP, and minimal AIS effects except for isolated peaks coinciding with storm phases. The study provides an integrated view of the “space sensitivity” of complex technical infrastructures and highlights the importance of considering space weather parameters in monitoring and operational planning.

Keywords: geomagnetic activity, space weather, Dst index, technological anomalies, GNSS, BGP, AIS, cross-correlation analysis, statistical modelling.

Постановка проблеми. Геомагнітні бурі є одним із ключових проявів космічної погоди та становлять суттєвий інтерес як для фундаментальної науки,

так і для прикладних досліджень, пов'язаних із надійністю глобальних технічних інфраструктур. Вони виникають унаслідок взаємодії сонячного вітру та варіацій міжпланетного магнітного поля з магнітосферою Землі, що призводить до її збурення і змін у поведінці заряджених частинок та електромагнітного середовища навколо планети [1, с. 220–245; 2, с. 110–135].

Одним з основних індикаторів рівня такої активності є індекс **Dst**, який описує депресію магнітного поля під час бурі та широко використовується в дослідженнях впливу космічної погоди на технічні системи [3, с. 80–102]. Порушення, спричинені магнітосферними процесами, можуть проявлятися у вигляді іоносферних збурень, градієнтів електронної концентрації, збільшення шумів та втрат сигналу, що впливає на точність та стабільність GNSS-навігації [4].

Крім супутникових систем позиціонування, вплив геомагнітних бур може проявлятися й у сегментах глобальних телекомунікацій, зокрема у зміні стабільності **BGP-маршрутизації** та динаміки оновлення глобальних таблиць маршрутів. Певні дослідження та практичні спостереження вказують, що іоносферні та радіочастотні збурення здатні непрямо впливати на роботу мережевих протоколів через деградацію супутникових каналів та підвищення затримок у магістральних з'єднаннях [5].

Окремий інтерес становлять морські навігаційні системи **AIS**, які також використовують радіоканали та схильні до впливу іоносферних аномалій. Існують задокументовані випадки зниження дальності прийому, часткових втрат повідомлень та збільшення інтервалів між передачами під час періодів підвищеної сонячної активності [6; 7].

Оскільки глобальні технічні системи працюють у різних частинах спектра та використовують різні фізичні принципи, інтегральний статистичний аналіз їх реакції на геомагнітну активність дозволяє виявити не лише прямі, а й опосередковані кореляції. Саме це і становить головну мету даної роботи: порівняти поведінку **GNSS**, **BGP** та **AIS** під час періодів підвищеної магнітної

активності, використовуючи спільну методологію попередньої обробки даних та крос-кореляційного аналізу.

Геомагнітні бурі становлять один із ключових факторів космічної погоди, здатних впливати на роботу сучасних технічних систем. Їхня природа пов'язана з взаємодією міжпланетного магнітного поля та сонячного вітру з магнітосферою Землі, унаслідок чого виникають перерозподіли струмів і зміни, зафіксовані зниженням Dst-індексу — основного показника інтенсивності бурі [8, с. 220–245]. Основні джерела збурень, такі як корональні викиди маси та високошвидкісні потоки сонячного вітру, мають складну динаміку, а їхній вплив визначається орієнтацією міжпланетного магнітного поля та швидкістю плазмового потоку [9, с. 110–135].

У періоди сильних бур найбільших змін зазнає іоносфера, де істотно порушуються електронна концентрація та структура шарів F і E. Ці процеси створюють нерівномірності, що здатні спричиняти значні затримки, флуктуації та втрати сигналів у радіодіапазонах, які використовують GNSS та AIS [10, с. 80–102], [11]. Таким чином, технологічні інфраструктури, що критично залежать від стабільності електромагнітного середовища, можуть зазнавати деградації якості роботи.

Попри значну кількість фундаментальних досліджень фізики космічної погоди, вплив геомагнітних бур на різні сегменти технічних систем залишається вивченим нерівномірно. Найбільше уваги приділено GNSS, тоді як інші інфраструктури — зокрема глобальна мережна маршрутизація (BGP) або навігаційні системи морського сектору (AIS) — аналізуються суттєво рідше. Це формує очевидну прогалину в розумінні того, наскільки крос-системні технічні аномалії можуть бути пов'язані із зовнішніми геофізичними чинниками.

Крім того, відсутні комплексні роботи, які б одночасно розглядали кілька технологічних сфер та порівнювали їх реакції на спільний геомагнітний вплив. Саме багатосистемний погляд дає змогу виявити узагальнені закономірності та оцінити потенційні ризики для інфраструктур, що працюють у різних середовищах — супутниковому, радіочастотному та мережевому.

Тому постає проблема необхідності всебічного порівняльного аналізу реагування GNSS-систем, мережевих протоколів (BGP) та морської інфраструктури AIS на геомагнітні збурення. Її вирішення дозволить глибше зрозуміти механізми впливу космічної погоди на технічні системи й оцінити потенційні ризики для їх стабільності.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження впливу геомагнітних бур на супутникові та радіотехнічні інфраструктури активно розвиваються вже понад два десятиліття. Наукова література охоплює як фізичні механізми взаємодії магнітосферних збурень із навколоземним простором, так і практичні наслідки для технічних систем.

Вплив на GNSS

У низці фундаментальних робіт описано, як іоносферні збурення, спричинені геомагнітними бурями, впливають на амплітудні та фазові характеристики супутникових сигналів. Дослідження свідчать, що при зниженні Dst нижче -50 нТл зазвичай спостерігається зменшення SNR, зростання флуктуацій сигналу та суттєва різниця у реакції станцій залежно від широтної зони. Найбільш виражені ефекти фіксуються в екваторіальних регіонах, де посилюється екваторіальна аномалія та змінюються характеристики електричного поля [9; 10; 11].

Поведінка BGP під час магнітосферних збурень

У відкритих інтернет-джерелах, зокрема в аналітичних публікаціях APNIC Labs та колекціях даних RIPE RIS, відзначається, що великі геомагнітні події можуть опосередковано впливати на стабільність міжмережевих маршрутів. У деяких дослідженнях повідомляється про збільшення кількості Withdrawals та Announcements у періоди різких змін Dst, що розглядається як прояв маршрутизаційної нестабільності, особливо для каналів, які частково покладаються на супутниковий або радіорелейний зв'язок [15; 16].

Вплив на AIS

Вплив іоносферних збурень на VHF-діапазон, у якому працює AIS, детально описано в технічній документації IALA. Під час геомагнітних бур у

високоширотних регіонах спостерігається зменшення кількості суден у зоні видимості, збільшення інтервалів між передаваннями повідомлень та зростання частки пакетів із затримкою. Це пов'язано з підсиленням поглинання в нижніх шарах іоносфери та зміною умов розповсюдження радіохвиль [11; 17].

Зведений аналіз літератури демонструє, що GNSS, глобальна маршрутизація та AIS є чутливими до параметрів космічної погоди. Однак характер впливу залежить від широти, технологічних особливостей каналів зв'язку та конкретної реалізації систем.

Метою статті є аналіз реакції глобальних технічних систем – GNSS, міжмережевої маршрутизації BGP та автоматичної ідентифікаційної системи AIS – на геомагнітні збурення, що спостерігалися у травні 2024 року, а також визначення характерних часових зв'язків між індексом Dst та показниками цих систем. Дослідження спрямоване на виявлення потенційних проявів космічної погоди у супутникових та радіотехнічних каналах зв'язку й оцінку можливих механізмів їх впливу.

Виклад основного матеріалу (результатів) дослідження. У межах проведеної роботи були проаналізовані дані GNSS, BGP та AIS за травень 2024 року з метою оцінити їх реакцію на геомагнітні збурення, зокрема під час періодів істотних мінімумів індексу Dst.

Результати аналізу GNSS

Під час інтервалів, коли Dst знижувався нижче -50 , було зафіксовано:

- зниження SNR на більшості досліджуваних станцій;
- зростання амплітудних флуктуацій сигналу L1;
- відмінності в реакції станцій різних широт.

Найвиразніші зміни спостерігалися на станціях NTUS (Сінгапур) та ISHI (Японія), що узгоджується з очікуваною підвищеною чутливістю екваторіальної та субтропічної іоносфери.

Крос-кореляційний аналіз (Рис. 1) показав максимальні зв'язки між LOESS-сгладженими значеннями L1 та Dst на лагах 1–3 години, що відповідає характерним часовим затримкам іоносферної реакції.

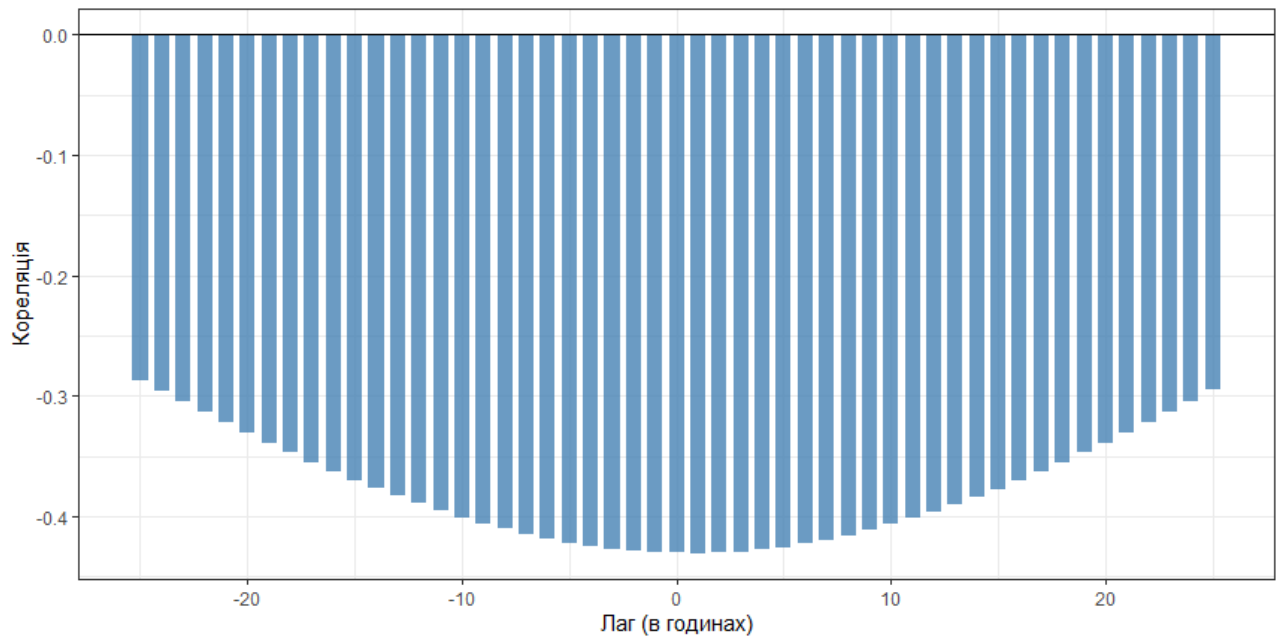


Рис. 1. Крос-кореляція L1 (LOESS) та Dst за травень 2024 року

Результати аналізу BGP

Під час глибоких мінімумів Dst у BGP-даних спостерігалися:

- збільшення кількості Withdrawals;
- підвищення кількості Announcements.

Особливо помітні зміни були зафіксовані для префіксу 31.13.64.0/18 (Meta), який продемонстрував короточасні стрибки у кількості подій (Рис. 2). Це може свідчити про нестабільність на рівні між-AS каналів, імовірно пов'язаних із супутниковими або радіорелейними сегментами. Кореляційний аналіз показав слабкі, але стійкі зв'язки в межах лагів до ± 3 годин.

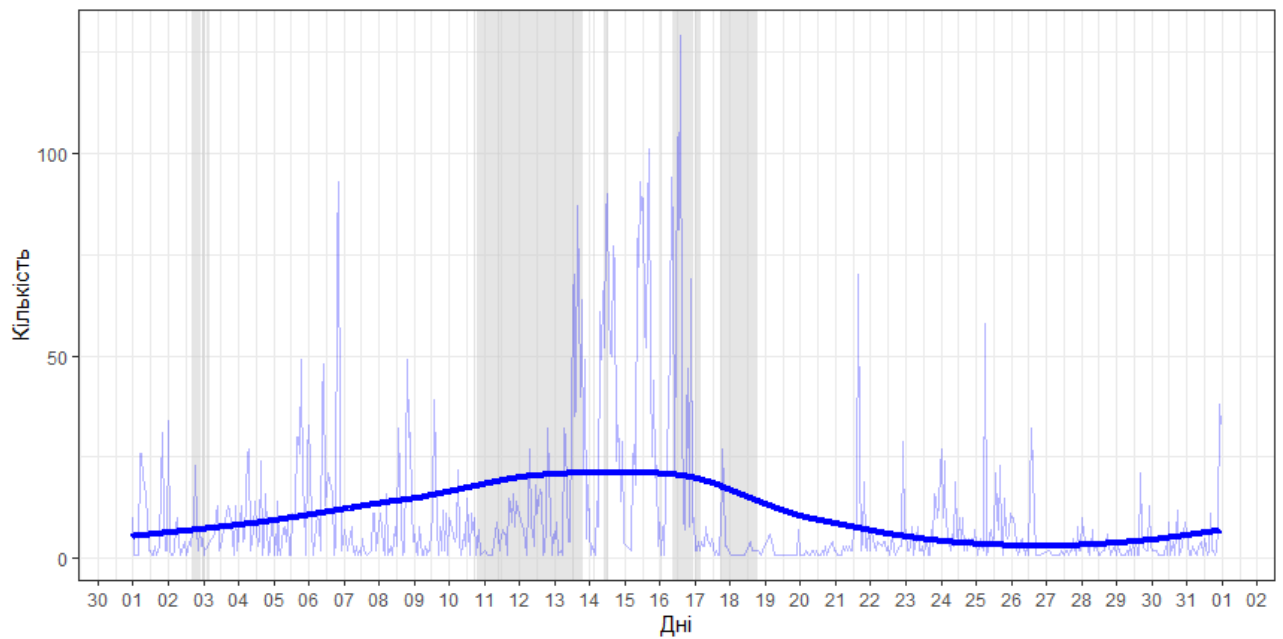


Рис. 2. Погодинна динаміка Withdrawals (LOESS) префіксу 31.13.64.0/18
із позначеними інтервалами бур

Результати аналізу AIS

У AIS-даних під час збурень було зафіксовано:

- зменшення кількості унікальних суден у видимості;
- збільшення інтервалів між повідомленнями;
- зростання частки повідомлень із затримкою понад заданий поріг.

Ці ефекти були найпомітнішими у високоширотних регіонах, що добре відповідає очікуваній поведінці VHF-каналів у періоди посиленого поглинання.

Крос-кореляція показала максимальний зв'язок на лагах 2–4 години, що вказує на затримані реакції AIS відносно змін індексу Dst.

Висновки та перспективи подальших пошуків у напрямі дослідження.

Отримані результати демонструють, що три різні технологічні системи – GNSS, AIS та BGP – по-різному реагують на однакові геомагнітні події. Найчутливішою виявилася GNSS-інфраструктура, що цілком відповідає її критичній залежності від стану іоносфери: підвищення індексу Kp та сплески Dst супроводжувалися локально значущими аномаліями позиціонування та збільшенням кількості втрат фіксації. Морська система AIS також показала

виразну реакцію, яка пояснюється радіохвильовою природою передавання даних та змінами умов поширення сигналів під час магнітних бур. Протокол маршрутизації BGP продемонстрував найменшу, але статистично помітну реакцію — переважно у вигляді збільшення кількості маршрутних флапів та короточасних перебудов топології, що, ймовірно, відображає не прямий, а опосередкований вплив через зміни затримок у каналах зв'язку та нестабільність окремих автономних систем.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують наявність потенційних взаємозв'язків між космічною погодою та технічними аномаліями у різних сегментах інфраструктури — від супутникової навігації до морських та інтернет-комунікацій. Незважаючи на відмінності у величині ефектів, усі три системи демонструють підвищену чутливість у періоди активних геомагнітних збурень, що може мати як наукове, так і прикладне значення при побудові систем моніторингу, раннього попередження та підвищення стійкості критичної інфраструктури.

Подальший розвиток цього напрямку передбачає декілька логічних та важливих кроків.

1. Розширення часових вибірок. Дослідження на довшому інтервалі (10 – 20 років) дозволить краще охопити повні цикли сонячної активності та зменшити статистичну невизначеність, особливо для рідкісних сильних бур.

2. Порівняння регіональних та глобальних ефектів. Сучасні іоносферні моделі дозволяють аналізувати просторову неоднорідність впливу. Це важливо, бо GNSS-похибки та радіохвильові спотворення мають виразні широтні залежності.

3. Багатофакторне моделювання. Наступним кроком є побудова моделей, які комбінуватимуть:

- індекси космічної погоди;
- параметри середовища (TEC, foF2);
- внутрішні технічні показники систем (наприклад, якість каналів у BGP або рівень шуму в AIS).

Це дозволить оцінювати не лише кореляції, а й причинно-наслідкові механізми.

4. Мікрорівневий аналіз технічних аномалій. Зокрема, для BGP варто розмежувати збої, пов'язані з людським фактором, внутрішніми технічними проблемами і потенційними зовнішніми впливами, щоб точніше оцінити реальну величину космічного ефекту.

5. Інтеграція різних інфраструктур у єдину систему моніторингу. Доцільно створити прототип платформи, що буде автоматично поєднувати дані GNSS, AIS, BGP, геомагнітні індекси та іоносферні карти, забезпечуючи крос-перевірку та виявлення аномалій у реальному часі.

6. Використання методів машинного навчання. Нейронні мережі та комбінаторні моделі можуть бути застосовані для прогнозування ймовірності аномалій на основі патернів космічної погоди, що створює передумови для практичного застосування результатів.

7. Оцінка ризиків для національної критичної інфраструктури. З огляду на зростання залежності від супутникової навігації, Інтернету та судноплавства, навіть невеликі збої можуть мати значні економічні наслідки. Тому важливо оцінити рівень вразливості різних секторів і розробити рекомендації з мінімізації ризиків.

У сукупності ці напрями створюють основу для систематичного розвитку нової галузі – дослідження «космічної чутливості» технічних систем, що поєднує астрогеофізику, статистику, телекомунікації та аналіз великих даних.

Список використаної літератури:

1. Kivelson, M. G., Russell, C. T. Introduction to Space Physics. Cambridge University Press, 1995. – с. 220 – 245.
2. Schrijver, C. J., Siscoe, G. L. Heliophysics: Space Storms and Radiation. Cambridge University Press, 2010. – с. 110 – 135.
3. Riley, P. Solar-Terrestrial Physics: An Introduction. Cambridge University Press, 2012. – с. 80–102.
4. GNSS and Space Weather – European GNSS Agency (GSA): <https://www.euspa.europa.eu/simplex/gnss-space-weather>.

5. BGP Monitoring Project – RIPE NCC: <https://www.ripe.net/analyse/internet-measurements/bgp>.
6. International Association of Marine Aids to Navigation (IALA). AIS Guidelines, Edition 2023: <https://www.iala-aism.org/technical/publications/>.
7. US NOAA: Space Weather Impacts on Marine VHF & AIS: https://www.weather.gov/sw/sw_ais.
8. Kivelson, M. G., Russell, C. T. Introduction to Space Physics. Cambridge Univ. Press, 1995 – с. 220 – 245.
9. Schrijver, C. J., Siscoe, G. L. *Heliophysics: Space Storms and Radiation*. Cambridge Univ. Press, 2010 – с. 110 – 135.
10. Riley, P. *Solar-Terrestrial Physics: An Introduction*. Cambridge Univ. Press, 2012 – с. 80 – 102.
11. NOAA Space Weather Prediction Center – Ionospheric Disturbances. <https://www.swpc.noaa.gov/>.
12. Campbell, W. H. *Geomagnetic Storms*. Springer, 2001 – с. 28 – 55.
13. Jenkins, G. M., Watts, D. G. *Spectral Analysis and Its Applications*. Holden-Day, 1968 – с. 300 – 330.
14. Chatfield, C. *Time-Series Forecasting*. Chapman & Hall/CRC, 2001 – с. 45 – 75.
15. Huston, G. – *BGP and Interdomain Routing*. APNIC Labs. <https://labs.apnic.net/>.
16. RIPE NCC RIS – BGP Stream Data: <https://ris.ripe.net/>.
17. IALA – AIS Technical Documentation: <https://www.iala-aism.org/>.

Відомості про авторів:

Солов'єнко Андрій Костянтинович – студент II курсу магістратури факультету інформаційних технологій, математики та природничих наук Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка, тел. +380634383369, e-mail: muchatnik@gmail.com.

Макарчук Олег Петрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики, фізики та методик викладання Центральноукраїнського державного університету імені Володимира Винниченка, тел. 0967267986, e-mail: makolpet@gmail.com.