

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОЛУБ Марія Юріївна

УДК 550.388

ДИСЕРТАЦІЯ

**«ЧАСОВІ ВАРІАЦІЇ РІВНЯ ФЛУКТУАЦІЙ
ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ»**

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
(Галузь знань 10 Природничі науки)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ М. Ю. Голуб

Науковий керівник: Черногор Леонід Феоктистович, доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України

Харків - 2026

АНОТАЦІЯ

Голуб М. Ю. Часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля Землі, зумовлених дією природних і техногенних джерел збурень у системі Сонце – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля. Аналіз флуктуацій геомагнітного поля є важливим для розуміння фізичних механізмів формування геомагнітних збурень, оцінки стану геокосмічної обстановки та визначення її впливу на природні й технічні системи.

Метою дисертаційної роботи є експериментальне дослідження часових варіацій рівня флуктуацій компонент геомагнітного поля, визначення їх спектральних характеристик і встановлення зв'язку між параметрами флуктуацій і різними типами геофізичних і геокосмічних явищ.

У першому розділі представлено аналітичний огляд сучасних уявлень про геомагнітне поле Землі, його структуру та основні джерела збурень. Розглянуто результати попередніх досліджень геомагнітних ефектів, спричинених магнітними бурями, сонячними затемненнями, падінням метеороїдів, проходженням сонячного термінатора, землетрусами, вулканічною активністю, потужним радіовипромінюванням та інфразвуковими впливами. Показано, що флуктуації геомагнітного поля є чутливим індикатором процесів у системі атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

Другий розділ присвячено дослідженню геомагнітних ефектів сонячних затемнень 10 червня 2021 р., 25 жовтня 2022 р., 14 жовтня 2023 р. та 8 квітня

2024 р. На основі магнітометричних спостережень проаналізовано часові зміни рівня флуктуацій геомагнітного поля під час затемнень і після їхнього завершення. Встановлено особливості реакції геомагнітного поля, пов'язані з перебудовою іоносферних струмових систем та інерційним характером процесів у геокосмічному середовищі.

У третьому розділі розглянуто геомагнітні ефекти сонячних і геокосмічних бур. Проведено статистичний аналіз геомагнітних бур, а також детально досліджено події 28 квітня – 2 травня 2023 р. і 4 – 7 листопада 2023 р. Показано, що в періоди підвищеної геомагнітної активності відбувається істотне зростання амплітуди флуктуацій геомагнітного поля та розширення їхнього спектрального складу, що відображає складну динаміку магнітосферних струмових систем.

Четвертий розділ присвячено аналізу геомагнітних ефектів катастрофічних явищ. Досліджено часові варіації флуктуацій геомагнітного поля, пов'язані з землетрусами та вибухами супервулканів. Показано, що такі події можуть супроводжуватися реєстрованими геомагнітними збуреннями, які зумовлені атмосферно-іоносферними та магнітосферними механізмами перенесення енергії.

У результаті виконання дисертаційної роботи встановлено характерні часові масштаби, амплітуди та спектральні особливості флуктуацій геомагнітного поля для різних типів збурень. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення моделей геомагнітних збурень, моніторингу космічної погоди та оцінки впливу геокосмічних процесів на природні й технічні системи.

Ключові слова: геомагнітне поле, іоносфера, геомагнітні бурі, сонячні затемнення, землетруси, вулканічна активність, електромагнітні хвилі, енергія, методи, часові варіації, сигнал, аналіз, процеси, оцінка, електричний струм.

ABSTRACT

Holub M. Yu. Temporal Variations of the Geomagnetic Field Fluctuation Level. – Qualifying scientific paper: a manuscript.

Thesis for a Philosophy Doctor Degree in Physics and Mathematics: Speciality 105 Applied Physics and Nanomaterials. – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to the study of temporal variations in the level of geomagnetic field fluctuations caused by natural and technogenic disturbance sources within the Sun–magnetosphere–ionosphere–atmosphere–Earth system. The analysis of geomagnetic field fluctuations is essential for understanding the physical mechanisms responsible for geomagnetic disturbances, assessing the state of the geospace environment, and evaluating its impact on natural and technological systems.

The aim of the dissertation is the experimental investigation of temporal variations in the fluctuation levels of geomagnetic field components, determination of their spectral characteristics, and identification of relationships between fluctuation parameters and various types of geophysical and geospace phenomena.

The first chapter presents an analytical review of current concepts of the Earth's geomagnetic field, its structure, and the main sources of geomagnetic disturbances. The results of previous studies of geomagnetic effects caused by magnetic storms, solar eclipses, meteorite falls, the passage of the solar terminator, earthquakes, volcanic activity, intense radio emission, and infrasound impacts are considered. It is shown that geomagnetic field fluctuations are a sensitive indicator of processes occurring in the atmosphere–ionosphere–magnetosphere system.

The second chapter is devoted to the investigation of geomagnetic effects of solar eclipses on June 10, 2021, October 25, 2022, October 14, 2023, and April 8, 2024. The features of the geomagnetic field response associated with the restructuring of ionospheric current systems and the inertial nature of processes in the geospace environment are established.

The third chapter considers geomagnetic effects of solar and geomagnetic storms. A statistical analysis of geomagnetic storms is carried out, and the events of April 28 – May 2, 2023, and November 4 – 7, 2023, are studied in detail. It is shown that during periods of enhanced geomagnetic activity, there is a significant increase in the amplitude of geomagnetic field fluctuations and a broadening of their spectral composition, reflecting the complex dynamics of magnetospheric current systems.

The fourth chapter is devoted to the analysis of geomagnetic effects of catastrophic phenomena. Temporal variations of geomagnetic field fluctuations associated with earthquakes and supervolcanic explosions are investigated. It is shown that such events may be accompanied by detectable geomagnetic disturbances caused by atmosphere–ionosphere and magnetospheric mechanisms of energy transfer.

As a result of the dissertation research, characteristic time scales, amplitudes, and spectral features of geomagnetic field fluctuations for different types of disturbances have been established. The obtained results can be used to improve models of geomagnetic disturbances, for space weather monitoring, and for assessing the impact of geospace processes on natural and technological systems.

Keywords: geomagnetic field, ionosphere, geomagnetic storms, solar eclipses, earthquakes, volcanic activity, electromagnetic waves, energy, methods, temporal variations, signal, analysis, processes, estimation, electric current.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в фахових виданнях:

1. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Бухтоподібні варіації геомагнітного поля, що супроводжували катастрофічний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2023. Т. 39, №5. С. 3–23. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591323050033>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Розрахунок основних параметрів іоносферних збурень. Участь у фізичній інтерпретації отриманих результатів, написання окремих розділів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та основних результатів, їхній аналіз. Розробка математичної моделі.)

2. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. Т. 40, № 3. С. 3–25. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324030024>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та заключних висновків.)

3. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Помірні магнітні бурі 28 квітня – 2 травня 2023 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. Т. 40, № 6. С. 19–44. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324060023>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Написання окремих розділів. Аналіз часових варіацій. Участь у фізичному тлумаченні отриманих результатів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Фізичне тлумачення. Написання обговорення та основних результатів.)

**Наукові праці в наукових виданнях, які індексуються
в наукометричній базі SCOPUS:**

4. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Bay-Shaped Variations in the Geomagnetic Field that Accompanied the Catastrophic Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2023. Vol. 39, No. 5. P. 247–260. DOI: <https://doi.org/S0884591323050033>.

5. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic Effect of the Solar Eclipse of October 25, 2022, in Eurasia. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. Vol. 40, No. 3. P. 117–137. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324030024>.

6. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. Main Features of the Geomagnetic Effect of the October 14, 2023 Annular Solar Eclipse over the Americas. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2024. Vol. 265. P. 106354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106354>.

7. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Moderate Magnetic Storms on April 28–May 2, 2023. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. Vol. 40, No. 6. P. 306–326. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324060023>.

8. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic effect of the solar eclipse of April 8, 2024, in the North American sector. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, Iss. 3. P. 3133–3149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.002>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Bay-shaped variations in the geomagnetic field that accompanied the catastrophic explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University*. May 23–26, 2023. Kyiv, Ukraine. P. 102–103.

2. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Large-scale geomagnetic field disturbances caused by the strong explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. APHYS 2023. October 17–21, 2023. Kyiv, Ukraine. P. 87–88.

3. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic effect of the October 25, 2022 partial solar eclipse in the Euro-Asian regio. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. May 28–31, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 81–83.

4. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. Global variations of the geomagnetic effect during the October 14, 2023 annular solar eclipse in the Americas. APHYS 2024. October 22–25, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 262–263.

5. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Features of the geomagnetic effect caused by the solar eclipse on April 8, 2024 in the American region. APHYS 2024. October 22–25, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 256–257.

6. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Yhang Yu. Features of the multi-step geomagnetic storm on November 4–7, 2023: observation results at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky Station. XII International Antarctic Conference. May 13–14, 2025. Kyiv, Ukraine. P. 68.

7. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Zheng Yu. Features of the multi-step geomagnetic storm on November 4–7, 2023: observation results at the Ukrainian Antarctic station Akademik Vernadsky. Astronomy and Space Physics in Kyiv University. May 27–30, 2025. Kyiv, Ukraine. P. 95–96.

8. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. The multi-step geomagnetic storm of November 4–7, 2023, as a topic of applied physics. Proceedings of the XXI International scientific conference electronics and applied physics. APHYS 2025. October, 21–24, 2025, Kyiv, Ukraine. P. 111–112.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ГОЛОВНИХ УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	22
1.1. Загальні відомості про геомагнітне поле.....	22
1.2. Джерела збурень геомагнітного поля.....	24
1.3. Результати досліджень збурень геомагнітного поля.....	26
1.3.1. Магнітні бурі.....	27
1.3.2. Сонячні затемнення.....	29
1.3.3. Падіння метеороїдів.....	30
1.3.4. Сонячний термінатор.....	31
1.3.5. Землетруси.....	33
1.3.6. Вулканізм.....	34
1.3.7. Потужне радіовипромінювання.....	35
1.3.8. Інфразвукове випромінювання.....	36
1.4. Висновки до розділу 1.....	37
РОЗДІЛ 2. ГЕОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ.....	39
2.1. Засоби та методи.....	39
2.2. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р.....	41
2.3. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р.....	53
2.4. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 14 жовтня 2023 р.....	83
2.5. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 8 квітня 2024 р.....	116
2.6. Висновки до розділу 2.....	142
РОЗДІЛ 3. ГЕОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ І ГЕОКОСМІЧНИХ БУР.....	146

3.1. Засоби та методи.....	146
3.2. Геомагнітні ефекти сонячних спалахів.....	148
3.3. Статистика геомагнітних бур.....	154
3.4. Геомагнітні ефекти бур 28 квітня – 2 травня 2023 р.....	161
3.5. Геомагнітні ефекти бур 4 – 7 листопада 2023 р.....	175
3.6. Висновки до розділу 3.....	214
РОЗДІЛ 4. ГЕОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ КАТАСТРОФІЧНИХ ЯВИЩ.....	217
4.1. Засоби та методи.....	217
4.2. Геомагнітні ефекти землетрусу.....	219
4.3. Геомагнітні ефекти вибуху супервулкану.....	226
4.5. Висновки до розділу 4.....	238
ВИСНОВКИ.....	241
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	244
ДОДАТОК А	275

ПЕРЕЛІК ГОЛОВНИХ УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ І ПОЗНАЧЕНЬ

АГХ – атмосферна гравітаційна хвиля

ЗАІМ – Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера

ІБ – іоносферна буря

МБ – магнітна буря

РІЗ – рухоме іоносферне збурення

СЗ – сонячне затемнення

СМСМІАЗ – Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля

СТ – сонячний термінатор

ХНУ – Харківський національний університет

UT – Universal Time, всесвітній час

A – відносна затінена площа диска Сонця, амплітуда радіохвилі

c – швидкість світла у вакуумі

e – заряд електрона

f – частота радіохвилі

f_p – плазмова частота електронів

H – висота однорідної атмосфери

M – фаза затемнення

m – маса електрона

N – концентрація електронів

R, r – відстань від джерела до місця реєстрації

T – період

v – швидкість

v' – удавана швидкість

ΔT – тривалість сигналу

Δt – час запізнювання

δ_N – відносна зміна концентрації електронів

ϵ_0 – електрична стала

λ – довжина хвилі

φ – фаза хвилі

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Геомагнітне поле Землі є одним із фундаментальних геофізичних факторів, що визначає характер взаємодії планети з потоками заряджених частинок сонячного та галактичного походження [4, 5, 7]. Воно формує магнітосферу, забезпечує екранування біосфери від високоенергетичного випромінювання та відіграє важливу роль у процесах, що відбуваються в іоносфері та навколоземному космічному просторі [4, 5, 7]. Стан геомагнітного поля характеризується як квазістаціонарною складовою, так і складною системою часових варіацій різних масштабів, зумовлених внутрішніми та зовнішніми джерелами [1, 4, 85].

Особливий науковий інтерес становлять часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля, які відображають динаміку нестаціонарних процесів у системі Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера Землі [1–3, 104]. Флуктуації геомагнітного поля охоплюють широкий спектр часових масштабів – від секундних і хвилинних пульсацій до добових та багатодобових збурень – і є чутливим індикатором змін стану космічної погоди [7, 85].

Часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля зумовлюються як природними факторами, зокрема змінами параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля, розвитком магнітних бур і сумбур [7, 112], так і антропогенними впливами. До останніх належать, зокрема, активні радіофізичні експерименти з нагрівом іоносферної плазми потужним високочастотним радіовипромінюванням, які можуть спричиняти локальні та регіональні зміни електродинамічних процесів у верхній атмосфері [49, 106].

Дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля є важливим як з фундаментальної, так і з прикладної точки зору. Воно сприяє поглибленню уявлень про механізми передачі енергії та імпульсу в

геокозмичній системі, розвиток турбулентності в магнітосферно-іоносферному середовищі, а також дозволяє вдосконалювати методи діагностики стану космічної погоди [1–4, 7, 85]. Практичне значення таких досліджень зумовлене необхідністю прогнозування геомагнітних збурень, які можуть впливати на роботу супутникових систем, засобів радіозв'язку, радіолокації, навігації, радіоастрономії та енергетичних мереж [7, 85].

У зв'язку з цим дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля є актуальною науковою задачею сучасної геофізики та фізики геокосмосу, що потребує застосування сучасних методів аналізу часових рядів, зокрема спектральних і системних підходів, для виявлення закономірностей, характерних часових масштабів і фізичних механізмів формування спостережуваних збурень [1–4, 49, 103].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

У дисертації наведено результати досліджень, виконаних автором з його науковим керівником протягом 2022–2025 рр. відповідно до перелічених нижче науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Дисертантка була співвиконавцем Проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля–атмосфера–іоносфера»). Робота виконувалась у межах держбюджетних НДР, заданих МОН України, номери держреєстрації 0121U109881 та 0122U001476 (виконавець напрямку).

Актуальність теми дослідження. Сучасна прикладна фізика значну увагу приділяє дослідженню складних нелінійних систем, у яких флуктуаційні процеси відіграють визначальну роль у формуванні спостережуваних фізичних ефектів. Геомагнітне поле Землі є прикладом такої системи, у якій часові варіації рівня флуктуацій відображають динаміку

енергетичних та електродинамічних процесів у магнітосферно-іоносферному середовищі.

Особливу актуальність становить дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля в широкому діапазоні часових масштабів, оскільки вони є чутливим індикатором переходів системи між квазістаціонарними та збуреними станами. Аналіз таких варіацій дозволяє встановлювати характерні часові масштаби фізичних процесів, пов'язаних з поширенням хвиль, розвитком плазмової турбулентності та нелінійною взаємодією електромагнітних збурень у геокосмічному середовищі.

З прикладної точки зору дослідження рівня флуктуацій геомагнітного поля має важливе значення для розробки методів діагностики стану космічної погоди, оцінки впливу геомагнітних збурень на радіотехнічні та енергетичні системи, а також для інтерпретації результатів активних експериментів у іоносфері та магнітосфері. Це визначає актуальність даної дисертаційної роботи в межах спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля та встановлення їхніх характерних часових масштабів і фізичних механізмів формування, викликаних дією потужних джерел енерговиділення різної фізичної природи.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі основні завдання:

1. Проаналізувати часові ряди компонент геомагнітного поля з використанням сучасних методів обробки експериментальних даних.

2. Встановити закономірності розвитку геомагнітних бур різної інтенсивності у 24-му та 25-му циклах сонячної активності на основі статистичного, просторово-часового та енергетичного аналізу.

3. Виявити характерні інтервали підсилення та ослаблення флуктуацій і визначити моменти початку та завершення збурених станів.

4. Встановити закономірності та механізми формування геомагнітних ефектів, що супроводжують різні природні процеси – землетруси, потужні вулканічні вибухи, сонячні затемнення – на основі комплексного аналізу варіацій геомагнітного поля.

5. Надати фізичне тлумачення спостережуваних флуктуацій з урахуванням процесів у магнітосферно-іоносферному середовищі.

Об'єкт дослідження – геомагнітне поле Землі як складова динамічна система.

Предмет дослідження є часові варіації рівня флуктуацій компонент геомагнітного поля та їхні спектрально-часові характеристики.

Методи дослідження.

Обробка експериментальних даних здійснюється з використанням сучасних програмних засобів і баз даних геофізичних спостережень.

У дисертації застосовано методи аналізу часових рядів геомагнітного поля, системний спектральний аналіз, просторове порівняння даних магнітометричних станцій різних широт, статистичний аналіз індексів геомагнітної активності, а також фізичну інтерпретацію результатів у рамках моделей сонячно-земних і літосферно-іоносферних зв'язків.

Наукова новизна отриманих результатів. У наявних роботах практично відсутній системний аналіз часових зсувів максимумів або мінімумів рівня флуктуацій геомагнітного поля відносно моменту спрацювання потужних джерел енерговиділення (сонячних затемнень, геомагнітні бур, землетрусів, вибуху супервулкану), тривалості та амплітуди збурень. Недостатньо досліджено, як швидко магнітосферно-іоносферна система перебудовується після зміни радіаційних умов і які часові масштаби характерні для цього процесу.

Тож у роботі вперше отримано такі результати:

1. Встановлено, що реакція геомагнітного поля на сонячні затемнення має часову затримку, яка проявляється у зсуві максимумів або мінімумів рівня флуктуацій відносно моменту максимального затемнення.

Показано, що така затримка та тривалість реакції на затемнення зумовлена релаксаційними процесами в магнітосферно-іоносферних струмових системах.

2. Виконано комплексний аналіз просторово-часової еволюції рівня флуктуацій компонент X , Y , Z геомагнітного поля під час чотирьох сонячних затемнень 2021–2024 рр. та визначено характерні особливості їхньої амплітудно-часової та глобальної структури.

3. Встановлено, що геомагнітна буря 4–7 листопада 2023 р. мала п'ятикроковий (багатостадійний) характер, тобто фактично складалася з п'яти окремих бур різної інтенсивності з окремими головними фазами та максимумами індексів K_p і D_{st} .

4. Виявлено розширення спектрального складу флуктуацій геомагнітного поля під час збурених станів, що свідчить про розвиток багатомасштабних хвильових і турбулентних процесів у магнітосферно-іоносферному середовищі.

5. Визначено характерні часові інтервали підсилення флуктуацій при магнітних бурях, сонячних затемненнях та катастрофічних подіях і встановлено їх залежність від природи джерела збурення.

6. Показано, що реакція геомагнітного поля на літосферні події (землетруси, вибух вулкана) має іншу часову структуру порівняно із сонячно-обумовленими збуреннями, що свідчить про різні фізичні механізми формування спостережуваних ефектів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному.

1. Вперше у глобальних масштабах детально досліджено часову еволюцію рівня флуктуацій геомагнітного поля з виділенням характерних параметрів збурень і встановлено зв'язок між змінами рівня флуктуацій і динамікою геомагнітних збурень під час дії низки потужних джерел енерговиділення (сонячних затемнень, геомагнітних бур, землетрусу, вибуху супервулкану). Отримано нові результати щодо спектрально-часових особливостей флуктуацій геомагнітного поля.

2. Вперше отримано статистичні характеристики магнітних бур впродовж 24-го циклу сонячної активності.

3. Вперше детально досліджено особливості розвитку помірних магнітних бур нового, 25-го циклу сонячної активності з урахуванням їх багатостадійного характеру.

4. Проведено кількісну енергетичну оцінку кожної зі складових бурі – геокозмичної, магнітосферної та магнітної – з визначенням їх потужності та енергії для кожного з п'яти етапів.

5. Отримано нові результати щодо геомагнітних ефектів землетрусів та вулканічних вибухів у середньо- та короткоперіодному діапазонах, підтверджено хвильову природу цих збурень та їх вплив на іоносферні струми і концентрацію електронів. Розроблено методику виділення хвиль різної фізичної природи та уточнено умови прояву геомагнітної реакції за різних рівнів фонові активності. Отримані дані розширюють експериментальні докази існування сейсмо- та вулкано-іоносферно-магнітосферних зв'язків і підвищують розуміння взаємодії підсистем геокосмосу під дією імпульсних джерел енергії.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані в дисертаційній роботі результати мають важливе прикладне значення для задач моніторингу та прогнозування стану магнітосфери й іоносфери Землі, а також для оцінювання впливу геокозмичних і літосферних збурень на технічні наземні та космічні системи.

Встановлені закономірності часової еволюції рівня флуктуацій компонент X , Y , Z геомагнітного поля під час сонячних затемнень дозволяють уточнювати часові масштаби перебудови магнітосферно-іоносферних струмових систем після зміни радіаційних умов. Це створює підґрунтя для вдосконалення фізичних моделей динаміки системи СМСМІАЗ в умовах швидких зовнішніх впливів.

Виявлена наявність часової затримки максимумів або мінімумів рівня флуктуацій відносно моменту максимальної фази затемнення може бути

використана при побудові напівемпіричних моделей реакції геомагнітного поля на короточасні варіації сонячного випромінювання.

Результати дослідження магнітної бурі 4–7 листопада 2023 р., зокрема встановлення її п'ятикрокової структури та поетапної зміни спектрального складу флуктуацій, можуть бути використані для вдосконалення методів класифікації складних геомагнітних збурень і підвищення точності оцінювання їх енергетичних характеристик.

Встановлені особливості спектрального розширення флуктуацій під час збурених станів мають практичне значення для оцінювання рівня геомагнітних ризиків для систем енергопостачання, аналізу впливу збурень на навігаційні та радіозв'язкові системи, інтерпретації даних наземних магнітометричних спостережень.

Розроблені підходи до системного аналізу рівня флуктуацій геомагнітного поля можуть бути застосовані для дослідження інших типів геофізичних збурень природного та техногенного походження.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання для діагностики стану космічної погоди, вдосконалення методів аналізу геомагнітних даних, інтерпретації результатів геофізичних та геокосмічних експериментів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом самостійних наукових досліджень автора. Усі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, а саме збір і систематизація експериментальних даних наземних магнітометричних спостережень, обробка експериментальних даних та формування баз даних для подальшого аналізу, аналіз часових варіацій компонент X , Y , Z геомагнітного поля, розрахунок рівня флуктуацій геомагнітного поля та визначення їхніх характерних часових масштабів, виконання спектрального аналізу геомагнітних варіацій, проведення аналітичних розрахунків параметрів іоносферних струмів та оцінювання магнітного ефекту, дослідження особливостей геомагнітної відповіді під час сонячних затемнень

2022–2024 рр., магнітних бур та катастрофічних явищ (землетруси, вибух вулкана), опис стану космічної погоди в періоди досліджуваних подій, участь у фізичній інтерпретації отриманих результатів та формулюванні основних висновків роботи.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у зборі та обробці експериментальних даних, виконанні аналітичних і числових розрахунків, аналізі часових і спектральних характеристик геомагнітних варіацій, підготовці графічних матеріалів, написанні окремих розділів статей та участі в обговоренні отриманих результатів.

Постановка задач, розробка математичних моделей, написання частини текстів статей і загальне наукове керівництво здійснювалися науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Представлені в роботі результати доповідалися на 3 міжнародних конференціях:

– Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 18–21 October 2022; 23–26 May 2023, 28–31 May 2023).

– XVIII International Conference “Electronics and Applied Physics” (APHYS) (Kyiv, Ukraine, 18–22 October 2022; 17–21 October 2023).

– Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 18–21 October 2022; 23–26 May 2023, 28–31 May 2024).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані у 17 наукових працях, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях України (6 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 2 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (входять до наукометричної бази Scopus), 8 – матеріали доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Загальний обсяг роботи складає 277 сторінок, основного тексту – 165 сторінки. Робота ілюстрована 96 рисунками, 33 таблицями. Список використаних джерел містить 234 найменування.

Автор дисертаційної роботи висловлює подяку співавторам та співробітникам кафедри космічної радіофізики, які внесли вагомий вклад в результати досліджень, наведених в дисертації.

Особлива подяка науковому керівнику, завідувачу кафедри, доктору фізико-математичних наук, професору, член-кореспонденту НАН України, Чорногору Леоніду Феоктистовичу за розробку нових концепцій із взаємодії підсистем в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера під час впливу високоенергетичних джерел, за допомогою яких у цій роботі проведено дослідження, за систематичну допомогу у проведенні досліджень.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальні відомості про геомагнітне поле

Геомагнітне поле Землі є складним багатокомпонентним фізичним полем, що формується внаслідок сукупної дії внутрішніх і зовнішніх джерел і характеризується значною просторово-часовою мінливістю [1, 4, 5]. Воно відіграє ключову роль у процесах взаємодії Землі з навколосемним космічним середовищем, визначаючи структуру магнітосфери, динаміку іоносферної плазми та умови поширення електромагнітних хвиль у верхній атмосфері [2, 3, 5, 104].

З фізичної точки зору геомагнітне поле є проявом електродинамічних процесів у провідних середовищах, що описуються рівняннями Максвелла з урахуванням руху заряджених частинок [4, 5, 6]. Його наявність зумовлює формування магнітосфери – області простору, в якій рух плазми значною мірою контролюється магнітним полем Землі. Магнітосфера слугує бар'єром для сонячного вітру, перерозподіляючи енергію та імпульс, що надходять від Сонця, і трансформуючи їх у геомагнітні збурення різної інтенсивності [5, 7, 8, 9].

Основним внутрішнім джерелом геомагнітного поля є геодинамо, яке реалізується в рідкому зовнішньому ядрі Землі [1, 4]. У цьому шарі відбуваються складні конвективні рухи електропровідної речовини, що перебуває під впливом обертання планети та коріолісових сил. Унаслідок цього виникають електричні струми великомасштабного характеру, які підтримують квазістаціонарну дипольну складову геомагнітного поля [1, 4, 5]. Саме ця складова визначає загальну конфігурацію поля поблизу земної поверхні та його орієнтацію в просторі.

Окрім головного поля, істотний внесок у спостережувану структуру геомагнітного поля вносять зовнішні струмові системи, локалізовані в магнітосфері та іоносфері [1, 3–7]. До них належать струми магнітопаузи,

хвостові струми магнітосфери, кільцевий струм, а також іоносферні електричні струми, пов'язані з рухом заряджених частинок у верхній атмосфері [1, 3, 5, 6]. Саме зовнішні джерела зумовлюють більшу частину коротко- та середньоперіодичних часових варіацій геомагнітного поля, включаючи геомагнітні бурі, суббурі та хвильові процеси [1, 3, 7–9].

Геомагнітне поле в точці спостереження зазвичай описується за допомогою компонент у прямокутній або сферичній системі координат. У практиці геомагнітних вимірювань широко використовуються компоненти X (північна), Y (східна) та Z (вертикальна), або ж компоненти H , D і Z [1, 4, 5]. Такий поділ дозволяє аналізувати анізотропію варіацій поля та виявляти домінуючі напрямки збурень, що є важливим для фізичної інтерпретації флуктуаційних процесів.

Часові зміни геомагнітного поля охоплюють широкий діапазон масштабів [1, 4, 5, 7]. До повільних змін належать секулярні варіації, зумовлені еволюцією процесів у ядрі Землі. До швидших змін належать добові варіації, пов'язані з іоносферними струмами, а також збурення, викликані взаємодією магнітосфери з сонячним вітром [5–7]. Особливу групу становлять короткоперіодичні флуктуації геомагнітного поля, які мають хвильову або турбулентну природу та проявляються у вигляді нерегулярних коливань різної інтенсивності [7–9].

Флуктуації геомагнітного поля є наслідком розвитку складних нелінійних процесів у магнітосферно-іоносферному середовищі, зокрема збудження магнітогідродинамічних хвиль, плазмової нестійкості та турбулентності [1, 3, 5, 7]. Їхні спектральні характеристики містять інформацію про масштаби переносу енергії, механізми дисипації та взаємодію різних фізичних процесів у плазмі. Саме тому рівень флуктуацій геомагнітного поля розглядається як важливий діагностичний параметр стану геокосмічної системи.

З позицій прикладної фізики аналіз геомагнітного поля та його флуктуацій є необхідним для дослідження процесів поширення

електромагнітних хвиль у неоднорідному магнітоплазмовому середовищі. Геомагнітні збурення здатні змінювати умови радіопоширення, впливати на стабільність навігаційних сигналів та викликати індуковані струми у протяжних технічних системах [2, 5, 7, 9]. У зв'язку з цим вивчення часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля має не лише фундаментальне, а й виражене прикладне значення.

Таким чином, геомагнітне поле Землі слід розглядати як складну відкриту фізичну систему, у якій поєднуються процеси різної природи та масштабів. Аналіз його часових варіацій, зокрема рівня флуктуацій, дозволяє поглибити уявлення про фізичні механізми взаємодії в геокосмічному середовищі та створює основу для подальших прикладних досліджень, що є предметом даної дисертаційної роботи.

1.2. Джерела збурень геомагнітного поля

Збурення геомагнітного поля Землі є наслідком нестационарних електродинамічних процесів у провідних середовищах різної природи та масштабів [1, 4, 5]. Згідно з рівняннями Максвелла, будь-які часові та просторові варіації магнітного поля зумовлюються змінами густини електричних струмів, тому фізичну природу геомагнітних збурень доцільно розглядати через аналіз джерел струмів у системі Земля – магнітосфера – іоносфера [3–6, 104].

Залежно від локалізації та характерних часових масштабів джерела збурень геомагнітного поля умовно поділяють на внутрішні, зовнішні та антропогенні [1, 5–8].

Внутрішні джерела пов'язані з процесами у надрах Землі, насамперед у рідкому зовнішньому ядрі, де реалізується механізм геодинамо. Зміни режимів конвекції електропровідної речовини призводять до повільних варіацій головного магнітного поля, відомих як секулярні варіації [1, 4, 104]. Для цих збурень характерні великі часові масштаби – від років до десятиліть,

тому вони практично не впливають на короткоперіодичні флуктуації, які розглядаються в даній роботі [5, 104].

Окрім цього, змінні магнітні поля зовнішнього походження індують електричні струми в земній корі та мантиї. Такі індуковані струми модифікують локальні характеристики геомагнітного поля та можуть істотно впливати на вимірювані значення компонент, особливо вертикальної компоненти Z [5, 7, 9, 104].

Зовнішні джерела збурень відіграють визначальну роль у формуванні коротко- та середньоперіодичних збурень геомагнітного поля. Вони зумовлені взаємодією сонячного вітру з магнітосферою Землі та подальшим розвитком струмових систем у магнітосферно-іоносферному середовищі.

Основним фактором є потік сонячного вітру, який несе міжпланетне магнітне поле [5–7]. Зміни параметрів сонячного вітру – швидкості, густини та орієнтації міжпланетного магнітного поля – призводять до перебудови магнітосфери та формування струмових систем на магнітопаузі, у хвості магнітосфери та у кільцевому струмі. Ці процеси є основною причиною розвитку геомагнітних бур і сумбур [7, 8].

Важливим джерелом геомагнітних збурень є іоносферні струми, зокрема регулярні добові струмові системи типу Sq , що формуються під дією сонячного ультрафіолетового випромінювання, а також авроральні струми, пов'язані з динамікою магнітосферної плазми [1, 2, 48, 87, 98]. Іоносферні струми є основним джерелом регулярних варіацій геомагнітного поля та значною мірою визначають поведінку горизонтальних компонент X і Y [1, 3, 5].

Окрему групу зовнішніх джерел становлять хвильові процеси в магнітосфері, пов'язані з поширенням магнітогідродинамічних хвиль [1, 3–5]. Такі процеси проявляються у вигляді короткоперіодичних флуктуацій геомагнітного поля, що реєструються у широкому діапазоні частот і є важливими з точки зору аналізу рівня флуктуацій [1, 3, 4, 6].

До антропогенних джерел збурень геомагнітного поля належать активні впливи людини на іоносферне середовище [2, 9]. Зокрема, експерименти з нагрівом іоносферної плазми потужним високочастотним радіовипромінюванням призводять до локальних змін електропровідності та електричних струмів в іоносфері [50]. Це, у свою чергу, викликає локальні флуктуації геомагнітного поля, які можуть бути зареєстровані наземними магнітометрами [2, 9].

Антропогенні збурення зазвичай характеризуються чітко визначеними часовими інтервалами та обмеженою просторовою локалізацією, що дає змогу відокремлювати їх від природних варіацій шляхом застосування спектрального та часово-частотного аналізу [2, 3, 50, 104].

Таким чином, джерела збурень геомагнітного поля є різноманітними за фізичною природою та масштабами прояву. Основний внесок у флуктуації геомагнітного поля, що аналізуються в даній дисертаційній роботі, вносять зовнішні магнітосферно-іоносферні процеси. Це обґрунтовує необхідність подальшого детального аналізу часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля, який буде розглянуто в наступних розділах роботи.

1.3. Результати досліджень збурень геомагнітного поля

Значна кількість експериментальних і теоретичних досліджень присвячена вивченню збурень геомагнітного поля, які виникають унаслідок взаємодії магнітосфери Землі з сонячним вітром [1–5, 7, 72, 81]. Узагальнення результатів цих досліджень свідчить, що геомагнітні збурення є багатофакторними процесами, які охоплюють широкий діапазон часових і просторових масштабів та відображають складну динаміку струмових систем у магнітосферно-іоносферному середовищі [1, 3, 4, 6, 88].

У рамках сучасних уявлень збурення геомагнітного поля класифікуються за інтенсивністю, тривалістю та фізичними механізмами формування [1, 3, 5, 6, 72, 81]. До найбільш енергоємних і масштабних

збурень належать *геокоосмічні* бурі, які супроводжуються суттєвими змінами рівня компонент геомагнітного поля та різким зростанням інтенсивності флуктуацій [1, 3, 7, 57, 102]. Менш інтенсивні, але частіші збурення пов'язані з суббурями, хвильовими процесами та регулярними варіаціями іоносферного походження [1, 3, 4, 5, 89].

Результати багаторічних спостережень показують, що аналіз часових варіацій геомагнітного поля під час збурених періодів дозволяє отримати важливу інформацію про енергетичний обмін у системі Сонце – магнітосфера – іоносфера та про механізми формування флуктуацій різних масштабів.

1.3.1. Магнітні бурі

Магнітні бурі є одними з найінтенсивніших проявів геомагнітної активності та характеризуються глобальними збуреннями геомагнітного поля, які тривають від кількох годин до кількох діб [1, 2, 3, 7, 57, 72, 81, 102]. Вони виникають унаслідок посиленої взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі, зокрема під час надходження потоків плазми з підвищеною швидкістю або за сприятливої орієнтації міжпланетного магнітного поля [4–7, 67].

Згідно з результатами численних досліджень, ключову роль у розвитку магнітних бур відіграє формування та інтенсифікація кільцевого струму в магнітосфері [7, 57, 72, 81, 102]. Посилення кільцевого струму призводить до зменшення горизонтальної складової геомагнітного поля поблизу земної поверхні, що проявляється у вигляді негативних відхилень компонент X або H . Саме ця особливість використовується для кількісної оцінки інтенсивності магнітних бур за допомогою глобальних індексів геомагнітної активності [9, 100, 104].

Магнітна буря зазвичай має чітко виражену фазову структуру, яка включає початкову фазу, головну фазу та фазу відновлення [1, 2, 7, 72, 81,

112]. На початковій фазі спостерігається раптове зростання рівня геомагнітного поля, пов'язане з компресією магнітосфери під дією сонячного вітру. Головна фаза характеризується максимальним розвитком кільцевого струму та значним зниженням горизонтальної компоненти геомагнітного поля. На фазі відновлення відбувається поступове ослаблення струмових систем і повернення параметрів геомагнітного поля до фонових значень [7, 57, 72, 102].

Характерною ознакою магнітних бур є раптове та значне збільшення амплітуди коливань горизонтальних компонент геомагнітного поля. Вони супроводжуються значними варіаціями магнітних індексів, таких як K_p , D_{st} та AE , що відображають загальний стан геомагнітної активності. Магнітні бурі можуть мати різну інтенсивність: від слабких, що викликають незначні коливання, до сильних і супербур, які здатні впливати на роботу технологічних систем, супутників, енергетичні мережі та радіонавігаційні, радіолокаційні та комунікаційні канали [1, 3, 7, 57, 81, 102].

Вплив магнітних бур простежується не лише у магнітосфері, а й в іоносфері, де спостерігаються зміни електронної концентрації, збурення електричних полів і генерація електромагнітних хвиль різних частот [7, 57, 67, 81, 102]. Значні бурі також здатні викликати аномальні варіації геомагнітного поля на земній поверхні, які реєструють наземні магнітометри в різних широтних поясах [4, 5, 75, 76].

Експериментальні дані свідчать, що під час магнітних бур істотно зростає рівень флуктуацій геомагнітного поля у широкому діапазоні частот [9, 100, 102]. Це зростання зумовлене активацією хвильових процесів, розвитком турбулентності та нестійкостей у магнітосферно-іоносферному середовищі. Флуктуації проявляються у всіх вимірюваних компонентах X , Y та Z , однак їхні амплітуди та спектральні характеристики можуть суттєво відрізнятись залежно від широти спостережень і стадії бурі [1, 3, 7, 57, 72, 102].

Результати попередніх досліджень показують, що аналіз спектральних і статистичних характеристик геомагнітних флуктуацій під час магнітних бур

є ефективним інструментом для вивчення динаміки струмових систем і процесів переносу енергії в магнітосфері. Це робить магнітні бурі важливим об'єктом дослідження в контексті аналізу часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля [4–7, 57, 67, 102].

1.3.2. Сонячні затемнення

Сонячні затемнення є специфічним природним фактором, який викликає короточасні, але фізично значущі збурення в іоносфері та, відповідно, у геомагнітному полі Землі [48]. На відміну від магнітних бур, пов'язаних із зовнішнім впливом сонячного вітру на магнітосферу, ефекти сонячних затемнень мають переважно внутрішньоіоносферну природу та зумовлені різким зменшенням потоку сонячного ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання [12–16, 18, 20, 48].

Під час сонячного затемнення відбувається тимчасове ослаблення процесів *фотоіонізації* в іоносфері, що призводить до зменшення концентрації заряджених частинок, особливо в іоносферних шарах *E* та *F* [18, 20, 48]. Це, у свою чергу, викликає зміну електропровідності іоносфери та перебудову іоносферних струмових систем, зокрема струмів динамо [48, 49]. Зміни іоносферних струмів безпосередньо відображаються у варіаціях компонент геомагнітного поля, які реєструються наземними магнітометричними станціями [12–15, 48, 51].

Результати попередніх досліджень показують, що під час сонячних затемнень у геомагнітному полі спостерігаються характерні відхилення компонент *X*, *Y* та *Z*, амплітуда яких залежить від фази затемнення, географічної широти пункту спостереження та рівня фонові геомагнітної активності. Найбільш виражені ефекти, як правило, фіксуються поблизу моменту максимального затемнення, коли зменшення іоносферної електропровідності досягає максимальних значень [12–14, 16, 18–20, 48, 51].

Особливу увагу в роботах [12–15, 48–51, 54, 55] приділено аналізу часових флуктуацій геомагнітного поля під час сонячних затемнень. Встановлено, що затемнення можуть супроводжуватися зміною спектрального складу геомагнітних варіацій, зокрема ослабленням регулярних добових варіацій та появою квазіперіодичних збурень, пов'язаних із релаксаційними процесами в іоносфері [48–51, 54, 55]. Такі флуктуації мають, як правило, меншу інтенсивність порівняно з магнітними бурями, проте є добре відтворюваними та фізично інформативними.

Дослідження геомагнітних ефектів сонячних затемнень є важливими з точки зору вивчення зв'язку між іоносферними процесами та вимірюваними варіаціями геомагнітного поля. Сонячні затемнення фактично виступають як природний експеримент, що дозволяє дослідити реакцію геомагнітного поля на різку зміну зовнішніх умов іоносферного збудження за відносно спокійних геомагнітних умов [12–15, 48–51, 54, 55].

Таким чином, результати досліджень сонячних затемнень підтверджують суттєву роль іоносферних процесів у формуванні часових варіацій і флуктуацій геомагнітного поля та доповнюють уявлення про механізми виникнення локальних і регіональних геомагнітних збурень.

1.3.3. Падіння метеороїдів

Падіння метеороїдів на Землю є природним джерелом короточасних геофізичних збурень, здатних впливати на стан магнітосфери та іоносфери [60, 107]. Під час входження метеороїда в атмосферу відбувається інтенсивне нагрівання та іонізація газу навколо нього, що формує локальні провідні сліди, здатні змінювати електричні та магнітні поля. Ці процеси проявляються як короточасні варіації компонент геомагнітного поля, які можуть реєструватися як на наземних магнітометричних станціях, так і за допомогою радіозондування іоносфери [60, 106, 107].

Інтенсивність впливу залежить від масивності метеороїда, його швидкості та кута входження в атмосферу, а також від висоти, на якій відбувається максимальна іонізація. Великі метеороїди викликають помітні імпульсні збурення магнітного поля, які можна порівняти з локальними «міні-магнітними бурями», тоді як дрібні частинки формують лише слабкі короткочасні коливання [60, 106, 107].

Падіння метеороїдів також впливає на радіопоширення у високочастотному (ВЧ) та наднизькочастотному (НЧ) діапазонах, оскільки іонізація атмосферного сліду формує тимчасові провідні канали, що змінюють характеристики радіохвиль [60, 106, 107]. Цей ефект активно використовують у радіоастрономії та радіоінтерферометрії, зокрема для вивчення дрібних метеорних потоків та їх динаміки.

Історично, спостереження геомагнітних ефектів падіння метеороїдів почалися у ХХ столітті разом із розвитком магнітометрії та радіоастрономічних методів. Перші систематичні роботи зосереджувалися на аналізі короткочасних збурень у магнітному полі та кореляції їх з відомими метеорними потоками. У ХХІ столітті застосування сучасних магнітометричних мереж і космічних супутників дозволило детально вивчати просторово-часові характеристики таких збурень і встановити, що навіть поодинокі падіння великих метеороїдів можуть локально впливати на іоносферну електропровідність [60, 106, 107].

Таким чином, падіння метеороїдів є значущим природним фактором короткочасних геомагнітних збурень, і його систематичне вивчення дозволяє краще розуміти взаємодію атмосфери, іоносфери та магнітосфери, а також оцінювати вплив на радіозв'язок і навігаційні системи.

1.3.4. Сонячний термінатор

Сонячний термінатор (СТ) є геофізичним явищем, що визначає межу між денним та нічним освітленням поверхні Землі. Перехід цієї межі створює

різкі зміни у нагріванні атмосфери та іоносфери, що, у свою чергу, викликає коливання електропровідності і локальні електричні поля. В результаті цього спостерігаються добові варіації геомагнітного поля, а також збурення в іоносферних струмах, які впливають на поширення радіохвиль [10, 11, 104].

Основними причинами геомагнітних ефектів СТ є [10, 11]:

1. Різкі градієнти температури та іонізації в перехідній зоні між освітленою та затемненою частиною атмосфери.
2. Індукування горизонтальних струмів у іоносфері через зміну електропровідності і диференціальні електричні поля.
3. Виникнення атмосферно-іоносферних хвильових процесів, які поширюються на великі відстані та впливають на рівень геомагнітних компонент X , Y , Z [54].

Спостереження показують, що ефекти СТ подібні до добових варіацій S_q , проте відрізняються більш різкими та короткочасними збуреннями. Максимальна амплітуда коливань геомагнітного поля у зоні проходження термінатора досягає кількох десятків нанотесла, що особливо помітно у середніх та високих широтах [10, 11].

У середині ХХ століття почалися дослідження впливу СТ, коли наземні магнітометри дозволили виділити добові коливання від інших геомагнітних ефектів. У ХХІ столітті використання супутникових спостережень і глобальних магнітометричних мереж дозволило уточнити механізми взаємодії термінатора з іоносферними струмами та оцінити його вплив на радіозв'язок, навігаційні системи та космічну погоду [10, 11].

Таким чином, сонячний термінатор є важливим природним фактором добових та короткочасних геомагнітних збурень, і його систематичне вивчення дозволяє прогнозувати і мінімізувати вплив на технологічні системи та наукові вимірювання в геокосмосі.

1.3.5. Землетруси

Землетруси є одним із природних факторів, здатних викликати локальні та регіональні зміни геомагнітного поля [175–179]. Внаслідок тектонічних рухів і розломів у земній корі виникають механічні напруження, які можуть створювати електричні струми у провідних шарах земної кори, а також індуковані магнітні поля. Ці процеси проявляються як короточасні або низькочастотні коливання компонент геомагнітного поля (X , Y , Z), що реєструються наземними магнітометрами, особливо у сейсмоактивних регіонах.

Механізм впливу землетрусів на геомагнітне поле пов'язаний із пізоелектричними та електрокінетичними ефектами, а також з переміщенням заряджених частинок у породах під високим тиском [180–184]. Сильні землетруси можуть призводити до формування помітних імпульсних збурень, тоді як слабкі підземні поштовхи викликають лише локальні та низькоамплітудні коливання.

Вплив землетрусів на іоносферу та радіопоширення також спостерігається: збурення магнітного поля та індуковані електричні струми можуть змінювати характеристики іоносферного плазмового середовища, що проявляється у часових варіаціях сигналів ВЧ та НЧ діапазонів. У ряді досліджень відзначено, що геомагнітні сигнали можуть передувати основному поштовху, що відкриває перспективи використання магнітометрів у сейсмічному моніторингу та прогнозуванні землетрусів [185–190].

Вивчення геомагнітних ефектів землетрусів розпочалося з появою високочутливих магнітометрів у ХХ столітті. Сучасні спостереження включають як наземні, так і космічні вимірювання, що дозволяє оцінювати просторово-часову структуру збурень і взаємозв'язок між сейсмічною активністю та геомагнітними реакціями [191–197].

Таким чином, землетруси є важливим джерелом короточасних геомагнітних збурень, і їх систематичне дослідження сприяє кращому

розумінню взаємодії земної кори з магнітосферою та іоносферою, а також розвитку методів моніторингу і прогнозування природних катастроф.

1.3.6. Вулканізм

Вулканічна активність є потужним природним джерелом геофізичних збурень, які здатні впливати на стан геомагнітного поля, іоносфери та атмосфери [198–200]. Під час підготовки та реалізації вулканічних вивержень у земній корі відбуваються інтенсивні теплові, механічні та хімічні процеси, що супроводжуються генерацією електричних струмів у провідних породах. Унаслідок цього формуються локальні варіації магнітного поля, які можуть реєструватися наземними магнітометричними станціями.

Основними механізмами геомагнітних ефектів вулканізму вважають термоелектричні та електрокінетичні процеси, а також зміну електропровідності гірських порід під впливом високих температур і флюїдів [201, 202]. Додаткову роль відіграє рух магми, який супроводжується перерозподілом заряджених частинок і може спричиняти квазістатичні або імпульсні збурення геомагнітного поля [203, 204].

Потужні вулканічні виверження здатні впливати не лише на літосферу, але й на атмосферу та іоносферу [205, 206]. Викид великої кількості газів і аерозолів у верхні шари атмосфери призводить до збурення температурного режиму та формування атмосферно-іоносферних хвиль. Поширюючись на значні відстані, такі хвилі можуть модифікувати іоносферні струмові системи та викликати помітні варіації компонент геомагнітного поля.

У сучасних дослідженнях встановлено, що геомагнітні збурення, пов'язані з вулканізмом, можуть мати як короточасний імпульсний характер, так і тривалі квазіперіодичні прояви [207–209]. У ряді випадків аномалії геомагнітного поля спостерігалися до початку основної фази виверження, що свідчить про можливість використання магнітометричних даних у комплексному моніторингу вулканічної активності.

Таким чином, вулканізм є важливим природним чинником геомагнітних і атмосферно-іоносферних збурень. Його систематичне дослідження сприяє глибшому розумінню взаємодії літосфери, атмосфери, іоносфери та магнітосфери, а також розвитку методів прогнозування та зменшення ризиків, пов'язаних з вулканічними катастрофами.

1.3.7. Потужне радіовипромінювання

Потужне радіовипромінювання штучного походження є важливим антропогенним чинником, здатним викликати локальні та регіональні збурення в іоносфері та, опосередковано, у геомагнітному полі [213]. До таких джерел належать високопотужні радіопередавачі, нагрівні іоносферні стени та інші технічні системи, що випромінюють електромагнітні хвилі у широкому діапазоні частот. Взаємодія потужного радіовипромінювання з іоносферною плазмою супроводжується нелінійними процесами, які змінюють електропровідність і параметри плазмового середовища.

Основними механізмами впливу є нагрів електронів, збудження плазмових хвиль та модифікація іоносферних струмових систем [214, 215]. У результаті цього виникають квазіперіодичні та аперіодичні збурення концентрації електронів, які призводять до варіацій магнітного поля, зокрема його горизонтальних і вертикальних компонент. Амплітуда таких збурень зазвичай є меншою порівняно з природними геокосмічними бурями, проте вони чітко корелюють з режимом роботи радіовипромінювальних установок.

Потужне радіовипромінювання також може ініціювати атмосферно-іоносферні хвильові процеси, які поширюються на значні відстані від джерела збурення [216]. Ці процеси супроводжуються зміною параметрів радіоканалу та можуть проявлятися у вигляді флуктуацій геомагнітного поля, зафіксованих наземними магнітометричними мережами.

Історично дослідження впливу штучних радіоджерел на іоносферу та геомагнітне поле активізувалися у другій половині XX століття з розвитком

потужних радіотехнічних систем [217, 218]. Сучасні експериментальні роботи демонструють, що контрольоване радіовипромінювання є ефективним інструментом для вивчення механізмів взаємодії електромагнітних хвиль з іоносферною плазмою та для тестування теоретичних моделей геомагнітних збурень.

Таким чином, потужне радіовипромінювання є значущим антропогенним джерелом іоносферних і геомагнітних варіацій. Його дослідження має важливе значення для розуміння процесів у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера та для оцінки впливу техногенних факторів на функціонування радіозв'язку й навігаційних систем.

1.3.8. Інфразвукове випромінювання

Інфразвукове випромінювання є важливим природним і техногенним чинником, що здатний впливати на стан атмосфери, іоносфери та геомагнітного поля [219]. Інфразвукові хвилі з частотами нижче 20 Гц генеруються під час потужних природних процесів, таких як землетруси, вулканічні виверження, метеороїдні події, а також внаслідок діяльності техногенних джерел. Завдяки малому поглинанню в атмосфері такі хвилі можуть поширюватися на великі відстані та досягати верхніх шарів атмосфери.

Під час поширення інфразвукових хвиль відбувається модуляція температури, густини та тиску атмосфери, що призводить до збурення іоносферної плазми [220, 221]. У результаті змінюється електропровідність іоносфери та параметри іоносферних струмів, які формують геомагнітне поле поблизу поверхні Землі. Ці процеси проявляються у вигляді короточасних або квазіперіодичних флуктуацій компонент геомагнітного поля.

Інфразвукове випромінювання часто розглядають як один із механізмів вертикального зв'язку в системі літосфера – атмосфера – іоносфера – магнітосфера [219–222]. Збурення, що виникають у нижніх шарах атмосфери,

можуть трансформуватися у хвильові процеси, які передають енергію у верхні шари та модифікують іоносферні струмові системи. У цьому контексті інфразвукові хвилі відіграють важливу роль у формуванні фонових та імпульсних геомагнітних варіацій.

Сучасні експериментальні дослідження, що поєднують дані інфразвукових сенсорів, магнітометрів та супутникових спостережень, підтверджують наявність кореляцій між інфразвуковою активністю та збуреннями геомагнітного поля [219–222]. Особливо чітко такі ефекти проявляються під час потужних природних подій, коли амплітуда інфразвукових хвиль є достатньо великою для ініціювання помітних іоносферних реакцій.

Таким чином, інфразвукове випромінювання є важливим джерелом геомагнітних та іоносферних збурень і відіграє суттєву роль у передачі енергії між різними підсистемами геокосмічного середовища. Його дослідження має принципове значення для розуміння механізмів формування часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля та для розвитку комплексних методів моніторингу природних і техногенних процесів.

1.4. Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи виконано системний аналіз сучасних уявлень про фізичні механізми формування та збурення геомагнітного поля Землі, а також розглянуто основні природні й техногенні чинники, що зумовлюють часові варіації його компонент.

1. Показано, що геомагнітне поле є динамічною багаторівневою системою, стан якої визначається сукупною дією внутрішніх джерел Землі та зовнішніх факторів космічного і атмосферного походження. Основну роль у виникненні збурень відіграють процеси сонячно-земних зв'язків, зокрема варіації параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та пов'язані з ними геокосмічні бурі.

2. Проаналізовано вплив іоносферних струмових систем на формування варіацій компонент X , Y та Z геомагнітного поля. Зміни електропровідності іоносфери, спричинені сонячною активністю, геомагнітними бурями та хвильовими процесами, безпосередньо відображаються у вимірюваних магнітометричних даних.

3. Встановлено, що зменшення сонячної радіації під час сонячних затемнень призводить до перебудови іоносферних струмів і, як наслідок, до локальних варіацій геомагнітного поля, які можуть бути зафіксовані наземними магнітними спостереженнями.

4. Інфразвукове випромінювання та інші хвильові процеси відіграють важливу роль у вертикальному зв'язку між літосферою, атмосферою, іоносферою та магнітосферою. Такі збурення здатні ініціювати флуктуації геомагнітного поля, зумовлені модифікацією іоносферних струмових систем.

5. Встановлено, що комплексне дослідження варіацій геомагнітного поля потребує одночасного урахування процесів різної природи та масштабів.

Отримані в розділі узагальнення створюють фізичну та методологічну основу для подальшого аналізу експериментальних даних і застосування спектральних та статистичних методів обробки, що реалізуються в наступних розділах дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2. ГЕОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ

2.1. Засоби та методи

Історія вивчення варіацій магнітного поля Землі, що супроводжували сонячні затемнення (СЗ), нараховує близько 120 років [16–19]. Теоретичні основи магнітного ефекту СЗ заклав автор [20]. Він припустив, що варіації геомагнітного поля протягом СЗ пов'язані зі зміною густини іоносферних струмів на висоті Е-області іоносфери (~ 90–120 км). Результати [20] розвивали в теоретичних роботах [21, 22], де моделювалися варіації геомагнітного поля протягом СЗ.

Зміни в головному магнітному полі Землі, що супроводжували СЗ в 1958–2008 рр., описані в ряді робіт [23–46].

Можливість генерації СЗ геомагнітних пульсацій вивчалася в роботах [36, 43].

В даний час питання про геомагнітний ефект СЗ залишається відкритим. У літературі наведені суперечливі дані. Одні автори стверджують, що амплітуда компоненти головного магнітного поля "північ – південь" збільшується [32], інші, що вона зменшується [40, 47]. Треті автори відзначають, що ця амплітуда взагалі не змінюється, а варіює амплітуда компоненти "захід – схід" [44]. В одних випадках спостереження підтверджують механізм, описаний у роботі [20], в інших – суперечать йому.

Дослідження геомагнітних ефектів сонячних затемнень базується на аналізі варіацій компонентів геомагнітного поля, які реєструються наземними магнітометричними станціями. Сонячне затемнення розглядається як природний експеримент, що супроводжується короткочасним і просторово неоднорідним зменшенням сонячного випромінювання, яке призводить до змін у параметрах іоносфери та, відповідно, в системі іоносферних струмів.

Основними вихідними даними для дослідження є часові ряди варіацій компонентів геомагнітного поля X , Y та Z , отримані з високочутливих флюкстейтних магнітометрів. Для забезпечення репрезентативності аналізу використовуються дані декількох геофізичних обсерваторій, розташованих на різних географічних широтах і довготах, що дозволяє простежити просторові особливості прояву ефектів затемнення.

Методика обробки даних включає попередню фільтрацію часових рядів з метою усунення довгоперіодних трендів та регулярних добових варіацій. Для цього застосовуються методи ковзного середнього, поліноміальної апроксимації або спектральної фільтрації. Подальший аналіз спрямований на виділення слабких збурень геомагнітного поля, які можуть бути замасковані фоновими геомагнітними коливаннями.

Для дослідження частотних характеристик збурень застосовуються методи системного спектрального аналізу. Ці методи дають змогу оцінити зміну енергетичних характеристик флуктуацій у різних діапазонах періодів і простежити еволюцію спектральної щільності потужності під час затемнення. Додатково використовується порівняльний аналіз із контрольними днями, що дозволяє відокремити ефекти, безпосередньо пов'язані із затемненням, від впливу загальної космічної погоди.

Фізичне тлумачення отриманих результатів ґрунтується на сучасних уявленнях про взаємодію системи «Сонце – іоносфера – магнітосфера – Земля».

Труднощі спостереження геомагнітного ефекту СЗ пов'язані з тим, що на магнітне поле впливає багато високоенергетичних джерел [48]. Величина геомагнітного ефекту залежить не тільки від сили (фази M) СЗ, але і від стану космічної погоди, місця спостереження, часу доби, пори року та ін. Тому дослідження геомагнітного ефекту кожного нового СЗ залишається актуальним завданням.

У даному розділі розглядаються чотири сонячних затемнення (СЗ): кільцеподібне СЗ 10 червня 2021 р., СЗ 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні, СЗ 14 жовтня 2023 р. та 8 квітня 2024 р. в Американському регіоні.

Метою розділу є дослідження особливостей часових варіацій X -, Y - і Z -компонентів геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій INTERMAGNET в день СЗ та у контрольні дні. Також важливо дослідити співставлення їх з результатами обчислень.

Результати цього розділу опубліковано в роботах [12–15].

2.2. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 10 червня 2021 р

Загальні відомості. Особливістю СЗ 10 червня 2021 р. було те, що воно належало до кільцеподібних. Функція покриття на рівні Землі не перевищувала 89%, а фаза – 0.943. Це мало місце над островом Гренландія з 10:33:16 UT до 10:36:56 UT (UT тут і далі всесвітній час).

Почалося затемнення над територією Канади о 08:12:20, а закінчилося о 13:11:19 (Табл. 2.1). Кільцеподібне СЗ спостерігалось з 9:49:50 до 11:33:43. Місячна тінь поступово переміщувалася від Канади в Атлантичний океан, Північний Льодовитий океан, Північний полюс, північну частину Європи й Азії. Тінь простягалася до нижньої частини Італії, Греції, України, захопила більшу частину Росії, а також Монголію і Китай (Рис. 2.1).

Таблиця 2.1.

Загальні відомості про сонячне затемнення

[за даними сайту <https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2021-june-10>]

Момент початку СЗ	08:12:20 UT
Момент першої появи кільцевого СЗ на Земній кулі	09:49:50 UT
Момент настання максимальної фази СЗ	10:41:54 UT
Момент крайньої появи кільцевого СЗ на Земній кулі	11:33:43 UT
Момент закінчення СЗ	13:11:19 UT

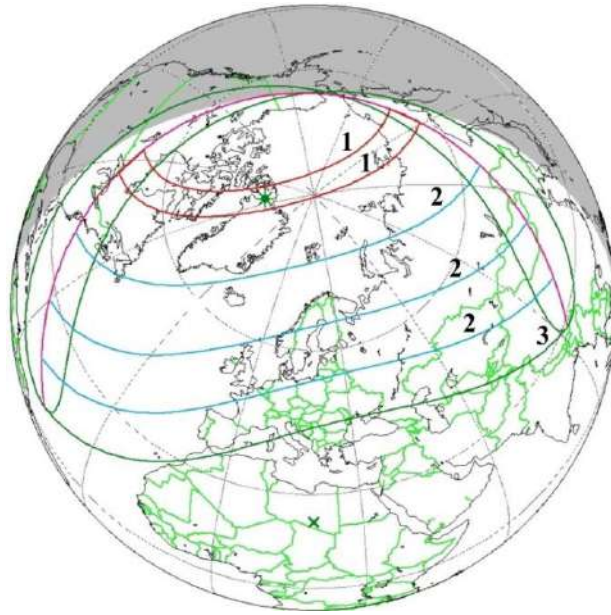


Рис. 2.1. Карта сонячного затемнення. Червоні лінії показують на території кільцеподібного затемнення, сині – часткового затемнення, зелена – межа затемнення.

Дані та методи. Для аналізу ефектів у головному магнітному полі Землі використовувалися дані вимірювань міжнародної мережі INTERMAGNET. Проаналізовано дані 15 магнітних станцій, розташованих на широтах від 77.47° пн. ш. до 48.17° пн. ш. (Табл. 2.2). При цьому максимальна фаза СЗ на рівні Землі змінювалася від 0.943 до 0.124. Роздільна здатність за часом – 1 хв, за рівнем геомагнітного поля – близько 0.1 нТл.

Аналізу підлягали дві горизонтальні (X – «північ – південь» і Y – «захід – схід») і вертикальна (Z) компоненти головного магнітного поля Землі.

Помітні варіації вдалося виявити тільки в рівні X -компоненти. Мали місце як аперіодичні, так і квазіперіодичні варіації рівня X -компоненти.

Для визначення спектрального складу квазіперіодичних варіацій використовувався системний спектральний аналіз (ССА), який об'єднує взаємодоповнюючі віконне перетворення Фур'є (ВПФ), адаптивне перетворення Фур'є (АПФ) і вейвлет перетворення (ВП) на основі материнської функції Морле [49]. Спектральному аналізу передувало видалення тренду на інтервалі 120 хв з інтервалом ковзання 1 хв.

Таблиця 2.2.

Параметри сонячного затемнення 10 червня 2021 р. в різних обсерваторіях Земної кулі [<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/JSEX/JSEX-AS.html>]

Назва станції	Координати		Країна	Тип СЗ	t_0	t_{es}	t_{max}	t_{ee}	t_1	M*	A, %*
	ϕ	λ									
Qaanaaq (Thule) (THL)	77.47° пн.ш.	69.227° з.д.	Королівство Данія	A	09:30:20	10:33:16	10:35:06	10:36:56	11:41:50	0.943 (0.936)	89 (88.6)
Hornsund (HRN)	77 пн.ш.	15.547° сх.д.	Норвегія	P	09:32:33	–	10:43:29	–	11:56:08	0.761 (0.785)	68.5 (71.3)
Qeqertarsuaq (Godhavn) (GDH)	69.252° пн.ш.	53.533° з.д.	Королівство Данія	P	09:12:24	–	10:18:12	–	11:27:28	0.909 (0.935)	85.9 (88.6)
Abisko (ABK)	68.358° пн.ш.	18.823° сх.д.	Швеція	P	09:15:28	–	10:27:10	–	11:42:27	0.588 (0.609)	48.2 (50.6)
Sodankyla (SOD)	67.37° пн.ш.	26.63° сх.д.	Фінляндія	P	09:10:43	–	10:21:08	–	11:35:35	0.554 (0.574)	44.4 (46.6)
Nurmijarvi (NUR)	60.51° пн.ш.	24.66° сх.д.	Фінляндія	P	08:58:14	–	10:07:53	–	11:22:57	0.396 (0.414)	27.7 (29.4)
Uppsala (UPS)	59.903° пн.ш.	17.353° сх.д.	Швеція	P	09:00:53	–	10:11:27	–	11:27:23	0.402 (0.419)	28.2 (30.0)
Borok (BOX)	58.07° пн.ш.	38.23° сх.д.	Росія	P	08:50:27	–	09:56:57	–	11:09:02	0.327 (0.343)	21.0 (22.5)
Hel (HLP)	54.603° пн.ш.	18.811° сх.д.	Польща	P	08:51:00	–	09:59:03	–	11:13:20	0.266 (0.281)	15.6 (16.9)
Wingst (WNG)	53.74° пн.ш.	9.07° сх.д.	Німеччина	P	08:58:23	–	10:06:13	–	11:19:50	0.296 (0.312)	18.2 (19.7)
Niemegk (NGK)	52.07° пн.ш.	12.68° сх.д.	Німеччина	P	08:52:19	–	09:58:51	–	11:11:36	0.234 (0.248)	12.9 (14.1)
Belsk (BEL)	51.836° пн.ш.	20.789° сх.д.	Польща	P	08:45:17	–	09:51:31	–	11:04:17	0.187 (0.200)	9.3 (10.3)
Budkov (BDV)	49.08° пн.ш.	14.02° сх.д.	Чехія	P	08:47:02	–	09:50:56	–	11:01:14	0.151 (0.164)	6.8 (7.7)
Lviv (LVV)	49.9° пн.ш.	23.75° сх.д.	Україна	P	08:40:31	–	09:45:19	–	10:56:47	0.124 (0.137)	5.1 (5.9)
Furstenfeldbruck (FUR)	48.17° пн.ш.	11.28° сх.д.	Німеччина	P	08:49:06	–	09:51:39	–	11:00:20	0.147 (0.16)	6.5 (7.4)

Примітка: ϕ – широта, λ – довгота, СЗ – сонячне затемнення, А – кільцеве затемнення, Р – часткове затемнення, t_0 – момент часу початку затемнення, t_{es} – момент часу початку кільцевого або повного затемнення, t_{max} – момент часу максимальної фази затемнення, t_{ee} – момент часу закінчення кільцевого або повного затемнення, t_1 – момент часу закінчення затемнення, M – магнітуда сонячного затемнення, A – частка видимої площі Сонця, яка покрита місячним диском, $\Delta T = t_{ee} - t_{es}$ – тривалість повної або кільцевої фази затемнення (в хвиликах і секундах), * – параметри обчислені для 0 км (110 км).

Стан космічної погоди. Оскільки варіації геомагнітного поля можуть бути викликані цілою низкою космічних і земних джерел, потрібен ретельний аналіз стану космічної погоди (Рис. 2.2).

Проаналізовано стан космічної погоди для 6–12 червня 2021 р. Виявилось, що 7, 8, 11 і 12 червня 2021 р. іоносфера була магнітозбуреною (за даними сайтів [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] та [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]). У ці доби індекс $K_p \approx 3-4$, а індекс D_{st} досягав $-(13-30)$ нТл.

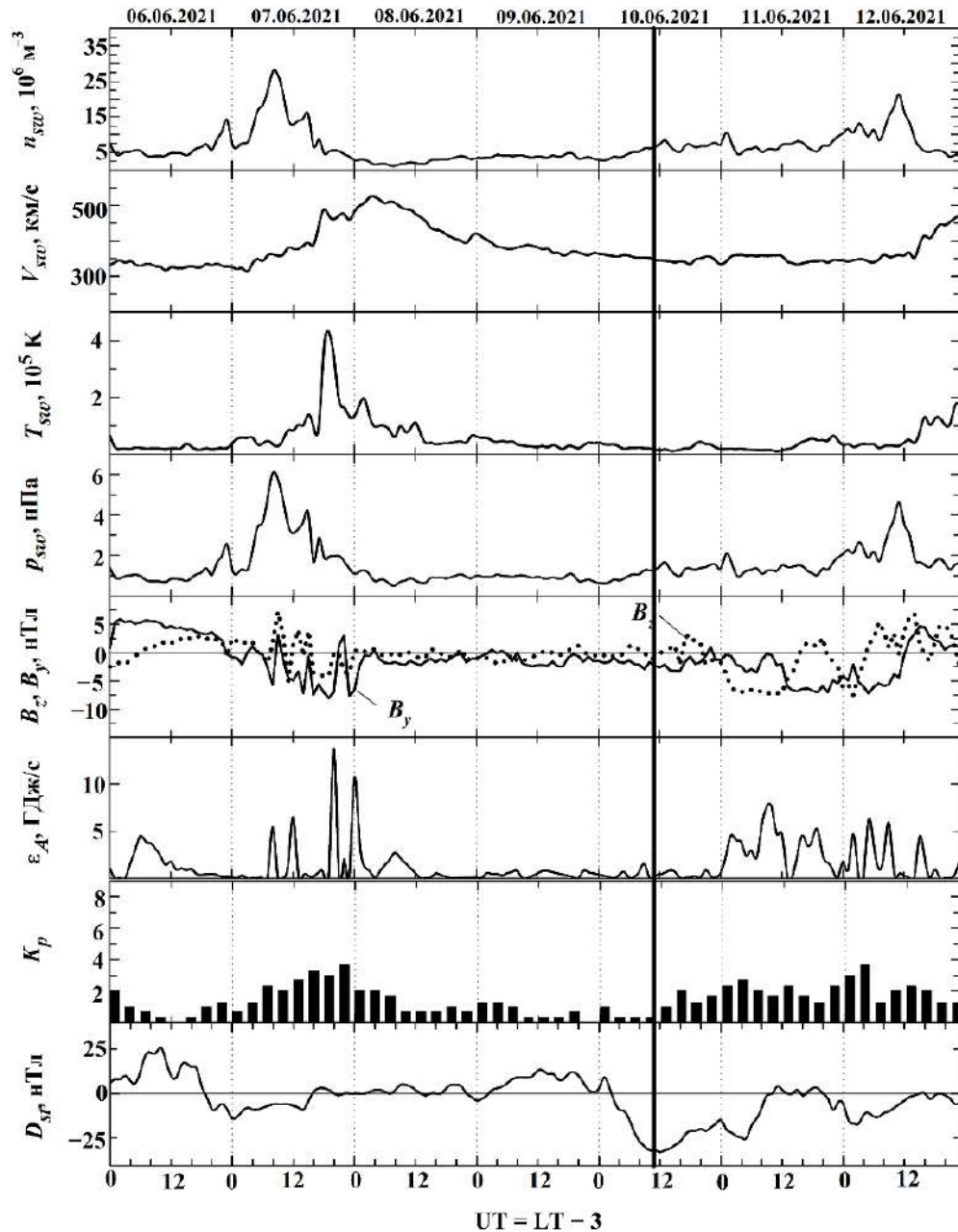


Рис. 2.2. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період з 6 – 12 червня 2021 р. Вертикальна лінія вказує на момент настання максимальної фази СЗ. Дати вказані вздовж осі абсцис.

З цієї причини в якості контрольних обрано доби 6 і 9 червня 2021 р. (Табл. 2.3). З цієї таблиці видно, що 6, 9 та 10 червня 2021 р. в інтервалі часу 09:00–12:00 значення $K_p = 0.3$.

Таблиця 2.3.

Загальні відомості про індекс геомагнітної активності K_p у період сонячного затемнення 10 червня 2021 р. та в контрольні дні

Дата/Час, UT	00–03	03–06	06–09	09–12	12–15	15–18	18–21	21–00
06 червня 2021 р.	2	1	0.7	0.3	0	0.3	1	1.3
09 червня 2021 р.	1.3	1.3	1	0.3	0.3	0.3	0.7	0
10 червня 2021 р.	1	0.3	0.3	0.3	1	2	1.3	1.7

Індекс F10.7 сонячної активності 6, 9 та 10 червня 2021 р. відповідно складав 79.7, 81.0 і 75.6, тобто Сонце залишалося спокійним.

Таким чином, протягом СЗ магнітна й іоносферна обстановки були сприятливими для спостереження магнітного ефекту затемнення.

Результати аналізу. Розглянемо окремо аперіодичні і квазіперіодичні варіації геомагнітного поля в день СЗ 10 червня 2021 р. і в контрольні дні 6 і 9 червня 2021 р.

Для прикладу опишемо характерні варіації рівня геомагнітного поля для чотирьох станцій, для яких максимальна фаза затемнення була досить великою (від 0.909 до 0.402).

Станція GDH (максимальна фаза $M = 0.909$). До 08:10 рівень X-компоненти флюктував від 0 до -10 нТл (рис. 2.3). З 08:10 до 08:50 спостерігалось його зменшення до -45 нТл. Перед початком СЗ рівень, флюктуюючи, збільшився до -30 нТл. Після початку СЗ о 09:12 і до 10:50 в рівні X-компоненти спостерігався провал, мінімальне значення становило –

(50–55) нТл. З 10:50 і до 11:55 рівень залишався практично незмінним і становив близько $-(40-45)$ нТл.

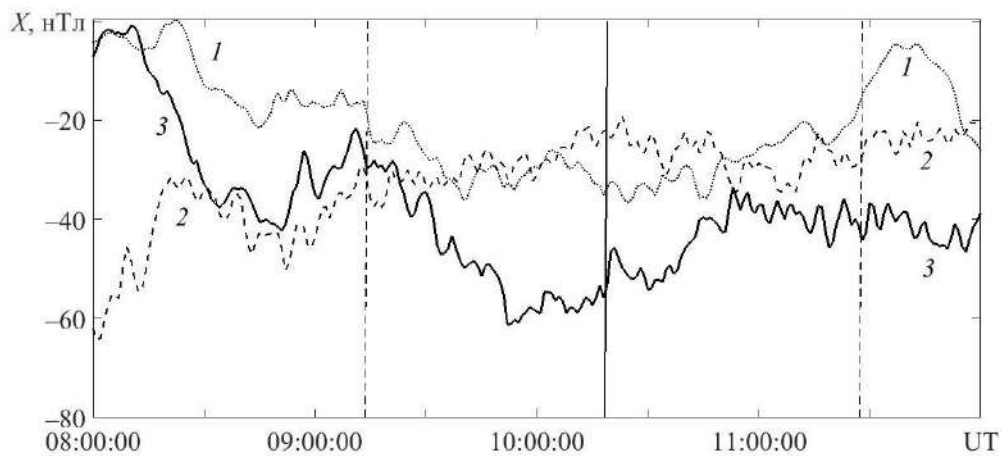


Рис. 2.3. Часові варіації рівня X-компоненти на станції Qeqertarsuaq (GDH): 1 – 6 червня 2021 р.; 2 – 9 червня 2021 р.; 3 – 10 червня 2021 р. Пунктирними вертикальними лініями показані моменти початку і закінчення СЗ, суцільною вертикальною лінією – момент максимальної фази СЗ.

Станція HRN ($M \approx 0.761$). З 08:20 і до 09:20 спостерігався провал в рівні X-компоненти (від -10 до -30 нТл) (Рис. 2.4). З 09:20 і до 09:50 відзначалося його зростання до 10 нТл, яке потім змінилося після 09:50 зменшенням від 10 до -10 нТл. Мінімальне значення близько -10 нТл мало місце приблизно поблизу моменту закінчення СЗ. Далі відзначалося зростання рівня X-компоненти. На повільні варіації рівня протягом СЗ накладалися квазіперіодичні варіації з періодом $T \approx 9$ хв і амплітудою близько 2.4–3.7 нТл.

Станція АВК ($M \approx 0.588$). З 08:25 і до 09:00 спостерігалось зменшення рівня X-компоненти від -17 до -26 нТл (Рис. 2.5). Протягом СЗ рівень сильно флюктував із квазіперіодом T близько 9 хв і амплітудою 1–1.5 нТл. Крім того, мало місце зменшення середнього значення рівня на 9–10 нТл.

Станція UPS ($M \approx 0.402$). Рівень X-компоненти з 08:00 до 08:40 зменшувався від -18 до -26 нТл (Рис. 2.6). В інтервалі часу 08:40–09:05 він залишався майже незмінним на рівні близько -26 нТл. Далі спостерігалось

його збільшення на 3 нТл, тобто до -23 нТл. Після 09:15 рівень спочатку зменшувався до -28 нТл, а потім збільшувався до -20 нТл, що мало місце приблизно в момент закінчення СЗ. Зменшення середнього значення рівня протягом СЗ не перевищувало 5 нТл.

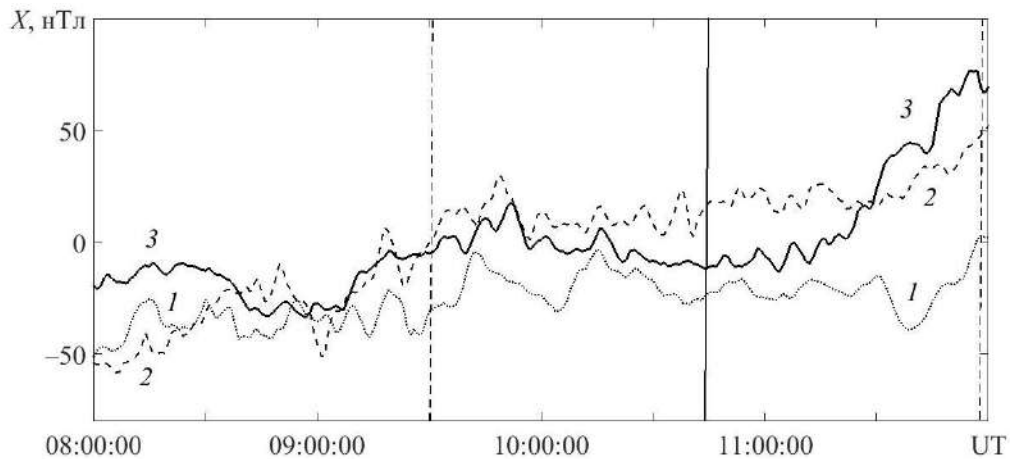


Рис. 2.4. Те ж саме, що на Рис. 2.3, для станції Hornsund (HRN).

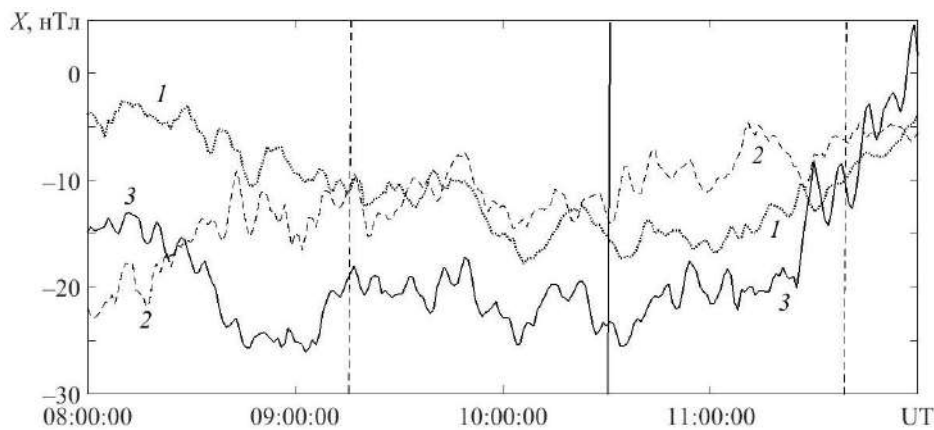


Рис. 2.5. Те ж саме, що на Рис. 2.3, для станції Abisko (ABK).

Крім вже згаданих квазіперіодичних варіацій рівня X-компоненти з періодом 9 хв і амплітудою ΔX_a від 1–1.5 до 2.4–3.7 нТл, протягом СЗ спостерігалися й інші періоди. Наведемо такі приклади.

Станція HLP ($M \approx 0.266$). Як видно з рис. 2.7, протягом СЗ спостерігалися два процеси з періодами 6–7 і 35 хв з амплітудами 0.5–0.8 і 1.6–2.2 нТл відповідно.

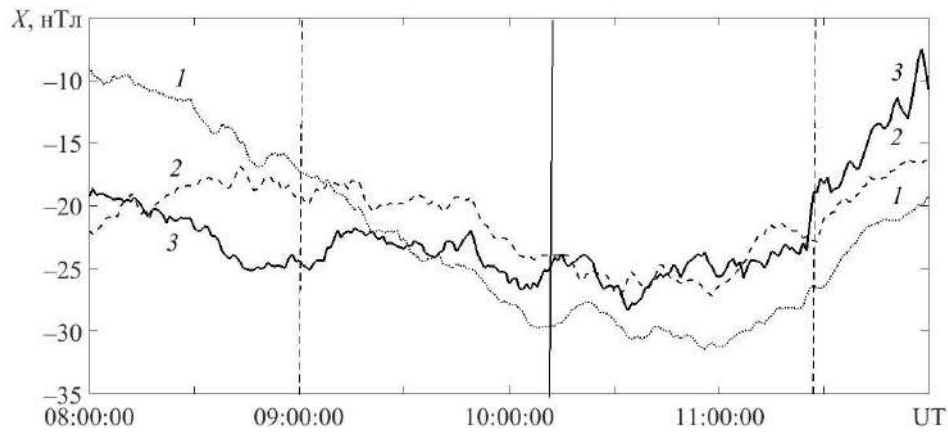


Рис. 2.6. Те ж саме, що на Рис. 2.3, для станції Uppsala (UPS).

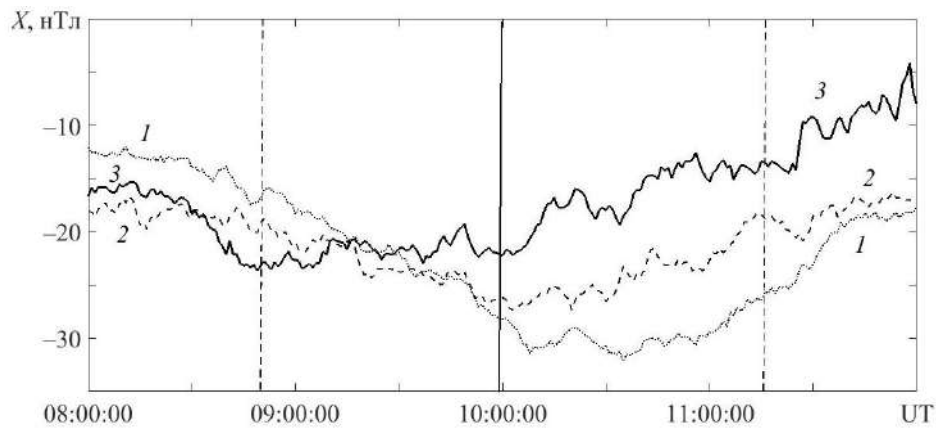


Рис. 2.7. Те ж саме, що на Рис. 2.3, для станції Hel (HLP).

Станція LVV ($M = 0.124$). Протягом СЗ мали місце квазіперіодичні варіації рівня X -компоненти з періодами близько 20 і 35 хв і амплітудою ~ 1.3 – 1.7 нТл (Рис. 2.8). Крім цього періоду, спостерігався період 6–7 хв зі значно меншою амплітудою.

Як приклад наведемо результати ССА варіацій рівня X -компоненти для станцій HRN (Рис. 2.9) і LVV (Рис. 2.10). З рисунків видно, що протягом СЗ суттєво змінювався спектральний склад. При цьому придушувалися коливання з $T \approx 60$ – 100 хв, а виникали осциляції з періодами близько 20 і 35 хв (рис. 2.9, 2.10).

Аналіз рівня X -компоненти геомагнітного поля показав, що при досить великому значенні фази СЗ ($M_{\max} \geq 0.248$) спостерігалось зменшення ΔX

рівня на одиниці – десятки нанотесла. Чим більше M_{\max} і більше широта станції, тим більше ефект. Для станцій THL і GDH $\Delta X \approx -30$ нТл. У той же час для станції HLP $\Delta X \approx -(2.4-2.6)$ нТл.

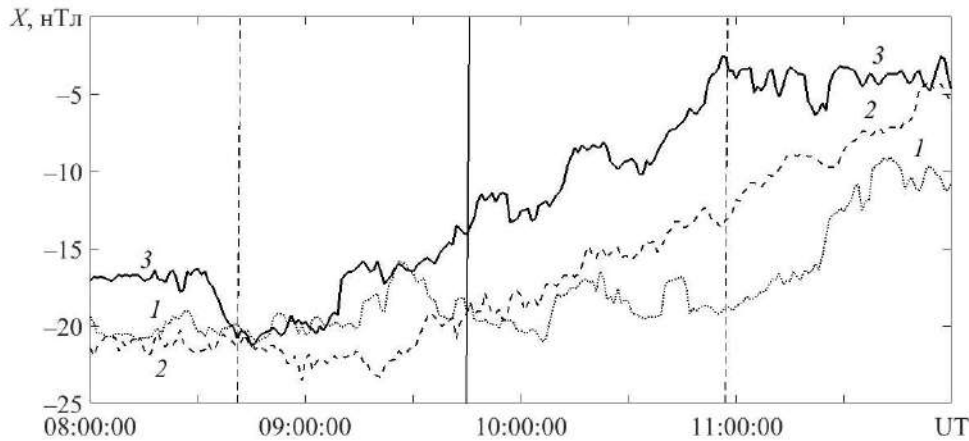


Рис. 2.8. Те ж саме, що на Рис. 2.3, для станції Lviv (LVV).

Зменшення рівня X -компоненти (напрямок "північ – південь") зумовлено зменшенням густини іоносферного струму в напрямку "захід – схід" j_y . Згідно [21, 50]

$$\Delta X \approx -\frac{1}{2}\mu_0\Delta j_y\Delta z,$$

де μ_0 – магнітна стала, Δj_y – збурення густини струму в шарі товщиною Δz . Оскільки [21, 50]

$$\Delta j_y \approx -\frac{1}{2}e\Delta Nv,$$

то

$$\Delta X \approx \frac{1}{4}\mu_0e\Delta Nv\Delta z,$$

де e – заряд електрона, ΔN – зменшення концентрації електронів N під дією СЗ, v – швидкість електронів відносно іонів. Очевидно, що при $\Delta N < 0$ маємо $\Delta X < 0$.

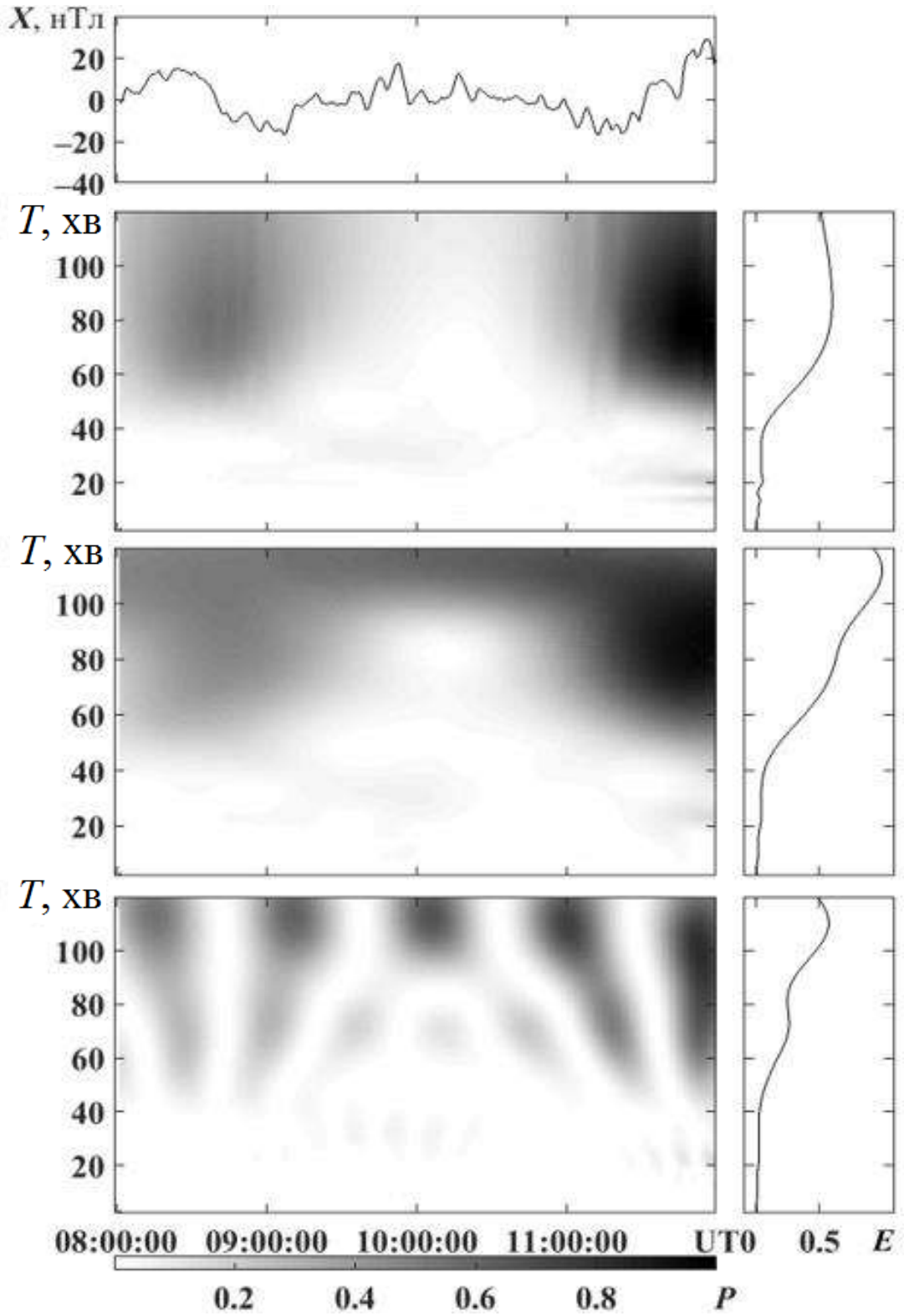


Рис. 2.9. Результати смугової фільтрації та ССА в діапазоні періодів 2–120 хв для станції HRN в інтервалі часу 08:00:00–12:00:00 UT.

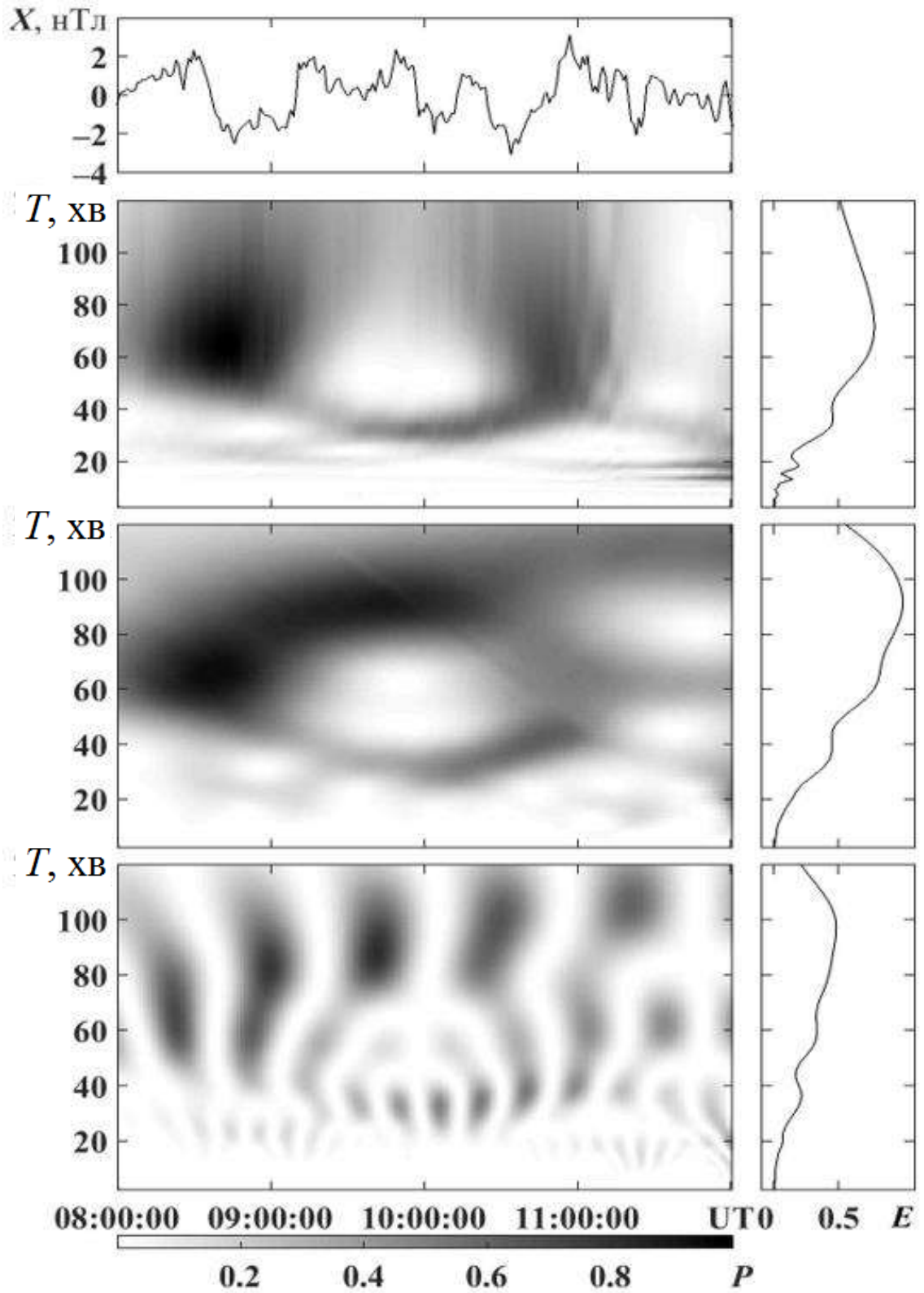


Рис. 2.10. Результати смугової фільтрації та ССА в діапазоні періодів 2–120 хв для станції LVV в інтервалі часу 08:00:00–12:00:00 UT.

Отже, спостережуваний аперіодичний ефект зменшення рівня Х-компоненти пояснюється механізмом, описаним в роботі [20] і розвиненому авторами [21, 22].

Квазіперіодичний ефект пов'язаний з генерацією атмосферних гравітаційних хвиль, які модулюють тиск атмосферного газу, а разом з ним і концентрацію електронів. При цьому виникає електричний струм з густиною

$$j_y \approx -\frac{1}{2}eNw,$$

де w – швидкість частинок у хвилі.

При досить великих j_y в незбурених умовах і збуреннях N у хвилі може бути ефективним механізм модуляції іоносферного струму.

Таким чином, обидва механізми пояснюють квазіперіодичний геомагнітний ефект СЗ.

Головні результати досліджень.

1. Виявлено та пояснено аперіодичний геомагнітний ефект сонячного затемнення, що полягає в зменшенні не більше, ніж на ~ 30 нТл рівня компоненти поля в напрямку "північ – південь". Ефект пояснюється зміною величини густини іоносферного струму в напрямку "захід – схід" в результаті зменшення під дією затемнення концентрації електронів.

2. Виявлено та пояснено квазіперіодичний геомагнітний ефект сонячного затемнення, викликаний генерацією затемненням атмосферних гравітаційних хвиль. Хвиля викликає модуляцію іоносферного струму, а також захоплення електронів, що створює додатковий квазіперіодичний іоносферний струм з періодом, рівним періоду хвилі. Амплітуда квазіперіодичних варіацій становила кілька одиниць нанотесла.

3. Системний спектральний аналіз дозволив уточнити періоди квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля, що супроводжували затемнення (близько 20 і 35 хв).

2.3. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р.

Загальні відомості. Часткове СЗ 124 сароса спостерігалось 25 жовтня 2022 р. і Європі, на Близькому Сході, у Центральній Азії, Західному Сибіру та на Північному Заході Африки [<https://www.intermagnet.org/>]. Затемнення розпочалося на території Ісландії о 08:58:20 у місцевості з такими географічними координатами: 66°28' пн.ш., 18°57' з.д. СЗ закінчилося в 13:02:16 у районі Аравійського моря з координатами 17°35' пн.ш., 66°31' сх.д. Максимальна фаза часткового СЗ сягала $M_{\max} \approx 0.8623$. Це спостерігалось у місцевості з координатами 61°36' пн.ш., 77°24' сх.д. Схема руху місячної тіні під час затемнення 25 жовтня 2022 р. показана на рис. 2.11.



Рис. 2.11. Контурна мапа розподілу станцій спостереження та зони часткового затемнення.

Дані та методи. Для виявлення геомагнітного ефекту СЗ 25 жовтня 2022 р. аналізувалися часові варіації рівня X-, Y-, Z-компонентів геомагнітного поля, зареєстровані світовою мережею INTERMAGNET

[<https://www.intermagnet.org/>]. При цьому розрізнявальна здатність за амплітудою складала 0.1 нТл, а за часом – 1 хв. Всього використано 15 магнітних станцій, розміщених у Європейських країнах, Росії, Туреччині та Індії (табл. 2.4). Крім даних для дня з СЗ, аналізувалися данні для контрольних днів. Фаза затемнення на станціях змінювалася від 0.210 до 0.838, а відносна площа покриття диска Сонця від 11 до 79%.

Перед аналізом варіацій рівня геомагнітного поля видалялась постійна складова. Для виявлення аперіодичного ефекту додатково обчислювався тренд цих компонентів геомагнітного поля на інтервалі 60 хв.

Магнітне поле Землі є досить чутливим до збурень різної фізичної природи і, особливо, до збурень на Сонці. Для виділення реакції геомагнітного поля на СЗ необхідно відкинути інші можливості джерела. При цьому в нагоді стає ретельний аналіз космічної погоди. Для цього використано дані з сайту [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

Стан космічної погоди. Збурення концентрації частинок n_{sw} сонячного вітру розпочалося 21 жовтня 2022 р., підсилились до $2.24 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ 22 жовтня 2022 р. (рис. 2.12). Після різкого спаду у другій половині доби 22 жовтня 2022 р. мали місце менші сплески n_{sw} до $1.2 \cdot 10^7 \cdot \text{м}^{-3}$ та до $2.0 \cdot 10^7 \cdot \text{м}^{-3}$ 23 та 26 жовтня відповідно. В день СЗ $n_{sw} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Швидкість V_{sw} частинок сонячного вітру 23 та 24 жовтня 2022 р. збільшилася від незбуреного значення $\sim 300 \text{ км/с}$ до 558 км/с . 25 жовтня $V_{sw} \approx 400 \text{ км/с}$.

Температура T_{sw} частинок сонячного вітру зросла від фонового значення $\sim 10^4 \text{ К}$ до $1.8 \cdot 10^5 \text{ К}$ і до $3.5 \cdot 10^5 \text{ К}$ 22 та 23 жовтня 2022 р. У день СЗ $T_{sw} \approx 5 \cdot 10^5 \text{ К}$.

Динамічний тиск p_{sw} частинок сонячного вітру зростав, флюктуючи, 21 та 22 жовтня 2022 р. до 4.9 нПа . Максимальне значення $p_{sw} \approx 5.3 \text{ нПа}$ мало місце 23 жовтня 2022 р. 25 жовтня 2022 р. він флюктуував у межах $1 \dots 1.5 \text{ нПа}$.

Рівень компонентів B_y і B_z міжпланетного магнітного поля у спокійних умовах флюктуував від -5 до $+5 \text{ нТл}$. Для B_y -компонента мінімальне значення

Таблиця 2.4.

Загальні відомості про сонячне затемнення 25 жовтня 2022 р.

Станція	Координати		t_1	t_m	t_2	M_{\max}	$A_{\max}, \%$	Схід сонця (UTC)	Захід сонця (UTC)
	Широта	Довгота							
Novosibirsk (Klyuchi) NVS Russia	54.8500°N	83.2300°E	10:11	11:18	12:21	0.838	79	01:19	11:01
Arti ARS Russia	56.4330°N	58.5670°E	09:48	11:01	12:10	0.826	78	03:00	12:35
Sodankyla SOD Finland	67.3700°N	26.6300°E	09:11	10:21	11:30	0.68	60	05:55	13:55
Abisko ABK Sweden	68.3580°N	18.8230°E	09:09	10:15	11:21	0.64	55	06:33	14:19
Nurmijarvi NUR Finland	60.5100°N	24.6600°E	09:11	10:23	11:32	0.63	54	05:29	14:37
Lycksele LYC Sweden	64.6120°N	18.7480°E	09:09	10:16	11:22	0.615	52	06:11	14:42
Uppsala (Fiby) UPS Sweden	59.9030°N	17.3530°E	09:09	10:17	11:23	0.57	46	05:58	15:08
Lviv LVV Ukraine	49.9000°N	23.7500°E	09:20	10:31	11:42	0.53	43	05:04	15:09
Hel HLP Poland	54.6035°N	18.8107°E	09:11	10:21	11:30	0.53	42	05:34	15:18
Belsk BEL Poland	51.8360°N	20.7890°E	09:15	10:26	11:36	0.52	41	05:20	15:17
Jaipur JAI India	26.9200°N	75.8000°E	11:03	12:05	13:00	0.52	41	01:01	12:15
Surlari SUA Romania	44.6800°N	26.2500°E	09:27	10:41	11:51	0.505	40	04:45	15:11
Iznik IZN Turkey	40.5000°N	29.7200°E	09:38	10:52	12:01	0.50	39	04:22	15:03
Alibag ABG India	18.6380°N	72.8720°E	11:21	12:16	13:03	0.36	24	01:04	12:36
Hartland HAD United Kingdom	51.0000°N	4.4800°W	09:10	9:57	10:42	0.21	11	07:01	17:05

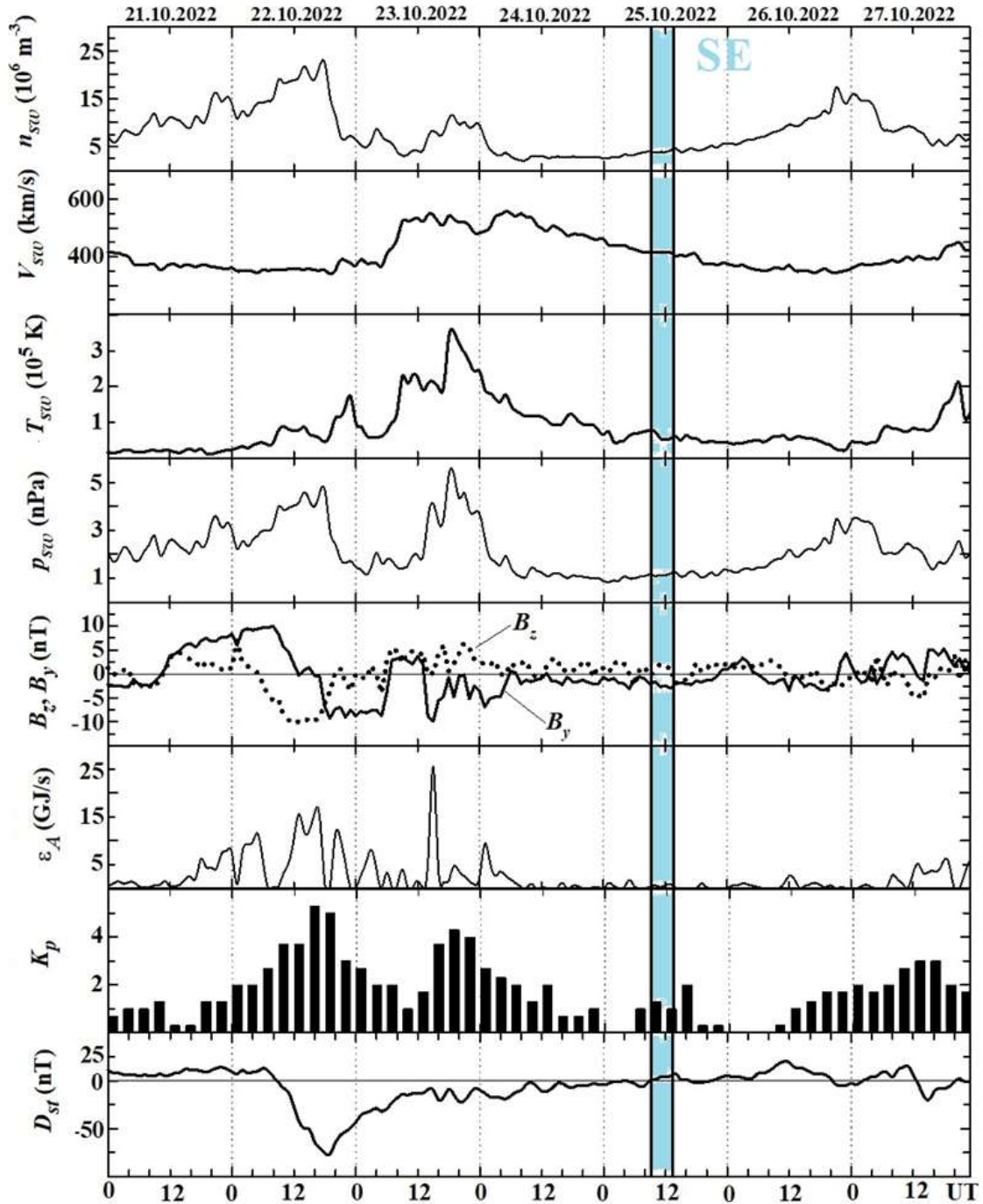


Рис. 2.12. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 21 жовтня – 27 жовтня 2022 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

складало -9.9 нТл, а максимальне -10 нТл. Максимальне значення B_z -компонента сягало 6.9 нТл, а мінімальне значення наближалось до -10.2 нТл. Останнє мало місце опівдні 22 жовтня 2022 р. Це було ознакою геомагнітної бурі. І, дійсно, вдень 22 та 23 жовтня 2022 р. параметр Акасофу, що описує приплив енергії до магнітосфери, виріс від фонового значення ~ 1 до 25.4 Гдж/с. У день С3 та 26 жовтня 2022 р. цей параметр не перевищував ~ 1 Гдж/с.

Планетарний індекс K_p 21 жовтня 2022 р. не перевищував 1.3 , а 22 жовтня 2022 р. він зріс до $K_{p\max} = 5.3$. Наступного дня він сягав $4 \dots 4.3$. У день С3 $K_p = 0 \dots 2$.

21 жовтня 2022 р. значення D_{st} -індекса не перевищувало ~ 10 нТл. Після 06:40 22 жовтня 2022 р. цей індекс різко зменшувався впродовж 12 годин до -76 нТл. 25 жовтня 2022 р. значення D_{st} -індекса флюктувало у межах від -10 до $+10$ нТл.

Часові варіації B_z -компонента, параметра Акасофу, K_p -індекса та D_{st} -індекса свідчать про те, що на Землі спостерігалася геомагнітна буря. За класифікацією NOAA [<http://www.sec.noaa.gov>] вона належить до помірних (moderate), а за класифікацією [3] до сильної бурі.

На тлі магнітної бурі, що розпочалася 22 жовтня 2022 р. та продовжувалася до кінця доби 24 жовтня 2022 р., важко обрати контрольні дні. День 27 жовтня 2022 р. також був збуреним ($K_{p\max} = 3$, $D_{st} \approx -20 \dots +20$ нТл). Найбільш спокійним був день 26 жовтня 2022 р. Менш спокійним був день 21 жовтня 2022 р. Саме ці дні обрано в якості контрольних.

Результати аналізу. Будемо порівнювати варіації компонентів геомагнітного поля для 25 та 26 жовтня 2022 р.

Станція NVS. Для цієї станції $M_{\max} \approx 0.838$, $A_{\max} \approx 70\%$. Особливістю спостережень геомагнітного ефекту на станції було те, що до настання максимальної фази затемнення мав місце захід Сонця на поверхні планети (рис. 2.13). На висотах іоносфери, які формують геомагнітний ефект ($z \approx 90 \dots 150$ км), це відбулося за $1 \dots 1.5$ год. Як видно із рис. 2.13 а, ці

компоненти геомагнітного поля досить сильно флюктували у часі. Тому зручніше аналізували тренди \bar{X} , \bar{Y} і \bar{Z} (рис. 2.13 б).

Зменшення \bar{X} розпочалося за 40 хв. до початку СЗ на поверхні Землі та тривало близько 140 хв. При цьому $\bar{X} \approx -6$ нТл. Зменшення тренду \bar{Y} на 2.5 нТл також розпочалося за 30 хв. до початку СЗ та тривало 90 хв. Зменшення рівня \bar{Z} на 1.5 нТл тривалістю 110 хв розпочалося одночасно з початком СЗ.

Станція ARS. Для цієї станції $M_{\max} \approx 0.826$, $A_{\max} \approx 78\%$. Захід Сонця спостерігався після закінчення СЗ (рис. 2.14). Суттєве (до 4.5 нТл) зменшення \bar{X} тривалістю близько 180 хв розпочалося практично одночасно з початком СЗ.

Значення \bar{Y} спочатку зменшилося на 1 нТл, а потім збільшилося приблизно на стільки же. Деяке (до 1 нТл) зменшення рівня \bar{Z} розпочалося приблизно за 10 хв після початку СЗ та тривало близько 90 хв.

Станція SOD. Для фінської станції $M_{\max} \approx 0.680$, $A_{\max} \approx 60\%$. Для високоширотної станції флюктуації рівня всіх компонент були значними (до 10 нТл) (рис. 2.15 а). СЗ мало місце приблизно опівдні. Після початку СЗ тренд \bar{X} спочатку зростав до 4 нТл впродовж 60 хв, а потім зменшувався на 4 нТл впродовж 120 хв (рис. 2.15). Рівень \bar{Y} після початку СЗ зменшувався на 5 нТл.

Це тривало близько 110 хв. Значення \bar{Z} помітно (до 3 нТл) зменшилися лише після досягнення значення M_{\max} . Це тривало не менше 150 хв.

Станція АВК. Для шведської станції $M_{\max} \approx 0.640$, $A_{\max} \approx 55\%$. Ця станція належить також до високоширотних. Це обумовило значні (до 20 нТл) флюктуації рівня всіх компонентів геомагнітного поля (рис. 2.16 а). СЗ мало місце поблизу опівдня. Тренд \bar{X} , помітно флюктуючи, зменшився приблизно на 3 нТл (рис. 2.16). Це спостерігалось поблизу максимальної фази СЗ та продовжувалося 120 хв. Тренд \bar{Y} впродовж 100 хв зменшувався на 2 нТл.

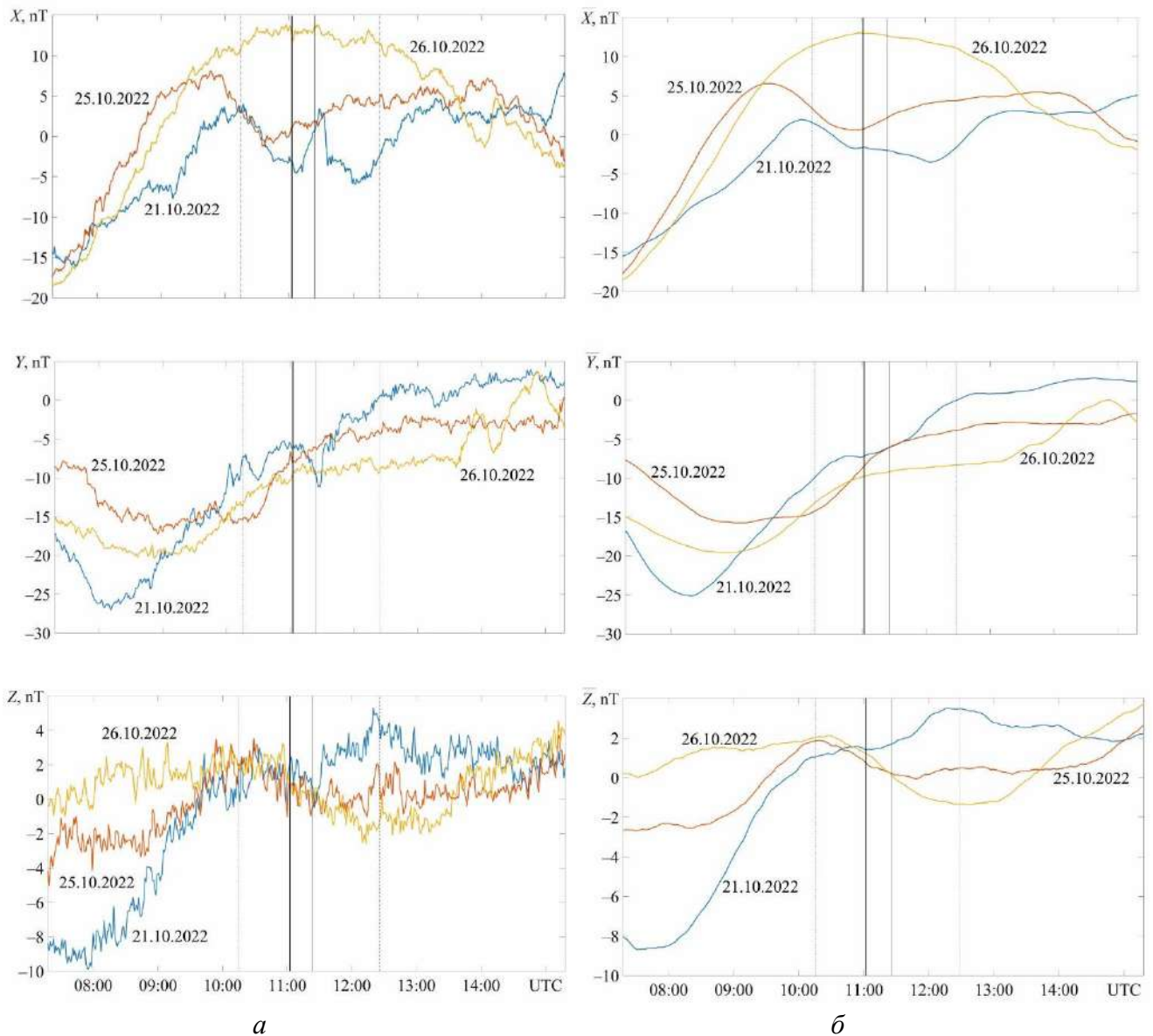


Рис. 2.13. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*а*) та тренду (*б*) на станції NVS (максимальна фаза – 0.838; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 79%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією)

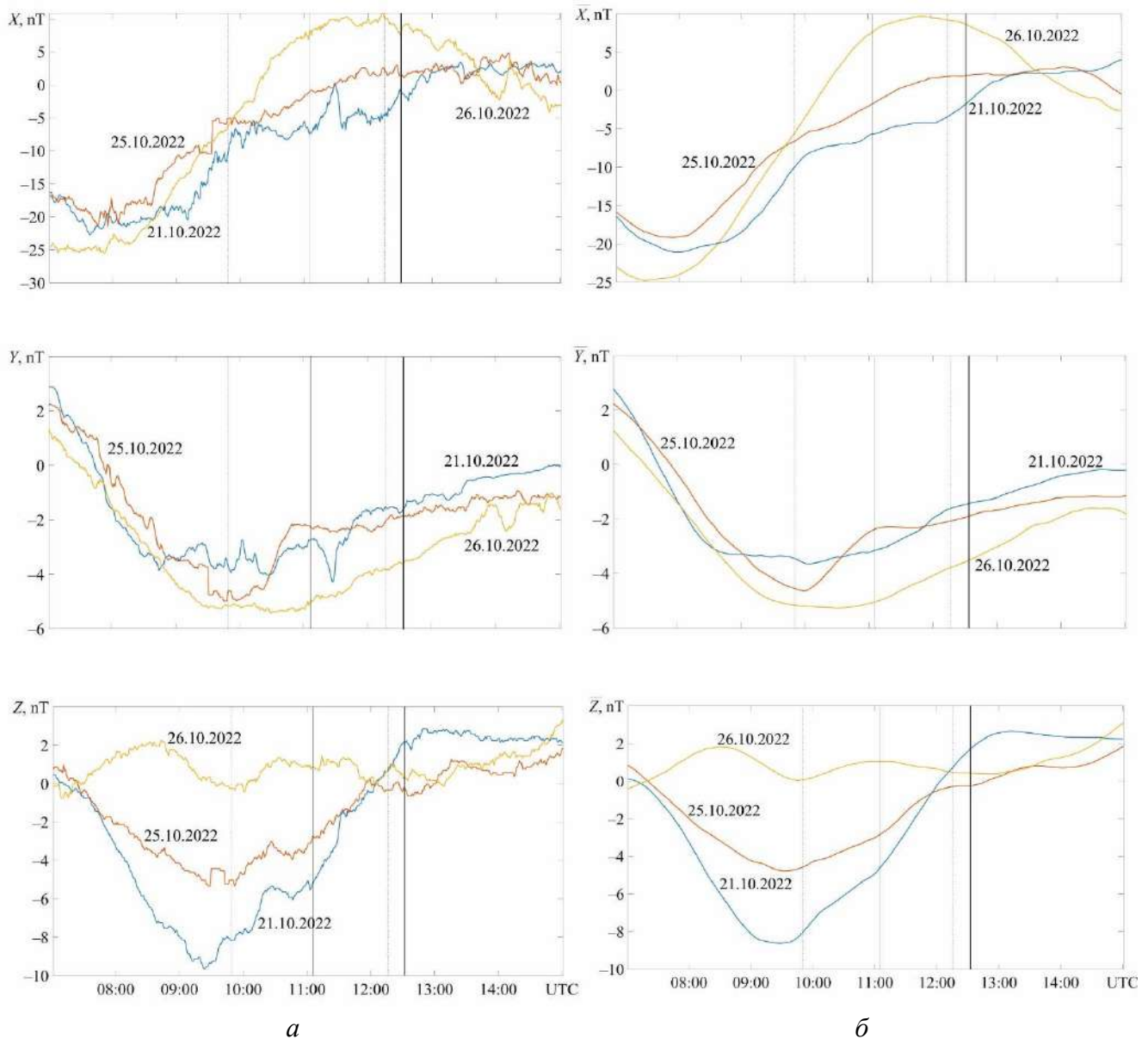


Рис. 2.14. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції ARS (максимальна фаза – 0.826; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 78%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією)

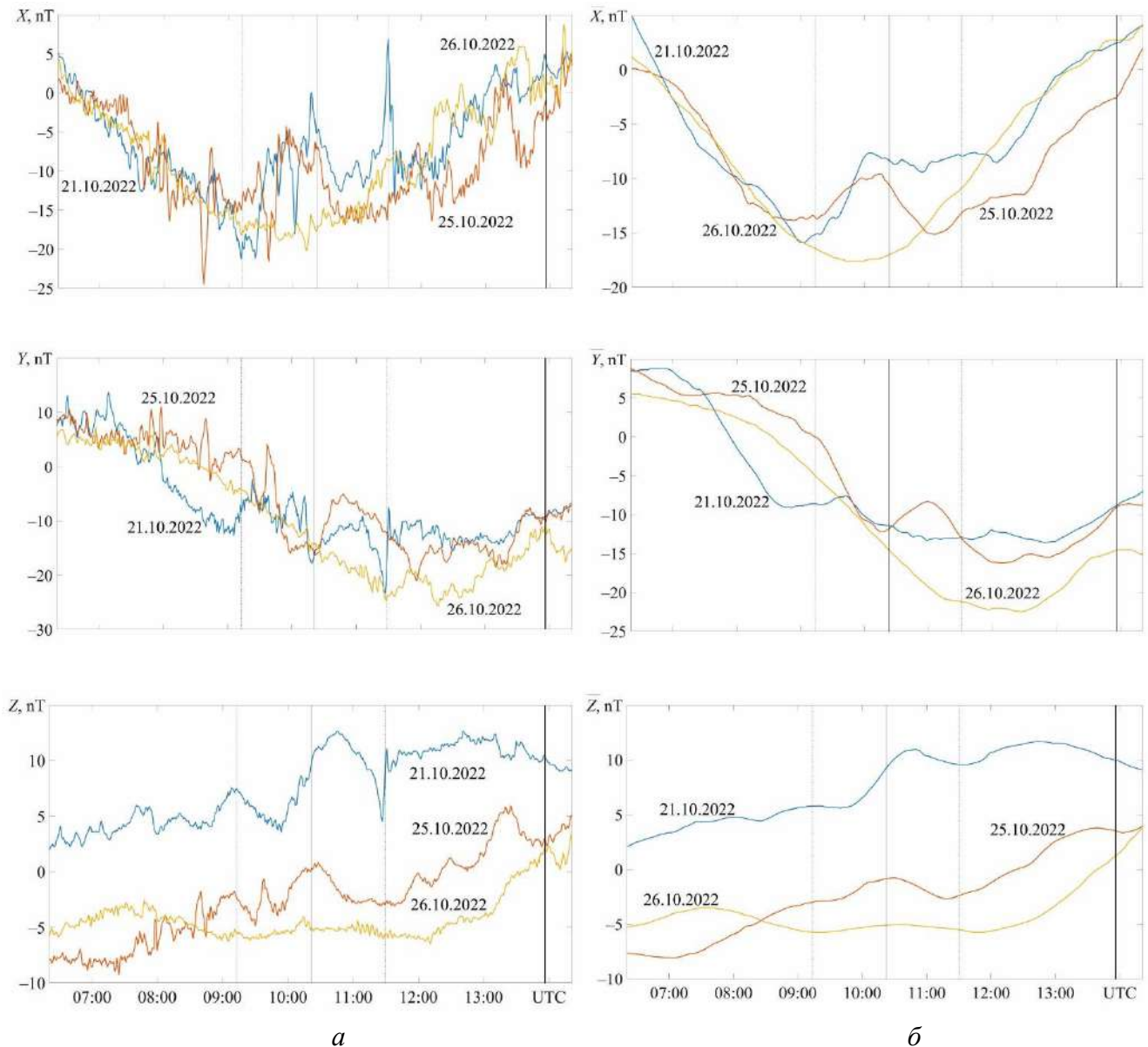


Рис. 2.15. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*а*) та тренду (*б*) на станції SOD (максимальна фаза – 0.68; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 60%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією)

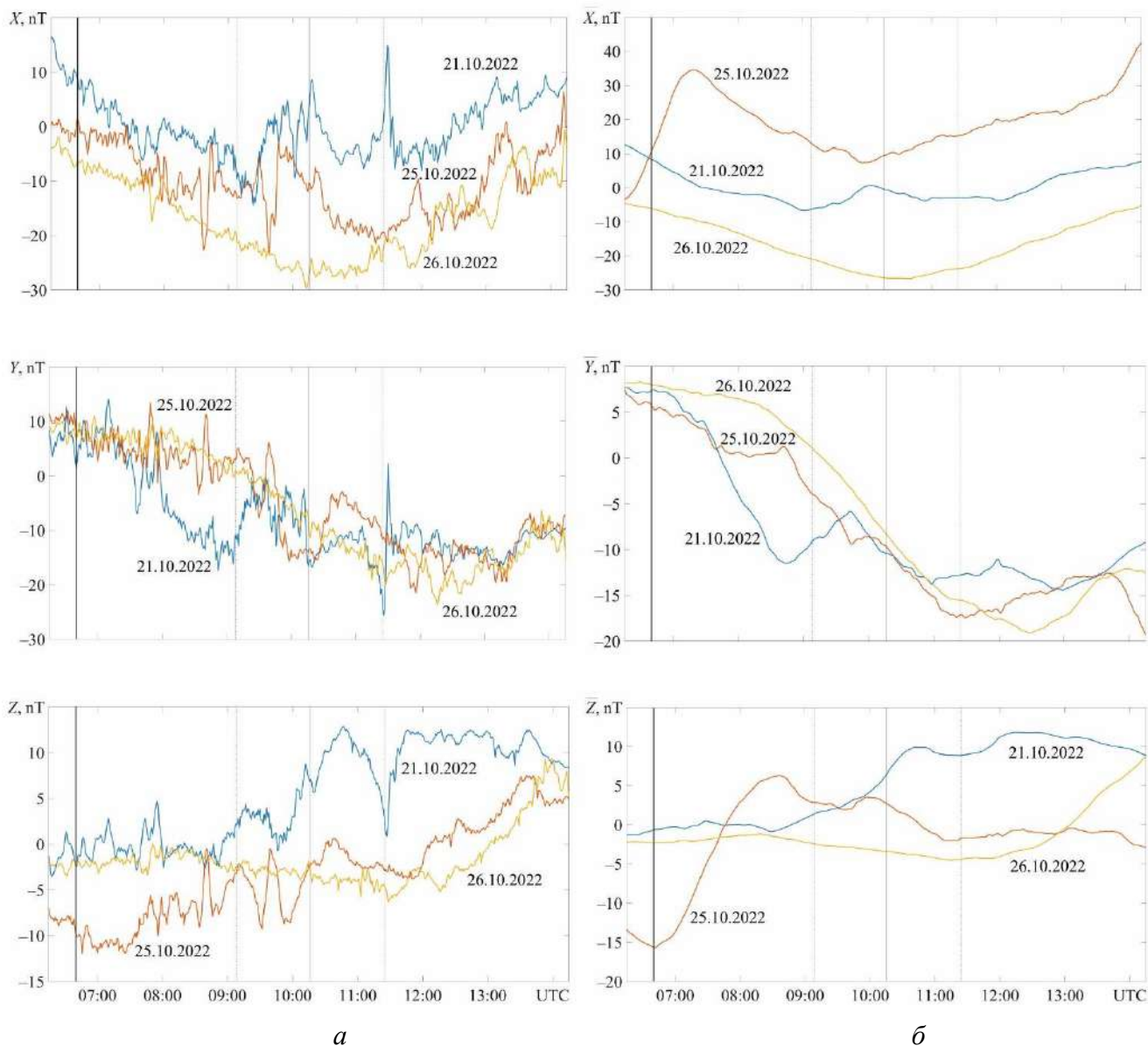


Рис. 2.16. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції АВК (максимальна фаза – 0.64; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 55%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією)

Значення \bar{Z} зменшувалися двічі. Перший раз з 08:40 до 10:00. При цьому $\Delta\bar{Z} \approx -(2...2.5)$ нТл. Другий раз з 10:00 до 12:25. Зменшення сягало 3 нТл.

Станція NUR. Для фінської станції $M_{\max} \approx 0.630$, $A_{\max} \approx 54\%$. На широтах цієї станції ($\sim 60^\circ$) флуктуації рівня всіх компонент відносно невеликі (1...1.5 нТл) (рис. 2.17 а). Зменшення \bar{X} на 2.5 нТл тривалістю близько 90 хв спостерігалось практично одночасно з настанням СЗ. Зменшення рівня \bar{Y} реєструвалося двічі. Перший раз від початку затемнення впродовж 90...100 хв. При цьому $\Delta\bar{Y} \approx -(4...5)$ нТл. Другий раз з 11:00 до 14:00. У цьому випадку $\Delta\bar{Y} \approx -(6...8)$ нТл. Тренд \bar{Z} після настання СЗ зменшився на 0.5 нТл. Після фази затемнення з M_{\max} тренд ще зменшився на 1.5...2 нТл. Це тривало 70...80 хв.

Станція LYS. Для шведської станції $M_{\max} \approx 0.615$, $A_{\max} \approx 52\%$. Хоча станція знаходиться на широті близько 65° , флуктуації рівня всіх компонент геомагнітного поля сягали 10...20 нТл (рис. 2.18 а). СЗ спостерігалось приблизно опівдні. Після початку СЗ падіння рівня \bar{X} припинилося, а після моменту часу з M_{\max} тренд \bar{X} зменшився на 3 нТл, що продовжувалося приблизно 120 хв (рис. 2.18). Тренд \bar{Y} зменшувався двічі. Перший раз відразу після початку СЗ на 5 нТл тривалістю 100 хв. Другий раз з 11:00 до 14:00. При цьому $\Delta\bar{Y} \approx -(7...8)$ нТл. Зменшення рівня \bar{Z} тривалістю 80 хв не перевищувало 1 нТл.

Станція UPS. Для шведської станції $M_{\max} \approx 0.570$, $A_{\max} \approx 46\%$. Суттєве зменшення \bar{X} (до 3 нТл) мало місце після моменту часу з M_{\max} та тривало 100 хв (рис. 2.19). Перше зменшення рівня \bar{Y} на 2 нТл мало місце майже відразу після настання СЗ та тривало 70...80 хв. Друге зменшення на 7...8 нТл спостерігалось з 11:00 до 14:00. Незначне зменшення (до 1 нТл) рівня \bar{Z} реєструвалося з 10:20 до 11:30, тобто після моменту часу з M_{\max} (10:17).

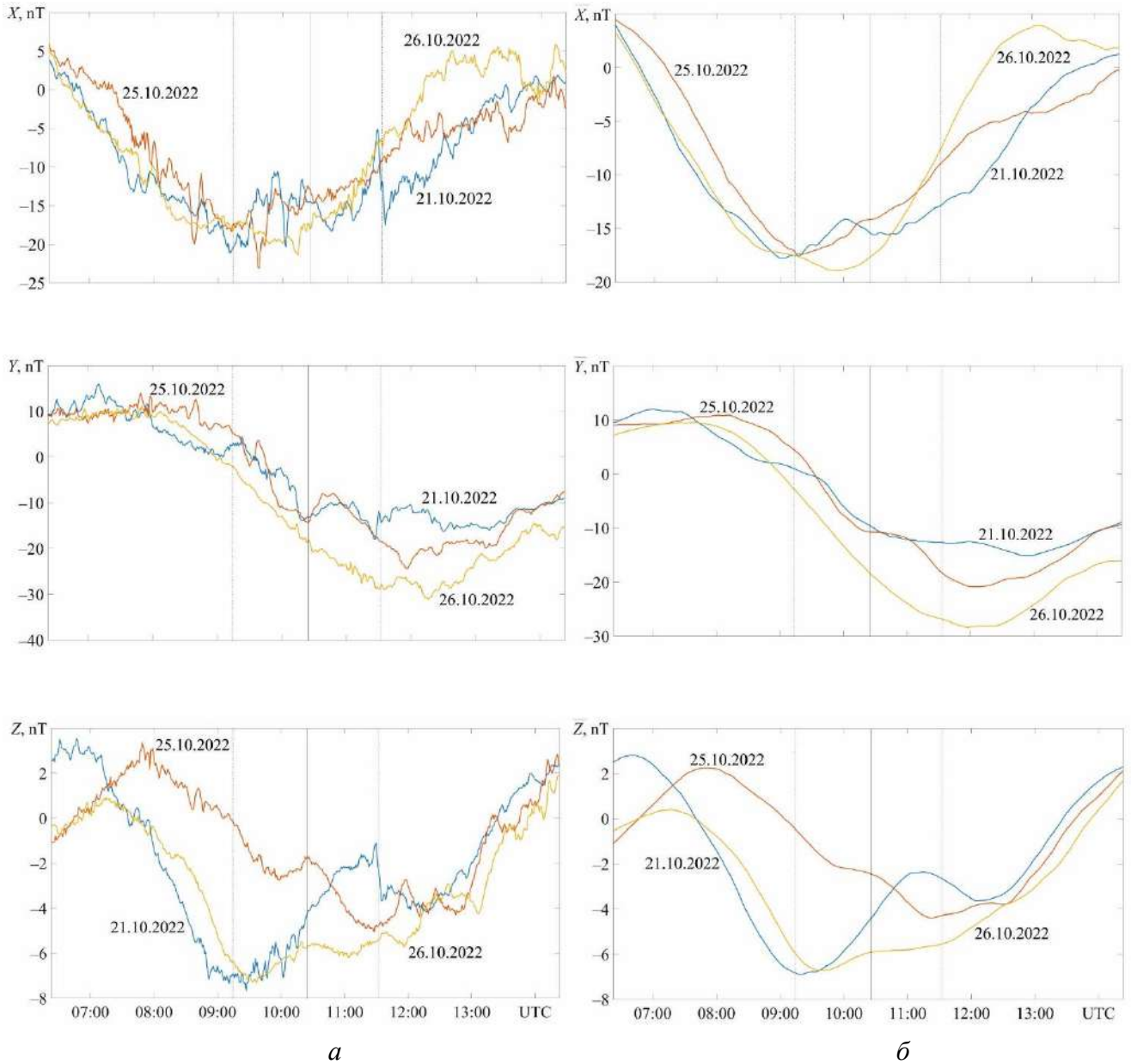


Рис. 2.17. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*а*) та тренду (*б*) на станції NUR (максимальна фаза – 0.63; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 54%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ

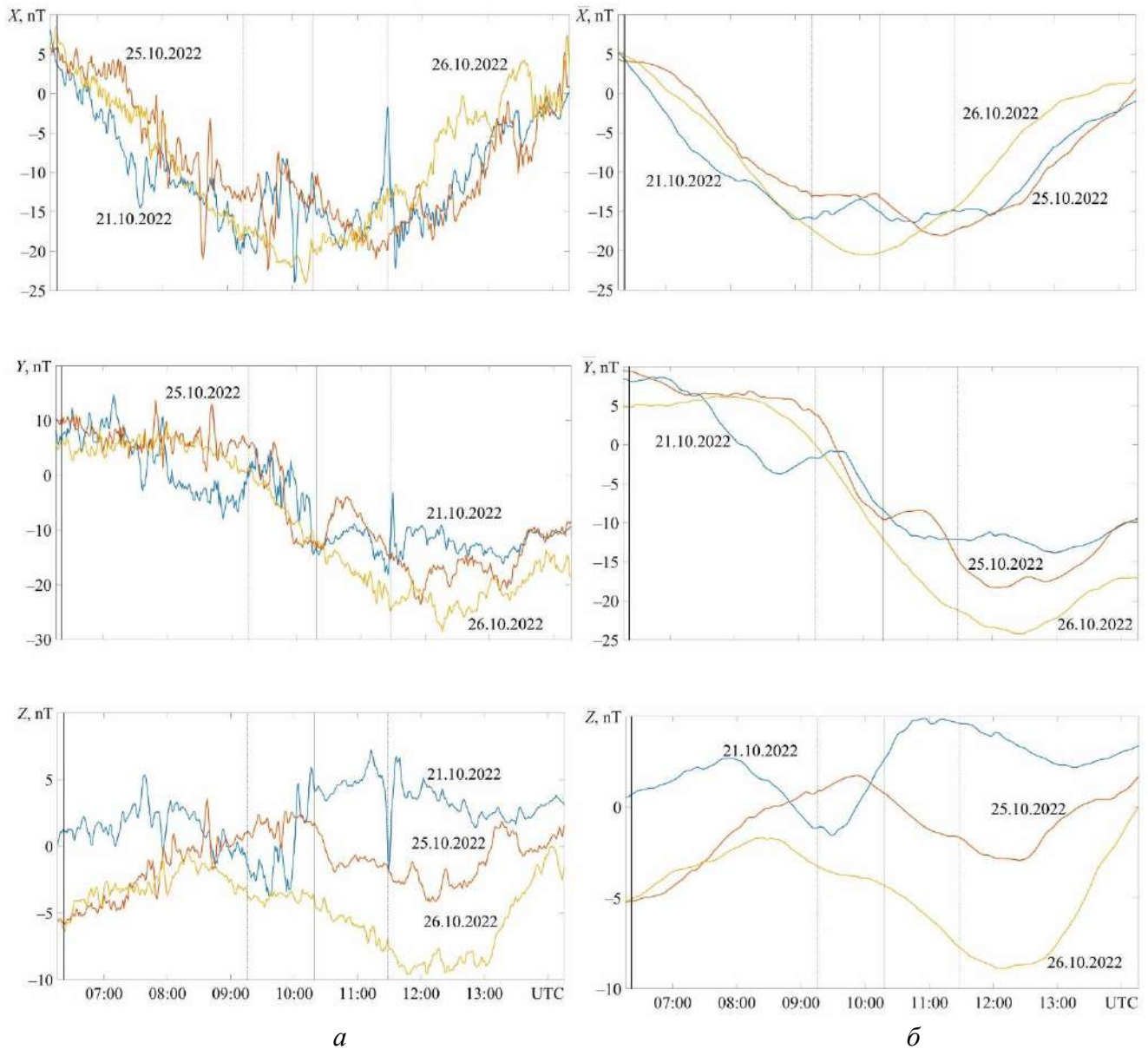


Рис. 2.18. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*а*) та тренду (*б*) на станції LYC (максимальна фаза – 0.615; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 52%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією)

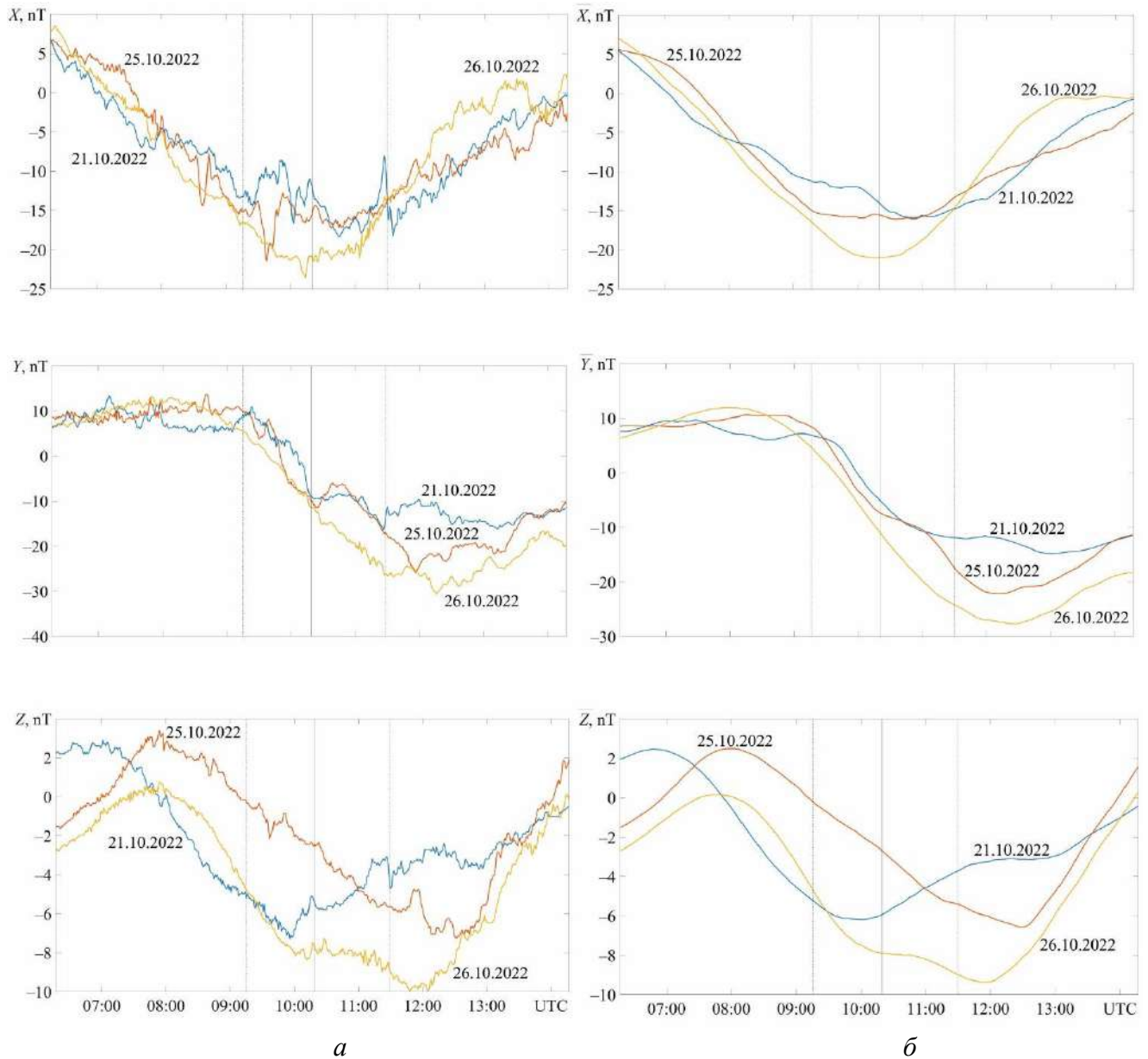


Рис. 2.19. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції UPS (максимальна фаза – 0.57; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 46%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ

Станція HLP. Для польської станції $M_{\max} \approx 0.530$, $A_{\max} \approx 42\%$. Незначне (до 2 нТл) зменшення тренду \bar{X} спостерігалось з 10:15 до 11:30 (рис. 2.20).

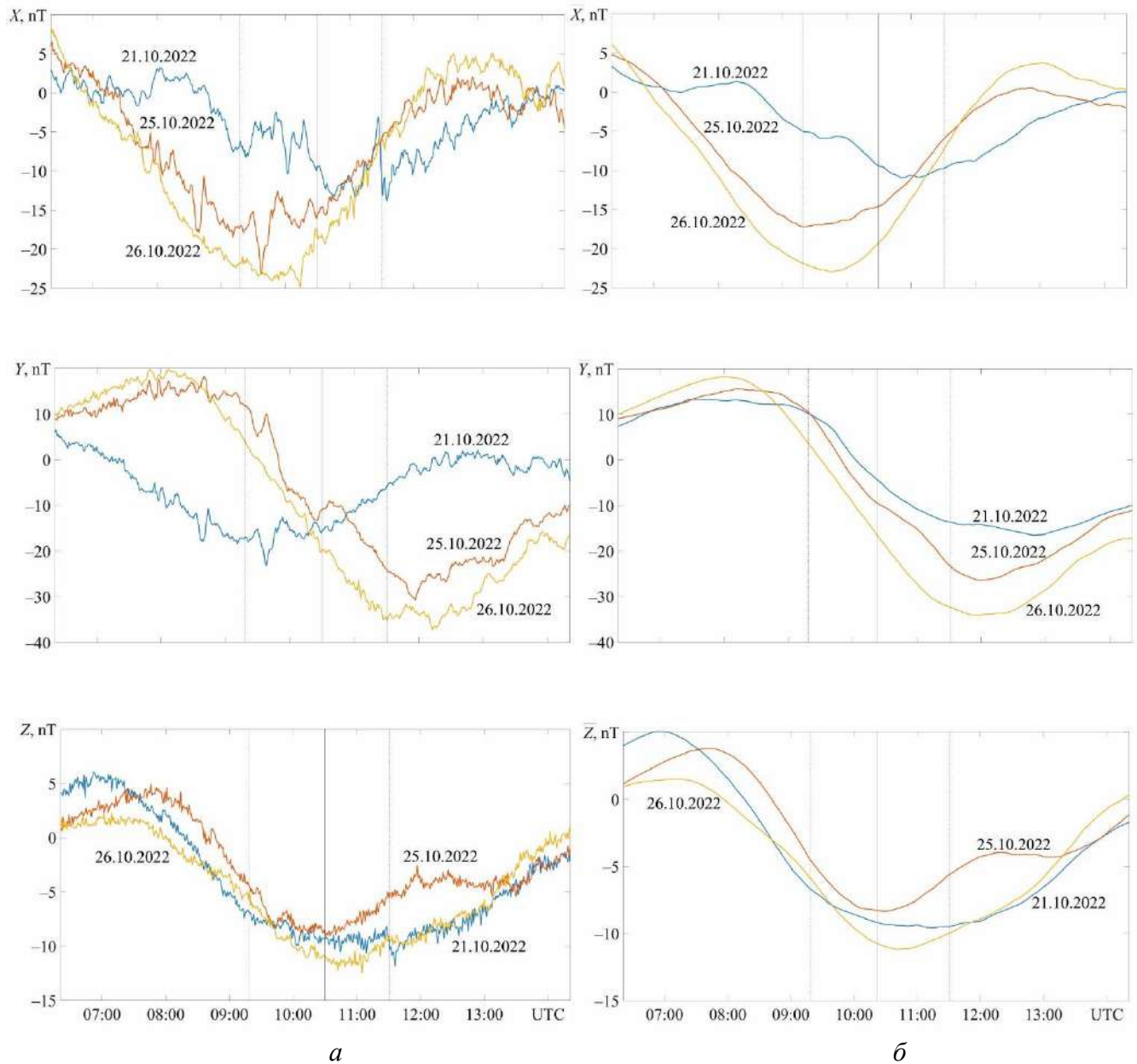


Рис. 2.20. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*а*) та тренду (*б*) на станції HLP (максимальна фаза – 0.53; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 42%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ

Зменшення рівня \bar{Y} мало місце двічі. Практично після початку СЗ рівень зменшився на 2 нТл, що тривало 90...100 хв. Вдруге зменшення рівня \bar{Y} на ~ 10 нТл спостерігалось з 11:00 до 14:00. Можливе зменшення рівня \bar{Z}

співпало з добовим зменшенням. Це сильно ускладнювало виявлення ефекту СЗ. Можливо, затемнення призвело до зменшення рівня \bar{Z} десь на 1 нТл. Швидше за все, це мало місце поблизу моменту часу з M_{\max} . Після 11:00, навпаки, спостерігалася тенденція до зростання рівня \bar{Z} на 2...3 нТл.

Станція LVV. Для української станції $M_{\max} \approx 0.530$, $A_{\max} \approx 43\%$. Незначне (до 2 нТл) зменшення тренду \bar{X} реєструвалося приблизно з 09:00 до 10:20 (рис. 2.21). Зменшення рівня \bar{Y} мало місце двічі. Перший раз від початку СЗ до 11:00, тобто близько 90...100 хв. При цьому $\Delta\bar{Y} \approx -2$ нТл. Вдруге зменшення \bar{Y} до 7...8 нТл реєструвалося з 11:00 до 14:00. Зменшення до 1.5...2 нТл тренду \bar{Z} спостерігалася після початку СЗ і тривало близько 90 хв.

Станція BEL. Для польської станції $M_{\max} \approx 0.520$, $A_{\max} \approx 41\%$. Для станції BEL результати подібні до результатів, описаних для станції LVV (рис. 2.21 та рис. 2.22).

Станція JAI. Для індійської станції $M_{\max} \approx 0.520$, $A_{\max} \approx 41\%$. Незначне (до 2 нТл) зменшення рівня \bar{X} мало місце приблизно впродовж СЗ (рис. 2.23).

Приблизно таким же (до 2 нТл) було зменшення трендів \bar{Y} і \bar{Z} тривалістю біля 100 хв. Особливістю спостережень на цій станції було те, що СЗ мало місце поблизу заходу сонця на поверхні Землі.

Станція SUA. Для румунської станції $M_{\max} \approx 0.505$, $A_{\max} \approx 40\%$. СЗ спостерігалася практично опівдні. Вплив СЗ співпав із денним зменшенням рівня усіх компонентів (рис. 2.24). На цьому тлі для X-компоненти не вдалося виділити ефект СЗ. Для Y-компоненти мало місце зменшення на 2 нТл рівня після початку затемнення впродовж 80...90 хв. Вдруге тренд \bar{Y} зменшувався на 6...8 нТл з 11:00 до 14:00, тобто, починаючи приблизно за 15 хв після моменту часу з M_{\max} . Суттєве зменшення рівня \bar{Z} -компонента до декількох нанотесла спостерігалася після початку СЗ і тривало 70...90 хв.

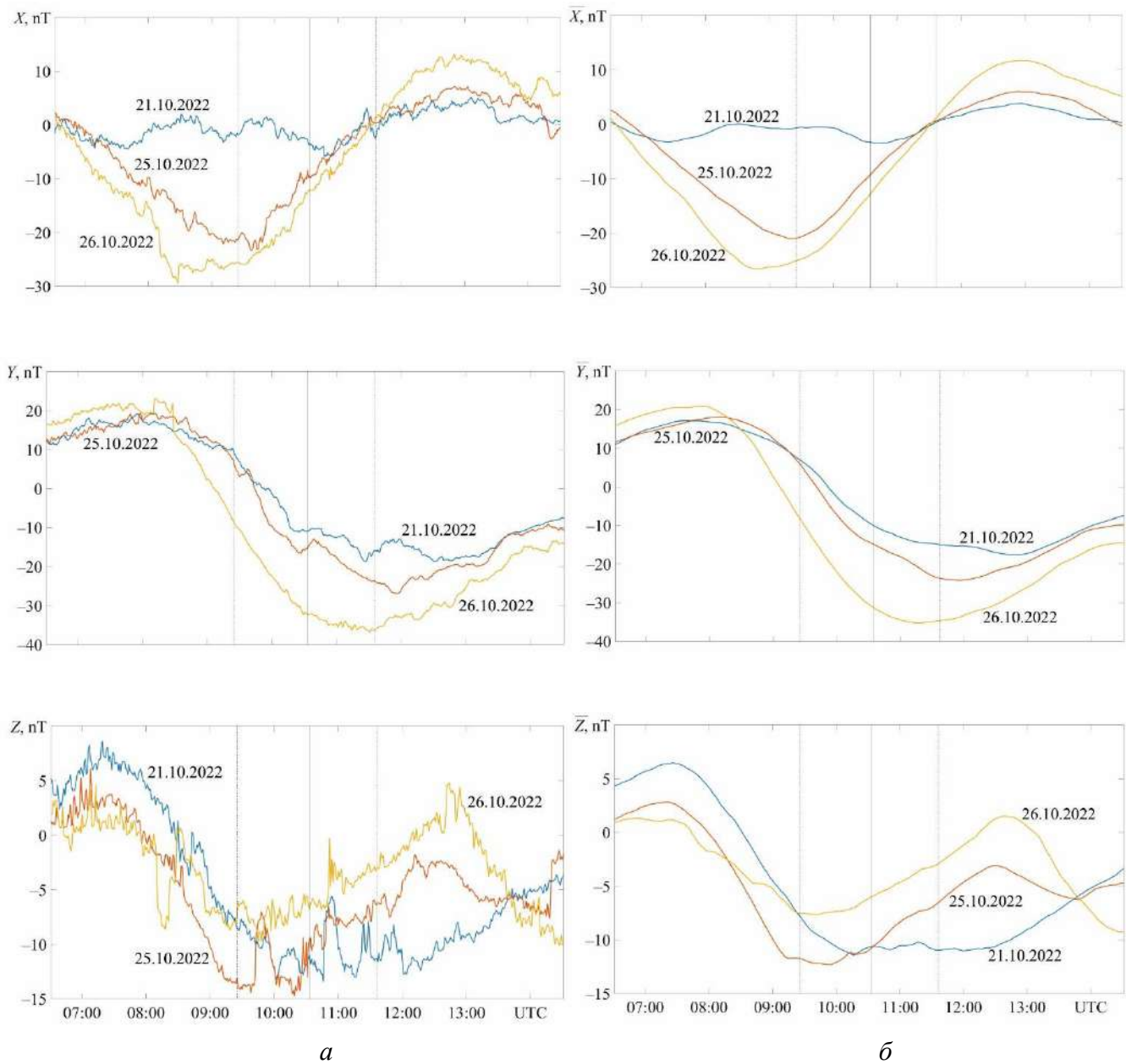


Рис. 2.21. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції LVV (максимальна фаза – 0.53; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 43%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ

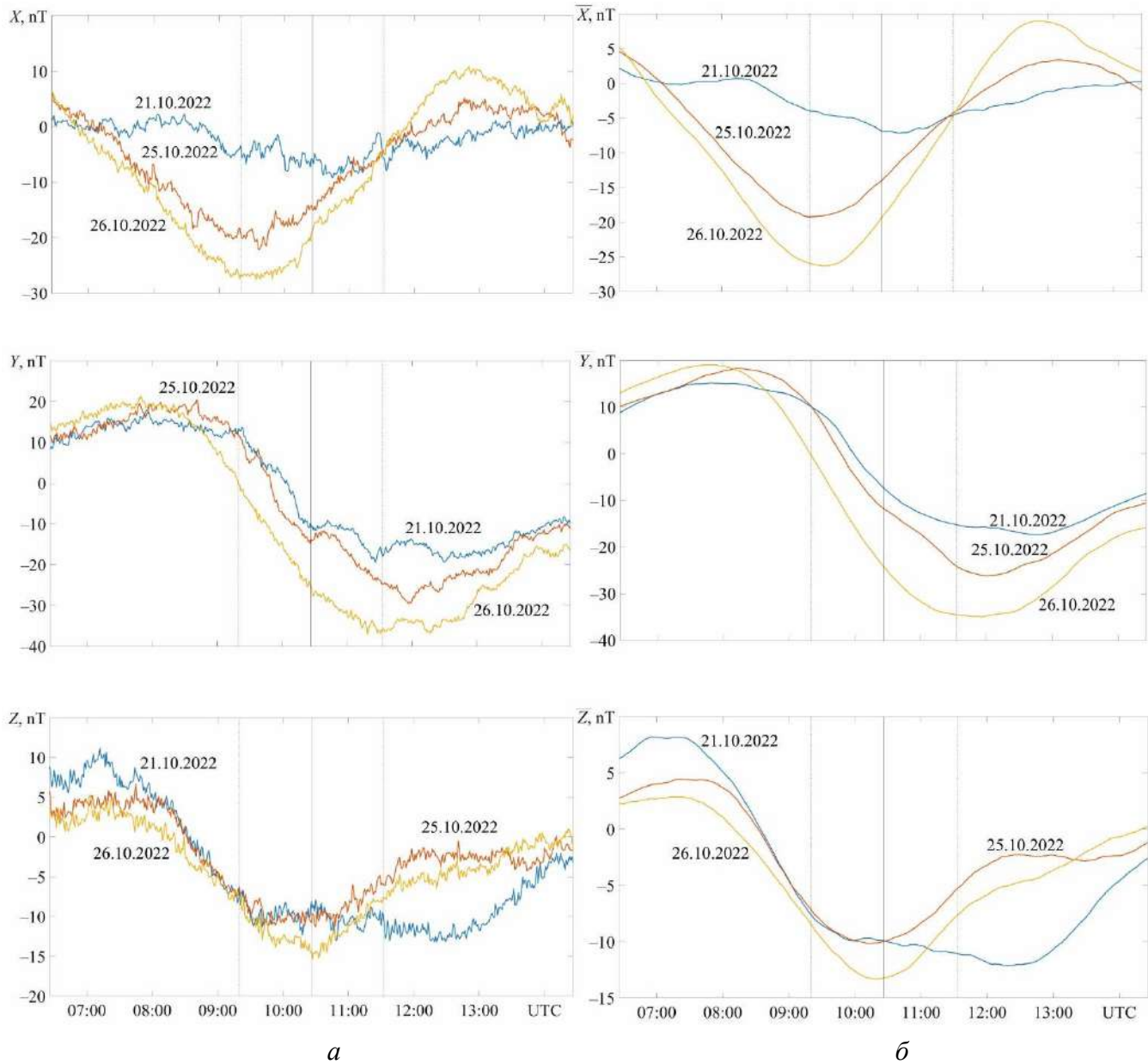


Рис. 2.22. Часові варіації компонент геомагнітного поля (а) та тренду (б) на станції BEL (максимальна фаза – 0.52; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 41%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ

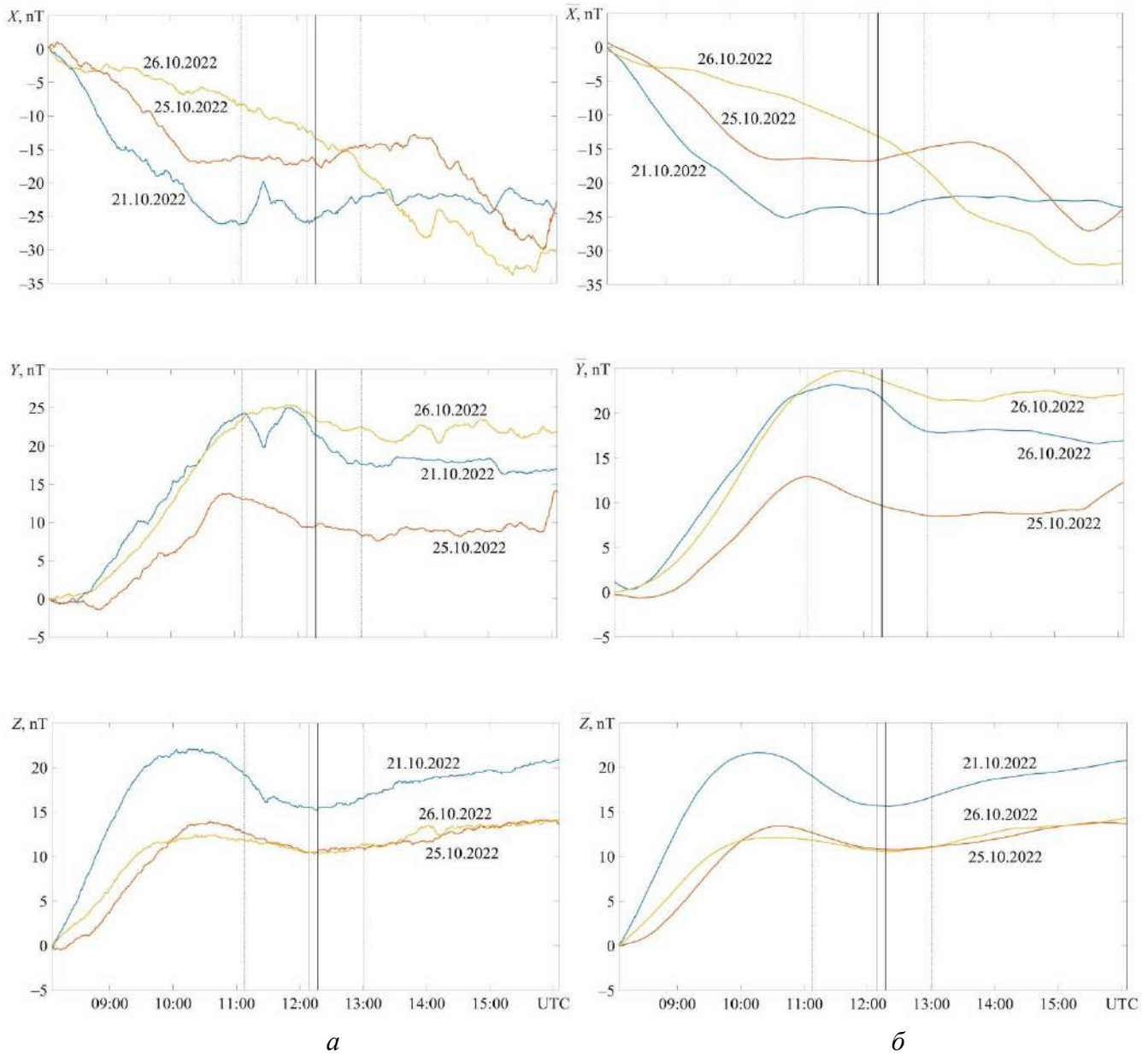


Рис. 2.23. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції JAI (максимальна фаза – 0.52; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 41%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією)

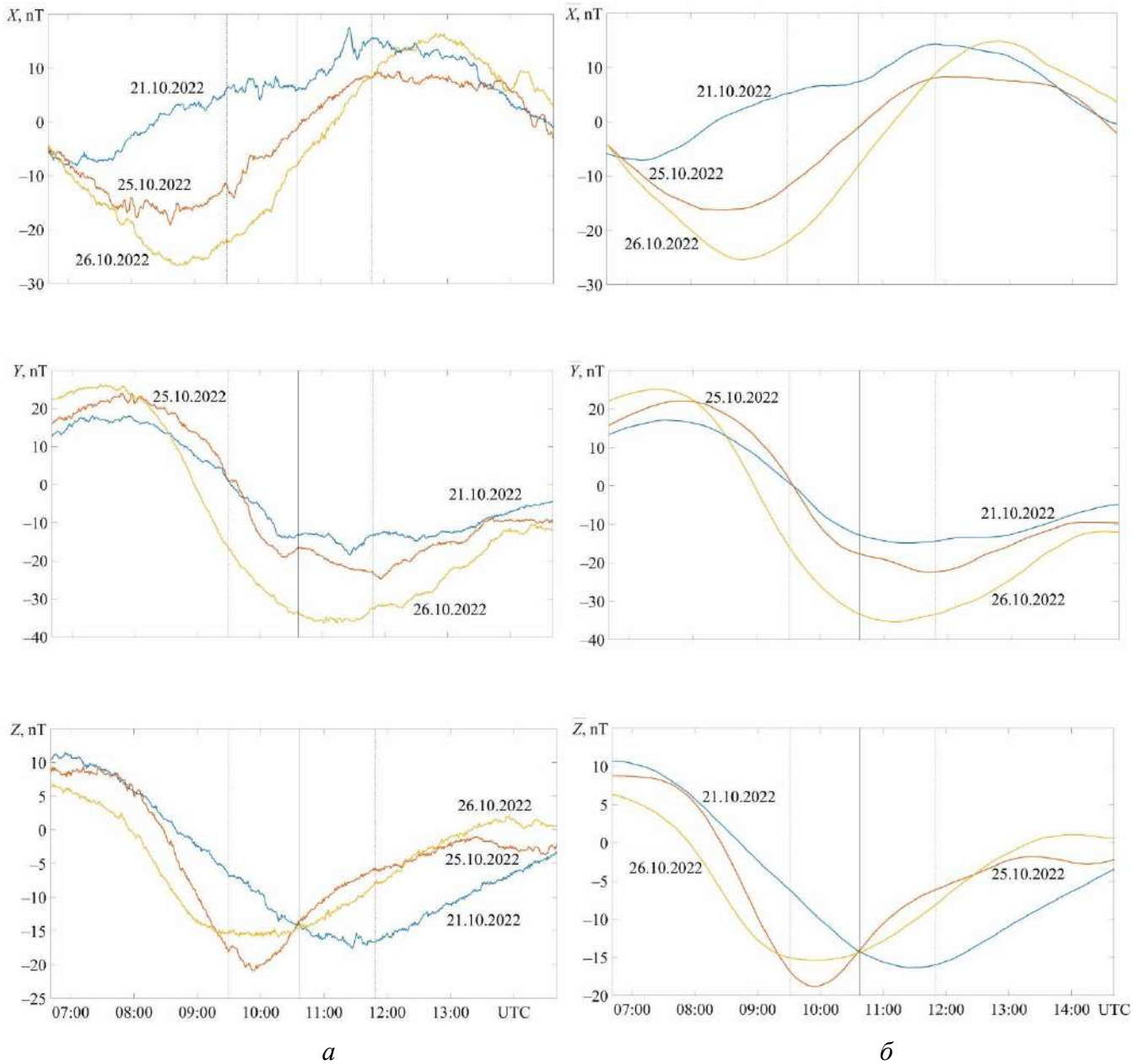


Рис. 2.24. Часові варіації компонент геомагнітного поля (а) та тренду (б) на станції SUA (максимальна фаза – 0.505; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 40%) у день С3 та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення С3, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу С3

Станція IZN. Для турецької станції $M_{\max} \approx 0.500$, $A_{\max} \approx 39\%$. Незначне (до 2 нТл) зменшення тренду \bar{X} реєструвалося з 10:00 до 11:20 (рис. 2.25). Рівень \bar{Y} зменшувався двічі. Перший раз приблизно на 5 нТл з 09:40 до

11:00. Вдруге з 11:00 до 14:00. При цьому $\Delta\bar{Y} \approx -4$ нТл. Зменшення рівня \bar{Z} не перевищувало 2 нТл та мало місце 09:40 до 10:50.

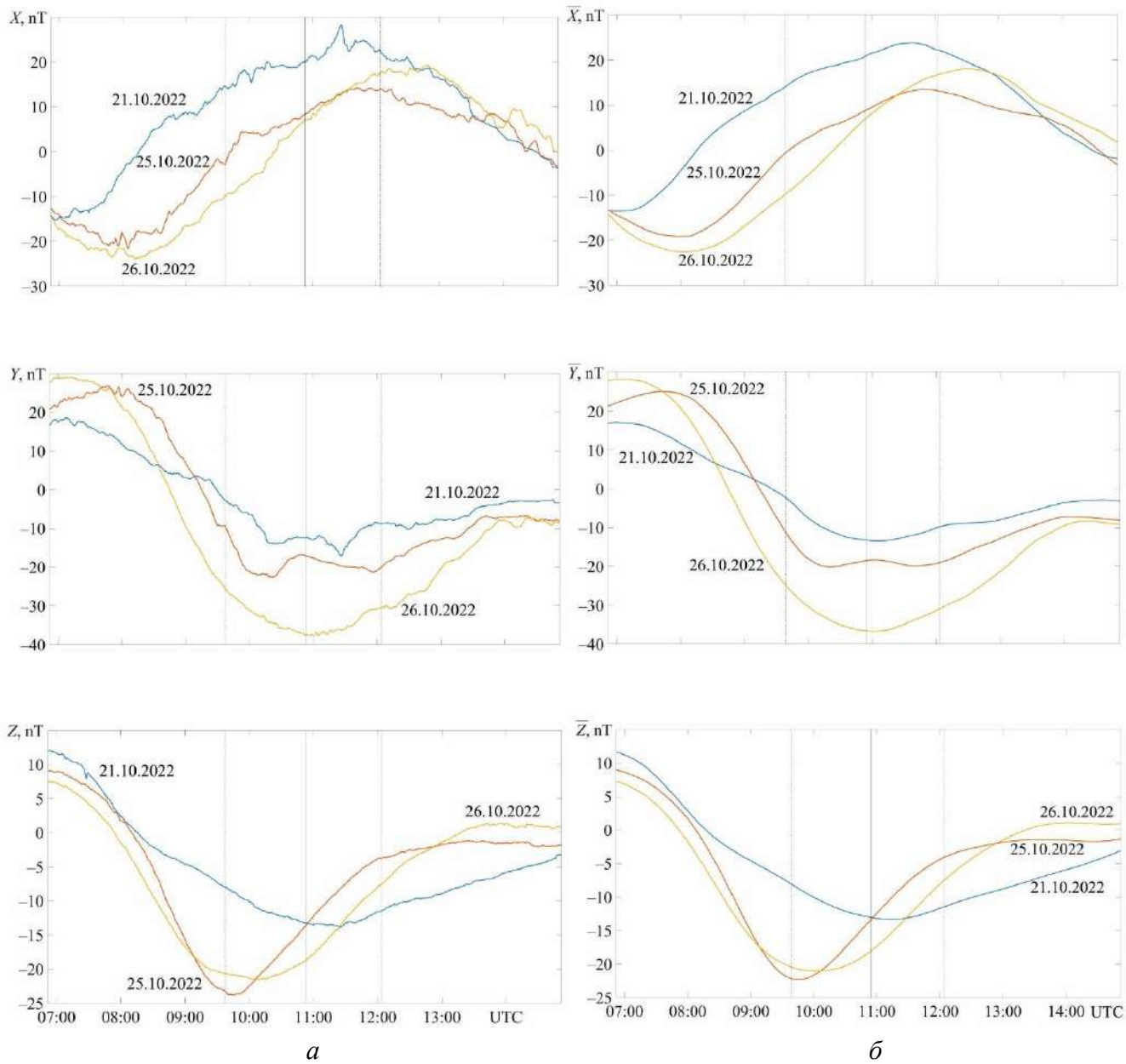


Рис. 2.25. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції IZN (максимальна фаза – 0.50; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 39%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ

Станція ABG. Для індійської станції $M_{\max} \approx 0.360$, $A_{\max} \approx 24\%$. Особливістю СЗ для цієї станції було те, що воно спостерігалось поблизу заходу Сонця на поверхні планети. Дуже не значне (~ 1 нТл) зменшення рівня \bar{X} реєструвалося з 11:50 до 13:00 (рис. 2.26). Тренд \bar{Y} зменшувався до 2 нТл впродовж 150 хв. Зменшення рівня \bar{Z} до 2 нТл спостерігалось з 11:20 до 14:00.

Станція HAD. Для британської станції $M_{\max} \approx 0.210$, $A_{\max} \approx 11\%$. СЗ спостерігалось в ранковий час, за 2 години після сходу Сонця на поверхні Землі (рис. 2.27). Впродовж СЗ мало місце зростання рівня \bar{X} приблизно на 1 нТл. Тренд \bar{Y} з 09:30 до 11:10 зменшувався на 2 нТл. Варіації рівня \bar{Z} , що могли бути викликанні СЗ, швидше за все, були відсутніми.

Збурення концентрації електронів. Рівняння балансу концентрації електронів N на висотах динамо-області атмосфери, що дає основний внесок у геомагнітний ефект СЗ, має вид:

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2, \quad (2.1)$$

де q – швидкість утворення електронів, α – коефіцієнт рекомбінації електронів з іонами. У квазістаціонарному випадку $dN/dt \approx 0$. Тоді з (2.1) маємо наступне рівняння:

$$q_0 = \alpha_0 N_0^2, \quad (2.2)$$

де індекс "0" означає незбурені умови. Поблизу моменту з фазою СЗ M_{\max} маємо для N_{\min} наступне співвідношення:

$$q = \alpha N_{\min}^2. \quad (2.3)$$

Тут

$$q = q_0(1 - A_{\max}) = q_0 B_{\min}.$$

Тоді з (2.2) та (2.3) за $\alpha \approx \alpha_0$ отримаємо:

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{B_{\min}}. \quad (2.4)$$

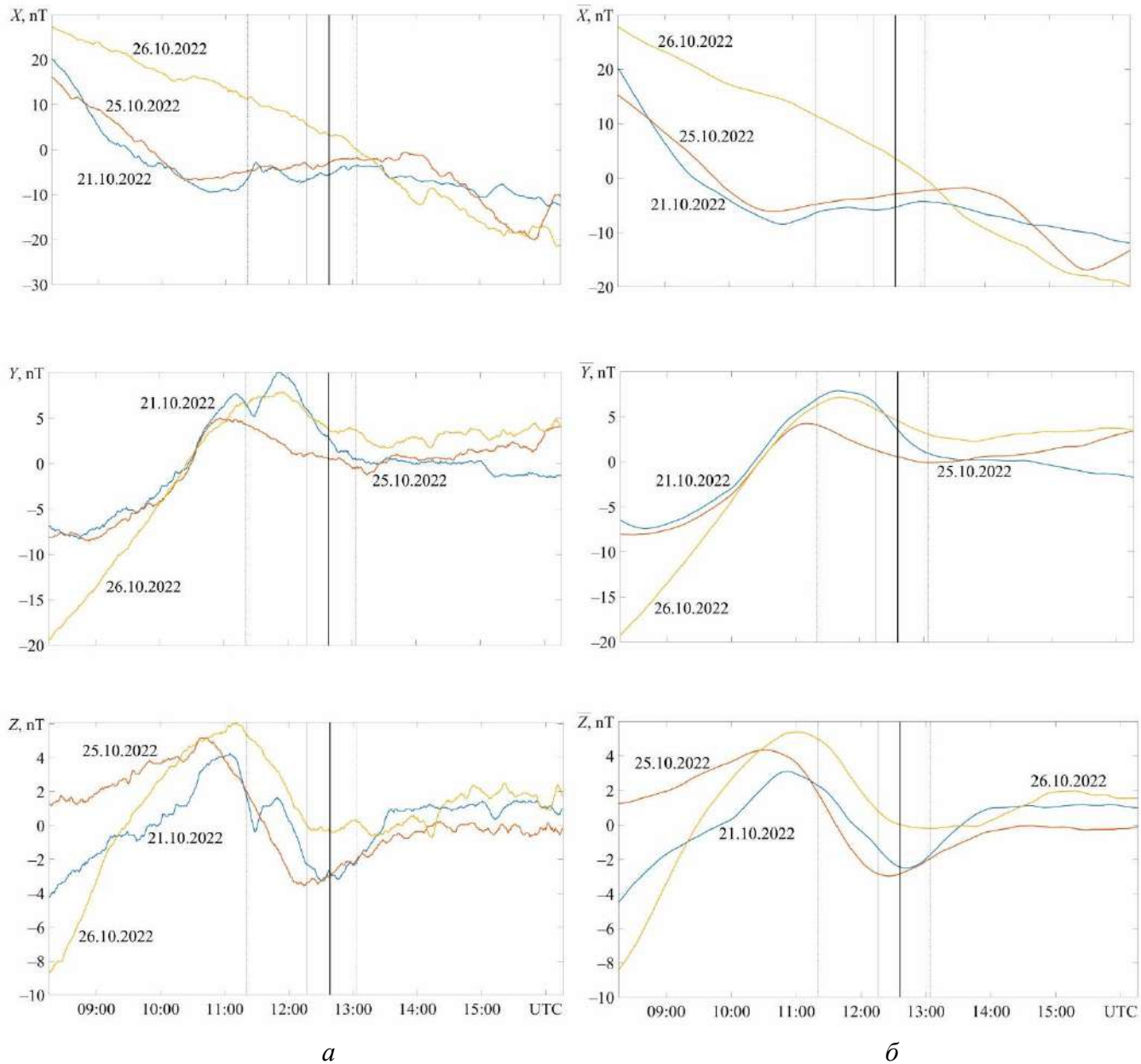


Рис. 2.26. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції АВГ (максимальна фаза – 0.36; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 24%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією)

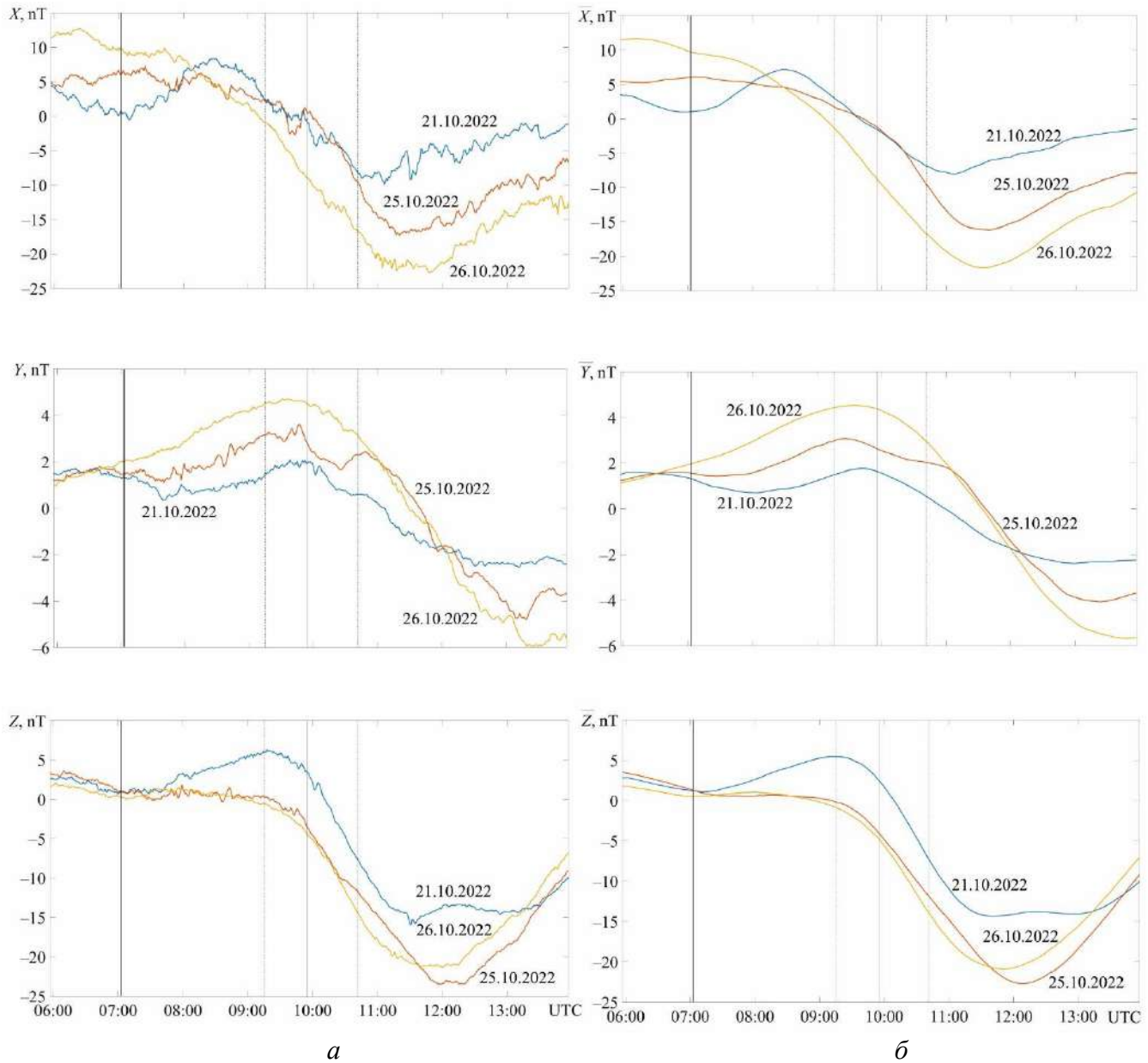


Рис. 2.27. Часові варіації компонент геомагнітного поля (*a*) та тренду (*б*) на станції HAD (максимальна фаза – 0.21; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 11%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією)

З урахуванням внеску сонячної корони рівняння (2.4) дещо змінюється [51]:

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{\frac{B_{\min} + \xi}{1 + \xi}}, \quad (2.5)$$

де в середньому $\xi \approx 0.25$ [51].

Для подальших обчислень зручно ввести максимальне за величиною відносне збурення концентрації електронів

$$\delta_N = \frac{N_{\min}}{N_0} - 1.$$

Збурення іоносферних струмів. Збурення Х-компонента обумовлене збуренням густини іоносферного струму в динамо-області атмосфери ($z \approx 90 \dots 150$ км). Незбурене значення густини електричного струму для висоти $z_{\max} \approx 150$ км дається наступним співвідношенням [50, 51]:

$$j_{0y} \approx -\frac{1}{2} e N_0 v_y, \quad (2.6)$$

де e – заряд електрона, v_y – проекція швидкості атмосферного вітру поблизу висоти z_{\max} .

Збурення СЗ значення густини електричного струму дається подібним співвідношенням:

$$\Delta j_y = -\frac{1}{2} e \Delta N v = -\frac{1}{2} e N_0 \delta_N v_y = j_{0y} \delta_N. \quad (2.7)$$

Внесок у геомагнітний ефект дає інтегральна густина електричного струму

$$\Delta J_y = \int_{\Delta z} \Delta j_y dz, \quad (2.8)$$

де Δz – характерна товщина шару, що дає внесок в інтеграл (2.8).

Характерною товщиною шару є висота однорідної атмосфери H за $z \approx z_{\max} \approx 150$ км. На цій висоті $H \approx 15$ км. Тоді із (2.7) і (2.8) випливає, що

$$\Delta J_y = j_{0y} \delta_N H = -\frac{1}{2} e N_0 \delta_N v H. \quad (2.9)$$

Надалі будемо вважати, що поблизу $z \approx 150$ км, $v \approx -50$ м/с.

Магнітний ефект. Для збурення рівня Х-компонента маємо [51]:

$$\Delta X_{cal} = \mu_0 \Delta J_y = -\frac{1}{2} \mu_0 e N_0 \delta_N v H, \quad (2.10)$$

де μ_0 – магнітна стала.

Результатами обчислень ΔX_{cal} наведено у табл. 2.6. Із табл. 2.6 можна бачити, що при збуренні B_{min} від 0.21 до 0.83 значення ΔX_{cal} збільшувалося приблизно від $-(6...8)$ нТл до $-(0.40...0.45)$ нТл.

Усі станції можна поділити згідно двох принципів. По-перше, за географічною широтою. По-друге, за часом доби.

До високоширотних віднесемо станції АВК ($\varphi \approx 68^\circ$), SOD ($\varphi \approx 67^\circ$), LYC ($\varphi \approx 65^\circ$), NUR ($\varphi \approx 61^\circ$) та UPS ($\varphi \approx 60^\circ$). Для цих станцій розмах флуктуацій рівня X-компонента сягав 10...20 нТл, Y-компонента – 10...15 нТл та Z-компонента – 5...10 нТл. Зі спаданням широти розмах зменшувався.

Низькоширотними є станції АВГ ($\varphi \approx 19^\circ$) та JAI ($\varphi \approx 27^\circ$). Для цих станцій розмах флуктуацій варіював у межах 0.1...1 нТл.

Усі інші 8 станцій знаходяться у середніх широтах. Для станцій розмах флуктуацій знаходився у межах 1...3 нТл.

Перейдемо до класифікації станцій за часом доби. СЗ розпочалося в ранковий час лише на станції НАД. Для цієї станції $A_{max} = 11\%$. Ефект СЗ якщо й був, то досить незначний. Лише для Y-компонента $\bar{Y} \approx -1$ нТл.

СЗ спостерігалось поблизу моменту заходу Сонця на станціях NVS, ARS, АВГ та JAI. При цьому мала місце синергетична взаємодія двох високоенергетичних процесів. З одного боку, СЗ, а з іншого, сонячного термінатору. Оскільки СЗ подібне настанню короткочасної ночі, то ефекти від СЗ і заходу Сонця нібито додавалися, тривалість сумарної реакції могла складати 150...180 хв. У ранковий і денний час тривалість реакції зазвичай не перевищувала 100 хв.

Для всіх інших 10 станцій СЗ мало місце поблизу опівдня.

Реакція на СЗ впевнено спостерігалася майже на всіх станціях за винятком станції НАД (табл. 2.5). СЗ, як правило, супроводжувалося

зменшенням рівня всіх компонентів. Найбільше магнітний ефект був вираженим в X-компоненті, а найменше – у Z-компоненті. В цілому абсолютна величина збурення X-компонента відслідковувала зміни параметру A_{\max} (рис. 2.28).

Рівняння відповідної регресії має такий вид:

$$\Delta\bar{X}_{\max} = -0.000516A_{\max}^2 - 0.0317A_{\max} + 0.14, R^2 = 0.9623, \sigma = 0.34 \text{ нТл.}$$

Таблиця 2.5.

Основні параметри збурень компонентів геомагнітного поля, що супроводжували СЗ

Станція	A_{\max} , %	ΔX_{\max} , нТл	ΔT , хв	ΔY_{\max} , нТл	ΔT , хв	ΔZ_{\max} , нТл	ΔT , хв
NVS	79	-6	140	-2.5	90	-1.5	110
ARS	78	-5	180	-1	140	-1	90
SOD	60	-4	120	-5	110	-3	150
ABK	55	-3	120	-2	100	-3	70
NUR	54	-2.5	90	-5	100	-1	70
LYC	52	-3	120	-5	100	-1	90
UPS	46	-3	100	-3	100	-1	60
LVV	43	-2	80	-2	100	-1	90
HLP	42	-2	75	-2	100	-1	90
BEL	41	-2	90	-2	100	-1	90
JAI	41	-2	90	-2	100	-2	100
SUA	40	-	-	-2	80...90	-3	90
IZN	39	-2	70	-5	100	-2	70
ABG	24	-1	80	-2	150	-2	160
HAD	11	~0	-	-1	100	~0	-

Таблиця 2.6.

Параметри СЗ, іоносферного ефекту СЗ, густини струму в динамо-області іоносфери, обчисленого $\Delta\bar{X}_{cal}$ і спостережуваного $\Delta\bar{X}$ магнітного ефекту (в дужках без врахування дії сонячної корони)

Станція	B_{min}	$\left(\frac{N}{N_0}\right)_{min}$	δ_N	$j_{0y},$ мкА/м ²	$N_0,$ 10 ¹¹ м ⁻³	$\Delta\bar{X}_{cal},$ нТл	$\Delta\bar{X},$ нТл
NVS	0.21	0.61 (0.46)	-0.39 (-0.54)	0.8	2	-5.9 (-8.1)	-6
ARS	0.22	0.61 (0.47)	-0.39 (-0.53)	0.8	2	-5.9 (-8.1)	-5
SOD	0.40	0.72 (0.63)	-0.28 (-0.37)	0.8	2	-4.2 (-5.6)	-4
ABK	0.45	0.75 (0.67)	-0.25 (-0.33)	0.6	1.5	-2.8 (-3.7)	-3
NUR	0.46	0.75 (0.68)	-0.25 (-0.32)	0.5	1.25	-2.4 (-3.0)	-2.5
LYC	0.48	0.76 (0.69)	-0.24 (-0.31)	0.6	1.5	-2.7 (-3.5)	-3
UPS	0.54	0.79 (0.73)	-0.21 (-0.27)	0.70	1.8	-2.8 (-3.6)	-3
LVV	0.57	0.81 (0.75)	-0.19 (-0.25)	0.56	1.4	-2.0 (-2.5)	-2
HLP	0.58	0.81 (0.76)	-0.19 (-0.24)	0.56	1.4	-2.0 (-2.5)	-2
BEL	0.59	0.82 (0.77)	-0.18 (-0.23)	0.56	1.4	-1.9 (-2.4)	-2
JAI	0.59	0.82 (0.77)	-0.18 (-0.23)	0.56	1.4	-1.9 (-2.4)	-2
SUA	0.60	0.82 (0.77)	-0.18 (-0.23)	0.56	1.4	-1.9 (-2.4)	-
IZN	0.61	0.83 (0.78)	-0.17 (-0.22)	0.56	1.4	-1.8 (-2.3)	-2
ABG	0.76	0.90 (0.87)	-0.10 (-0.13)	0.56	1.4	-1 (-1.4)	-1
HAD	0.89	0.95 (0.94)	-0.05 (-0.06)	0.4	1	-0.4 (-0.45)	0

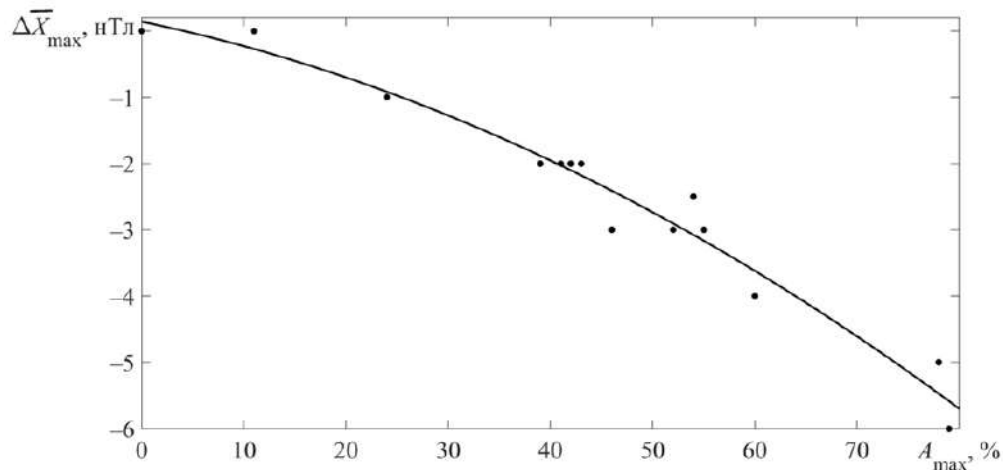


Рис. 2.28. Залежність максимальної величини збурення X-компонента від відносної площі покриття сонячного диску. Рівняння регресії $\Delta \bar{X}_{\max} = -0.000516A_{\max}^2 - 0.0317A_{\max} + 0.14$, $R^2 = 0.9623$, $\sigma = 0.34$ нТл

При обчисленнях величини магнітного ефекту СЗ вважалося, що затемнення викликало зменшення концентрації електронів на $\sim 5 \dots 39\%$ (табл. 2.6). Це призводило до такого ж зменшення густини електричного струму на висотах динамо-області атмосфери та певного зменшення рівня X-компонента геомагнітного поля. Результати обчислень для типових умов на висотах динамо-області наведено в табл. 2.6. Видно, що результати обчислень дуже близькі до результатів спостережень. Зокрема, зрозуміло, чому на станції НАД, для якої $A_{\max} \approx 11\%$, не вдалося виявити магнітний ефект СЗ. Його величина була дуже малою (~ 0.4 нТл).

Вище було розглянуто аперіодичний ефект СЗ. Відомо, що СЗ, зазвичай, супроводжується генерацією атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ). Хвильові збурення під час СЗ 25 жовтня 2022 р. чітко не спостерігалися. Проте мало місце помітне збільшення розмаху флуктуацій 25 жовтня 2022 р. у порівнянні з їхнім розмахом 26 жовтня 2022 р. (рис. 2.15 а – 2.20 а). Можна вважати, що такі флуктуації пов'язані з генерацією АГХ у діапазоні періодів 5–180 хв. Їхні прояви найкраще спостерігаються на флуктуаціях рівня X-компонента.

На кінець порівняємо отримані результати з результатами роботи [51]. У роботі [51] за даними 15 станцій вперше надійно обґрунтовано, що СЗ може призводити до реєструємих збурень геомагнітного поля. Ефекти затемнення найбільш виражені в варіаціях X -компонента. Показано, що зменшення покриття сонячного диску призводило до зменшення величини геомагнітного ефекту. В роботі [51] також виявлено прояви АГХ. Отримані у цій роботі результати повністю підтверджують результати роботи [51]. Усі описані ефекти були якісно подібними, але відрізнялися кількістю. Це пов'язано з тим, що у роботі [51] було чимало високоширотних ($\varphi > 60^\circ$) станцій, для яких значення густини електричного струму було на порядок більшим, тобто $j_{0y} \approx 3 \dots 6 \text{ мкА/м}^2$, а у нашому випадку $j_{0y} \approx 0.4 \dots 1 \text{ мкА/м}^2$.

Крім того, у цій роботі показано, що СЗ здатне збурювати також рівень Y - і Z -компонентів.

Головні результати досліджень.

1. За даними 15 станцій мережі INTERMAGNET проаналізовано часові варіації X -, Y - та Z -компонентів геомагнітного поля під час часткового сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні. Встановлено, що затемнення супроводжувалося збуреннями всіх компонентів поля практично на всіх станціях – від високих до низьких широт.

2. Найбільш чутливою до впливу затемнення виявилася X -компонента (південь–північ). Амплітуда її аперіодичного зменшення змінювалася від ~ 1 нТл ($A_{\max} \approx 24\%$) до 5–6 нТл ($A_{\max} \approx 78\text{--}79\%$). Для Y - та Z -компонент збурення були, як правило, у 1.5–3 рази меншими.

3. Підтверджено наявність стійкої залежності величини збурення X -компоненти від площі покриття сонячного диска (A_{\max}). Із зростанням A_{\max} від 11 до 79% абсолютна величина ΔX монотонно збільшувалася. Для станції НАД ($A_{\max} \approx 11\%$) ефект практично не реєструвався, що узгоджується з розрахунковим значенням (~ 0.4 нТл).

4. Тривалість аперіодичного ефекту складала переважно 90–120 хв, а в умовах синергетичної дії затемнення та сонячного термінатора до 150–

180 хв. Найбільш тривалі ефекти спостерігалися на станціях, де затемнення відбувалося поблизу заходу Сонця (NVS, ARS, ABG, JAI).

5. Показано, що основним фізичним механізмом геомагнітного ефекту є зменшення концентрації електронів у динамо-області іоносфери ($z \approx 90\text{--}150$ км), яке призводить до зменшення електропровідності та густини іоносферного струму.

6. Окрім аперіодичного ефекту, зафіксовано зростання розмаху флуктуацій геомагнітного поля під час затемнення. Це інтерпретується як прояв генерації атмосферних гравітаційних хвиль у діапазоні періодів $\sim 5\text{--}180$ хв, які модулюють іоносферні струми та, відповідно, компоненти геомагнітного поля.

7. Отримані результати добре підтверджують раніше встановлені закономірності для затемнення 10 червня 2021 р., але демонструють менші амплітуди ефектів, що пов'язано з широтним розподілом станцій та меншими значеннями густини іоносферного струму у досліджуваному регіоні.

2.4. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 14 жовтня 2023 р.

Загальні відомості. Вихідна інформація про кільцеподібне затемнення 14 жовтня 2023 р. представлена на сайті [<https://science.nasa.gov/eclipses/future-eclipses/eclipse-2023/>]. СЗ 134-го сароса розпочалося о 15:03:47, а закінчилося о 20:55:15 UT (тут і надалі всесвітній час). Максимальне затемнення з фазою $M_{\max} \approx 0.9520$ мало місце о 17:59:29 у точці з координатами $11^{\circ}22'$ пн.ш., $0.83^{\circ}06.1'$ з.д. (рис. 2.29). При цьому висота Сонця складала 67.9° , а азимут – 208.0° . Тривалість затемнення – 5 хв 17.2 с. Ширина зони кільцеподібного затемнення – 187.4 км. Тінь місяця рухалась з північного заходу (з точки з координатами 41.6° пн.ш., 150° з.д.), через північно-східну частину Тихого океану та Центральну Америку, північну частину Південної Америки і закінчилося у точці Атлантичного океану з координатами 5.6° пд.ш., 30° з.д.

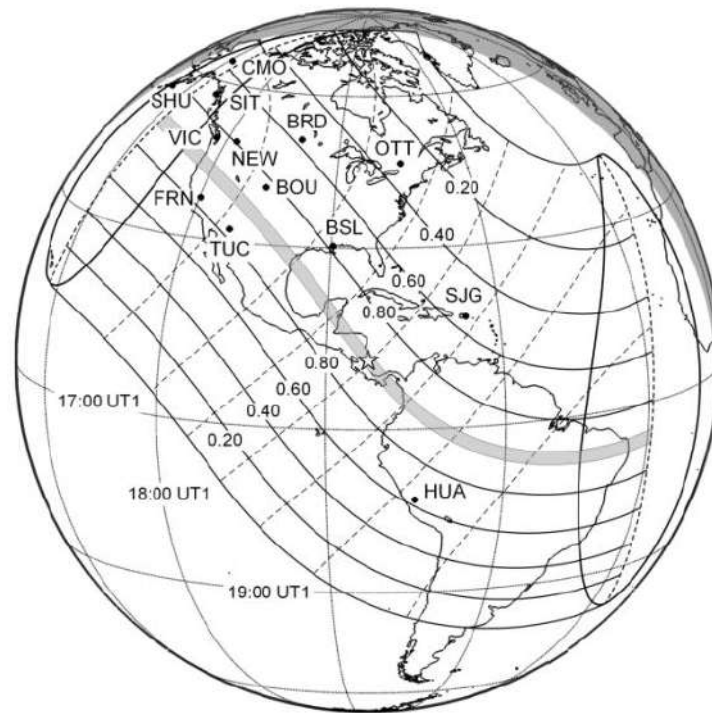


Рис. 2.29 Контурна мапа розподілу станцій спостереження та зони часткового затемнення 14 жовтня 2023 р.

Часткове СЗ спостерігалось практично на всіх двох Американських континентах. Винятком є західна частина Аляски, південна частина Чилі й Аргентини. Затемнення охопило західну частину Африканського континенту, північно-східну частину Тихого океану, західну та центральну зони Атлантичного океану.

Основна особливість СЗ полягала у тому, що воно було кільцеподібним.

Дані та методи. Для пошуку геомагнітного ефекту часткового СЗ були проаналізовані часові варіації рівня горизонтальних (X , Y) та вертикальної (Z) компонент магнітного поля Землі, що зареєстровані мережею магнітних станцій INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/>]. При цьому аналізувалися дані для 14 жовтня 2023 р. та низки контрольних днів. Всього використано 13 станцій, для яких максимальна фаза затемнення M_{\max} змінювалася від 0.30 до 0.86. Всі станції розміщені в Американському регіоні (довгота змінювалася від $\sim 66^\circ$ з.д. до $\sim 160^\circ$ з.д.) (табл. 2.7). Широта

варіювала від $\sim 12^\circ$ пд.ш. до 65° пн.ш. Аналізувалися ефекти СЗ у ранкові, денні та вечірні часи.

Розрізнявальна здатність вихідних даних складала 0.1 нТл за амплітудою та 1 хв за часом.

Алгоритм обробки наступний. Спочатку з вихідних даних віднімалася постійна складова, яка була різною для різних станцій і формувалися залежності $X(t)$, $Y(t)$ і $Z(t)$. Потім на інтервалі часу 60 хв проводилося ковзне згладжування та будувалися часові варіації тренду $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$, і $\bar{Z}(t)$. Крім того, знаходилася різниця між $X(t)$ і $\bar{X}(t)$, $Y(t)$ і $\bar{Y}(t)$, та $Z(t)$ і $\bar{Z}(t)$. Залежності $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$ та $\bar{Z}(t)$ використовувалися для пошуку аперіодичного ефекту СЗ, а різниця – для встановлення можливих квазіперіодичних збурень геомагнітного поля.

Для коректного виділення реакції геомагнітного поля на СЗ є необхідним ретельний аналіз стану космічної погоди. Для цього розроблено спеціальний формат (рис. 2.30). При цьому використовувалися дані, представлені на сайті [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] та результати оригінальних обчислень.

Таблиця 2.7.

Загальні відомості про сонячне затемнення 14 жовтня 2023 р. Розрахунки моментів часу виконано для поверхні Землі.

Станція	Координати		t_1	t_m	t_2	M	S, %	Схід сонця (UTC)	Захід сонця (UTC)
	Широта	Довгота							
TUC (Tucson) USA	32.1700°N	110.7300°W	15:15	16:36	18:09	0.86	82	13:28	00:52
FRN (Fresno) USA	37.0900°N	119.7200°W	15:09	16:23	17:58	0.86	82	14:08	01:24
SHU (Shumagin) USA	55.3500°N	160.4600°W	15:19	16:18	17:21	0.85	81	17:12	03:44
BOU (Boulder) USA	40.1400°N	105.2330°W	15:18	16:37	18:08	0.85	81	13:11	00:22
VIC (Victoria) Canada	48.5200°N	123.4200°W	15:10	16:21	17:40	0.85	81	14:34	01:26
NEW (Newport) USA	48.2700°N	117.1200°W	15:12	16:25	17:42	0.79	75	14:07	01:00
BSL (Bay St. Louis) Stennis Space Center USA	30.3500°N	89.6400°W	15:39	17:09	18:47	0.78	72	12:02	23:29
SIT (Sitka) USA	57.0600°N	135.3300°W	15:19	16:22	17:30	0.71	64	15:34	02:00
HUA (Huancayo) Peru	12.0500°S	75.3300°W	17:35	19:09	20:34	0.64	55	10:36	22:58
CMO (College) USA	64.8700°N	147.8600°W	15:30	16:28	17:29	0.57	47	16:47	02:31
BRD (Brandon) Canada	49.8700°N	99.9739°W	15:28	16:41	17:59	0.566	46.5	13:04	23:51
SJG (San Juan) USA	18.1100°N	66.1500°W	16:50	18:25	19:50	0.54	44	10:18	22:02
OTT (Ottawa) Canada	45.4030°N	75.5520°W	16:10	17:16	18:20	0.3	19	11:19	22:18

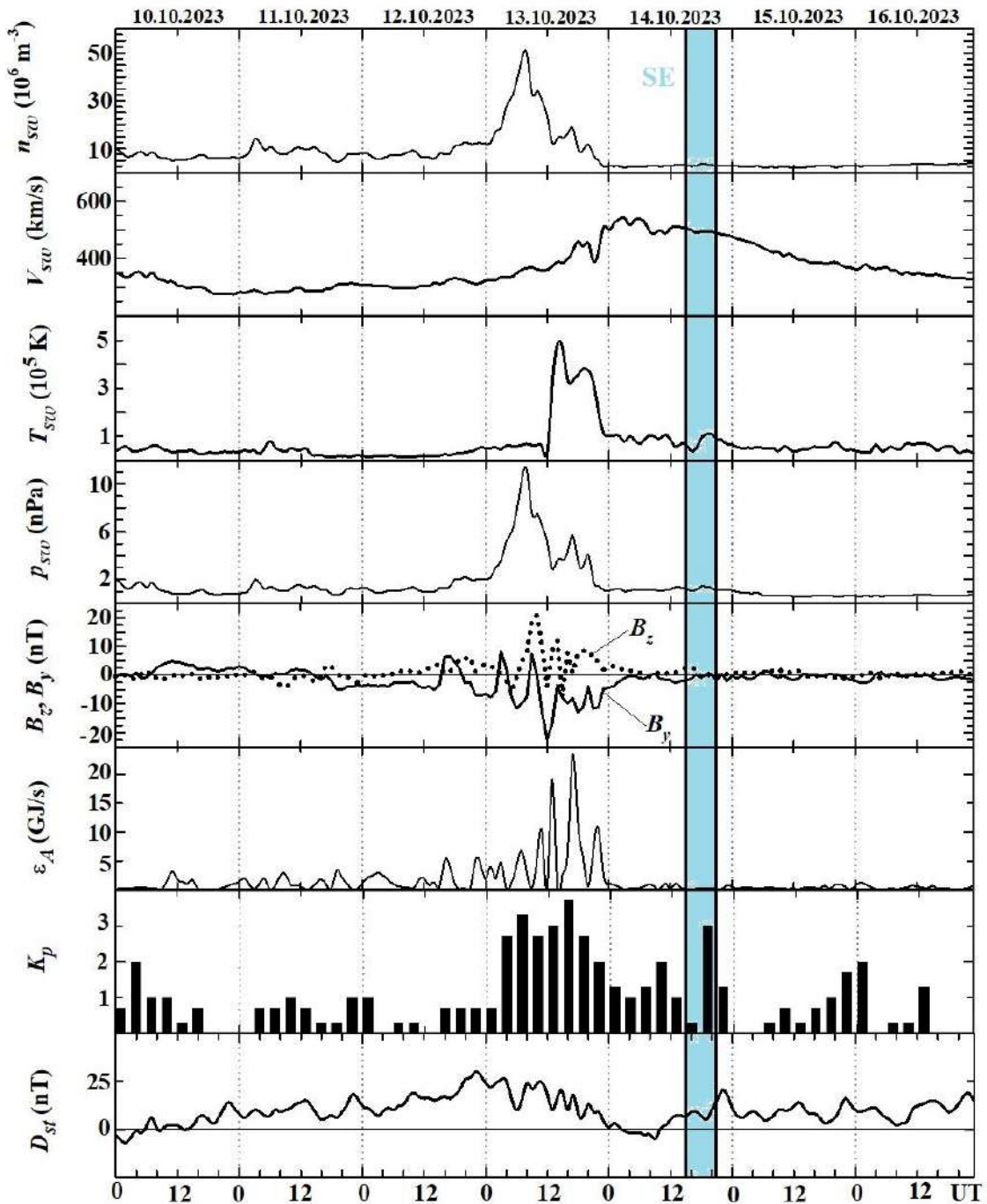


Рис. 2.30. Часові варіації параметрів сонячного вітру: концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , B_z і B_y компонентів міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ε_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 10 жовтня – 16 жовтня 2023 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

Швидкість V_{sw} частинок сонячного вітру, як правило, знаходилася у межах 300...350 км/с. Лише 14 жовтня 2023 р. вона підвищувалася до 542 км/с.

Температура T_{sw} частинок сонячного вітру зазвичай не перевищувала $(0.5...1) \cdot 10^5$ К. 13 жовтня 2023 р. вона зростала до $4.8 \cdot 10^5$ К.

Розраховані значення динамічного тиску p_{sw} частинок сонячного вітру у незбурених умовах не перевищували 1...2 нПа, а 13 жовтня 2023 р. сягали 11.2 нПа.

Значення компонентів B_y і B_z міжпланетного магнітного поля, як правило, не перевищували ± 5 нТл. Збільшення їх модуля до 21...22 нТл мало місце 13–14 жовтня 2023 р.

Якщо у інші дні значення параметра Акасофу ϵ_A , що описує приплив енергії сонячного вітру до магнітосфери Землі, не перевищувало 2...5 ГДж/с, то 13 жовтня 2023 р. значення ϵ_A зросли до 23.5 ГДж/с.

У незбурені дні значення індексу K_p не перевищували 1...2, а 13 жовтня 2023 р. він сягав 3.7. 14 жовтня 2023 р. цей індекс короткочасно зростав до 3.

Максимальне значення D_{st} -індекса в 30 нТл мало місце наприкінці доби 12 жовтня 2023 р. Наступного дня цей індекс зменшувався практично до 0 нТл.

Можна вважати, що 14 жовтня 2023 р. магнітне поле Землі було слабо збуреним. Це дозволило виявити геомагнітний ефект СЗ. У якості контрольних днів доцільно обрали магніто-спокійні дні 11 та 16 жовтня 2023 р.

Результати аналізу. Часові варіації трендів \bar{X} , \bar{Y} і \bar{Z} та флуктуацій рівня X , Y і Z компонентів для дня з СЗ та контрольних днів 11 та 16 жовтня 2023 р. наведено на рис. 2.31 – рис. 2.43. Результати детального аналізу аперіодичних і квазіперіодичних збурень рівня всіх трьох компонентів зведено в табл. 2.8 і табл. 2.9. Із табл. 2.8 видно, що найбільші (до 20 нТл) варіації тренду мали місце для X компонента, а найменші (до $\sim 1...2$ нТл) для Z компонента. Величина збурень суттєво залежала від відносної площі A_{\max} покриття диску Сонця та стану магнітного поля.

Таблиця 2.8.

Головні параметри аперіодичних збурень рівня компонентів геомагнітного поля, що супроводжували СЗ

Станція	A_{\max} , %	ΔX_{\min} , нТл	ΔT , хв	ΔY_{\min} , нТл	ΔT , хв	ΔZ_{\min} , нТл	ΔT , хв
Tucson	82	-10	240	-10	240	-2	180
Fresno	82	-13	240	-5	240	-2	180
Shumagin*	81	-2	100	-2	120	-1	120
Boulder	81	-20	180	-7	180	-5	240
Victoria	81	-15	140	-4	120	-2	180
Newport	75	-15	180	-4	120	-2	240
Bay St. Louis	72	-10	180	-15	240	-8	240
Sitka**	64	-3	120	-2	120	-3	160
Huancayo	55	-20	180	-7	180	-8	180
College**	47	-7	100	-2	120	0	-
Brandon	46.5	-8	200	-8	150	-2	120
San Juan	44	-2	180	-5	120	-6	240
Ottawa	19	-2	120	-2	180	-4	180

* СЗ до сходу Сонця на поверхні Землі

** СЗ поблизу сходу Сонця на поверхні Землі

Таблиця 2.9.

Головні параметри квазіперіодичних збурень рівня компонентів геомагнітного поля, що супроводжували СЗ

Станція	Компонент	Час запізнювання, хв	Тривалість, хв	Період, хв	Амплітуда, хв
Tucson	X	80	>240	30...50	2...5
	Y	80	240	30...50	1...3
	Z	80	>240	40...60	0.5...1

Fresno	X	80	>240	30...50	1...5
	Y	80	240	15...60	1...2
	Z	80	>240	30...50	0.3...0.6
Shumagin	X	80	>240	15...40	1...4
	Y	120	>180	30...40	3...6
	Z	90	>240	15...50	0.5...1
Boulder	X	100	>240	15...40	2...5
	Y	70	240	15...70	1...3
	Z	80	240	8...80	0.3...0.5
Victoria	X	80	>240	15...40	2...6
	Y	80	240	15...20	3...4
	Z	80	>240	10...40	0.6...1.5
Newport	X	145	180	15...40	1.5...6
	Y	90	220	15...60	1.5...4
	Z	150	240	20...60	0.3...0.8
Bay St. Louis	X	60	270	10...30	2...5
	Y	90	>180	12...40	0.5...2
	Z	60	>250	20...40	0.4...1.7
Sitka	X	80	>240	10...40	1...6
	Y	80	240	20...40	2...5
	Z	80	240	10...30	1...2
Huancayo	X	90	120	10...35	5...15
	Y	90	120	15...40	2...4
	Z	90	120	10...40	1...4
College	X	90	>210	10...50	3...15
	Y	120	>180	10...50	3...15
	Z	70	180	10...50	2...7
Brandon	X	130	>200	10...50	2...7
	Y	60	240	10...40	2...4
	Z	60	240	10...40	2...2.5
San Juan	X	30	>240	20...40	1.5...2
	Y	40	240	15...40	0.5...1.5
	Z	40	240	30...40	0.5...0.6
Ottawa	X	80	200	10...40	2...7
	Y	80	240	10...40	2...4
	Z	80	220	10...40	2...3

Із табл. 2.9 можна бачити, що після початку СЗ з часом запізнювання $\sim 30...150$ хв спостерігалися квазіперіодичні збурення рівня всіх компонентів. Період коливань варіював у межах $10...80$ хв. Зазвичай найбільша амплітуда коливань була у X компонента, а найменша – у Z компонента. Тривалість квазіперіодичних варіацій складала $\sim 180...240$ хв.

Опишемо часові варіації рівня компонент геомагнітного поля, що мали місце в різний час доби та за різного значення максимальної фази M_{\max} і максимальної відносної площі покриття диску Сонця A_{\max} .

Станція Tucson. Зменшення на 10 нТл значень тренду \bar{X} розпочалося о 17:00 та тривало близько 240 хв (рис. 2.31 а). Приблизно за $\Delta t \approx 80$ хв після початку СЗ спостерігались квазіперіодичні варіації рівня X компонента з амплітудою $X_a \approx 2 \dots 5$ нТл, періодом $T \approx 30 \dots 50$ хв і тривалістю ΔT не менше 240 хв (рис. 2.31 б).

Зменшення на 10 нТл рівня тренду \bar{Y} розпочалося приблизно о 15:00 і тривало ~ 240 хв. Квазіперіодичні коливання рівня Y компонента мали місце приблизно за 80 хв після початку СЗ. При цьому $Y_a \approx 1 \dots 3$ нТл, $T \approx 30 \dots 50$ хв і $\Delta T \approx 240$ хв.

Незначне (до 2 нТл) зменшення рівня тренду \bar{Z} реєструвалося з 15:00 та тривало ~ 180 хв. Час запізнювання появи квазіперіодичних варіацій Z компонента з амплітудою $Z_a \approx 0.5 \dots 1$ нТл, $T \approx 40 \dots 60$ хв, ΔT було менше 240 хв, складав приблизно 80 хв від початку СЗ.

Станція Fresno. Значне (до 13 нТл) зменшення рівня \bar{X} мало місце в інтервалі часу 16:30 – 20:30 (рис. 2.32 а). З часом запізнювання $\Delta t \approx 80$ хв спостерігалися квазіперіодичні збурення рівня X компонента з $X_a \approx 1 \dots 5$ нТл, $T \approx 30 \dots 50$ хв, ΔT було не менше 240 хв (рис. 2.32 б).

Зменшення рівня \bar{Y} на 5 нТл реєструвалося в інтервалі часу 15:00 – 19:00. Параметри квазіперіодичних варіацій наступні: $Y_a \approx 1 \dots 2$ нТл, $\Delta t \approx 80$ хв, $T \approx 15 \dots 60$ хв, $\Delta T \approx 180$ хв.

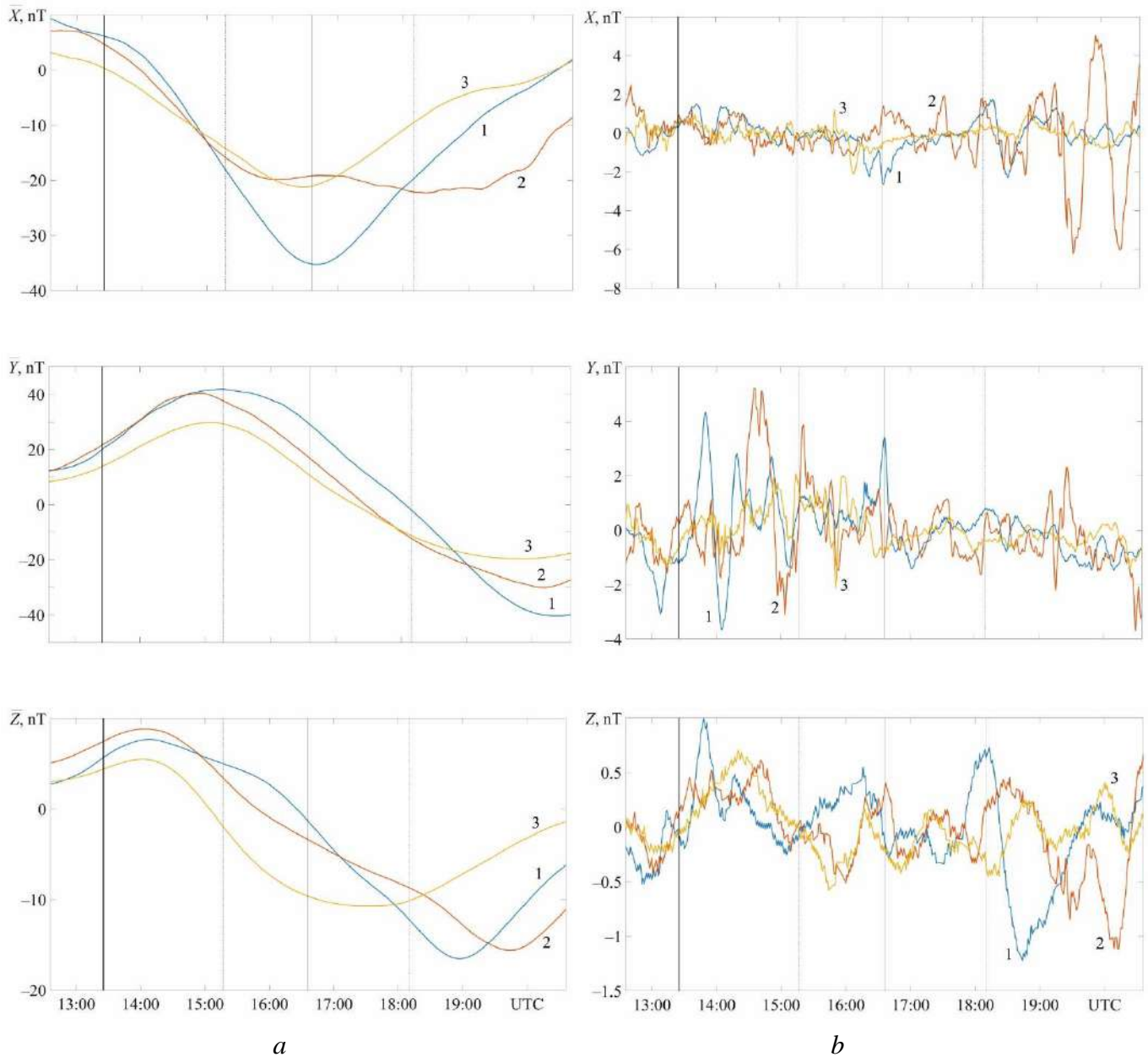


Рис. 2.31. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*а*) та різниці між сигналом та трендом (*б*) на станції TUC (максимальна фаза – 0.86; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 82%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

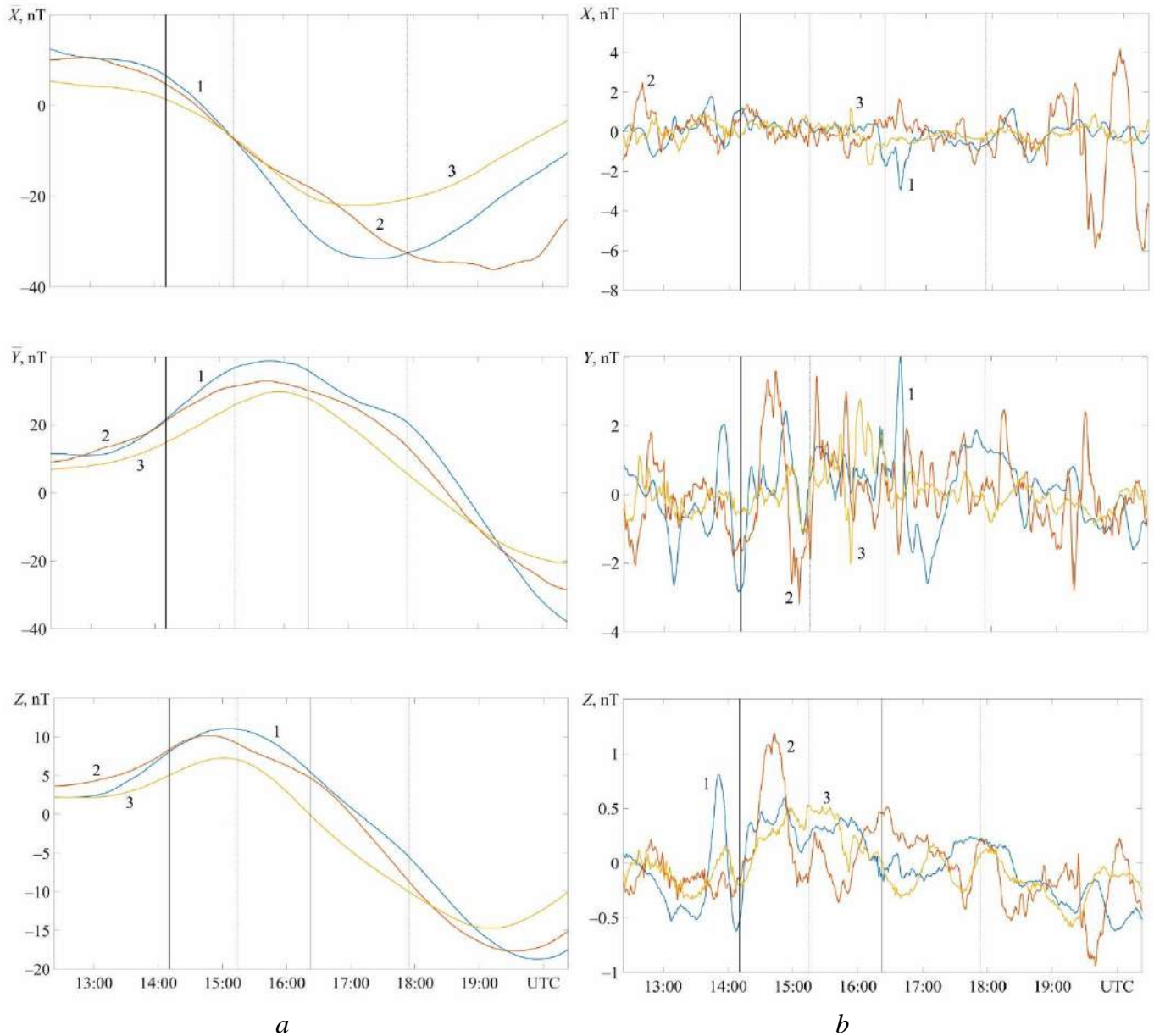


Рис. 2.32. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (а) та різниці між сигналом та трендом (б) на станції FRN (максимальна фаза – 0.86; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 82%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

Незначне (до 2 нТл) зменшення рівня \bar{Z} компонента мало місце з 16:30 до 19:30. З часом запізнювання ~ 80 хв реєструвалися квазіперіодичні варіації, для яких $Z_a \approx 0.3 \dots 0.6$ нТл, $T \approx 30 \dots 50$ хв, ΔT було не менше 240 хв.

Станція Shumagin. Дуже незначне (до 2 нТл) зменшення рівня розпочалося о 15:40 та тривало близько 100 хв (рис. 2.33 а). Для квазіперіодичних варіацій $X_a \approx 1 \dots 4$ нТл, $\Delta t \approx 80$ хв, $T \approx 15 \dots 40$ хв, ΔT не менше 240 хв (рис. 2.33 б).

Для Y компонента зменшення рівня до 2 нТл спостерігалось з 16:00 до 18:00. Параметри квазіперіодичних варіацій наступні: $Y_a \approx 3 \dots 6$ нТл, $\Delta t \approx 120$ хв, $T \approx 30 \dots 40$ хв, ΔT було не менше 180 хв.

Зменшення рівня Z компонента не перевищувало 1 нТл та тривало близько 120 хв. Для квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 90$ хв, $Z_a \approx 0.5 \dots 1$ нТл, $T \approx 15 \dots 50$ хв, ΔT було не менше 240 хв.

Станція Boulder. Значне збурення рівня X компонента сягало 20 нТл. Воно розпочалося приблизно о 17:00 і тривало більше 180 хв (рис. 2.34 а). Час запізнювання квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 100$ хв, $X_a \approx 2 \dots 5$ нТл, $T \approx 15 \dots 40$ хв, ΔT було більше 240 хв (рис. 2.34 б).

Зменшення рівня Y компонента не перевищувало 7 нТл і спостерігалось в інтервалі часу 15:00 – 18:00. Для квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 70$ хв, $Y_a \approx 1 \dots 3$ нТл, $T \approx 15 \dots 70$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв. Рух ранкового термінатора призвів до коливань з $Z_a \approx 5$ нТл.

Для Z компонента реєструвалися зменшення рівня на 5 нТл з 16:00 до 20:00. Параметри квазіперіодичних варіацій цього компоненту наступні: $\Delta t \approx 80$ хв, $Z_a \approx 0.3 \dots 0.5$ нТл, $T \approx 8 \dots 80$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв. Деяко більші (до 1 нТл) збурення супроводжували рух ранкового термінатора.

Станція Victoria. Значне (до 15 нТл) зменшення рівня X компонента мало місце в інтервалі часу 17:40 – 20:00 (рис. 2.35 а). Для квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 80$ хв, $X_a \approx 2 \dots 6$ нТл, $T \approx 15 \dots 40$ хв, ΔT більше 240 хв (рис. 2.35 б).

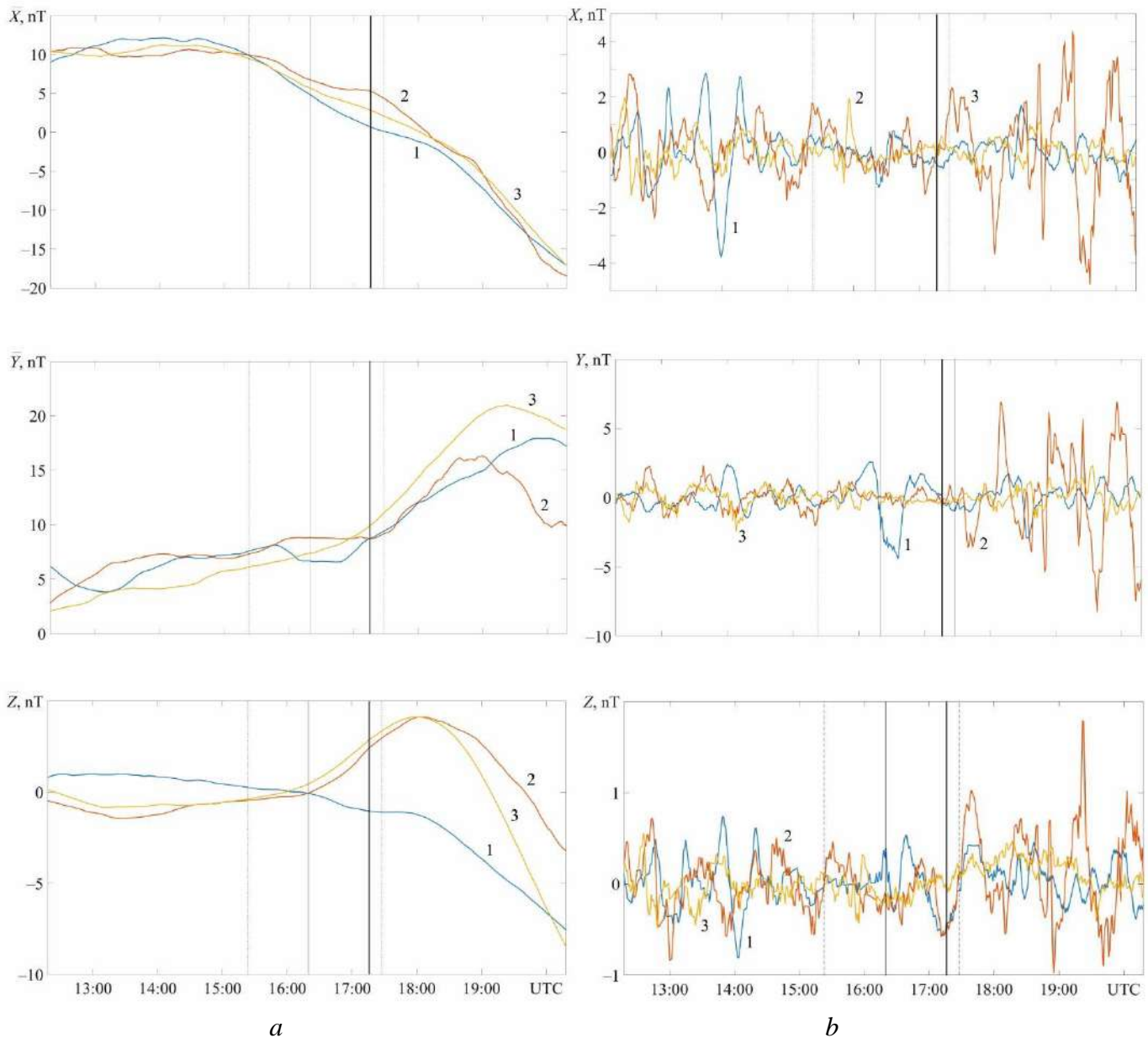


Рис. 2.33. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (а) та різниці між сигналом та трендом (б) на станції SHU (максимальна фаза – 0.85; максимальна відносна площа покриття сонячного диска – 81%) у день С3 та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення С3, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази С3. Моменти С3 та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

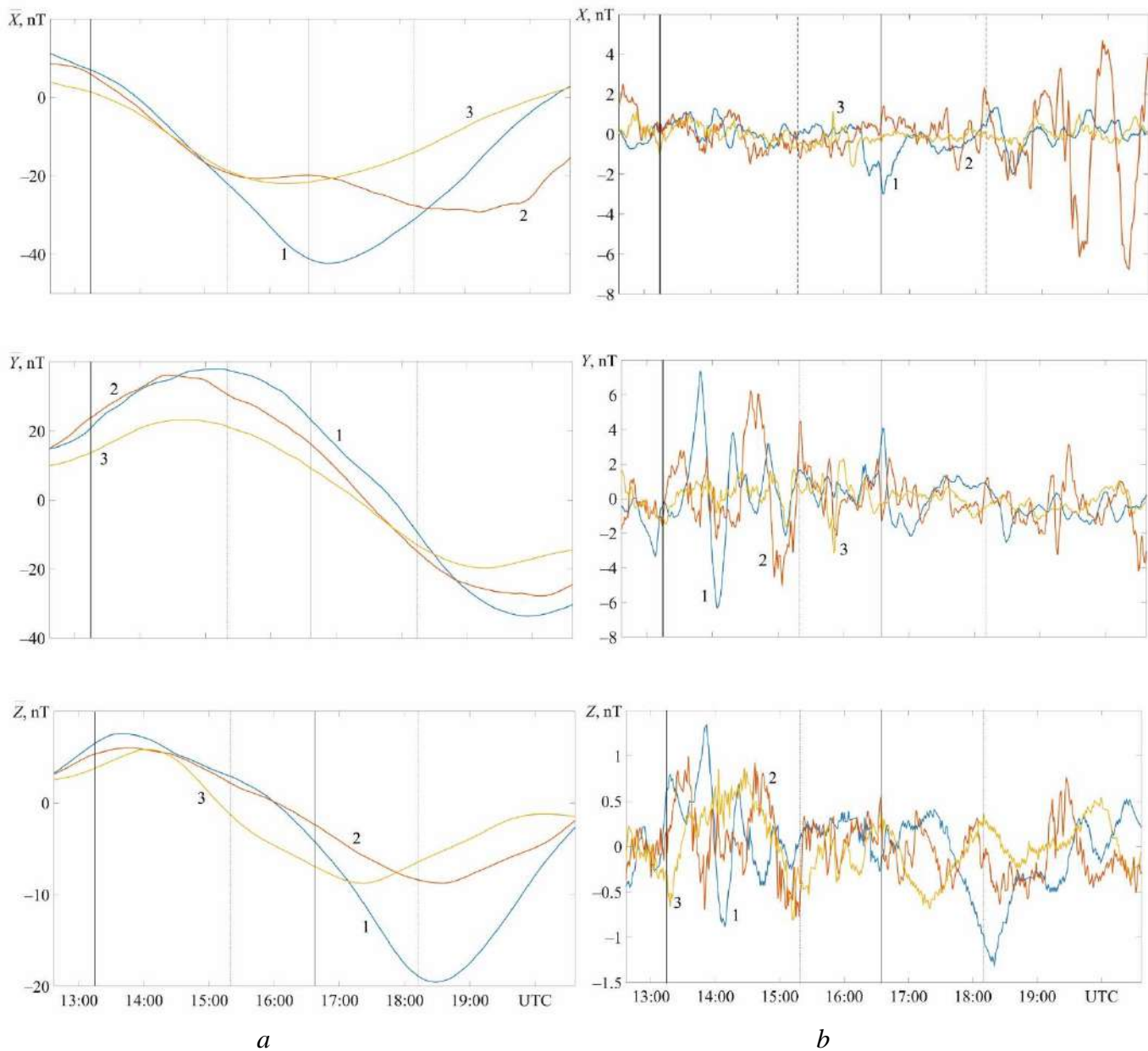


Рис. 2.34. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*b*) на станції VOU (максимальна фаза – 0.85; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 81%) у день С3 та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення С3, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази С3. Моменти С3 та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

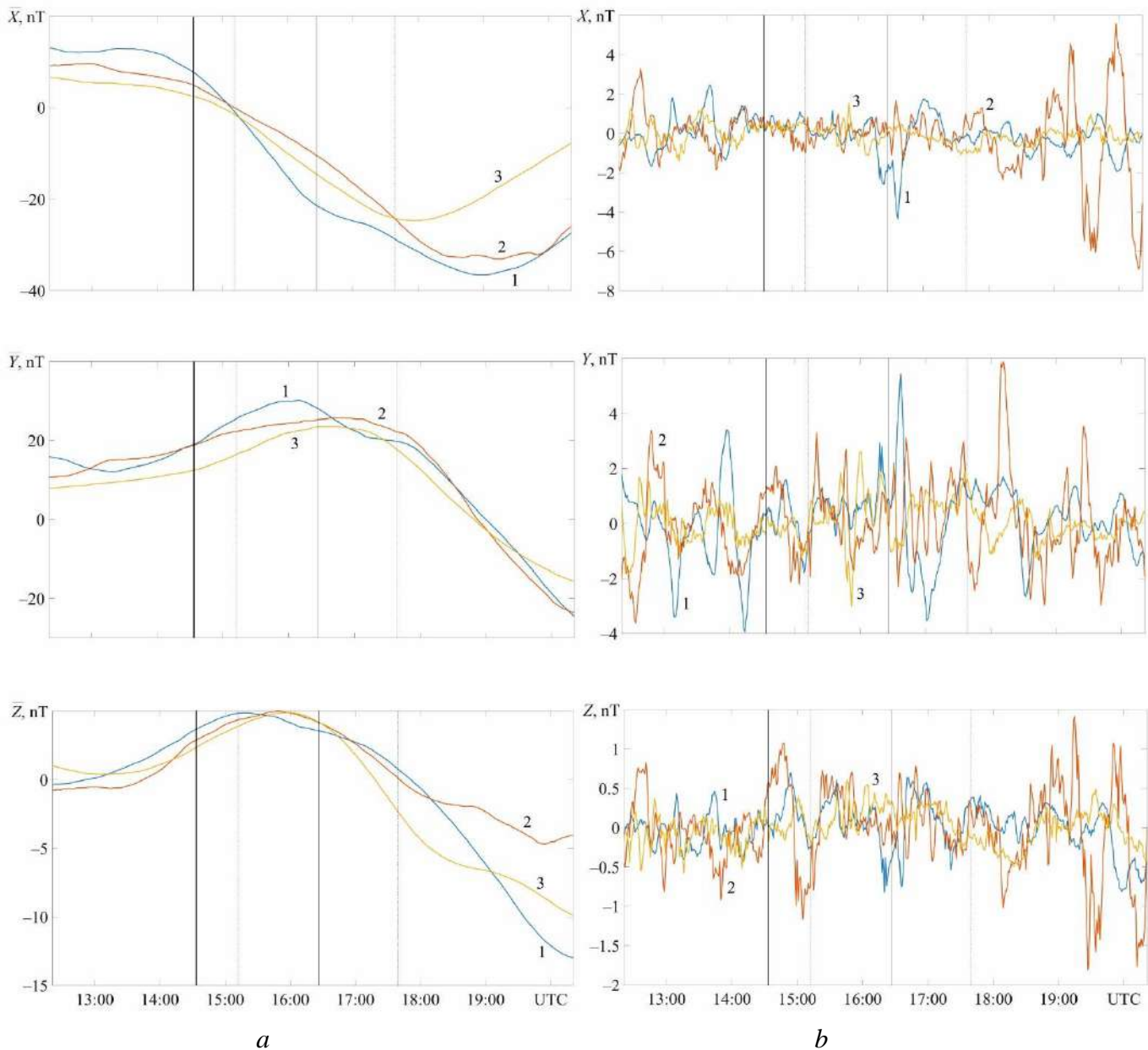


Рис. 2.35. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*b*) на станції VIC (максимальна фаза – 0.85; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 81%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

Зменшення рівня Y компонента не перевищувало 4 нТл. Воно реєструвалося в інтервалі часу 14:30 – 16:30. Час запізнювання квазіперіодичних варіацій складав ~ 80 хв, $Y_a \approx 3 \dots 4$ нТл, $T \approx 15 \dots 20$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв.

Для Z компонента зменшення рівня не перевищувало 2 нТл. Воно розпочалося приблизно о 17:00 і тривало ~ 180 хв. Параметри квазіперіодичних збурень наступні: $\Delta t \approx 80$ хв, $Z_a \approx 0.6 \dots 1.5$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, ΔT було більше 240 хв.

Станція Newport. Зменшення значення тренду \bar{X} сягало 15 нТл. Воно спостерігалось з 17:00 до 20:00 (рис. 2.36 а). Час запізнювання квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 145$ хв, $X_a \approx 1.5 \dots 6$ нТл, $T \approx 15 \dots 40$ хв, ΔT більше 180 хв (рис. 2.36 б).

Рівень Y компонента зменшувався до 4 нТл в інтервалі часу 15:00 – 17:00. Параметри квазіперіодичних варіацій наступні: $\Delta t \approx 90$ хв, $Y_a \approx 1.5 \dots 4$ нТл, $T \approx 15 \dots 60$ хв, $\Delta T \approx 220$ хв. Приблизно такими були і варіації рівня Y компонента, пов'язані з термінатором.

Незначне (до 2 нТл) зменшення рівня Z реєструвалося з 16:00 до 20:00. Для квазіперіодичних збурень $\Delta t \approx 150$ хв, $Z_a \approx 0.3 \dots 0.8$ нТл, $T \approx 20 \dots 60$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв. Близькі значення параметрів були у варіацій, що супроводжували рух ранкового термінатора.

Станція Bay St. Louis. Значення тренду \bar{X} зменшувалося до 10 нТл в інтервалі часу 17:00 – 20:00 (рис. 2.37 а). Час запізнювання квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 60$ хв, $X_a \approx 2 \dots 5$ нТл, $T \approx 10 \dots 30$ хв, $\Delta T \approx 270$ хв (рис. 2.37 б).

Зменшення рівня Y компонента до 15 нТл мало місце з 16:00 – 20:00. Параметри квазіперіодичних збурень рівня цього компонента такі: $\Delta t \approx 90$ хв, $Y_a \approx 0.5 \dots 2$ нТл, $T \approx 12 \dots 40$ хв, ΔT було більше 180 хв. Цим збуренням передували збурення, що супроводжували рух сонячного термінатора. Для них $Y_a \approx 4$ нТл.

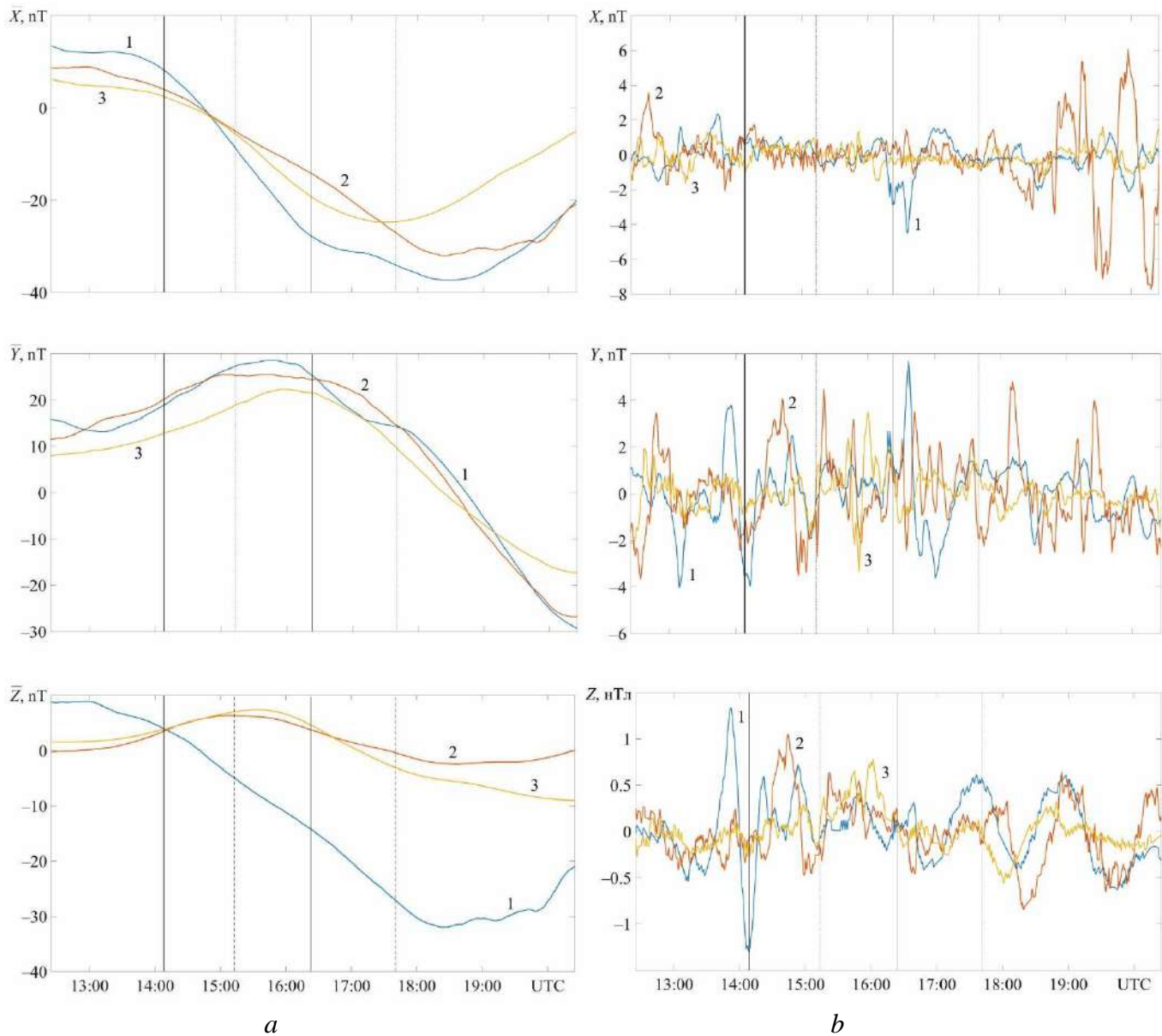


Рис. 2.36. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*б*) на станції NEW (максимальна фаза – 0.79; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 75%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

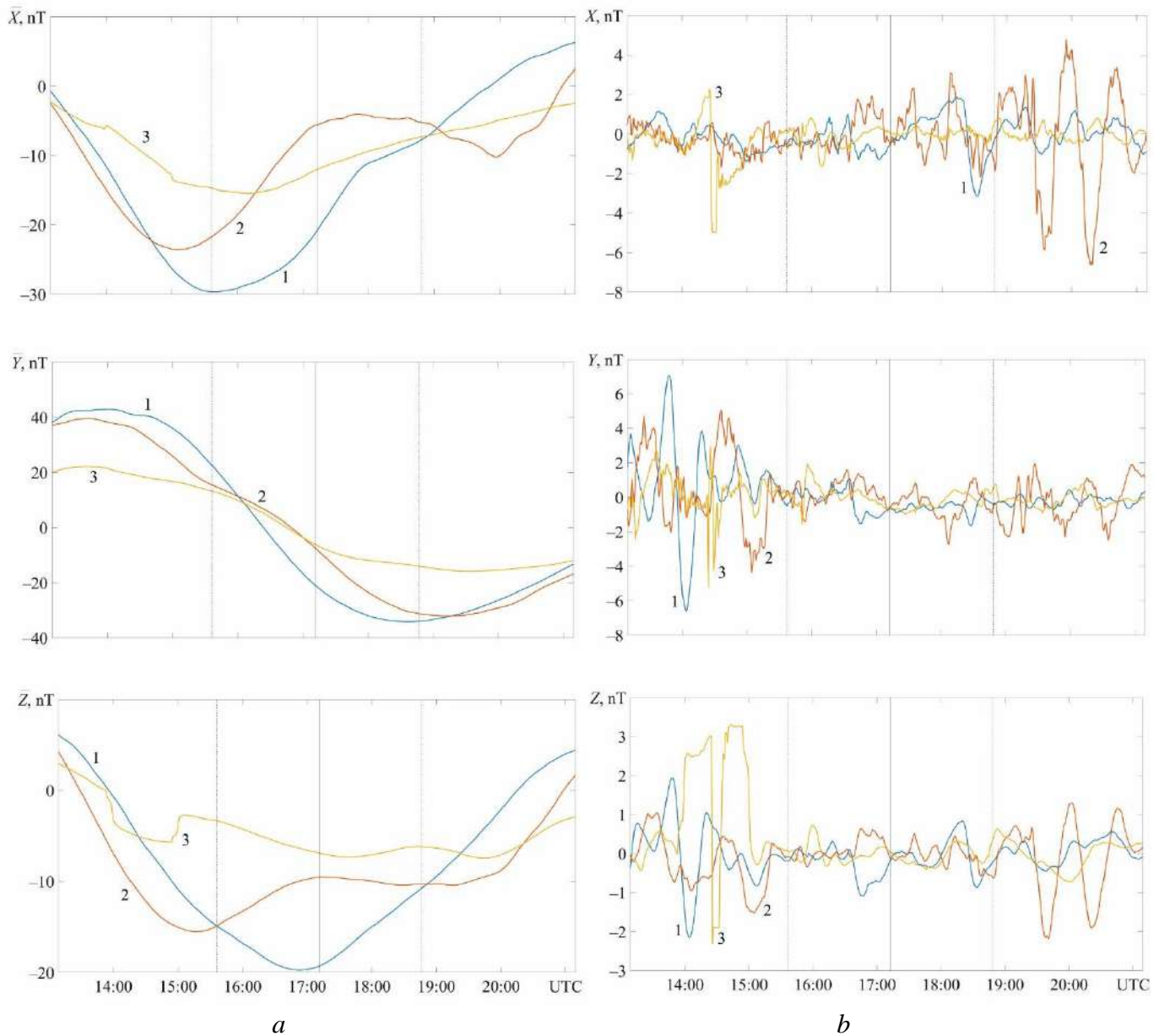


Рис. 2.37. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (а) та різниці між сигналом та трендом (б) на станції BSL (максимальна фаза – 0.78; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 72%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

Рівень Z компонента зменшувався до 8 нТл в інтервалі часу 17:15 – 20:15. Час запізнювання квазіперіодичних збурень $\Delta t \approx 60$ хв, $Z_a \approx 0.4 \dots 1.7$ нТл, $T \approx 20 \dots 40$ хв, ΔT було більше 240 хв.

Станція Sitka. Зменшення рівня \bar{X} до 3 нТл мало місце з 17:00 – 19:00 (рис. 2.38 а). Для квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 80$ хв, $X_a \approx 1 \dots 6$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, ΔT було більше 240 хв (рис. 2.38 б).

Рівень Y компонента зменшувався до 2.5 нТл в інтервалі часу 15:00 – 17:00. Параметри квазіперіодичних варіацій наступні: $\Delta t \approx 80$ хв, $Y_a \approx 2 \dots 5$ нТл, $T \approx 20 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв.

Зменшення рівня Z компонента до 3 нТл реєструвалося з 17:00 – 20:00. Час запізнювання квазіперіодичних збурень $\Delta t \approx 80$ хв, $Z_a \approx 1 \dots 2$ нТл, $T \approx 10 \dots 30$ хв, ΔT було більше 240 хв.

Станція Huancayo. Значення \bar{X} зменшувалися на 20 нТл з 15:00 – 18:00 (рис. 2.39 а). Квазіперіодичні варіації з $X_a \approx 8 \dots 10$ нТл спостерігалися ще до СЗ. Після настання затемнення мав місце сплеск амплітуди до 26 нТл. Після 16:20 реєструвалося коливання з $\Delta t \approx 90$ хв, $X_a \approx 5 \dots 15$ нТл, $T \approx 10 \dots 35$ хв, $\Delta T \approx 120$ хв (рис. 2.39 б).

Для Y компонента зменшення рівня до 7 нТл мало місце з 17:15 до 20:15. Для квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 90$ хв, $Y_a \approx 2 \dots 4$ нТл, $T \approx 15 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 120$ хв. Коливання з іншими періодами і амплітудою до 2...3 нТл мали місце і до СЗ.

Зменшення рівня Z компонента до 8 нТл реєструвалося з 17:00 – 20:00. Параметри квазіперіодичних варіацій наступні: $\Delta t \approx 90$ хв, $Z_a \approx 1 \dots 4$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 120$ хв. Подібні варіації з меншими періодами та амплітудою до 3 нТл спостерігалися з 17:00 до 18:30.

Станція College. Значення рівня тренду \bar{X} зменшувалися до 7 нТл в інтервалі часу 17:20 – 19:00 (рис. 2.40 а). Сильні (до 15...17 нТл) квазіперіодичні варіації реєструвалися до СЗ. Швидше за все, вони були пов'язані з рухом ранкового термінатора. З часом запізнювання $\Delta t \approx 90$ хв

мали місце коливання з $T \approx 10 \dots 50$ хв, $X_a \approx 3 \dots 15$ нТл, ΔT було більше 210 хв (рис. 2.40 б).

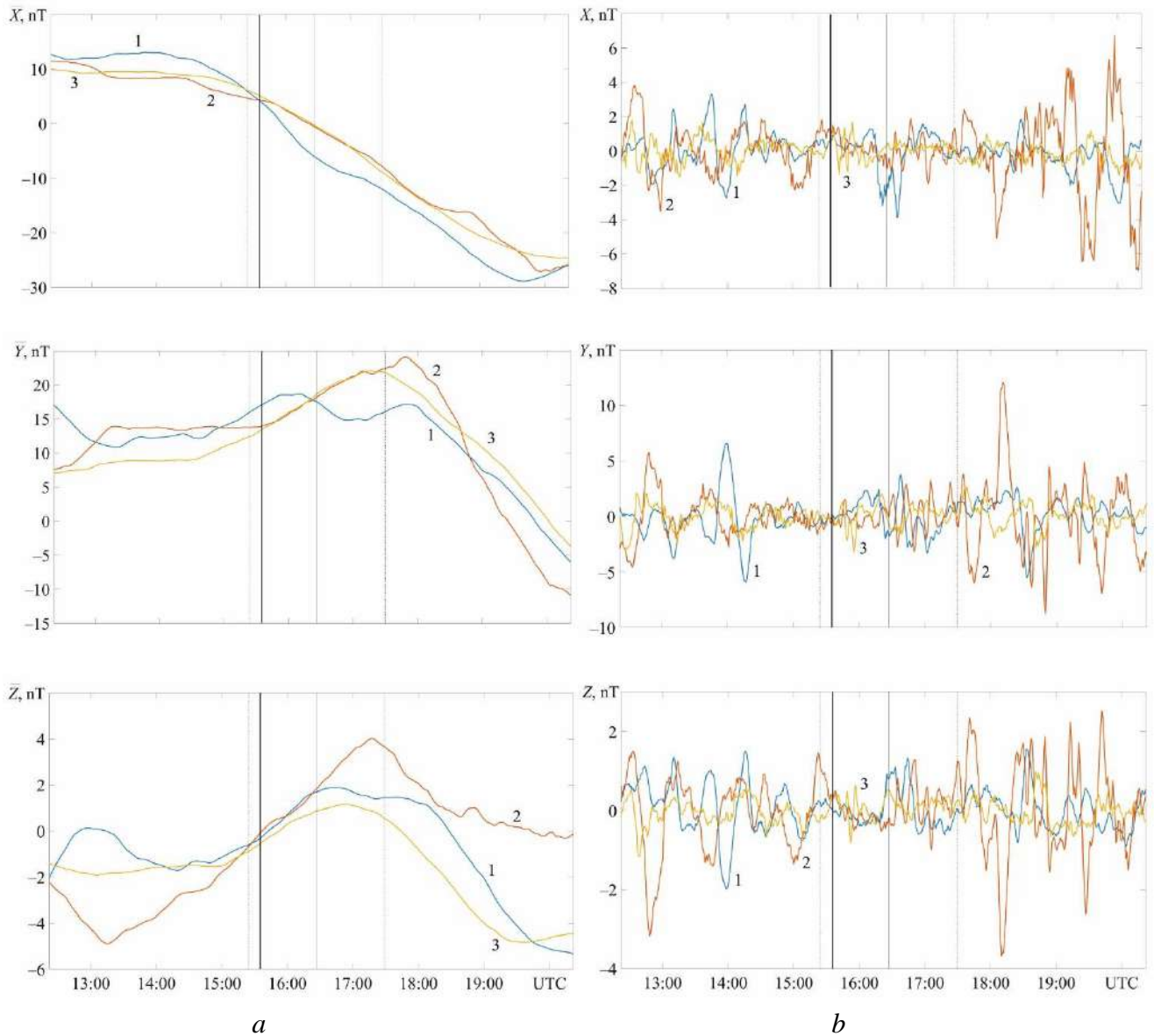


Рис. 2.38. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (а) та різниці між сигналом та трендом (б) на станції SIT (максимальна фаза – 0.71; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 64%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

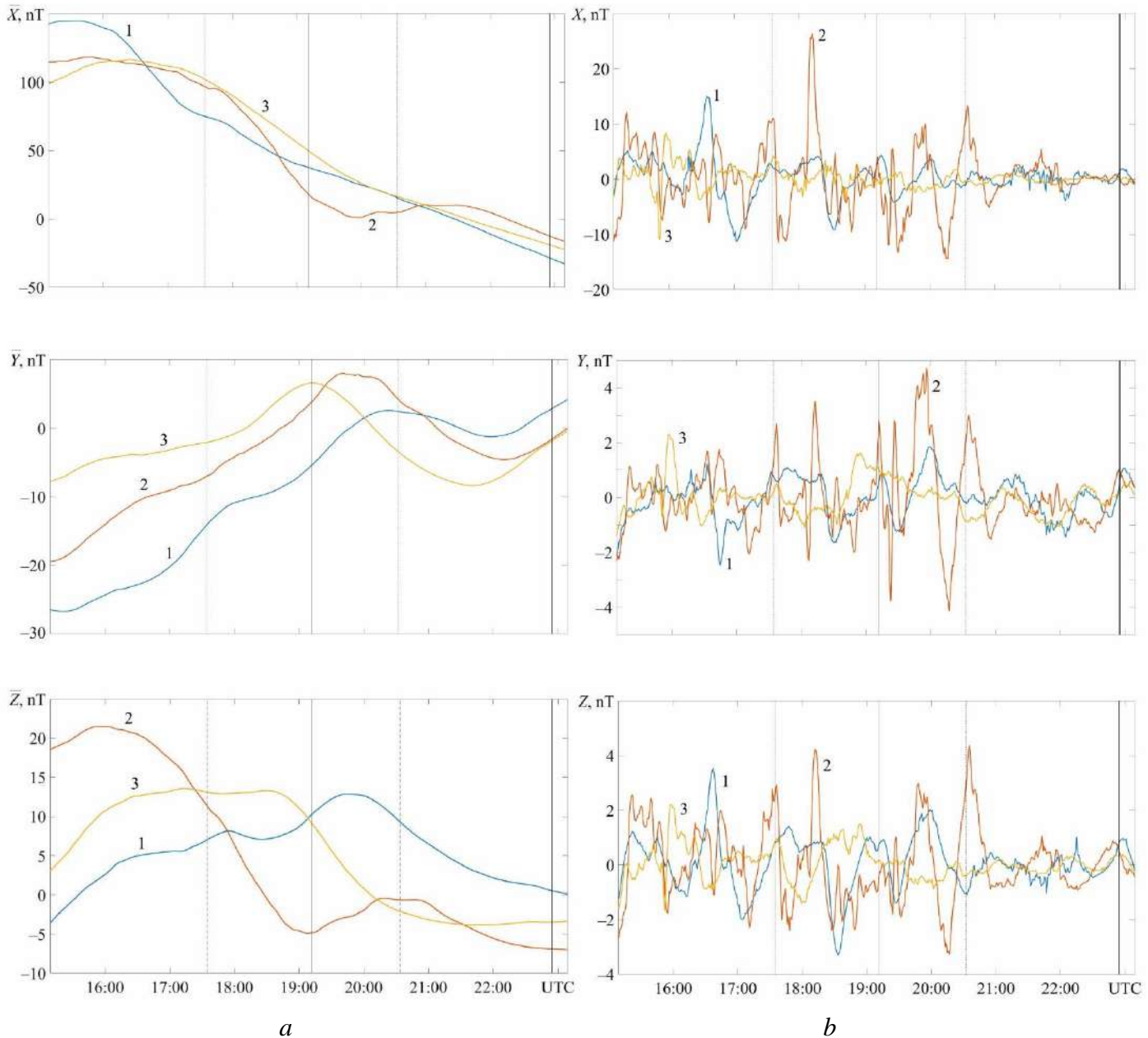


Рис. 2.39. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (а) та різниці між сигналом та трендом (б) на станції НУА (максимальна фаза – 0.64; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 55%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

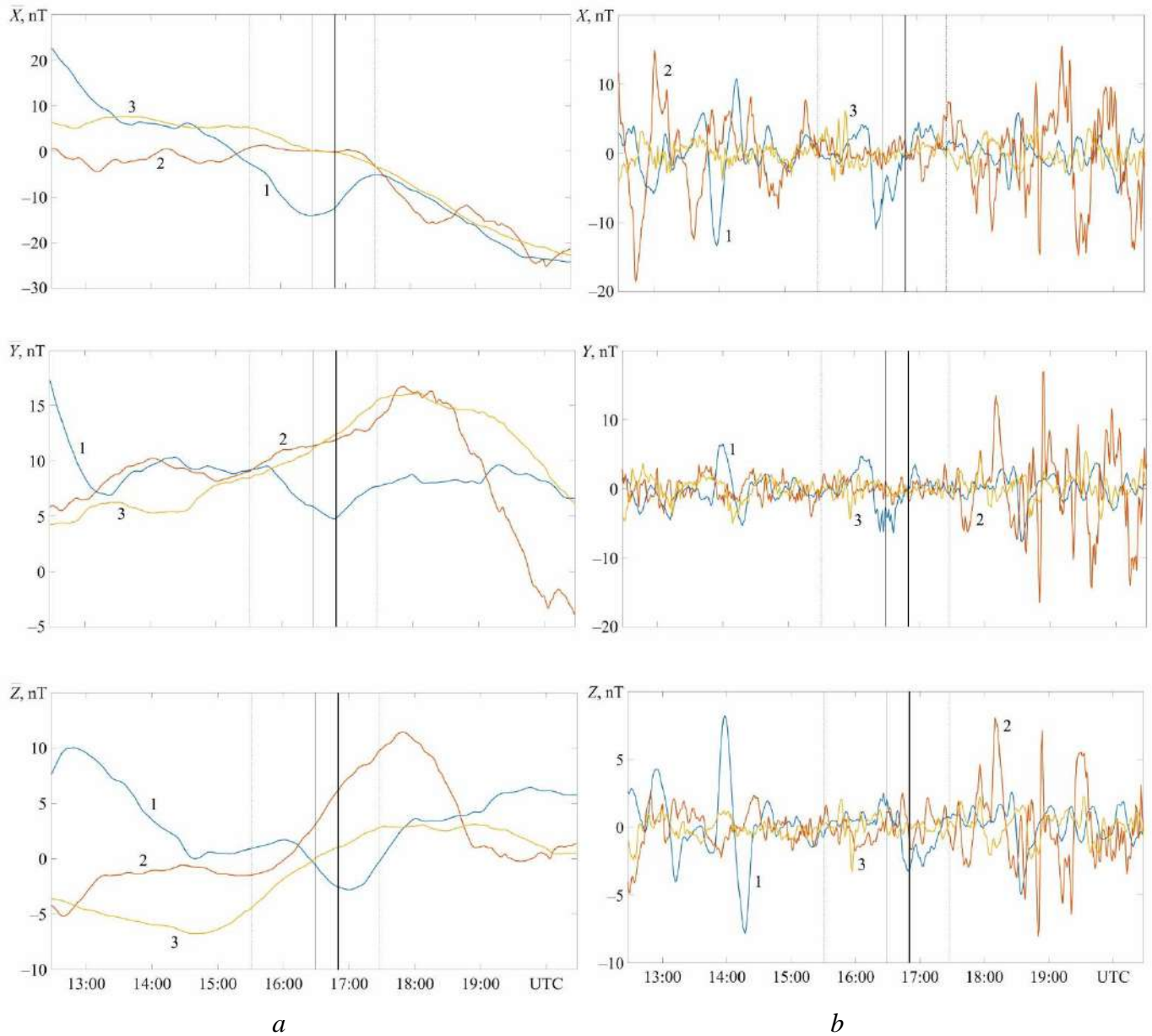


Рис. 2.40. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*b*) на станції СМО (максимальна фаза – 0.57; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 47%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

Незначне (до 2 нТл) зменшення \bar{Y} спостерігалось з 16:00 до 12:00. Крім того, після 18:00 реєструвалося стрімке зменшення \bar{Y} на ~ 20 нТл. Квазіперіодичні варіації мали наступні параметри: $\Delta t \approx 120$ хв, $Y_a \approx 3 \dots 15$ нТл, $T \approx 10 \dots 50$ хв, ΔT більше 180 хв. До 14:00 також мали місце значні (до 15...18 нТл) варіації рівня Y компонента.

Значні (до 10 нТл) варіації рівня \bar{Z} реєструвалися лише після 17:50, тобто після закінчення СЗ. Час запізнювання квазіперіодичних варіацій складав ~ 30 хв, $Z_a \approx 2 \dots 7$ нТл, $T \approx 10 \dots 50$ хв, $\Delta T \approx 180$ хв.

Станція Brandon. Зменшення рівня тренду \bar{X} на 8 нТл розпочалося приблизно о 17:00 і тривало не менше 200 хв (рис. 2.41 а). Для квазіперіодичних збурень $\Delta t \approx 130$ хв, $X_a \approx 2 \dots 3$ нТл, $T \approx 10 \dots 50$ хв, ΔT було більше 200 хв (рис. 2.41 б).

Для тренду \bar{Y} зменшення рівня на 7...8 нТл спостерігалось з 14:30 – 17:00. Параметри квазіперіодичних варіацій наступні: $\Delta t \approx 60$ хв, $Y_a \approx 2 \dots 4$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв. З 13:00 до 15:30 також мали місце квазіперіодичні збурення з $Y_a \approx 3 \dots 6$ нТл.

Зменшення рівня \bar{Z} не перевищувало 2 нТл. Воно тривало з 15:40 – 18:00. Для квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 60$ хв, $Z_a \approx 2 \dots 2.5$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв. З 13:00 до 15:00 також реєструвалися подібні збурення з амплітудою 2...3 нТл.

Станція San Juan. Незначне (до 2 нТл) зменшення рівня \bar{X} мало місце з 17:00 до 20:00 (рис. 2.42 а). Час запізнювання квазіперіодичних збурень складав ~ 30 хв, $X_a \approx 1.5 \dots 2$ нТл, $T \approx 20 \dots 40$ хв, тривалість ΔT перевищувала 200 хв (рис. 2.42 б).

Тренд \bar{Y} зменшувався приблизно на 5 нТл у інтервалі часу 17:00 – 19:00. Параметри квазіперіодичних збурень наступні: $\Delta t \approx 40$ хв, $Y_a \approx 0.5 \dots 1.5$ нТл, $T \approx 15 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв.

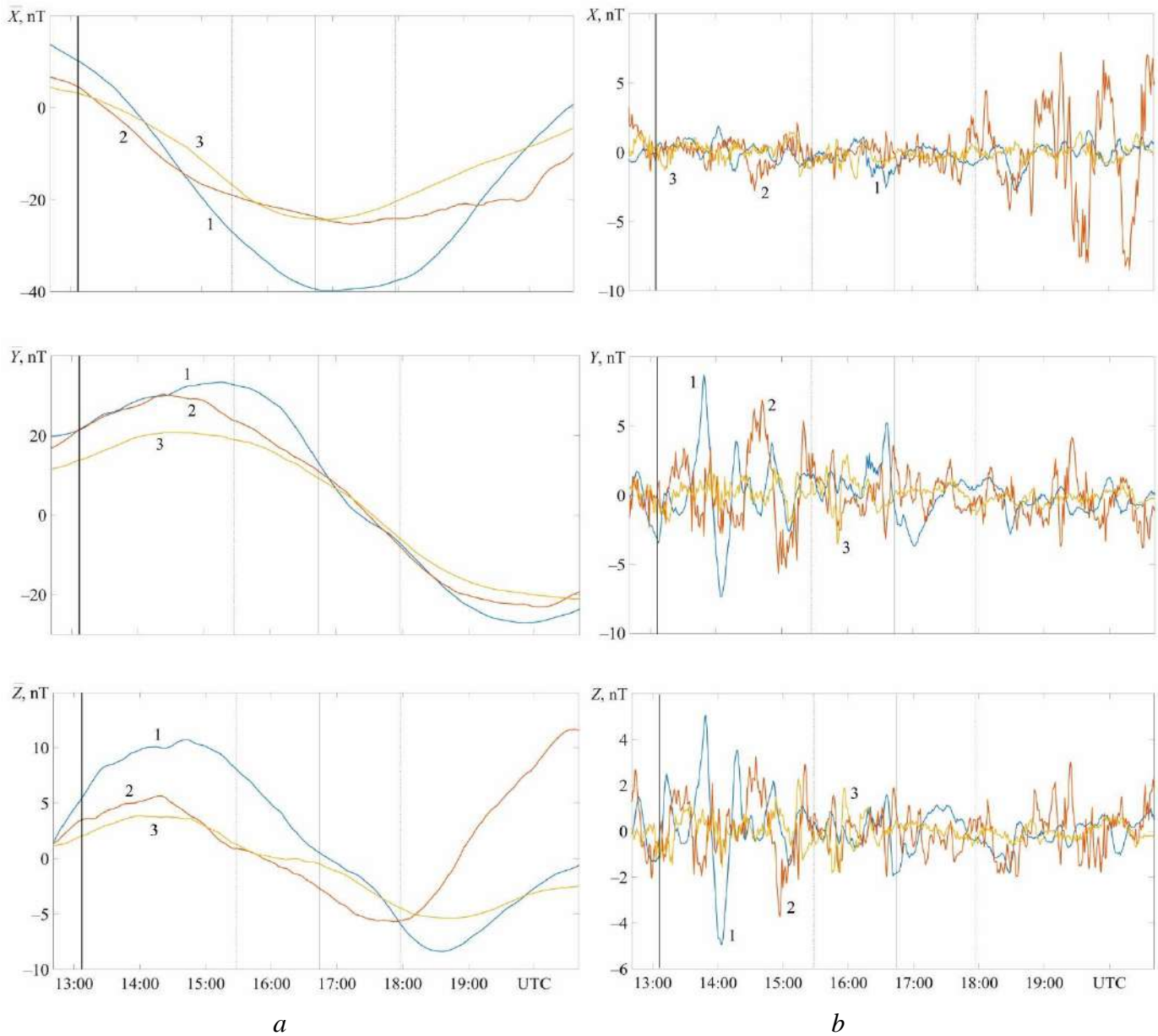


Рис. 2.41. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*b*) на станції BRD (максимальна фаза – 0.566; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 46.5 %) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та сходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (схід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

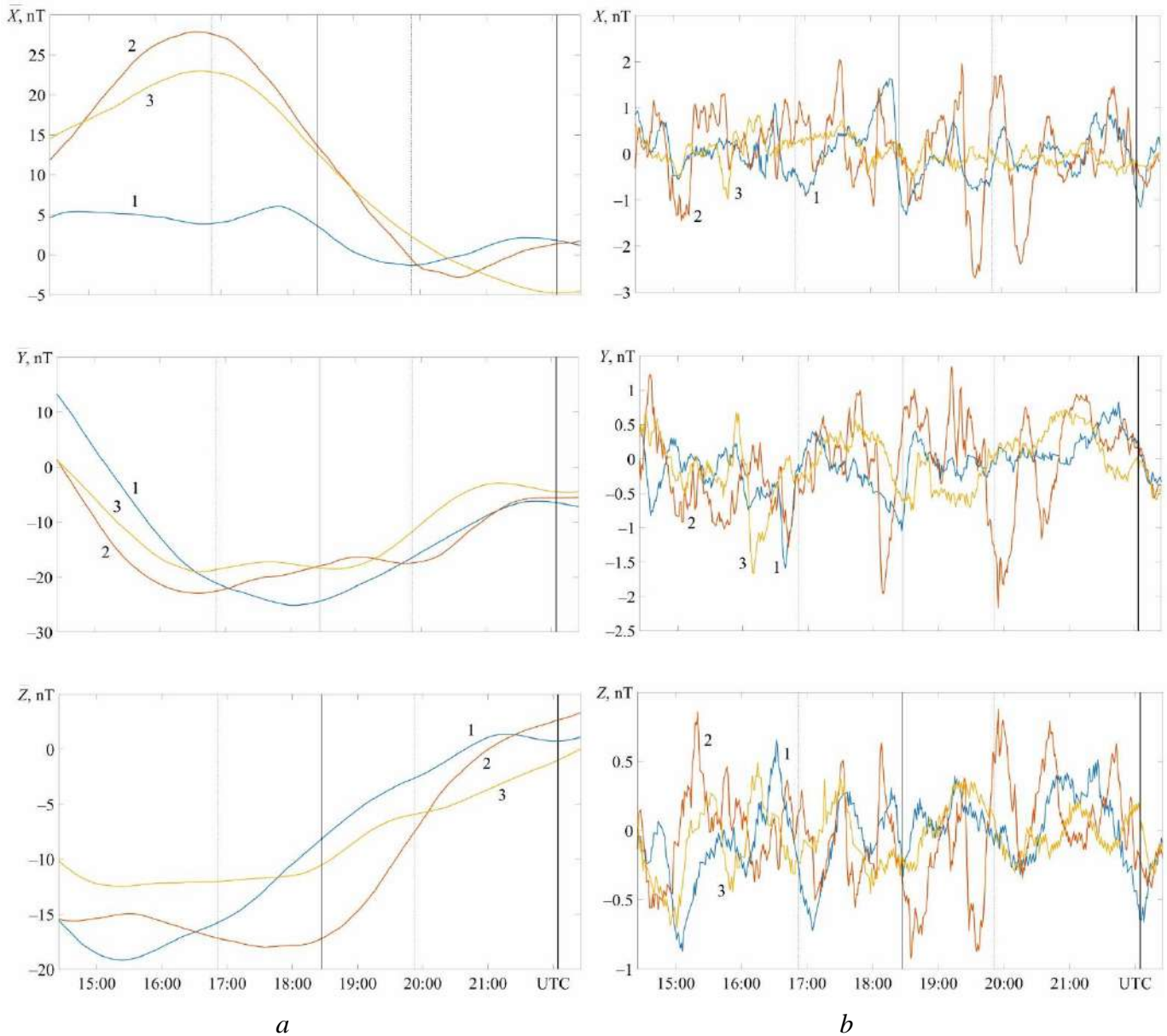


Рис. 2.42. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*b*) на станції SJG (максимальна фаза – 0.54; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 44%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією). (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

Для Z компонента рівень тренду зменшився на 6 нТл з 16:00 до 20:00. Квазіперіодичні варіації з $Z_a \approx 0.5 \dots 0.8$ нТл існували з 15:00 до 22:00. Після 17:30 їхня амплітуда дещо збільшувалася, тобто $\Delta t \approx 40$ хв, $T \approx 30 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв.

Станція Ottawa. Зменшення рівня \bar{X} , яке тривало з 15:00 до 17:00, не перевищувало 2 нТл (рис. 2.43 а). Квазіперіодичні збурення спостерігалися дуже чітко. Їхні параметри наступні: $\Delta t \approx 80$ хв, $X_a \approx 2 \dots 7$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв (рис. 2.43 б).

Зменшення рівня \bar{Y} , що також не перевищувало 2 нТл, реєструвалося в інтервалі часу 15:00 – 18:00. Час запізнювання квазіперіодичних варіацій $\Delta t \approx 80$ хв, $Y_a \approx 2 \dots 4$ нТл, $T \approx 10 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 240$ хв.

Зменшення до 4 нТл рівня тренду \bar{Z} мало місце з 15:00 до 18:00. Квазіперіодичні варіації мали амплітуду $2 \dots 3$ нТл, $\Delta t \approx 80$ хв, $T \approx 10 \dots 40$ хв, $\Delta T \approx 220$ хв.

Збурення концентрації електронів. Рівняння балансу концентрації електронів N на висотах динамо-області атмосфери, що дає основний внесок у геомагнітний ефект СЗ, має вид [51]:

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2, \quad (2.11)$$

де q – швидкість утворення електронів, α – коефіцієнт рекомбінації електронів з іонами. У квазістаціонарному випадку $dN/dt \approx 0$. Тоді з (2.11) маємо наступне рівняння:

$$q_0 = \alpha_0 N_0^2, \quad (2.12)$$

де індекс "0" означає незбурені умови. Поблизу моменту з фазою СЗ M_{\max} маємо для N_{\min} наступне співвідношення:

$$q = \alpha N_{\min}^2. \quad (2.13)$$

Тут

$$q = q_0 (1 - A_{\max}) = q_0 B_{\min}.$$

Тоді з (2.12) та (2.13) за $\alpha \approx \alpha_0$ отримаємо:

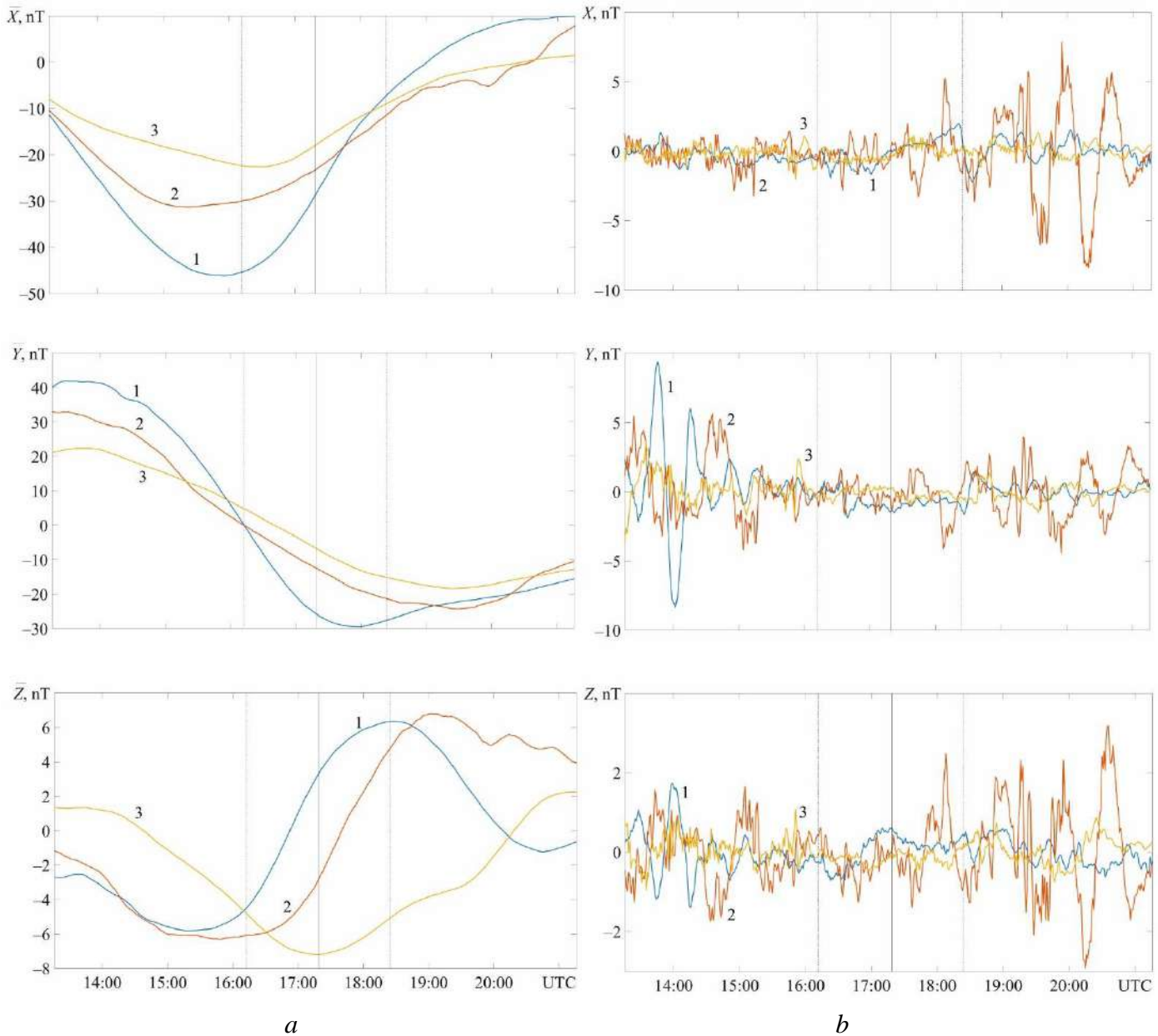


Рис. 2.43. Часові варіації тренду компонент геомагнітного поля (*a*) та різниці між сигналом та трендом (*b*) на станції ОТТ (максимальна фаза – 0.3; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 19%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – на момент максимальної фази СЗ. (1–11 жовтня 2023 р, 2–14 жовтня 2023 р, 3–16 жовтня 2023 р).

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{B_{\min}}. \quad (2.14)$$

З урахуванням внеску сонячної корони рівняння (2.14) дещо змінюється [48]:

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{\frac{B_{\min} + \xi}{1 + \xi}}, \quad (2.15)$$

де в середньому $\xi \approx 0.25$ [48].

Для подальших обчислень зручно ввести максимальне за величиною відносне збурення концентрації електронів

$$\delta_N = \frac{N_{\min}}{N_0} - 1.$$

Збурення іоносферних струмів. Збурення рівня Х-компонента обумовлене збуренням густини іоносферного струму в динамо-області атмосфери ($z \approx 90 \dots 150$ км). Незбурене значення густини електричного струму для висоти $z_{\max} \approx 150$ км дається наступним співвідношенням [50]:

$$j_{0y} \approx -\frac{1}{2} e N_0 v_y, \quad (2.16)$$

де e – заряд електрона, v_y – проекція швидкості атмосферного вітру поблизу висоти z_{\max} .

Збурення СЗ значення густини електричного струму дається подібним співвідношенням:

$$\Delta j_y = -\frac{1}{2} e \Delta N v_y = -\frac{1}{2} e N_0 \delta_N v_y = j_{0y} \delta_N. \quad (2.17)$$

Внесок у геомагнітний ефект дає інтегральна густина електричного струму

$$\Delta J_y = \int_{\Delta z} \Delta j_y dz, \quad (2.18)$$

де Δz – характерна товщина шару, що дає внесок в інтеграл (2.18). Для залежності від висоти у формулі (2.16) характерною товщиною є висота однорідної атмосфери H за $z \approx z_{\max} \approx 150$ км. На цій висоті $H \approx 15$ км. Тоді із (2.17) і (2.18) випливає, що

$$\Delta J_y = j_{0y} \delta_N H = -\frac{1}{2} e N_0 \delta_N v_y H. \quad (2.19)$$

Надалі будемо вважати, що для середніх і низьких широт поблизу $z \approx 150$ км, $v_y \approx -50$ м/с.

На високих широтах для станції College проекція швидкості [3]:

$$v_y = -\frac{E}{B_0},$$

де E – напруженість електричного поля на висотах динамо-області, B_0 – індукція незбуреного магнітного поля. За $E \approx 10$ мВ/м, $B_0 \approx 5 \cdot 10^{-5}$ Тл маємо $v_y \approx -200$ м/с.

Магнітний ефект. Для збурення рівня X -компонента маємо [50]:

$$\Delta X_{cal} = \mu_0 \Delta J_y = -\frac{1}{2} \mu_0 e N_0 \delta_N v_y H, \quad (2.20)$$

де μ_0 – магнітна стала.

Результати обчислень ΔX_{cal} за співвідношенням (2.20) наведено у табл. 2.10. Із табл. 2.10 можна бачити, що при збуренні B_{min} від 0.18 до 0.81 значення ΔX_{cal} мали тенденцію до збільшення приблизно від $-(10 \dots 20)$ нТл до -2 нТл. Важливо, що величина ΔX_{cal} залежала не тільки від B_{min} , а й від часу доби, географічних координат, стану іоносфери та магнітного поля (2.20). Під час розрахунків використовувалися модельні значення N_0 , що відповідали часу доби спостережень.

Як видно із табл. 2.10, аперіодичні збурення X компонента, що супроводжували СЗ, досить складно залежать від величини $B_{min} = 1 - A_{max}$. Справа в тому, що зменшення рівня компонент геомагнітного поля визначалися не тільки значенням δ_{min} , але й значеннями N_0 і v_y (2.20). В свою чергу N_0 і v_y залежали від широти та часу доби.

Найбільші збурення $\overline{\Delta X}$, що сягали $15 \dots 20$ нТл, спостерігалися на станціях Boulder, Huancayo, Victoria та Newport. Для станції Boulder і Victoria $B_{min} = 0.19$, а $A_{max} = 81\%$. Для них $\delta_N \approx -(0.41 \dots 0.56)$, а $N_0 \approx 4.6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ та $N_0 \approx 3.6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Значний ефект СЗ пояснюється, як досить великим значенням

A_{\max} , так і тим, що СЗ спостерігалось у денний час, коли концентрація електронів у динамо-області іоносфери була досить великою. Приблизно теж саме можна відмітити і для станції Newport.

Таблиця 2.10.

Параметри СЗ, іоносферного ефекту СЗ, густини струму в динамо-області іоносфери, обчисленого значення $\Delta\bar{X}_{cal}$ і спостережуваного значення $\Delta\bar{X}$ геомагнітного ефекту (в дужках з врахуванням дії сонячної корони)

Станція	B_{\min}	$\left(\frac{N}{N_0}\right)_{\min}$	δ_N	j_{0y} , мкА/м ²	N_0 , 10 ¹¹ м ⁻³	$\Delta\bar{X}_{cal}$, нТл	$\Delta\bar{X}$, нТл
Tucson	0.18	0.42 (0.59)	-0.58 (-0.41)	0.9	2.3	-9.8 (-6.9)	-10
Fresno	0.18	0.42 (0.59)	-0.58 (-0.41)	1.2	3	-13.1 (-9.2)	-13
Shumagin	0.19	0.44 (0.59)	-0.56 (-0.41)	0.2	0.46	-2.1 (-1.5)	-2
Boulder	0.19	0.44 (0.59)	-0.56 (-0.41)	1.9	4.6	-20 (-14.6)	-20
Victoria	0.19	0.44 (0.59)	-0.56 (-0.41)	1.5	3.6	-15.8 (-11.6)	-15
Newport	0.25	0.50 (0.63)	-0.50 (-0.37)	1.6	4	-15 (-11.1)	-15
Bay St. Louis	0.28	0.53 (0.65)	-0.47 (-0.35)	1.1	2.8	-9.7 (-7.2)	-10
Sitka	0.36	0.60 (0.70)	-0.40 (-0.30)	0.4	1	-3 (-2.3)	-3
Huancayo	0.45	0.67 (0.75)	-0.33 (-0.25)	3.2	8	-19.8 (-15)	-20
College	0.53	0.73 (0.79)	-0.27 (-0.21)	1.6	3.4	-8.1 (-6.3)	-7
Brandon	0.535	0.73 (0.79)	-0.27 (-0.21)	1.6	3.9	-8.1 (-6.3)	-8
San Juan	0.56	0.75 (0.80)	-0.25 (-0.20)	0.45	1.1	-2.1 (-1.7)	-2
Ottawa	0.81	0.90 (0.92)	-0.10 (-0.08)	1.1	2.7	-2.1 (-1.7)	-2

Станція Нуансауо знаходиться в області екваторіальної іоносферної аномалії, де денний час на висотах динамо-області N_0 сягали значень $8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, що й призвело до зменшення рівня X компонента на 20 нТл за $B_{\min} \approx 0.45$ та $A_{\max} = 55\%$.

Досить значним ($|\Delta \bar{X}| \approx 10 \dots 13 \text{ нТл}$) був ефект СЗ на станціях Tucson, Fresno та Bay St. Louis, що пояснюється величиною A_{\max} , що змінювалася від 82% до 72%, та величиною N_0 у деякий час $(2.3 - 3) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Для станції Shumagin $A_{\max} = 81\%$, тобто відносна площа покриття диска Сонця така ж, як і для станції Boulder, але значення ефекту СЗ складала -2 нТл, а на станції Boulder -20 нТл, що на порядок менше. Це пояснюється тим, що СЗ на станції Shumagin мало місце незабаром після сходу Сонця, коли $N_0 \approx 4.6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Незначним було збурення $\Delta \bar{X} \approx -3$ нТл на станції Sitka. Головна причина полягала в тому, що СЗ спостерігалось також після сходу Сонця, коли $N_0 \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Крім того, $A_{\max} = 64\%$.

На станції College СЗ також реєструвалося незабаром після сходу Сонця. Але у високих широтах (65° пн.ш.) швидкість v_y була приблизно вчетверо більше, ніж у середніх широтах, де $v_y \approx -50$ м/с. Це забезпечило $\Delta \bar{X} \approx -7$ нТл. Приблизно таке ж значення $\Delta \bar{X} \approx -8$ нТл спостерігалось на станції Brandon. Для станцій College та Brandon $A_{\max} = 47\%$. Проте на станції Brandon v_y приблизно вчетверо менше, ніж на станції College, а значення N_0 , навпаки, в 3.9 разів більше. Це й забезпечило практичну рівність геомагнітного ефекту СЗ.

Для станції San Juan $A_{\max} = 44\%$, тобто не дуже відрізняється від $A_{\max} = 46.5\%$ на станції Brandon. Проте значення $\Delta \bar{X}$ приблизно в чотири рази менше. Це пояснюється тим, що магнітний ефект на станції San Juan спостерігався перед заходом, коли $N_0 \approx 1.1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$.

Незначним (-2 нТл) був ефект на станції Ottawa, хоча $N_0 \approx 2.7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Це пояснюється малим значенням $A_{\text{max}} = 19\%$.

Наприкінці обговорення порівнюємо отримані результати з результатами робіт [13]. У цих роботах використовувалися результати спостережень на 15 магнітних станціях. У роботі [51] досліджувалися ефекти переважно у високих широтах, а у роботі [13] – в середніх широтах Євразійського континенту. Встановлено, що СЗ призводило до значних збурень геомагнітного поля. Ефекти найбільш яскраво виражені у варіаціях X компонента. Як і слід було очікувати, величина аперіодичних і квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля, зазвичай, відслідковувала зміни фази СЗ: більшим значенням фази відповідали більші значення величини геомагнітного ефекту. Квазіперіодичні варіації рівня геомагнітного поля асоціювалися з генерацією та поширенням атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ).

Таким чином, аналіз геомагнітного ефекту СЗ 14 жовтня 2023 р. у глобальних масштабах показав, що величина ефекту суттєво залежала не тільки від фази СЗ, але й від географічних координат, часу доби, стану іоносфери та іоносферної струмової системи.

Квазіперіодичні варіації спостерігалися у всіх компонентах геомагнітного поля. Їхня амплітуда, зазвичай, не перевищувала $5 \dots 6$ нТл. Тільки на станціях Huancayo та College амплітуда часом сягала 15 нТл. Перша станція знаходиться в області екваторіальної іоносферної аномалії, а друга – в високих широтах, де більш потужні іоносферні струмові системи.

Квазіперіодичні збурення мали час запізнювання по відношенню до початку СЗ, що змінювався від 30 до 150 хв (у середньому $\Delta t \approx 80 \dots 90$ хв), та тривалість $\Delta T \approx 180 \dots 240$ хв.

Період коливань $T \approx 10 \dots 80$ хв, в середньому $T \approx 15 \dots 40$ хв. Це означає, що квазіперіодичні варіації рівня геомагнітного поля викликалися генерацією та поширенням АГХ, період яких змінюється від ~ 5 хв до 180 хв [54]. Механізм генерації квазіперіодичних збурень наступний. Місячна тінь на

висотах атмосфери генерує АГХ, які з тим же періодом модулюють концентрацію електронів у полі АГХ. Електрони набувають масової швидкості

$$v = v_s \frac{\Delta p}{p_0} \approx v_s \delta_{Na},$$

де $\Delta p/p_0$ – відносне збурення тиску у полі АГХ, v_s – швидкість звука на висотах динамо-області атмосфери, δ_{Na} – відносна амплітуда збурень концентрації електронів. Тоді амплітуда квазіперіодичних коливань дається співвідношенням, подібним до (2.20):

$$X_a = \frac{1}{2} \mu_0 e N_0 \delta_{Na} v_s H.$$

Наприклад, для станції Нуансау за $N_0 \approx 8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $\delta_{Na} \approx 0.01 - 0.03$, $v_s \approx 360$ м/с, $H \approx 15$ км маємо $X_a \approx 4.3 \dots 13$ нТл. Денні спостереження дали $X_a \approx 5 \dots 15$ нТл. Таким чином, відносна амплітуда збурень N у полі АГХ була $\sim 0.01 \dots 0.03$. Такі значення відносної амплітуди і періодів цілком відповідають АГХ.

Головні результати досліджень

1. За даними 10 станцій мережі INTERMAGNET досліджено варіації X-, Y- та Z-компонентів геомагнітного поля під час кільцеподібного сонячного затемнення 14 жовтня 2023 р. Аналіз виконано для станцій, розташованих у зоні часткового та близького до максимального покриття сонячного диска.

2. Встановлено наявність статистично достовірного аперіодичного ефекту затемнення. Затемнення супроводжувалося переважно зменшенням рівня горизонтальних компонент геомагнітного поля, насамперед X-компоненти. Амплітуда збурення змінювалася від ~ 1 нТл до 4–5 нТл залежно від фази затемнення та широти станції.

3. Підтверджено залежність амплітуди ΔX від максимального покриття сонячного диска (A_{\max}). Із зростанням A_{\max} спостерігалось монотонне

збільшення абсолютної величини збурення. Найбільші ефекти зареєстровано на станціях, розташованих ближче до осі кільцеподібності.

4. Показано, що фізичний механізм ефекту пов'язаний зі зменшенням електронної концентрації в E-області іоносфери (90–150 км). Зменшення фотонізації призводило до зниження електропровідності та густини іоносферного динамо-струму, що обумовило спостережуване зменшення X-компоненти поля. Оцінене відносне зменшення електронної концентрації становило приблизно 10–35%.

5. Під час затемнення зафіксовано посилення короткоперіодичних флуктуацій (5–120 хв). Це інтерпретується як прояв генерації атмосферних гравітаційних хвиль, що виникали внаслідок швидкого охолодження атмосфери в зоні тіні та модулювали іоносферні струми.

6. Порівняння з попередніми затемненнями показало якісну подібність механізму, але відмінність амплітудних характеристик. Величина ефекту визначалася поєднанням фази затемнення, локального часу та фонових геомагнітних умов.

2.5. Геомагнітні ефекти сонячного затемнення 8 квітня 2024 р.

Загальні відомості. СЗ 139 саросу розпочалося 8 квітня 2024 р. о 15:42:07 UT над Тихим океаном і завершилося о 20:52:13.8 UT над Атлантичним океаном [<https://science.nasa.gov/eclipses/future-eclipses/eclipse-2024/>]. Максимальна фаза затемнення $M_{\max} \approx 1.056$ спостерігалася в точці з координатами $25^{\circ}17.5' \text{ N}$, $104^{\circ}07.2' \text{ W}$. Висота Сонця становила 69.8° , азимут дорівнював 149.4° . Тривалість повної фази СЗ дорівнювала 04 хв 28.1 с. Ширина смуги повної тіні становила 197.5 км. External and Internal contact of umbra are following: $U_1 = 16:38:44.4 \text{ UT}$, $U_2 = 16:41:01.7 \text{ UT}$, $U_3 = 19:53:13.9 \text{ UT}$, $U_4 = 19:55:29.1 \text{ UT}$. Повне затемнення спостерігалось у 6 штатах Мексики, 15 штатах США та 6 провінціях Канади (табл. 2.11).

Траекторія руху потужної тіні показана на рис. 2.44.

Таблиця 2.11.

Загальні відомості про сонячне затемнення 08 квітня 2024 р.

Станція	Координати		t_1	t_m	t_2	M	$S, \%$	Схід Сонця (UTC)	Захід Сонця (UTC)
	Широта	Довгота							
St John's STJ Canada	47.5950°N	52.6770°W	18:39:30	19:45:53	20:47:50	0.99	99	08:51	22:16
Ottawa OTT Canada	45.4030°N	75.5520°W	18:11:43	19:25:10	20:35:05	0.99	99	10:26	23:44
Sable Island SBL Canada	43.9321°N	60.0095°W	18:31:51	19:41:24	20:46:08	0.90	89	09:24	22:34
Fredericksburg FRD USA	38.2100°N	77.3670°W	18:03:05	19:19:32	20:32:10	0.87	85	10:41	23:43
Tucson TUC USA	32.1700°N	110.7300°W	17:06:24	18:19:39	19:36:23	0.76	70	13:01	01:51
Boulder BOU USA	40.1400°N	105.2330°W	17:28:48	18:40:30	19:53:40	0.702	64	12:30	01:36
Brandon BRD Canada	49.8700°N	99.9739°W	17:52:45	18:58:15	20:35:05	0.58	49	11:58	01:30
Fresno FRN USA	37.0900°N	119.7200°W	17:13:03	18:15:35	19:21:23	0.50	40	13:32	02:32
Newport NEW USA	48.2700°N	117.1200°W	17:41:20	18:36:10	19:32:31	0.38	26	13:07	02:33

Дані та методи. Аналізу підлягали часові варіації X-, Y- та Z-компонент (що відповідають напрямкам Північ–Південь, Захід–Схід і вертикальному напрямку) геомагнітного поля для низки американських і канадських магнітних станцій. Перелік цих станцій, які належать до мережі INTERMAGNET, наведено в табл. [<https://www.intermagnet.org/>].

Проаналізовано дані за 5–11 квітня 2024 р. Сонячне затемнення відбулося 8 квітня 2024 р., інші дні використовувалися як контрольні.

Роздільна здатність вихідних даних за амплітудою становить 0.1 нТл, а за часом – 1 хв.

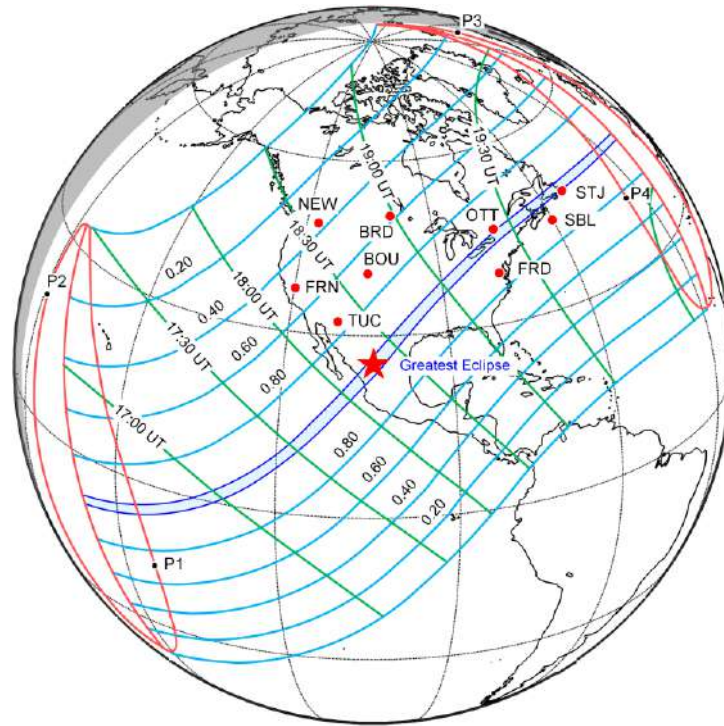


Рис. 2.44. Контурна карта розподілу станцій спостереження та зони часткового затемнення.

Алгоритм обробки полягав у наступному. Насамперед віднімалася стала складова, оцінена для відповідної доби. Ця складова відрізнялася на різних станціях. Отримані залежності $X(t)$, $Y(t)$ і $Z(t)$ піддавалися ковзному усередненню на інтервалі 60 хв, після чого будувалися трендові залежності $\bar{X}(t)$, $\bar{Y}(t)$ і $\bar{Z}(t)$. За цими залежностями визначався аперіодичний ефект сонячного затемнення. Крім того, для виявлення можливого квазіперіодичного ефекту обчислювалися різниці між $X(t)$ і $\bar{X}(t)$, $Y(t)$ і $\bar{Y}(t)$, а також $Z(t)$ і $\bar{Z}(t)$.

Стан космічної погоди. Для пошуку ефектів СЗ у геомагнітному полі потрібно дослідити ретельний аналіз стану космічної погоди. За даними сайту [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] розроблено спеціальний формат, що характеризує стан космічної погоди (рис. 2.45).

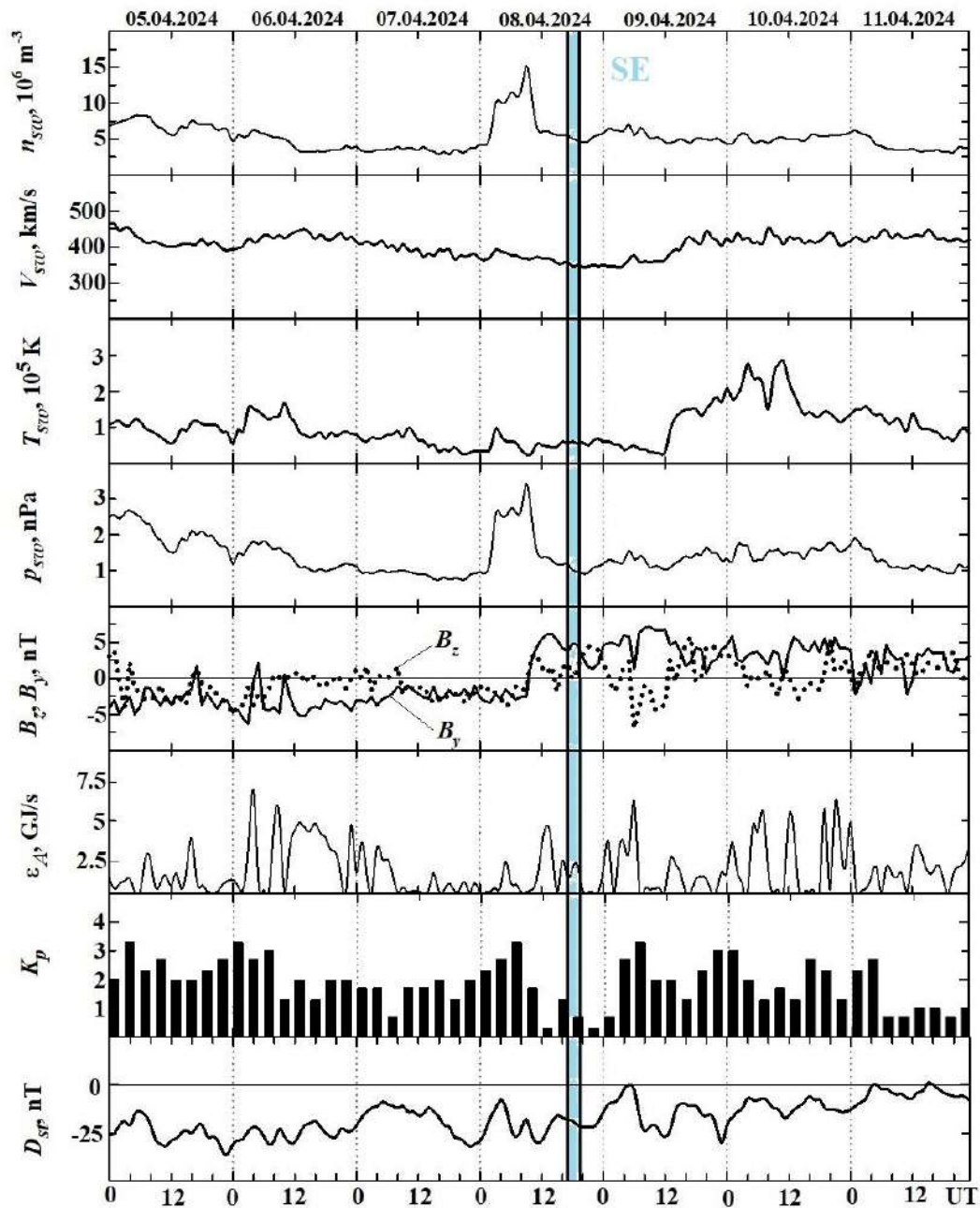


Рис. 2.45 Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період з 5 по 11 квітня 2024 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

Із рис. 2.45 видно, що в усі дні, крім першої половини 8 квітня 2024 р., значення концентрації частинок сонячного вітру n_{sw} флюктували в межах $(3-8) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Лише 8 квітня 2024 р. значення n_{sw} зростали від $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $15 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. Це тривало не більше 10 годин.

Швидкість частинок сонячного вітру V_{sw} змінювалася від 360 км/с до 464 км/с.

Температура частинок сонячного вітру T_{sw} з 5 квітня до першої половини дня 9 квітня 2024 р. флюктувала в межах $(0.2-1.7) \cdot 10^5 \text{ К}$. З 12:00 9 квітня 2024 р., приблизно до 14:00 10 квітня 2024 р., значення T_{sw} зростали від $0.2 \cdot 10^5 \text{ К}$ до $2.8 \cdot 10^5 \text{ К}$.

Динамічний тиск частинок сонячного вітру p_{sw} найчастіше флюктував у межах 1–2 нПа. Лише в першій половині дня 8 квітня 2024 р. значення p_{sw} зростали до 3.4 нПа.

Значення компонент B_y і B_z міжпланетного магнітного поля флюктували в межах від -6 нТл до 7 нТл.

Сплески параметра Акасофу ϵ_A зазвичай не перевищували $6-7$ ГДж/с.

Значення індексу K_p не перевищували 3.3, а в другій половині 8 квітня 2024 р. вони змінювалися від 0.3 до 1.

Значення D_{st} -індексу найчастіше флюктували в межах від 0 нТл до -30 нТл.

Отже, стан космічної погоди був незбуреним і сприятливим для пошуку варіацій геомагнітного поля, пов'язаних із сонячним затемненням.

Результати аналізу. Проаналізуємо часові варіації компонент геомагнітного поля для кожної станції.

Станція STJ. Часові варіації трендів компонент \bar{X} , \bar{Y} і \bar{Z} , а також флюктуацій δX , δY і δZ рівня цих компонент показано на рис. 2.46. Із рис. 2.46 видно, що протягом СЗ рівень \bar{X} зменшився приблизно на 8 нТл. Це тривало близько 130 хв. Помітно змінилися амплітуда δX та їхній період.

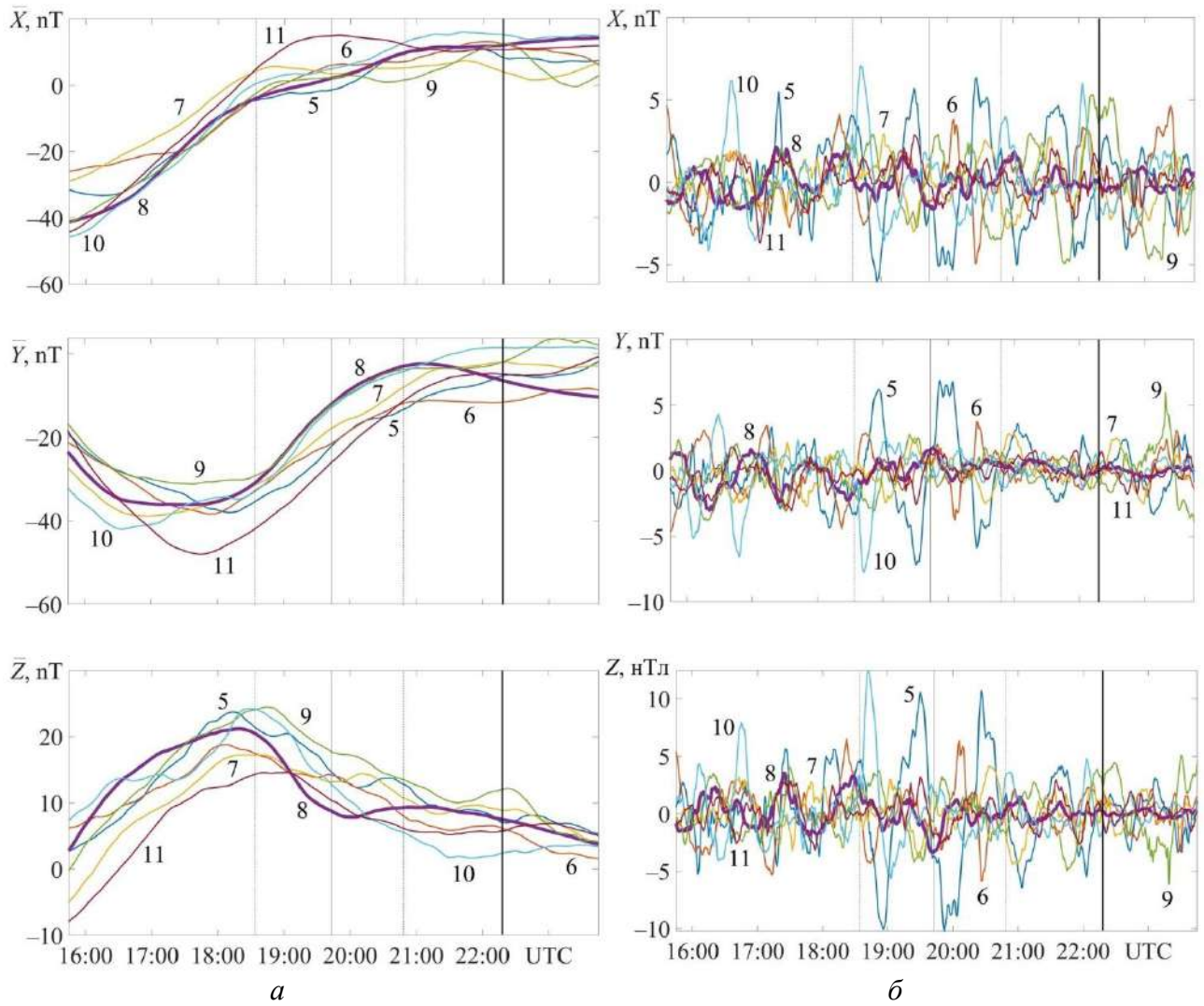


Рис. 2.46. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції STJ (максимальна фаза – 0.99; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 99%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. Моменти СЗ та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією). (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Ще до початку СЗ на рівні Землі значення \bar{Y} протягом 140 хв зменшувалися на 7 нТл. Під час СЗ значення \bar{Y} , навпаки, збільшувалися до 7 нТл. Це тривало близько 160 хв. Після настання головної фази СЗ

амплітуда флуктуацій δY зменшилася в кілька разів. Фактично відбулося пригнічення коливання, що існувало до затемнення, з амплітудою близько 2 нТл і періодом $T \approx 60$ хв.

Зменшення рівня тренду \bar{Z} до 8 нТл розпочалося практично одночасно з початком затемнення і тривало близько 160 хв. СЗ, так само як і для Y -компоненти, супроводжувалося пригніченням коливання, що існувало до затемнення, з амплітудою близько 2–3 нТл і періодом $T \approx 60$ хв.

Станція OTT. До початку СЗ з 15:30 до 17:30 відзначалося зменшення рівня тренду \bar{X} до 9 нТл тривалістю близько 160 хв (рис. 2.47). Протягом СЗ мало місце збільшення \bar{X} до 3 нТл, що тривало близько 160 хв. СЗ супроводжувалося незначним зменшенням амплітуди та періоду коливання, яке передувало затемненню.

Приблизно з 17:30 до 19:30 реєструвалося зменшення рівня \bar{Y} до 8 нТл тривалістю $\Delta T \approx 120$ хв. З 18:30 до 20:40 відзначалося зростання тренду \bar{Y} до 8 нТл із $\Delta T \approx 130$ хв. Мало місце пригнічення квазіперіодичного коливання, яке проявлялося до затемнення.

Приблизно за 1 год до початку СЗ розпочалося зменшення до 8 нТл тренду рівня \bar{Z} , яке тривало близько 200 хв. Затемнення також супроводжувалося порушенням коливання δZ , що спостерігалося до затемнення.

Станція SBL. Зменшення рівня тренду \bar{X} до 7 нТл за тривалістю $\Delta T \approx 140$ хв практично збіглося з тривалістю СЗ ($\Delta T \approx 130$ хв) (рис. 2.48). Затемнення супроводжувалося пригніченням коливання δX з $T \approx 60$ хв і амплітудою $\delta X_a \approx 3$ нТл.

Приблизно з 17:30 до 19:30 мало місце зменшення значень \bar{Y} до -1 нТл. З 19:00 до 21:20 відзначалося підвищення рівня \bar{Y} до 1 нТл. Затемнення супроводжувалося зміною характеру варіацій $\delta Y(t)$.

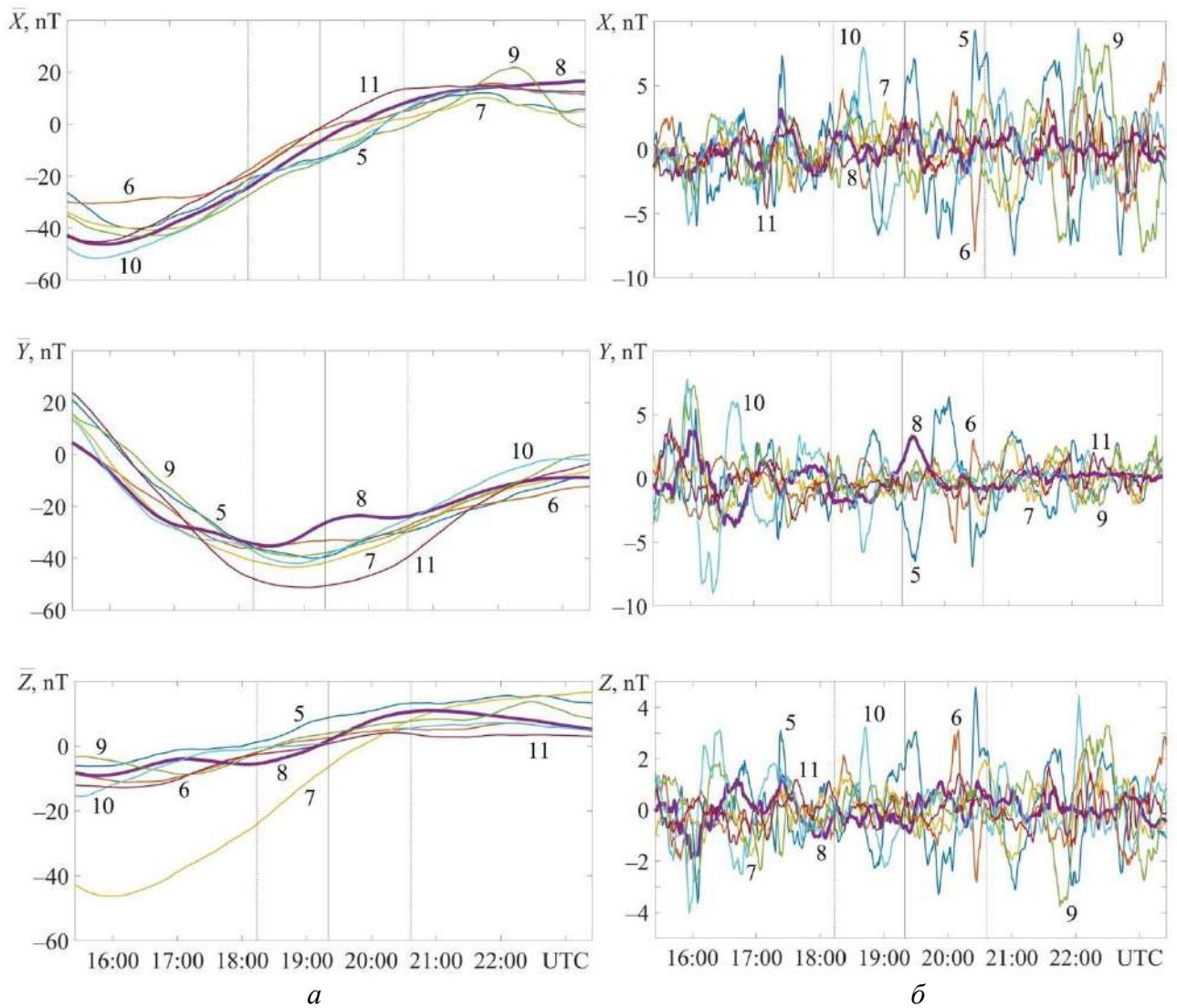


Рис. 2.47. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (*a*) та флуктуацій (*б*) на станції ОТГ (максимальна фаза – 0.99; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 99%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

З 18:00 до 21:00 рівень \bar{Z} зменшувався до 6 нТл. Реєструвалося пригнічення коливання $\delta Z(t)$.

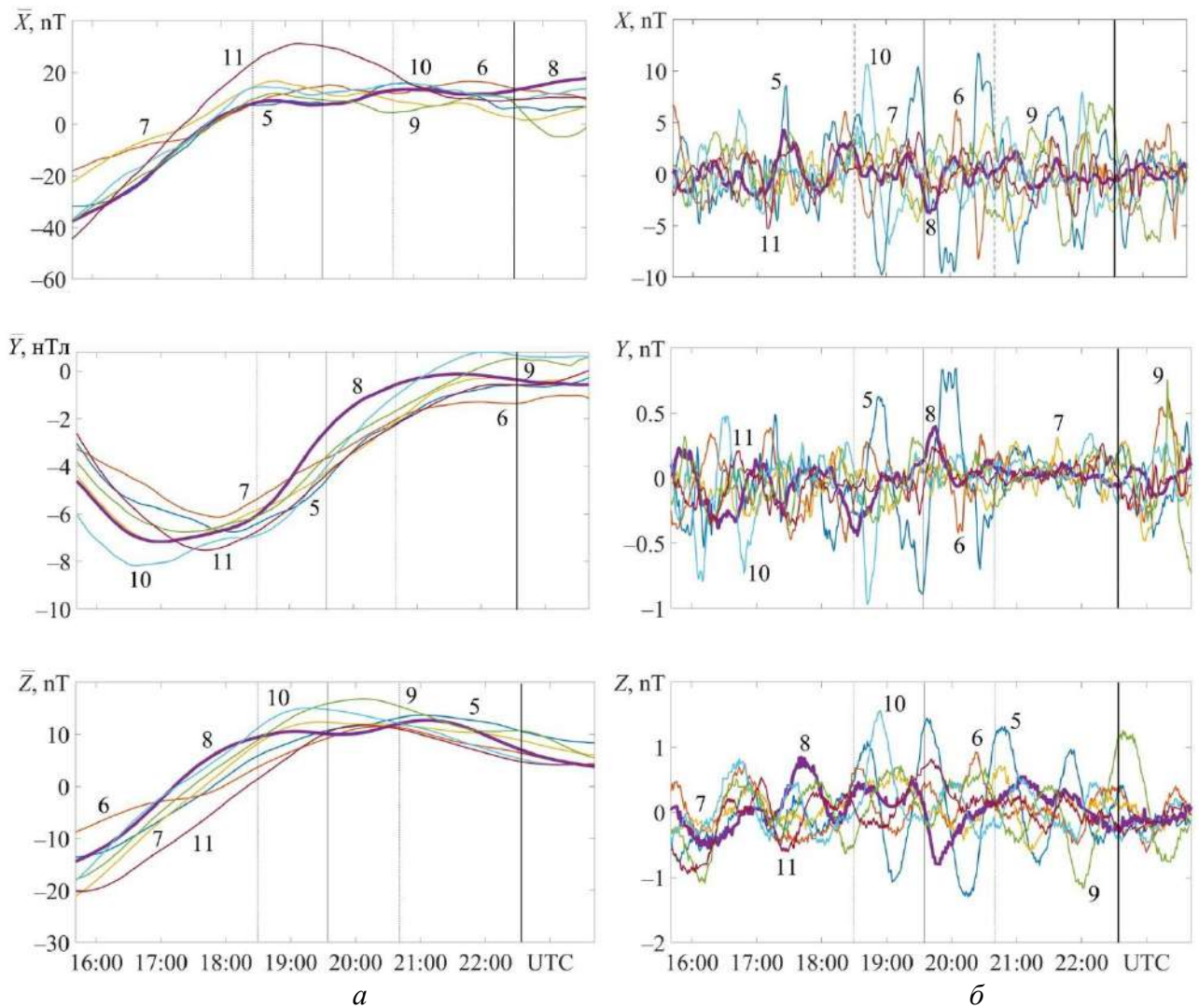


Рис. 2.48. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції SBL (максимальна фаза – 0.90; максимальна відносна площа покриття сонячного диска – 89%) у день С3 та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення С3, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу С3. Моменти С3 та заходу сонця обчислено відносно поверхні Землі на висоті 0 км (захід показано суцільною жирною лінією). (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Станція FRD. Зменшення рівня \bar{X} до 3 нТл розпочалося приблизно через 30 хв після початку С3 і тривало близько 130 хв (рис. 2.49).

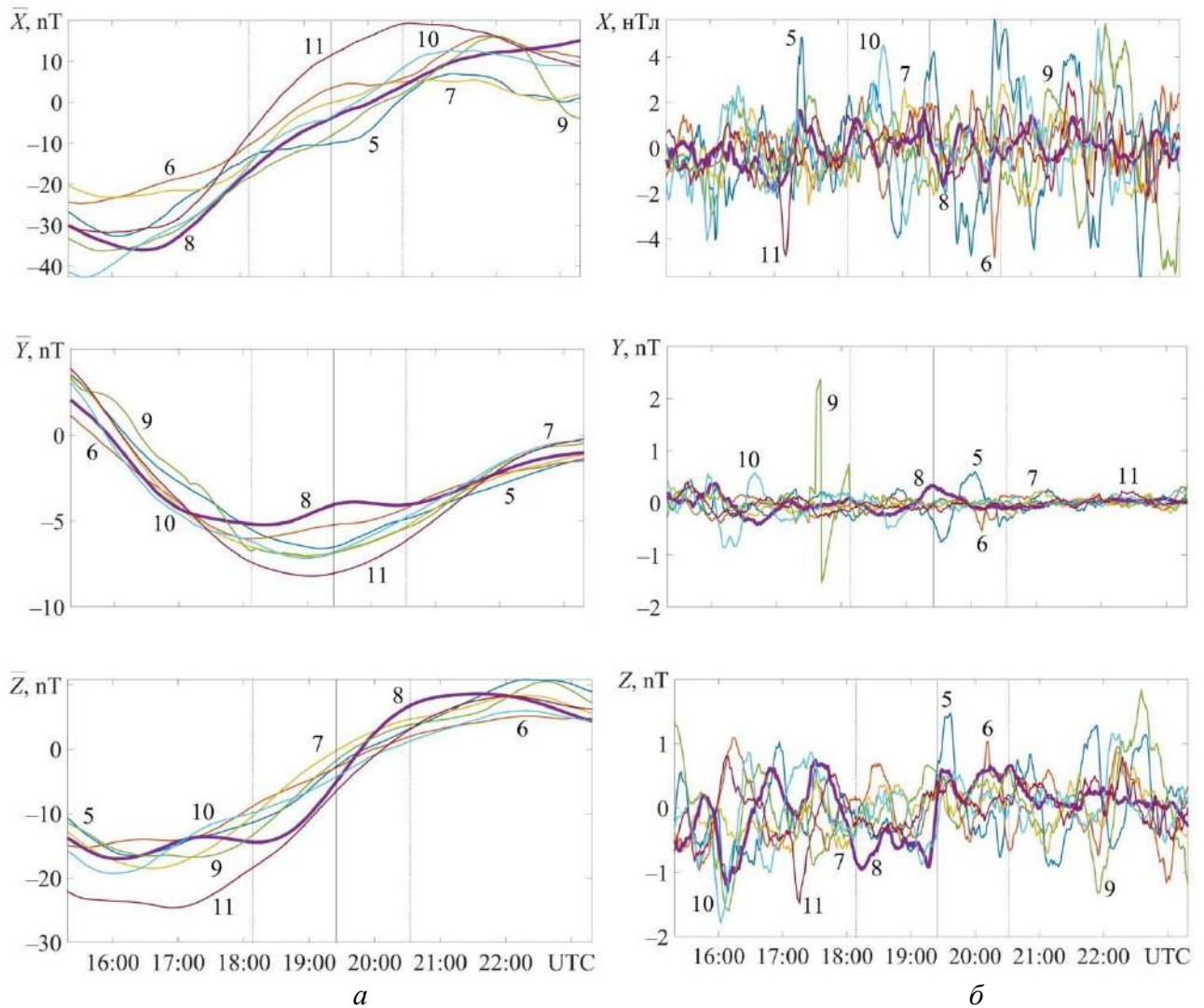


Рис. 2.49. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (*a*) та флуктуацій (*б*) на станції FRD (максимальна фаза – 0.87; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 85%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Характер варіацій $\delta X(t)$ протягом затемнення суттєво не змінився.

Приблизно за 1.5 год до настання СЗ мало місце незначне (до 1 нТл) зменшення рівня \bar{Y} , яке тривало близько 170 хв. В інтервалі часу 18:30–20:40

реєструвалося підвищення до 1.5 нТл значень \bar{Y} . Варіації $\delta Y(t)$ були незначними.

СЗ супроводжувалося зменшенням до 8 нТл рівня тренду \bar{Z} , яке тривало не менше 170 хв, а також пригніченням квазіперіодичного коливання $\delta Z(t)$.

Станція TUC. Практично одночасно з початком СЗ відзначалося збільшення значень \bar{X} до 10 нТл, що тривало близько 175 хв (рис. 2.50). Приблизно з 18:30 до 22:00 мало місце зменшення \bar{X} до 12 нТл. Зміна характеру варіацій δX була не настільки суттєвою.

Зменшення рівня \bar{Y} до 8 нТл розпочалося приблизно за 1 годину до настання СЗ і тривало близько 200 хв. Затемнення супроводжувалося повним пригніченням раніше існуючого коливання $\delta Y(t)$.

З 15:30 до 18:30 реєструвалося зменшення \bar{Z} до 4 нТл. З 17:30 до 20:30 мало місце збільшення \bar{Z} до 4 нТл. З 19:00 до 22:00 відзначалося зменшення \bar{Z} до 4 нТл. Варіації $\delta Z(t)$, що супроводжували СЗ, також помітно змінилися.

Станція BOU. Протягом СЗ мало місце збільшення значень \bar{X} до 8 нТл із $\Delta T \approx 155$ хв (рис. 2.51). Приблизно з 19:00 до 22:30 відзначалося зменшення \bar{X} до 8 нТл. СЗ також помітно вплинуло на рівень флуктуацій $\delta X(t)$.

Зменшення значень тренду \bar{Y} до 6 нТл розпочалося приблизно за 1.5 години до настання затемнення і тривало близько 180 хв. СЗ супроводжувалося пригніченням флуктуацій $\delta Y(t)$.

З 16:00 до 20:00 реєструвалося зменшення рівня \bar{Z} до 4 нТл. З 18:40 до 21:00, навпаки, мало місце його збільшення до 3 нТл із $\Delta T \approx 170$ хв. Характер варіацій $\delta Z(t)$ несуттєво змінився протягом СЗ.

Станція BRD. Починаючи з 17:00 до 19:30, мало місце зменшення значень \bar{X} до 8 нТл (рис. 2.52). З 18:00 до 20:40 відзначалося підвищення рівня \bar{X} до 5 нТл із $\Delta T \approx 160$ хв. Протягом СЗ помітно зменшився рівень флуктуацій $\delta X(t)$ від 3–4 нТл до 1.5–2 нТл.

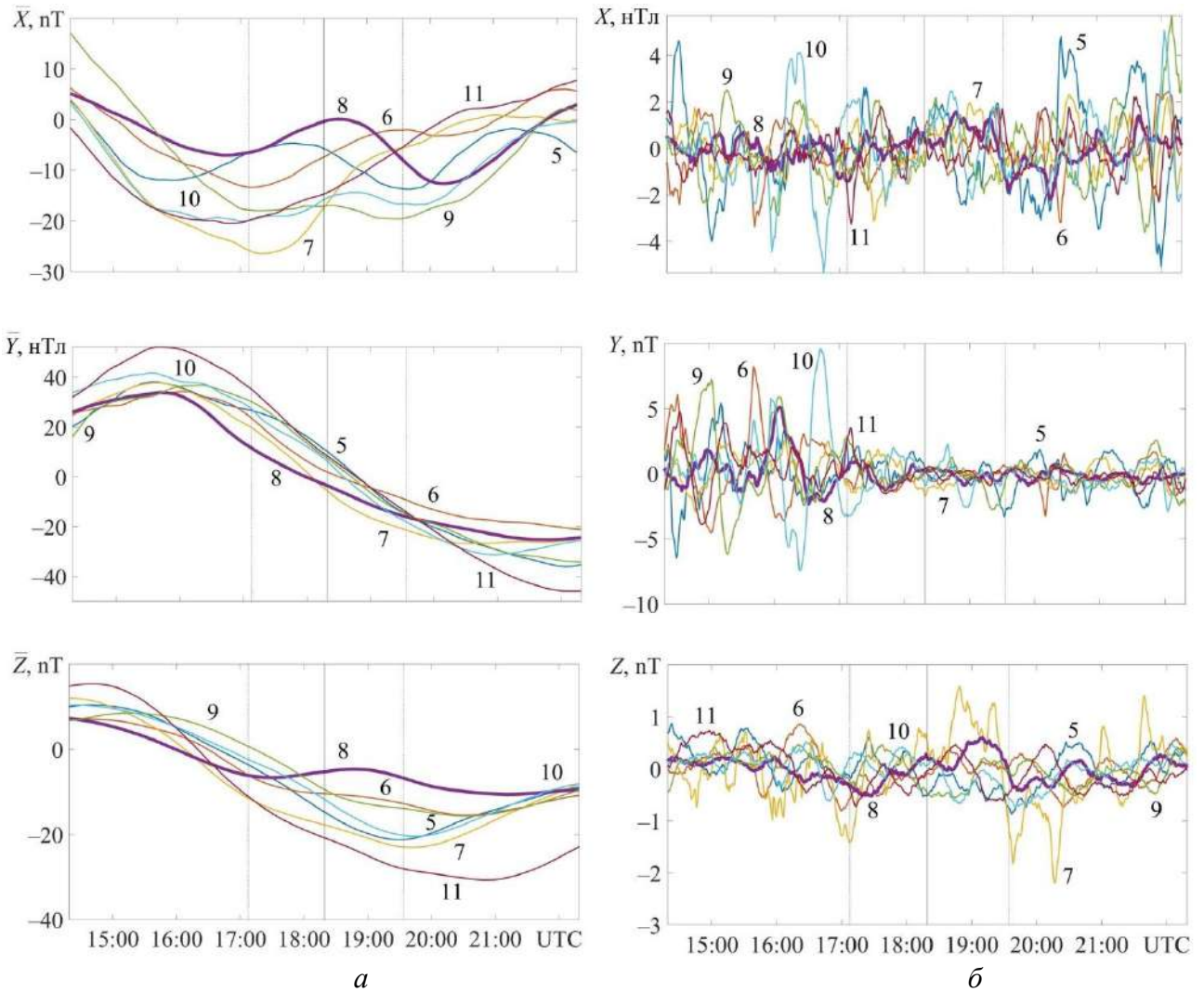


Рис. 2.50. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції TUC (максимальна фаза – 0.76; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 70%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Зменшення рівня \bar{Y} на 6 нТл розпочалося близько 16:15 і тривало до 18:30. З 18:00 до 20:45 також відзначалося зменшення \bar{Y} до 4 нТл. Після настання СЗ значення δY зменшилося в кілька разів, мало місце пригнічення коливання, що існувало до затемнення, з $\delta Y_a \approx 4\text{--}5$ нТл і $T \approx 60$ хв.

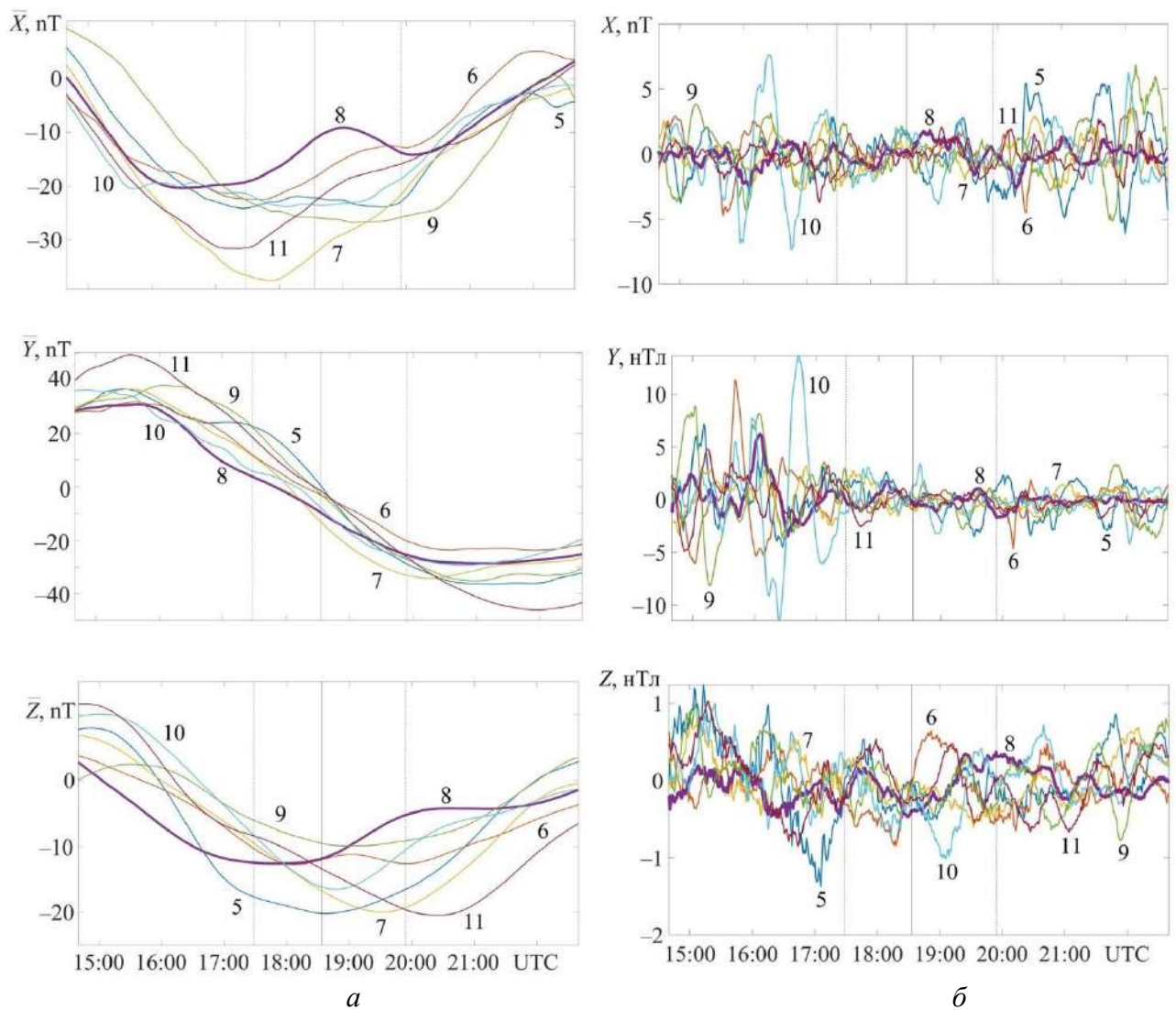


Рис. 2.51. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції BOU (максимальна фаза – 0.702; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 64%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

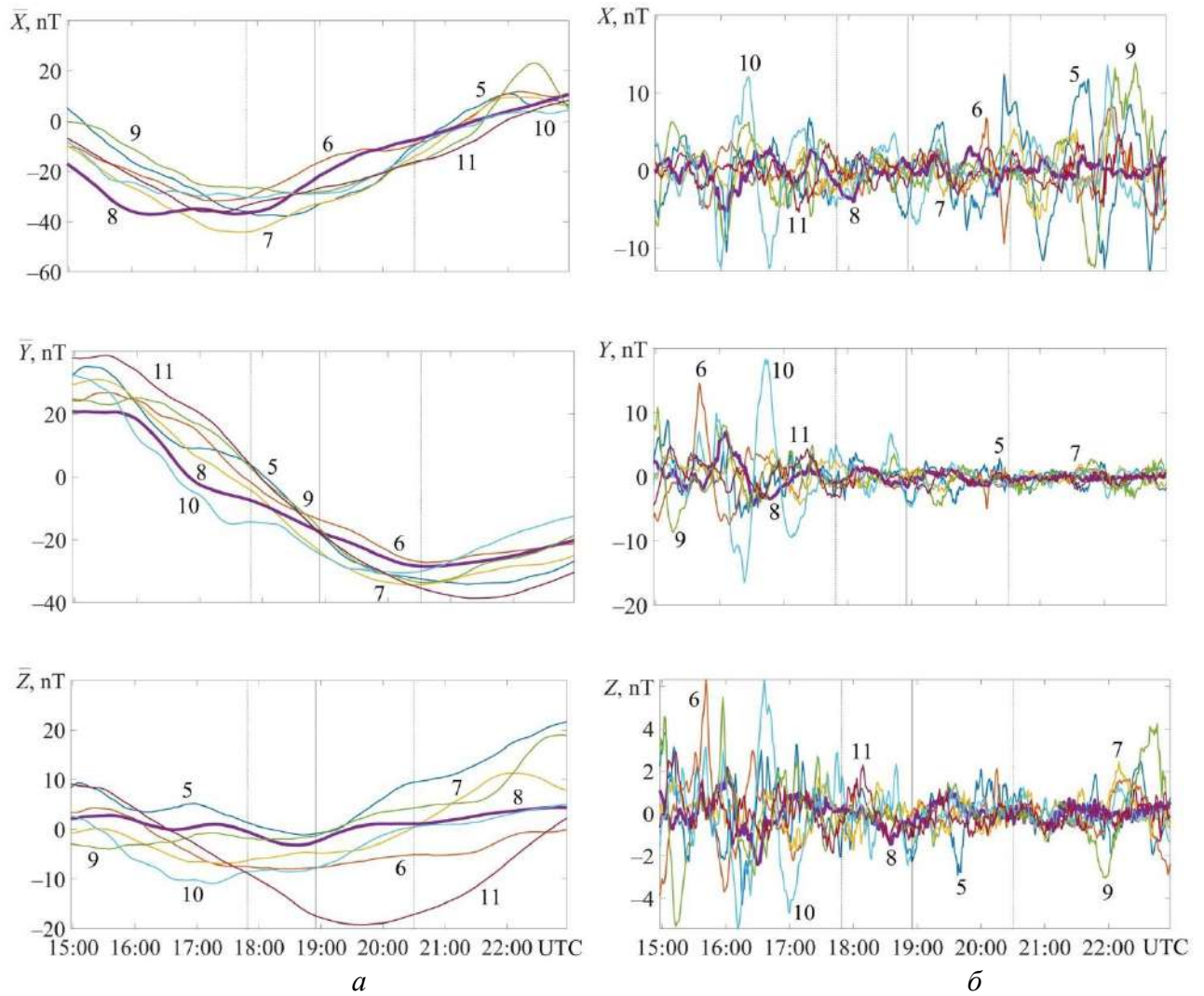


Рис. 2.52. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (*a*) та флуктуацій (*б*) на станції BRD (максимальна фаза – 0.58; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 49%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

З 17:20 до 19:45 реєструвалося зменшення рівня \bar{Z} до 6 нТл. супроводжувалося пригніченням квазіперіодичного збурення, яке спостерігалось до затемнення.

Станція FRN. Часові варіації рівня \bar{X} були складними (рис. 2.53). З 16:30 до 18:30 відзначалося його зменшення до 4 нТл. З 17:30 до 20:20 реєструвалося збільшення до 9 нТл. З 18:45 до 22:00 рівень \bar{X} знову зменшувався до 8 нТл. Протягом СЗ зменшився рівень флуктуацій $\delta X(t)$.

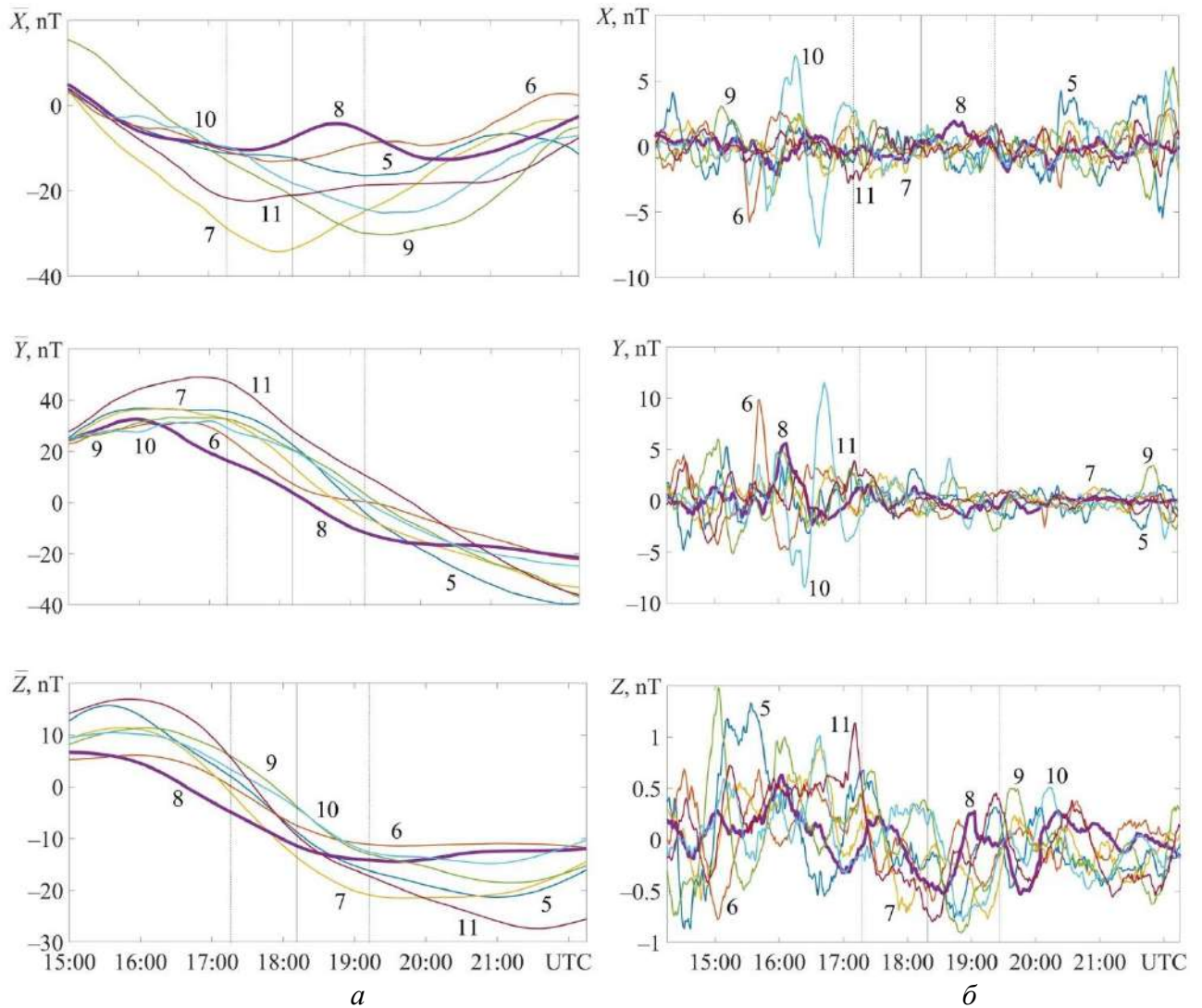


Рис. 2.53. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції FRN (максимальна фаза – 0.50; максимальна відносна площа покриття сонячного диска – 40%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

З 17:45 до 20:40 рівень \bar{Y} зменшувався до 4 нТл. СЗ супроводжувалося пригніченням коливання, що існувало до затемнення.

Зменшення рівня \bar{Z} до 4 нТл відзначалося з 16:45 до 19:45. СЗ супроводжувалося посиленням хвильової активності. Відзначалося збільшення амплітуди коливання з $T \approx 80$ хв і $\delta Z_a \approx 0.4$ нТл.

Станція NEW. Приблизно з 17:20 до 19:20 реєструвалося зменшення до 4 нТл рівня \bar{X} (рис. 2.54). Протягом СЗ незначно зменшився рівень флуктуацій $\delta X(t)$.

Значення тренду \bar{Y} зменшувалися двічі. Перший раз з 16:00 до 17:45 на 5 нТл. Другий раз з 18:00 до 20:45 на 4 нТл. СЗ супроводжувалося пригніченням коливання з $T \approx 60-80$ хв і $\delta Y_a \approx 3-4$ нТл.

Зменшення тренду \bar{Z} до 2.5 нТл відзначалося з 17:20 до 20:00. СЗ згенерувало коливання з $T \approx 60$ хв і $\delta Z_a \approx 0.3-0.5$ нТл.

Основні параметри аперіодичного збурення рівня компонент геомагнітного поля для всіх станцій наведено в табл. 2.12.

Збурення іоносферних струмів. Згідно з роботою [20] геомагнітний ефект СЗ зумовлений зменшенням концентрації електронів N у динамо-області атмосфери (висоти $z \approx 90 - 150$ км). При цьому зменшується питома провідність іоносферної плазми та порушується система іоносферних струмів. Варіації густини струму j_x , j_y і j_z призводять до змін рівня всіх компонент геомагнітного поля. Для варіацій ΔX_{cal} , ΔY_{cal} и ΔZ_{cal} маємо:

$$\begin{aligned} \Delta X_{cal} &= \mu_0 \Delta J_y, & \Delta Y_{cal} &= \mu_0 \Delta J_x, & \Delta Z_{cal} &= \mu_0 \Delta J_z, \\ \Delta J_x &= \int_{\Delta z} \Delta j_x dz, & \Delta J_y &= \int_{\Delta z} \Delta j_y dz, & \Delta J_z &= \int_{\Delta z} \Delta j_z dz. \end{aligned}$$

де μ_0 – магнітна стала, Δz – товщина шару, що дає основний внесок у варіації густини струму.

Відомо [50], що

$$\Delta j_x = \frac{e \Delta N v_x}{1 + \Omega_1^2}, \quad \Delta j_y = -\frac{e \Delta N v_y}{1 + \Omega_1^2} \Omega_1, \quad \Delta j_z = e \Delta N v_z,$$

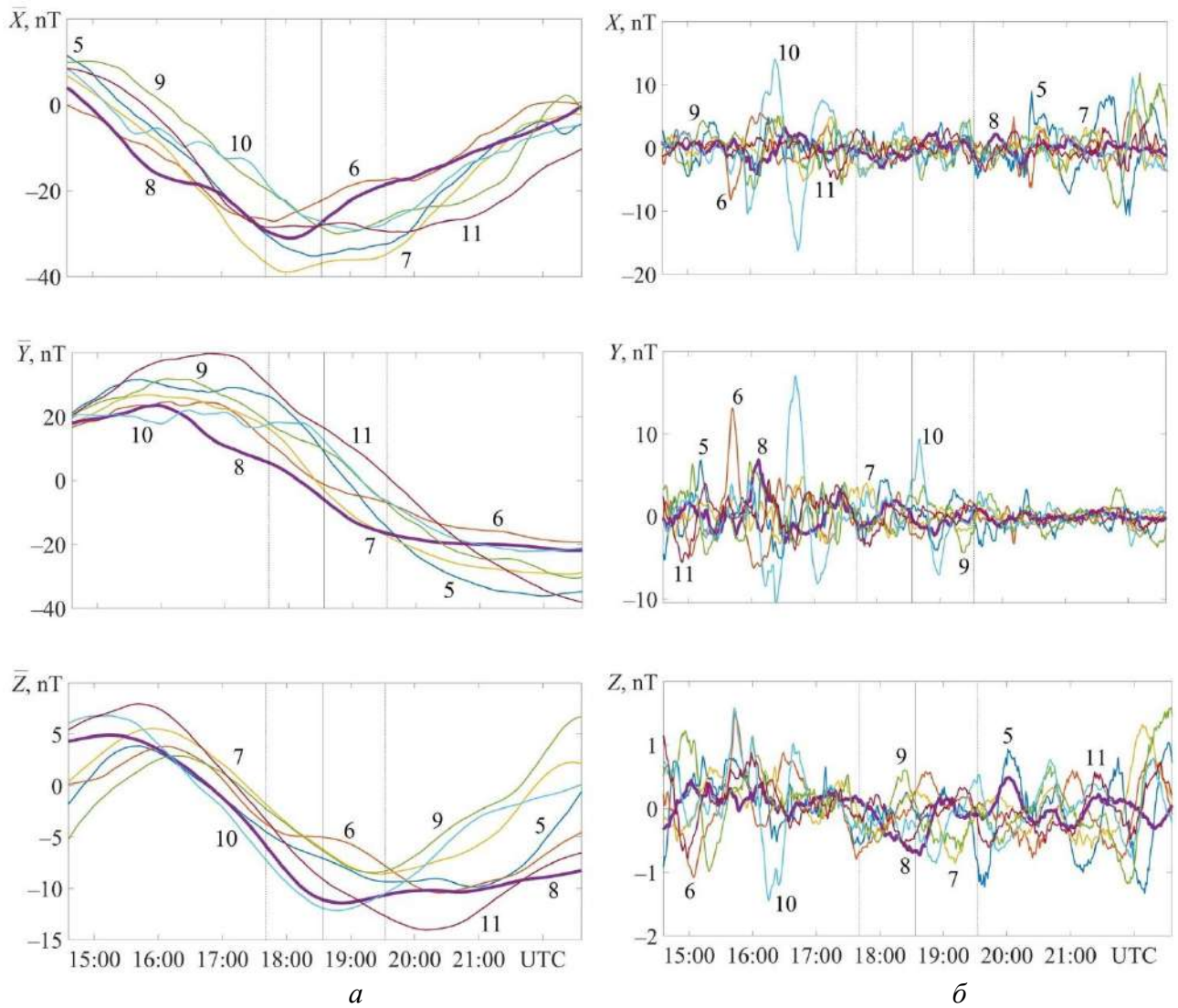


Рис. 2.54. Часові варіації компонент геомагнітного поля тренду (а) та флуктуацій (б) на станції NEW (максимальна фаза – 0.38; максимальна відносна площа покриття сонячного диску – 26%) у день СЗ та в контрольні дні. Штрихові вертикальні лінії вказують на моменти початку і закінчення СЗ, суцільна вертикальна лінія – максимальну фазу СЗ. (5 – 05.04.2024; 6 – 06.04.2024; 7 – 07.04.2024; 8 – 08.04.2024; 9 – 09.04.2024; 10 – 10.04.2024; 11 – 11.04.2024).

Таблиця 2.12.

Основні параметри аперіодичних збурень рівня компонент
геомагнітного поля, що супроводжували СЗ

Станція	A_{\max} , %	ΔX_{\max} , нТл	ΔT , хв	ΔY_{\max} , нТл	ΔT , хв	ΔZ_{\max} , нТл	ΔT , хв
STJ*	96	-8	130	-7(7)	140(160)	-8	160
OTT	96	-9(3)	160(160)	-8(8)	120(130)	-9	200
SBL*	84	-7	140	-1(1)	120(140)	-6	180
FRD	80	-3	130	-1(1.5)	170(110)	-8	170
TUC	68	-12(10)	210(175)	-8	200	-4(4)	180(180)
BOU	62	-8(8)	210(155)	-6	180	-4(3)	240(170)
BRD	48.5	-8(5)	150(160)	-6(-4)	135(165)	-6	145
FRN	40	-4(9)	120(175)	-4	175	-4	180
NEW	27	-4	120	-5(-2)	105(165)	-3	160

* СЗ мало місце за 1–3 год до заходу Сонця на поверхні Землі.

де $\Delta N = N - N_0 = N_0 \delta_N$, N і N_0 – збурені СЗ та незбурені значення концентрації електронів відповідно, $\Omega_i = \Omega_{iB}/v_{in}$, $\Omega_{iB} \approx 180 \text{ с}^{-1}$ – гірочастота електронів, v_{in} – частота зіткнень іонів із нейтралами. На висотах динамо-області $v_{in} \approx 10^4 - 10^2 \text{ с}^{-1}$. Тому переважно тут $\Omega_m \ll 1$. Лише поблизу висоти $z \approx 150 \text{ км}$ маємо $\Omega_i \approx 1$. Тут

$$\Delta j_y = -\frac{1}{2} e \Delta N v_y, = -\frac{1}{2} e N_0 \delta_N v_y,$$

$\Delta z \approx H$, де $H \approx 15 \text{ км}$ – приведена висота атмосфери поблизу $z \approx 150 \text{ км}$.

В основній частині динамо-області

$$\Delta j_x = e \Delta N v_x, = e N_0 \delta_N v_x,$$

$$\Delta j_z = e \Delta N v_z, = e N_0 \delta_0 v_z,$$

а $\Delta z \approx 30 \text{ км}$. При цьому

$$\Delta X_{cal} = -\frac{1}{2} \mu_0 e N_0 \delta_N v_y H, \quad (2.21)$$

$$\Delta Y_{cal} = \mu_0 e N_0 \delta_N v_x \Delta z, \quad (2.22)$$

$$\Delta Z_{cal} = \mu_0 e N_0 \delta_N v_z \Delta z. \quad (2.23)$$

Збурення СЗ концентрації електронів. Для оцінки геомагнітного ефекту за співвідношеннями (2.21) – (2.23) необхідно спочатку обчислити значення δ_N . Для цього скористаємося рівнянням балансу N для динамо-області атмосфери [52]:

$$\frac{dN}{dt} = q - \alpha N^2, \quad (2.24)$$

де α – коефіцієнт рекомбінації. Оскільки час встановлення концентрації електронів $t_N = (2\alpha N)^{-1}$ при $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ і $N \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$ порядку 25 с, що набагато менше характерного часу дії СЗ $t_s \approx 1$ год, то із (2.24) маємо:

$$q \approx \alpha N^2.$$

До початку СЗ

$$q_0 \approx \alpha_0 N_0^2.$$

Тоді

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{q}{q_0} \frac{\alpha_0}{\alpha} \right)^{1/2}.$$

При $\alpha \approx \alpha_0$ отримуємо

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{q}{q_0} \right)^{1/2}.$$

Поблизу моменту часу t_m , близького до максимальної фази СЗ, коли відносна площа покриття диска Сонця дорівнює A_{\max} , маємо

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{1 - A_{\max}} = \sqrt{B_{\min}}, \quad B_{\min} = 1 - A_{\max}. \quad (2.25)$$

З урахуванням внеску сонячної корони співвідношення (2.25) модифікується до такого [48]:

$$\frac{N_{\min}}{N_0} = \sqrt{\frac{B_{\min} + \xi}{1 + \xi}}, \quad (2.26)$$

де в середньому $\xi \approx 0.25$ [48].

Результати розрахунків N_{\min}/N_0 и $\delta_N = N_{\min}/N_0 - 1$ за співвідношеннями (2.25) і (2.26) наведені в табл. 2.13.

Таблиця 2.13.

Параметри СЗ, іоносферного ефекту СЗ, густини струму в динамо-області іоносфери, обчислені значення $\Delta\bar{X}_{cal}$ та спостережуваного $\Delta\bar{X}$ геомагнітного ефекту (у дужках без урахування дії сонячної корони).

Станція	B_{\min}	$\left(\frac{N}{N_0}\right)_{\min}$	δ_N	$j_{0y},$ мкА/м ²	$N_0,$ 10 ¹¹ м ⁻³	$\Delta\bar{X}_{cal},$ нТл	$\Delta\bar{X},$ нТл
STJ	0.04	0.48 (0.20)	-0.52 (-0.80)	0.60	1.5	-5.9(-9)	-8
OTT	0.04	0.48 (0.20)	-0.52 (-0.80)	0.72	1.8	-(7-10.8)	-9
SBL	0.16	0.57 (0.48)	-0.43 (-0.60)	0.60	1.5	-(5.3-7.4)	-7
FRD	0.20	0.60 (0.45)	-0.40 (-0.55)	0.36	1.8	-(2.7-3.7)	-3
TUC	0.32	0.68 (0.57)	-0.32 (-0.43)	1.08	2.0	-(11.6-14.8)	-12
BOU	0.38	0.71 (0.62)	-0.29 (-0.38)	1.44	2.4	-(6.8-10.2)	-8
BRD	0.515	0.78 (0.72)	-0.22 (-0.28)	2.16	2.5	-(7.9-10.0)	-8
FRN	0.60	0.82 (0.77)	-0.18 (-0.23)	1.40	1.3	-(3.5-4.5)	-4
NEW	0.73	0.89 (0.85)	-0.11 (-0.15)	1.62	2.0	-(3.3-4.5)	-4

Геомагнітний ефект. Результати оцінок ΔX_{cal} , ΔY_{cal} и ΔZ_{cal} за співвідношеннями (2.21) – (2.23) наведені в табл. 2.13, 2.14 та 2.15. У цих таблицях також наведено виміряні значення ΔX_{cal} , ΔY_{cal} и ΔZ_{cal} , а також

густини іоносферних струмів та модельні значення N_0 . При обчисленнях враховувалося, що $v_y < 0$ і $j_{0y} < 0$.

Таблиця 2.14.

Параметри СЗ, іоносферного ефекту СЗ, густини струму в динамо-області іоносфери, обчислені значення $\Delta\bar{Y}_{cal}$ та спостережуваного $\Delta\bar{Y}$ геомагнітного ефекту (у дужках без урахування дії сонячної корони)

Станція	v_x , м/с	j_{0x} , мкА/м ²	N_0 , 10^{11} м ⁻³	$\Delta\bar{Y}_{cal}$, нТл	$\Delta\bar{Y}$, нТл
STJ	10	0.24	1.5	-14.7(-7.2)	-7
OTT	10	0.29	1.8	-15.6(-8.6)	-8
SBL	2	0.05	1.5	-0.8(-1.1)	-1
FRD	2	0.06	1.8	-0.9(-1.2)	-1
TUC	18	0.58	2.0	-6.9(-9.3)	-8
BOU	12	0.46	2.4	-5.0(-6.6)	-6
BRD	10	0.40	2.5	-3.3(-4.2)	-4
FRN	25	0.65	1.3	-3.5(-4.0)	-4
NEW	15	0.48	2.0	-2.0(-2.7)	-2

Головною особливістю Great North American Eclipse було те, що на деяких станціях (табл. 2.12) поблизу СЗ спостерігалися як зменшення, так і збільшення рівня компонент геомагнітного поля. Навряд чи це зумовлено зміною знака, тобто напрямку протікання іоносферного струму. Найімовірніше, це пов'язано як зі зменшенням, так і зі збільшенням концентрації електронів поблизу моментів часу СЗ. Якщо зменшення N є

природним при СЗ, то його збільшення відноситься до доволі унікальних явищ. Збільшення N у області F_2 іоносфери можна пояснити рухом плазми вгору під час СЗ [53]. Цей механізм не діє в динамо-області атмосфери. Тут збільшення N може бути зумовлене середньоширотним надходженням енергійних (~ 10 кэВ) електронів із радіаційного поясу. Подібний процес описаний автором [50].

Таблиця 2.15.

Параметри СЗ, іоносферного ефекту СЗ, густини струму в динамо-області іоносфери, обчислені значення $\Delta \bar{Z}_{cal}$ та спостережуваного $\Delta \bar{Z}$ геомагнітного ефекту (у дужках без урахування дії сонячної корони)

Станція	v_z , м/с	j_{0z} , мкА/м ²	N_0 , 10^{11} м^{-3}	$\Delta \bar{Z}_{cal}$, нТл	$\Delta \bar{Z}$, нТл
STJ	12	0.29	1.5	-5.7(-9.3)	-8
OTT	12	0.35	1.8	-6.7(-10.3)	-9
SBL	12	0.29	1.5	-5.2(-7.2)	-6
FRD	16	0.46	1.8	-6.9(-9.5)	-8
TUC	7	0.32	2.0	-3.8(-5.2)	-4
BOU	7	0.30	2.4	-3.3(-4.3)	-4
BRD	15	0.60	2.5	-5.0(-6.3)	-6
FRN	25	0.52	1.3	-3.5(-4.5)	-4
NEW	18	0.58	2.0	-0.2(-2.7)	-3

Проте зменшення рівня всіх компонент геомагнітного поля спостерігалось на всіх станціях (табл. 2.12). Результати оцінок виконані для випадку, коли $N < N_0$. Як видно з табл. 2.13, 2.14 та 2.15, обчислені значення зменшення рівня всіх компонент геомагнітного поля дуже близькі до результатів спостережень. Момент настання реакції геомагнітного поля на СЗ

суттєво залежить від геометрії тіні Місяця, висоти Сонця над горизонтом, а також моменту настання СЗ на висотах динамо-області атмосфери. Цей момент відрізняється приблизно на $\sim 1 - 1.5$ години від моменту настання затемнення на рівні Землі.

У даній роботі геомагнітний ефект аналізується для станцій, рознесених по широті на 18° , а по довготі – на 67° . Це визначило особливості ефекту.

Як приклад порівняємо результати спостережень на станціях STJ та BRD, які знаходяться на близьких широтах. Виявилось, що величина зменшення всіх компонент на обох станціях близька. Водночас для першої станції $A_{\max} = 96\%$, а для другої станції $A_{\max} = 48.5\%$, тобто вдвічі менше. Причина рівності геомагнітного ефекту СЗ пояснюється різними значеннями N_0 і v_y . Для станції STJ затемнення спостерігалось в передзахідний час, а на станції BRD воно відбулося поблизу полудня.

Далі порівняємо величину ефекту для станцій BRD та NEW. Вони мають близькі широти та незначно відрізняються за довготою. При цьому значення N і v_y , v_z відрізняються незначно. Значення δ_N відрізняються приблизно вдвічі (табл. 2.13). Приблизно вдвічі відрізняються також значення \bar{X} , \bar{Y} і \bar{Z} . Цей приклад свідчить про залежність величини геомагнітного ефекту від фази СЗ та A_{\max} .

Цікаво порівняти результати спостережень для станцій STJ і ОТТ, для яких $A_{\max} = 96\%$. Значення N_0 у післяполуденний час дещо більше для станції ОТТ, ніж N_0 у передвечірній час на станції STJ. З цієї причини збурення всіх компонент за модулем більше на станції ОТТ, ніж на станції STJ.

Отримані результати в цілому якісно узгоджуються з відомими з літератури даними [13, 14, 51].

Протягом даного затемнення, як і під час інших СЗ, найбільше збурювався рівень X -компоненти. Через незначні відмінності у широті магнітних станцій широтний ефект для даного СЗ був слабо виражений. Водночас він чітко спостерігався для затемнень 10 червня 2021 р. та

14 жовтня 2023 р. Для цього СЗ, як і в роботах [13, 51] був чітко виражений довготний ефект.

Квазіперіодичні збурення. За даними робіт [13, 14, 51] можна зробити висновок, що СЗ супроводжується виникненням квазіперіодичних збурень рівня всіх компонент геомагнітного поля.

Протягом даного СЗ відзначалися як зміни характеру варіацій рівня всіх компонент, так і пригнічення коливання, що існувало до СЗ (табл. 2.16). Найчастіше період T цього коливання був близько 60 хв, а амплітуда варіювалася від 0.2 – 0.4 нТл до 2 – 4 нТл (табл. 2.16). Пригнічення коливання можна розглядати як процес генерації СЗ нового коливання, яке було приблизно в протифазі з коливанням, що існувало до затемнення. Накладання цих двох коливань призводить до пригнічення раніше спостережуваного коливання. Період і амплітуда коливання свідчать про те, що воно викликане генерацією та поширенням атмосферної гравітаційної хвилі [54].

Додамо, що генерація коливання, яке існувало до СЗ, чітко спостерігалася на станції NEW у Z-компоненті. При цьому $T \approx 60$ хв, а $\delta Z_a \approx 0.3\text{--}0.5$ нТл.

Таким чином, проведений аналіз часових варіацій геомагнітного поля підтвердив, що геомагнітний ефект СЗ існує. Цей ефект викликається збуренням концентрації електронів у динамо-області атмосфери та системи іоносферних струмів. Підтверджено також факт, що геомагнітний ефект кожного нового СЗ має лише йому притаманні особливості.

Головні результати досліджень.

1. Під час СЗ на всіх станціях спостерігалось зменшення рівня X-, Y- та Z-компонентів геомагнітного поля, що підтверджує існування геомагнітного ефекту затемнення.

Таблиця 2.16.

Відомості про квазіперіодичні збурення

Станція	Компонента	Характер варіацій	Період, хв	Амплітуда, нТл
STJ	X	Змінилися період та амплітуда флуктуацій рівня	60	2
	Y	Зменшення в кілька разів рівня флуктуацій		
	Z	Пригнічення коливання рівня, що існувало до СЗ	60	2 – 3
OTT	X	Незначне зменшення амплітуди коливання, що існувало до СЗ	60 – 80	2 – 4
	Y	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ		
	Z	Збій коливання, що існувало до СЗ		
SBL	X	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	60	3
	Y	Змінився характер флуктуацій	60	0.2
	Z	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	60	0.4
FRD	X	Характер флуктуацій суттєво не змінився	40 – 50	1 – 2
	Y	Варіації рівня флуктуацій незначні		
	Z	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	60	0.7 – 1
TUC	X	Характер варіацій суттєво не змінився	60	3
	Y	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ Помітна зміна характеру		

	Z	флуктуацій		
BOU	X	Помітна зміна характеру флуктуацій		
	Y	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	20 60	1 3
	Z	Характер варіацій суттєво не змінився		
BRD	X	Зменшення рівня флуктуацій у два рази	45 – 60	3 – 4 1.5 – 2
	Y	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	60	4 – 5
	Z	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	60	1
FRN	X	Зменшення рівня флуктуацій		
	Y	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	40 – 60	1 – 3
	Z	Збільшення амплітуди коливань	80	0.3 – 0.4
NEW	X	Характер варіацій суттєво не змінився		
	Y	Пригнічення коливання, що існувало до СЗ	60 – 80	3 – 4
	Z	Згенеровано коливання	60	0.3 – 0.5

2. Найбільші зміни спостерігалися для X -компоненти, тоді як Y - та Z -компоненти проявляли як пригнічення існуючих коливань, так і генерацію нових квазіперіодичних коливань з періодом близько 60 хв та амплітудою 0,2–4 нТл.

3. Геомагнітний ефект СЗ визначається локальними умовами: фазою затемнення, геометрією тіні Місяця, висотою Сонця над горизонтом, концентрацією електронів у динамо-області та напрямком іоносферних струмів.

4. Порівняння станцій з близькими широтами показало, що величина зменшення компонент може бути подібною, навіть при значних відмінностях відносного покриття диска Сонця (A_{\max}), що пояснюється різними значеннями N_0 та швидкістю потоків плазми.

5. Кожне СЗ проявляє індивідуальні особливості геомагнітного ефекту, включаючи довготний ефект, а широтний ефект проявляється слабкіше при невеликій відмінності широт станцій.

6. Обчислені значення $\Delta\bar{X}_{cal}$, $\Delta\bar{Y}_{cal}$ та $\Delta\bar{Z}_{cal}$ добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує адекватність моделі впливу зміни концентрації електронів у динамо-області атмосфери на геомагнітні варіації.

2.6. Висновки до розділу 2

1. Сонячне затемнення 10 червня 2021 р. належить до кільцеподібних затемнень і охоплювало значні території Північної півкулі. Хоча затемнення не супроводжувалося значною геомагнітною бурею, воно створило умови для формування локальних і регіональних збурень геомагнітного поля, пов'язаних із порушенням іоносферного динамо-механізму.

Аналіз часових варіацій компонентів геомагнітного поля показав наявність слабких, але статистично значущих відхилень від фонового рівня в

період проходження фаз затемнення. Найбільш чітко ці ефекти проявлялися в горизонтальних компонентах X та Y , що свідчить про зміну інтенсивності та конфігурації іоносферних струмів. Вертикальна компонента Z , як правило, демонструвала менш виражені варіації, що узгоджується з особливостями геометрії струмових систем.

У часовій області збурення геомагнітного поля корелювали з моментами початку, максимуму та завершення затемнення. У ці інтервали спостерігалось зниження амплітуди регулярної добової варіації, що може бути інтерпретовано як наслідок зменшення іоносферної електропровідності через ослаблення ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання Сонця. Найбільш помітні ефекти фіксувалися у денний час, коли внесок іоносферних струмів є максимальним.

Спектральний аналіз виявив перерозподіл енергії флуктуацій у діапазоні періодів від кількох хвилин до десятків хвилин. У період максимального затемнення спостерігалось зменшення спектральної щільності потужності на окремих частотах, що вказує на пригнічення певних типів іоносферних коливань. Після завершення затемнення спектральні характеристики поступово поверталися до фонового стану.

Отримані результати підтверджують, що сонячне затемнення 10 червня 2021 р. супроводжувалося помірними геомагнітними ефектами, зумовленими зменшенням іоносферної електропровідності та перебудовою системи іоносферних струмів. Виявлені закономірності узгоджуються з сучасними уявленнями про сонячно-земні зв'язки та демонструють інформативність геомагнітних спостережень для дослідження короткочасних іоносферних процесів.

2. За даними 15 магнітних станцій проаналізовано часові варіації всіх компонентів геомагнітного поля, що супроводжували СЗ 25 жовтня 2022 р. у Євразійському регіоні, та у контрольні дні та встановлено наступне. Часткове СЗ викликало збурення всіх компонент геомагнітного поля практично на всіх станціях. Найбільш збурювався рівень X -компонента. Підтверджено, що мала

місце тенденція до збільшення величини варіацій рівня X -компонента при збільшенні площі покриття диску Сонця. Підтверджено, що основним механізмом геомагнітного ефекту є збурення СЗ системи іоносферних струмів у динамо-області атмосфери. СЗ супроводжувалося ростом розмаху варіацій рівня компонент (у першу чергу X -компонента), що свідчить на користь генерації квазіперіодичних збурень.

3. Аналіз часових варіацій усіх компонентів геомагнітного поля 14 жовтня 2023 р., зареєстрованих на 13 станціях, рознесених більше, ніж на 8 тис. км, у день СЗ та в контрольні дні, показав наступне.

СЗ викликало зменшення рівня всіх компонентів геомагнітного поля, яке сягало 10...20 нТл. Найбільш збурювався рівень X компонента, а найменше – рівень Z компонента. Тривалість збурення складала $\sim 120...240$ хв. Зменшення рівня розпочалося за 80...100 хв після початку затемнення.

Крім аперіодичних збурень геомагнітного поля, реєструвалися його квазіперіодичні варіації, амплітуда яких сягала 5... 15 нТл. Зазвичай, вона не перевищувала 5...6 нТл. Період коливань складав 10...80 хв, а, частіше за все, він змінювався у межах 15...40 хв. Час запізнювання появи квазіперіодичних збурень варіював від 30 до 150 хв, але, частіше за все, від 80 до 90 хв. Тривалість квазіперіодичних коливань складала 180...240 хв.

За оцінками відносно зменшення концентрації електронів у період СЗ змінювалося від ~ 0.10 до 0.40...0.60. За A_{\max} від 19% до 82%.

Рух місячної тіні супроводжувався генерацією та поширенням АГХ з періодами $\sim 10...80$ хв та відносною амплітудою збурень концентрації електронів близько 0.01...0.03.

4. Аналіз часових варіацій рівня X -, Y - та Z -компонент геомагнітного поля, зареєстрованих на дев'яти станціях мережі INTERMAGNET упродовж Great North American Eclipse 8 квітня 2024 р. та у контрольні дні, показав наступне.

СЗ найчастіше супроводжувалося зменшенням рівня всіх компонент геомагнітного поля. На низці станцій, окрім зниження рівня, в інших часових

інтервалах спостерігалось також їх підвищення. Величина збурень рівня всіх компонент геомагнітного поля зазвичай була співмірною та не перевищувала приблизно 10 нТл. Тривалість збурень усіх компонент була близькою і, як правило, перебувала в межах 120–200 хв за тривалості СЗ близько 130–135 хв. Час запізнення або випередження геомагнітного ефекту залежав від геометрії місячної тіні.

СЗ супроводжувалося пригніченням коливань геомагнітного поля, що існували до початку затемнення, з періодом близько 60 хв та амплітудою 1–3 нТл.

5. При збільшенні максимальної фази СЗ спостерігалася тенденція до збільшення абсолютного значення аперіодичних і квазіперіодичних збурень.

6. Підтверджено, що величина геомагнітного ефекту СЗ залежить не лише від фази затемнення, але й від географічних координат магнітної станції, геометрії місячної тіні, стану іоносфери та системи іоносферних струмів.

7. У припущенні, що за магнітний ефект СЗ відповідає порушення іоносферної струмової системи, виконано оцінки ефекту, результати яких для всіх чотирьох СЗ добре підтверджуються результатами спостережень.

РОЗДІЛ 3. ГЕОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ СОНЯЧНИХ І ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

Розвиток сонячної активності супроводжується різноманітними проявами енерговиділення, які суттєво впливають на навколоземний космічний простір. Найбільш масштабними з них є сонячні та геокоосмічні бурі, що формують комплексну відповідь магнітосфери, іоносфери та атмосфери Землі. Геомагнітні ефекти таких бур проявляються у вигляді значних відхилень компонент геомагнітного поля, зміни спектральних характеристик варіацій та зростання рівня геомагнітної активності. У цьому розділі розглянуто засоби і методи дослідження геомагнітних збурень, особливості впливу сонячних спалахів на геомагнітне поле, а також статистичні закономірності виникнення геомагнітних бур.

У даному розділі розглядається геомагнітна реакція на сонячні спалахи класу X у вересні 2017 року, результати статистичного аналізу параметрів геомагнітних бур, що мали місце впродовж 24-го циклу сонячної активності, помірних геомагнітних бур 28 квітня – 2 травня 2023 р., та багатокрокової геомагнітної бурі 4 – 7 листопада 2023 року.

Розділ підготовлено за даними робіт автора [56–59].

3.1. Засоби та методи

Атмосфера та геокоосмос широко використовується в якості радіоканалу при розв'язанні задач радіозв'язку, радіоастрономії, радіолокації, радіопеленгації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування навколоземного середовища з поверхні планети або Землі з космосу [74–80].

Параметри атмосферно-космічного радіоканалу визначаються станом атмосферно-космічної погоди, яка формується, в основному, нестационарними процесами на Сонці (сонячними бурями) та частково

високоенергетичними процесами на Землі та в атмосфері [67, 81–86]. До найбільш сильних збурень атмосферно-космічного радіоканалу призводять геокосмічні бурі. Геокосмічні бурі зачіпають всі підсистеми в системі магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля. При цьому виникають сильні збурення геомагнітного поля (магнітна буря), атмосфери (атмосферна буря), іоносфери (іоносферна буря) та електричного поля атмосферно – іоносферного – магнітосферного походження (електрична буря) [1]. На поширення радіохвиль різних діапазонів найсильніше впливають іоносферні бурі та в меншій мірі, атмосферні бурі. Протягом іоносферних збурень концентрація електронів може збільшитися в 2 – 3 рази на F-області іоносфери або на 2 – 3 порядки в D-області іоносфери [87–91]. Все це призводить до значного ослаблення радіохвиль.

Під час негативних іоносферних збурень концентрація електронів у F-області іоносфери, навпаки, може зменшитися в 5 – 10 разів [87–91]. При цьому частотна ємність іоносферного радіоканалу значно зменшується аж до повної втрати для ВЧ діапазону (3 – 30 МГц). Крім зміни регулярних параметрів, в іоносфері під час бур може істотно змінитися її неоднорідна структура, яка веде до розсіяння і ослаблення радіохвиль в широкому діапазоні частот. Іоносферні бурі супроводжуються магнітними бурями та навпаки, магнітні бурі супроводжуються іоносферними бурями. Важливо, що ці бурі відрізняються великою різноманітністю, немає двох однакових бур [16]. У бур є спільні риси, також є індивідуальні особливості. Ці риси у теперішній час вивчені недостатньо [92–97]. Їх вивчення є актуальним завданням космічної геофізики та космічної радіофізики. Для виявлення загальних закономірностей доцільним є статистичний підхід до аналізу великої кількості бур.

Значно гірше вивчено вплив слабких і помірних бур. Є підстави вважати, що слабкі магнітні бурі (індекс $K_p = 3, 3+, 4-$) можуть завдавати повного впливу. Треба мати на увазі, що частота появи таких бур набагато більше, ніж сильних. Слабших та помірних ($K_p = 4, 4+, 5-$) бур може

відбуватися десятки-сотні за рік. Крім того, ефекти, що супроводжують слабкі та помірні бурі, можуть бути своєрідною межею для ефектів більш сильних бур.

У цьому полягає актуальність дослідження слабких і помірних бур.

Дослідження геомагнітних ефектів сонячних і геокосмічних бур базується на аналізі експериментальних даних наземних магнітометричних спостережень, які забезпечують безперервну реєстрацію часових варіацій геомагнітного поля. Основним джерелом даних у роботі є глобальні мережі магнітометрів, зокрема мережа INTERMAGNET, що надає стандартизовані вимірювання трьох ортогональних компонент геомагнітного поля – X , Y та Z – з високою точністю та часовою роздільною здатністю [1, 3, 74, 81].

Початковий етап обробки даних включає контроль якості, усунення пропусків, корекцію базових рівнів та видалення повільних трендів, зумовлених добовими і сезонними варіаціями. Для виділення збурених складових сигналу застосовуються методи фільтрації, що дозволяють відокремити фонові варіації від ефектів, спричинених сонячною та геокосмічною активністю [82, 84, 86].

Оцінювання інтенсивності геомагнітних збурень здійснюється із залученням загальноприйнятих геомагнітних індексів, таких як K_p , D_{st} та AE , які відображають відповідно планетарний рівень збуреності, динаміку кільцевого струму та інтенсивність авроральних електрострумів. Для детального аналізу часової структури геомагнітних ефектів використовуються спектральні методи, зокрема перетворення Фур'є, що дозволяють дослідити багатомасштабний характер збурень [1, 3, 74].

3.2. Геомагнітні ефекти сонячних спалахів

Вплив сонячних спалахів на навколоземне середовище досліджувався протягом багатьох років [69]. Сонячні спалахи є короткотривалими, але надзвичайно енергетично насиченими подіями в атмосфері Сонця, які

супроводжуються інтенсивним випромінюванням у рентгенівському та ультрафіолетовому діапазонах. Основний механізм їх впливу на геомагнітне поле Землі пов'язаний зі швидкою перебудовою іоносферної провідності під дією жорсткого електромагнітного випромінювання [4–7, 74].

Під час сонячних спалахів відбувається різке зростання іонізації у денній іоносфері, що призводить до інтенсифікації іоносферних струмів. Це, у свою чергу, зумовлює появу раптових імпульсних варіацій геомагнітного поля, які реєструються магнітометричними станціями переважно на освітленій Сонцем півкулі. Найбільш чутливо на такі збурення реагують горизонтальні компоненти геомагнітного поля, тоді як вертикальна складова зазнає змін меншої амплітуди [62, 64–66, 68, 73].

Геомагнітні ефекти сонячних спалахів, на відміну від геомагнітних бур, мають локальніший і короткочасний характер та не супроводжуються істотним розвитком кільцевого струму. Проте їх аналіз є принципово важливим для розмежування різних типів геомагнітної активності та для дослідження швидких процесів енерговкладення в іоносферу [1, 3, 60, 70–72].

У цьому розділі проаналізовано варіації рівнів магнітного поля Землі та його флуктуацій у діапазоні періодів 100–1000 с, що супроводжували сонячні спалахи класу X з 6 по 10 вересня 2017 року [60–62]. Для аналізу змін основного геомагнітного поля використовувалися дані низькочастотної обсерваторії Інституту радіоастрономії НАН України, тоді як флуктуації в діапазоні періодів 1–1000 с вимірювалися на магнітометричній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Наше дослідження робить внесок у подальше вивчення впливу сонячних спалахів на навколишнє середовище Землі [64, 65, 73] та надає цінні результати для вдосконалення можливостей прогнозування й мінімізації наслідків геофективних подій [66–68].

Космічна погода. У вересні 2017 року спостерігався підвищений рівень сонячної активності: було зафіксовано загалом 40 спалахів класу C, 15 спалахів класу M і 4 спалахи класу X. Зокрема, 6 вересня 2017 року о 09:00

УТ було зареєстровано сонячний спалах класу X2.2, а о 11:54 UT – спалах класу X9.3. 7 вересня 2017 року о 14:21 UT відбувся спалах класу X1.3, а 10 вересня 2017 року о 15:40 UT – спалах класу X8.2 (рис. 3.1).

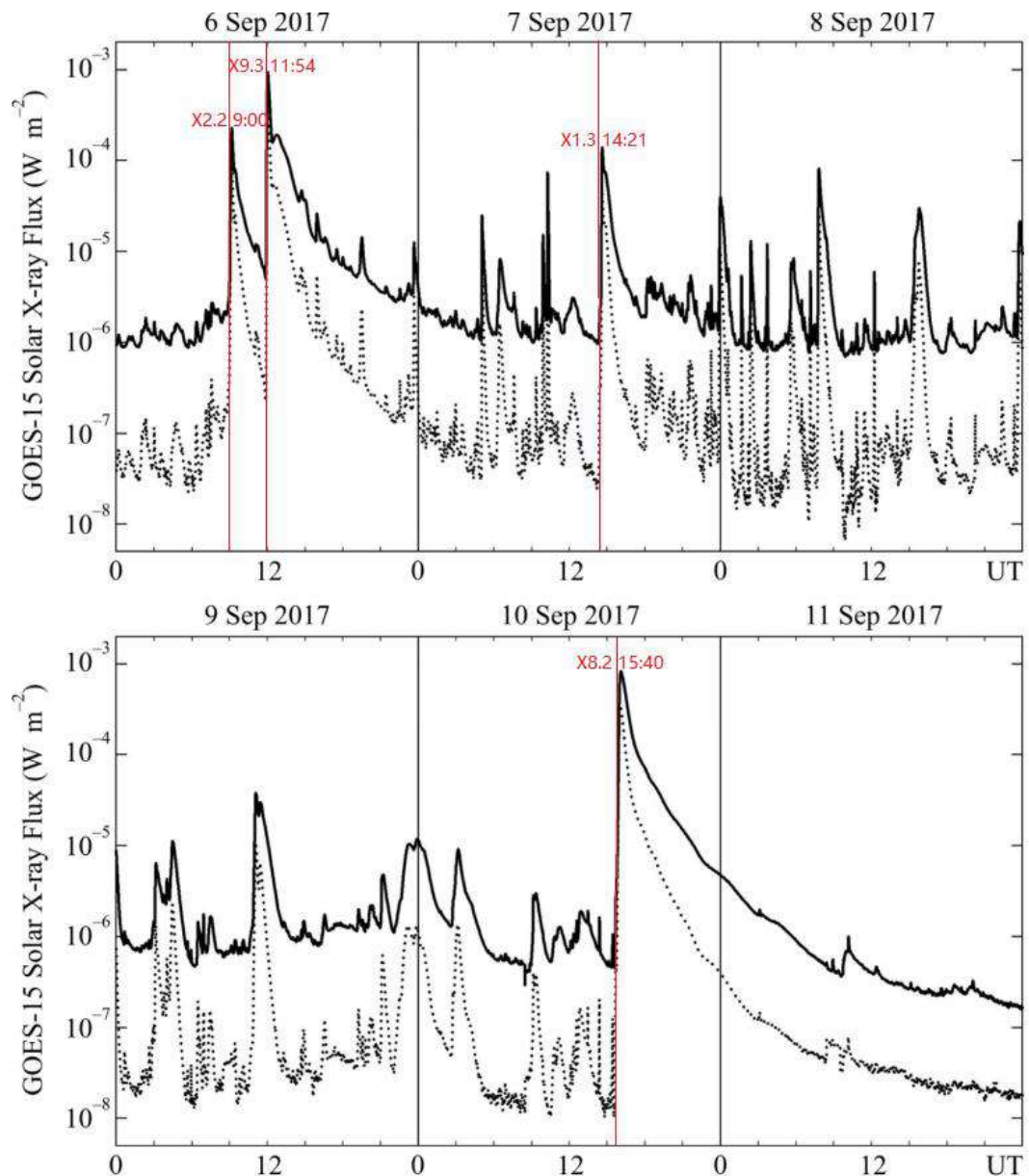


Рис. 3.1. Часові варіації X-ray рентгенівського випромінювання 6–11 вересня 2017 року. Суцільна лінія відповідає діапазону довжин хвиль 0.1–0.8 нм, точки – діапазону 0.05–0.4 нм. <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/xray/>

Спалахи X9.3 та X8.2 супроводжувалися корональними викидами маси (КВМ), що призвело до зростання концентрації заряджених частинок у

сонячному вітрі від $(2-3) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $(1.0-3.3) \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ К, а також до підвищення їх температури з 10^5 до $(6-8) \cdot 10^5$ К. Швидкість сонячного вітру зросла від 300–500 до 700–845 км/с, тоді як динамічний тиск збільшився від 1 до 5–10 нПа. Потік енергії в магнітосферу зріс від 1 до 20–30 ГВт, а вертикальна складова міжпланетного магнітного поля зменшилася до –33 нТл. Індекс AE підвищився до 1500 нТл, а індекс K_p – до 8. У ніч на 8 вересня 2017 року індекс D_{st} знизився до –142 нТл. Зазначені показники свідчили про початок геокосмічної бурі 8 вересня 2017 року, яка тривала протягом кількох діб [61, 63, 67, 68, 70, 71].

Засоби та методи. Магнітометрична обсерваторія Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна ($49,64^\circ$ пн. ш., $36,93^\circ$ сх. д.) оснащена магнітометром-флюксометром, призначеним для вимірювання флуктуацій горизонтальних H - та D -компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів $T = 1-1000$ с із часовою роздільною здатністю 0,5 с [49, 50]. Чутливість магнітометра становить не менше 1 пТл у діапазоні періодів $T = 1-1000$ с. Детальніший опис магнітометра-флюксометра наведено в роботі [60].

Варіації рівня флуктуацій магнітного поля Землі. Часова залежність рівнів H - та D -компонент у діапазоні періодів 1–1000 с, а також у піддіапазонах 1–10 с, 10–100 с і 100–1000 с 6 вересня 2017 року показано на рис. 3.2. Сонячні спалахи спричинили суттєве зростання рівня флуктуацій: після спалаху класу X2.2 він збільшився у 3–4 рази, а після спалаху класу X9.3 – до 10 разів. Після потужнішого викиду рівень знизився до –180 відн. од. для H -компоненти та до –400 відн. од. для D -компоненти, а згодом зріс відповідно до 50 відн. од. і 100 відн. од. Зазначені варіації тривали протягом 12–15 хвилин.

Результати ССА. Рівні H - та D -компонент 6 вересня 2017 року в діапазоні періодів 100–1000 с було проаналізовано методом ССА. Отримані результати, наведені на рис. 3.3, який свідчать, що спалахи класів X2.2 та X9.3 мали незначний вплив на спектральні складові в діапазоні періодів $T = 1-10$ с, проте спричинили зростання рівня флуктуацій у 2–3 та 10–12

разів відповідно в діапазоні періодів $T = 10\text{--}100$ с. У діапазоні періодів $T \approx 10\text{--}15$ хв перед спалахом, окрім аперіодичного ефекту, спостерігалось зростання амплітуди коливань у 1,5–2 рази. Після спалаху коливання згасали протягом 40–50 хвилин.

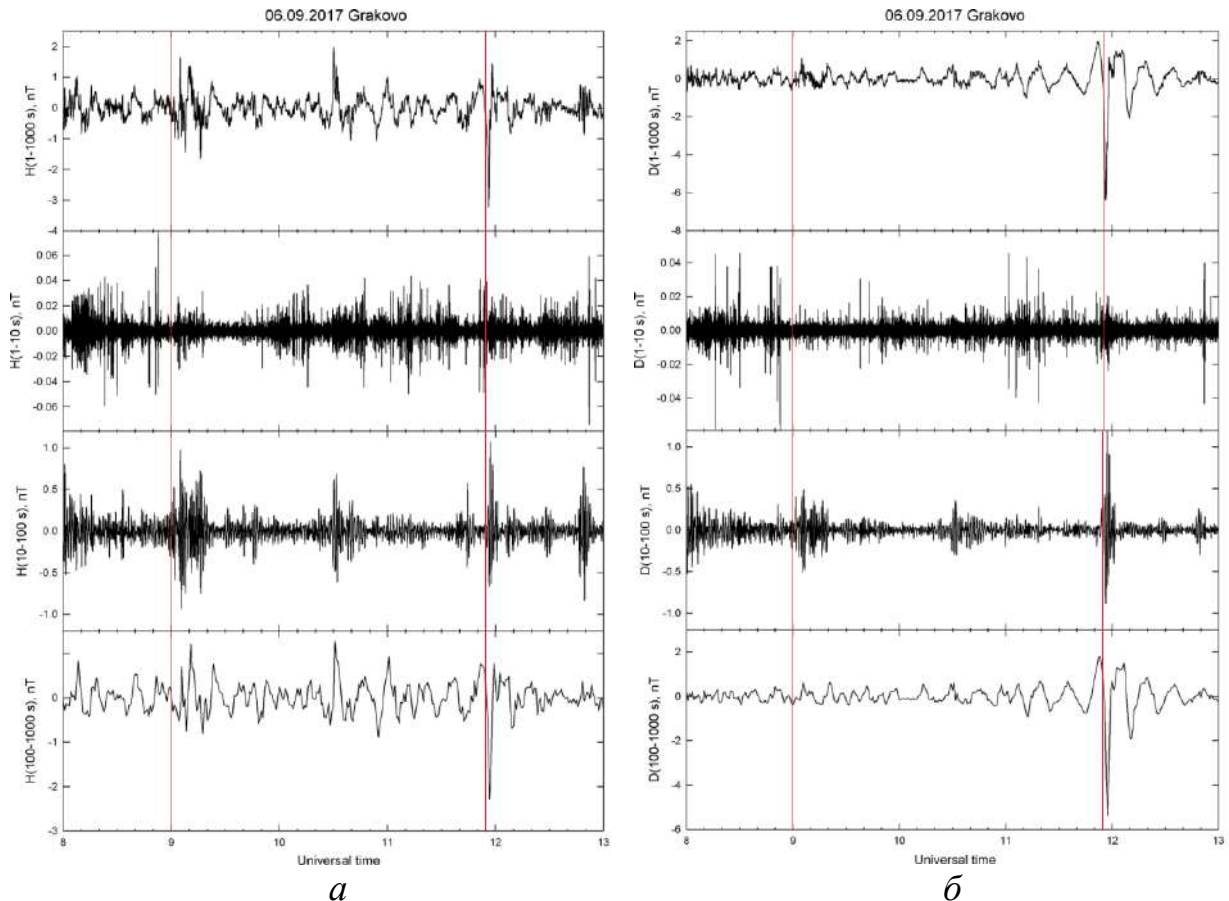


Рис. 3.2. Часові варіації рівнів H - (*a*) та D - (*б*) компонент 6 вересня 2017 року. Панелі зверху вниз: сигнал у діапазоні періодів 1–1000 с, 1–10 с, 10–100 с і 100–1000 с. Вертикальні лінії позначені моменти початку спалаху

Обговорення. Механізм варіацій геомагнітного поля, зумовлених сонячними спалахами, полягає в тому, що спалахи класу X здатні спричинити зростання концентрації електронів на висотах динамо-області іоносфери (90–130 км). Це призводить до зростання електропровідності іоносферної плазми та густини електричного струму, що викликає збурення струменевої течії (flux jet) і, як наслідок, формування геомагнітного ефекту. Оцінки верхніх

меж збурень температури атмосферного газу, концентрації електронів, густини електричного струму та компонент геомагнітного поля узгоджуються з експериментальними спостереженнями, що підтверджує адекватність запропонованого механізму.

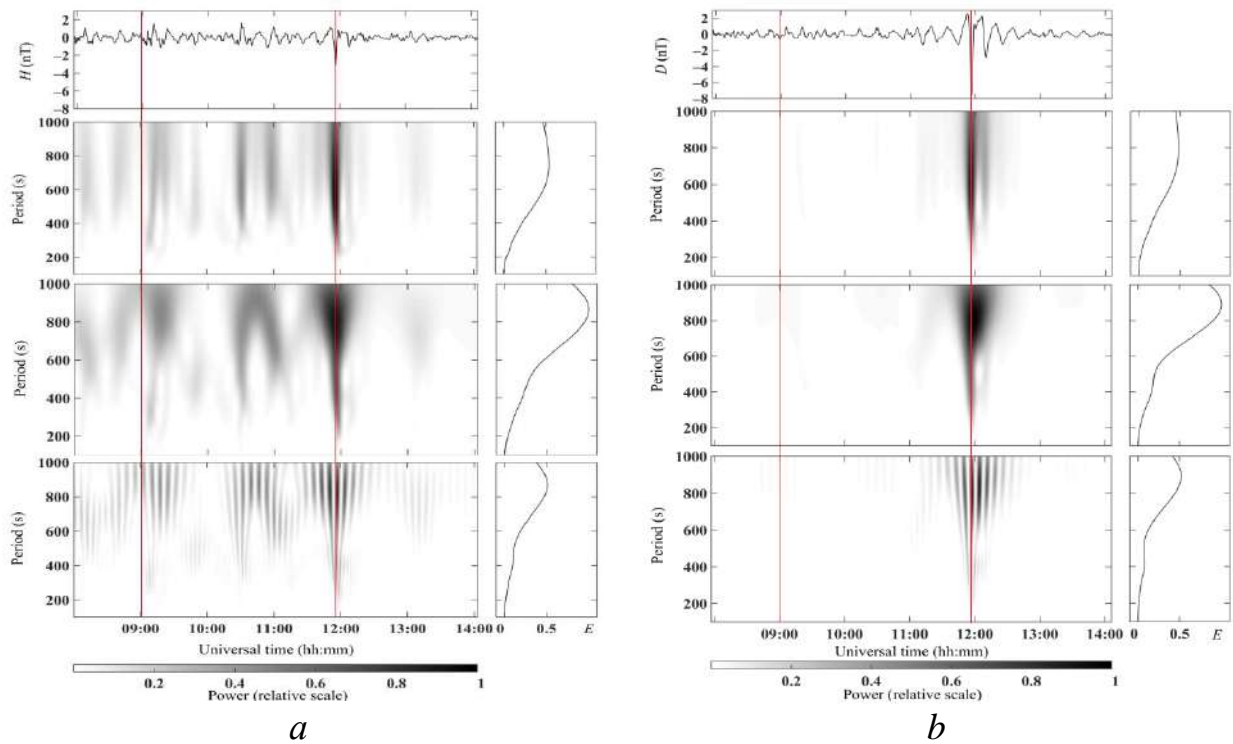


Рис. 3.3 Результати ССА для рівнів H - (a) та D - (b) компонент геомагнітного поля в діапазоні періодів 100–1000 с 6 вересня 2017 року. Панелі зверху вниз: вихідний сигнал, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення Морле. Вертикальні лінії позначають моменти початку спалаху.

Головні результати досліджень.

1. У вересні 2017 року спостерігався високий рівень сонячної активності, включно з потужними спалахами класу X, зокрема 6 вересня (X2.2 та X9.3), 7 вересня (X1.3) та 10 вересня (X8.2). Ці спалахи супроводжувалися корональними викидами маси, що призвело до значних змін параметрів сонячного вітру та енергопотіку в магнітосфері.

2. Сонячні спалахи класу X спричинили суттєве збільшення флуктуацій горизонтальних компонент H та D геомагнітного поля. Після спалаху X2.2 рівень флуктуацій зростав у 3–4 рази, після X9.3 – до 10 разів. Відомі коливання тривали 12–15 хвилин.

3. Метод ССА показав, що спалахи класу X майже не впливали на спектральні складові у діапазоні 1–10 с, але викликали значне підвищення амплітуди коливань у діапазоні 10–100 с та помітне зростання коливань у діапазоні 10–15 хв. Після спалахів коливання згасали протягом 40–50 хвилин.

4. Встановлено, що збільшення концентрації електронів у іоносферній динамо-області, підвищує електропровідність плазми та густину електричного струму, що викликає збурення струмових потоків і формує спостережуваний геомагнітний ефект.

5. Під час потужних спалахів основні компоненти магнітного поля (H , D) знижувалися на десятки нанотесла, тоді як рівень флуктуацій у діапазоні 100–1000 с залишався значно нижчим.

6. Корональні викиди маси спричинили початок геокозмичної бурі, яка тривала декілька діб та супроводжувалася підвищенням індексів AE , K_p і зниженням індексу D_{st} .

3.3. Статистика геомагнітних бур

Морфологія іоносферних збурень вивчалася у роботі [98].

Статистичний аналіз іоносферних збурень за два цикли сонячної активності виконаний у роботі [99], а магнітних бур – у роботах [99–101].

У роботі [100] виконано аналіз найбільш сильних геомагнітних бур за період з 1844 по 1993 рр. Робота [101] присвячена аналізу геомагнітних бур, що мали місце в 1932 – 2009 рр. Статистика магнітних та іоносферних бур обговорюється в [3]. В цій роботі введено нові індекси, що описують інтенсивність геокозмичних, магнітних та іоносферних бур.

Цікавим є статистичний аналіз варіацій параметрів сонячного вітру та їх наслідків – геомагнітних бур – за останній цикл сонячної активності.

Метою цього розділу є статистичний аналіз параметрів сонячного вітру та геомагнітного поля протягом 24-го циклу сонячної активності (2009 – 2020 рр.).

Стан космічної погоди. В якості вихідних даних обрані параметри збуреного сонячного вітру (концентрація n_{sw} , швидкість V_{sw} та температура T_{sw} частинок), збурені значення B_y - та B_z -компонент міжпланетного магнітного поля, що є причиною магнітних бур на Землі, а також індекси геомагнітної активності (AE , D_{st} та K_p). [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>]. Як відомо, індекс AE характеризує магнітну активність у полюсів планети (у авроральній області). Індекс D_{st} описує посилення кільцевого струму, що свідчить про геомагнітну активність у екваторіальній області. Індекс K_p , інакше планетарний індекс, який має логарифмічну шкалу, описує геомагнітну активність, усереднену у межах планети за даними 13 магнітних обсерваторій, розміщених між $\pm 44^\circ$ та $\pm 60^\circ$ геомагнітної широти. Іноді сила магнітних бур характеризується G -індексом, де $G = K_p - 4$. При $K_p = 5$ індекс $G1$ відповідає слабкій бурі, при $K_p = K_{pmax} = 9$ маємо $G5$, що відповідає екстремально сильній бурі.

У даній роботі розглянуті геомагнітні бурі з $K_p \geq 5$ або $G1$, $G2$, $G3$ та $G4$. Всього було 153 бурі з $K_p \geq 5$. Проаналізовані статистичні ряди максимальних значень n_{sw} , V_{sw} , T_{sw} , компонент B_y - та B_z -індексів AE , D_{st} та K_p , а також мінімальні значення B_z -компоненти та індексу D_{st} . Наявність негативних значень B_z -компоненти свідчить про настання геомагнітної бурі. Початку бурі відповідають значення $D_{stmax} > 0$. Мінімальні негативні значення D_{st} , точніше їх скориговані значення D_{st} , описують силу магнітної бурі [1]. При D_{st} , рівним 11–20, 21–40, 41–70, 71–120, 121–200, 201–300, 301–500, 501–1000, 1001–2000 нТл слід очікувати бур, які є слабкою, дуже слабкою, досить помірною, помірною, сильною, дуже сильною, надсильною, вкрай сильною, виключно сильною та екстремальною відповідно.

Стан космічної погоди протягом двох надсильних геомагнітних бур, що мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності, ілюструє рис. 3.4 та рис. 3.5. Для першої бурі $n_{swmax} = 41.7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$; $V_{swmax} = 742 \text{ км/с}$; $T_{swmax} = 11.2 \cdot 10^5 \text{ К}$; $p_{swmax} = 30.61 \text{ нТл}$; $B_{zmin} = -26.3 \text{ нТл}$; $B_{zmax} = 16.1 \text{ нТл}$; $B_{ymin} = -11.4 \text{ нТл}$; $B_{ymax} = 23.5 \text{ нТл}$; $\epsilon_{Amax} = 285.71 \text{ ГДж/с}$; $AE_{max} = 1636 \text{ нТл}$; $K_{pmax} = 8.3$; $D_{stmin} = -204 \text{ нТл}$; $D_{stmax} = 35 \text{ нТл}$. Для другої бурі $n_{swmax} = 13.9 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$; $V_{swmax} = 817 \text{ км/с}$; $T_{swmax} = 33.8 \cdot 10^5 \text{ К}$; $p_{swmax} = 7.3 \text{ нТл}$; $B_{zmin} = -24.2 \text{ нТл}$; $B_{zmax} = 10.4 \text{ нТл}$; $B_{ymin} = -10.7 \text{ нТл}$; $B_{ymax} = 9.5 \text{ нТл}$; $\epsilon_{Amax} = 191.82 \text{ ГДж/с}$; $AE_{max} = 1442 \text{ нТл}$; $K_{pmax} = 8.3$; $D_{stmin} = -142 \text{ нТл}$; $D_{stmax} = 32 \text{ нТл}$.

Результати статистичного аналізу. Спочатку за період 2009 – 2020 рр. будувалися статистичні ряди для максимальних значень кожного параметра p (p_{min} до p_{max}). На підставі цих рядів створювалися гістограми, які в тих випадках, де це доцільно, доповнювалися аналітичними законами розподілу випадкових значень p . Далі обчислювалися середні значення \bar{p} та середньоквадратичне відхилення σ , а також середньоквадратичне відхилення середнього значення $\sigma_p = \sigma / \sqrt{N}$, де N – число відліків.

Результати обчислень статистичних характеристик наведені в табл. 3.1. З табл. 3.1 видно, що найбільш ймовірні значення параметрів наступні: $n_{swmax} = (32.0 \pm 1.4) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, $V_{swmax} = 617.3 \pm 7.3 \text{ км/с}$, $T_{swmax} = (4.8 \pm 0.3) \cdot 10^5 \text{ К}$, $B_{ymax} = 10.42 \pm 0.41$, $B_{zmin} = -10.7 \pm 0.4 \text{ нТл}$, $AE_{max} = 1095.0 \pm 21.5 \text{ нТл}$, $D_{stmin} = -(69.5 \pm 2.8) \text{ нТл}$, $D_{stmax} = 20.7 \pm 1.1 \text{ нТл}$ и $K_{pmax} = 5.76 \pm 0.06$. Як видно, похибка оцінки \bar{p} зазвичай не перевищує 1–6 %.

Приклад гістограми для $\lg K_{pmax}$ наведено на рис. 3.6. З рис. 3.6 видно, що при збільшенні $\lg K_{pmax}$ логарифм числа подій досить швидко убуває. Отримана наступна регресія:

$$\lg n \approx - 8.13 \lg K_{pmax} + 7.65 \quad (3.1)$$

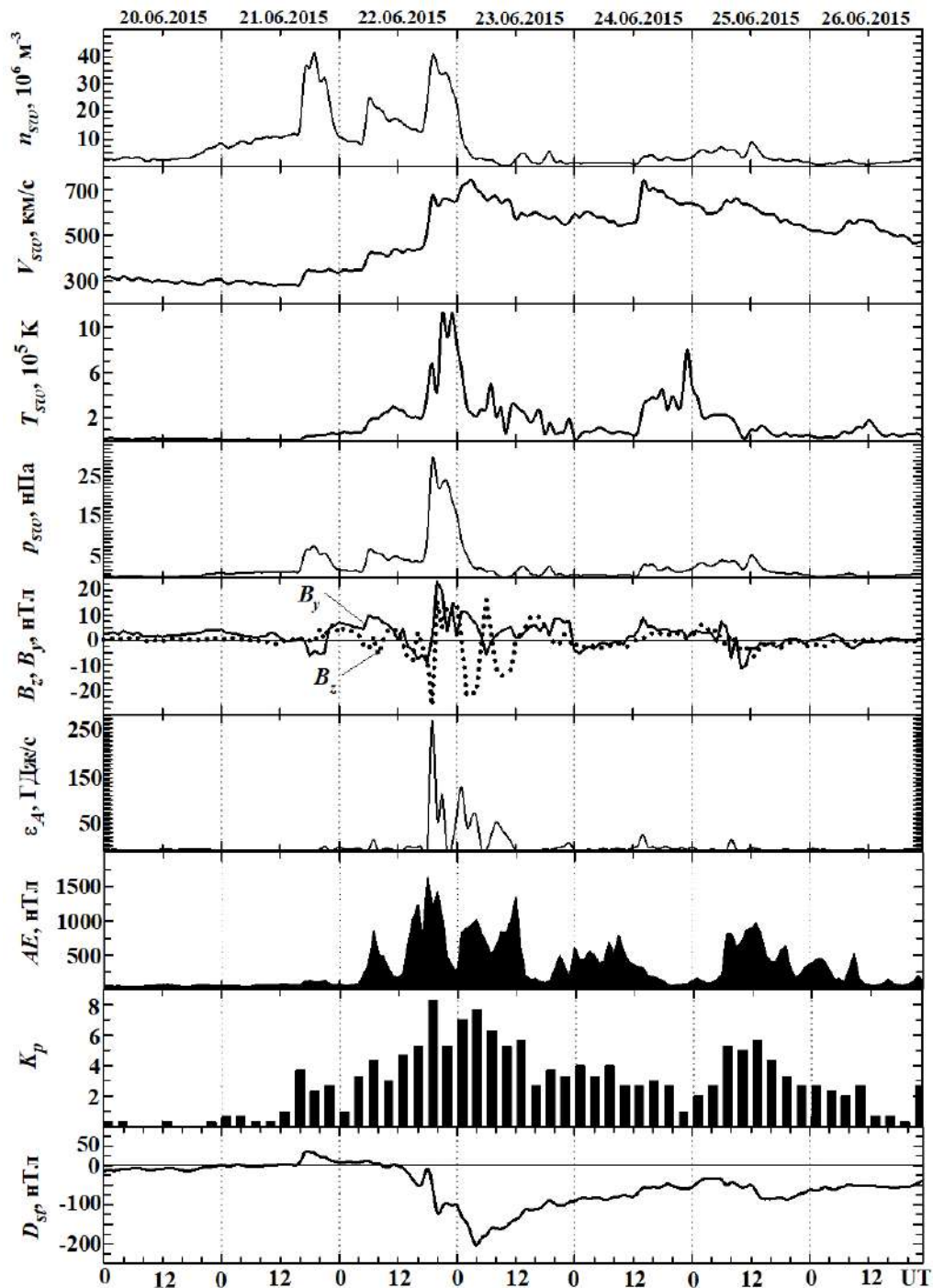


Рис. 3.4. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , вимірених компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ε_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE -індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 20 – 26 червень 2015 р. Дати вказані уздовж осі абсцис.

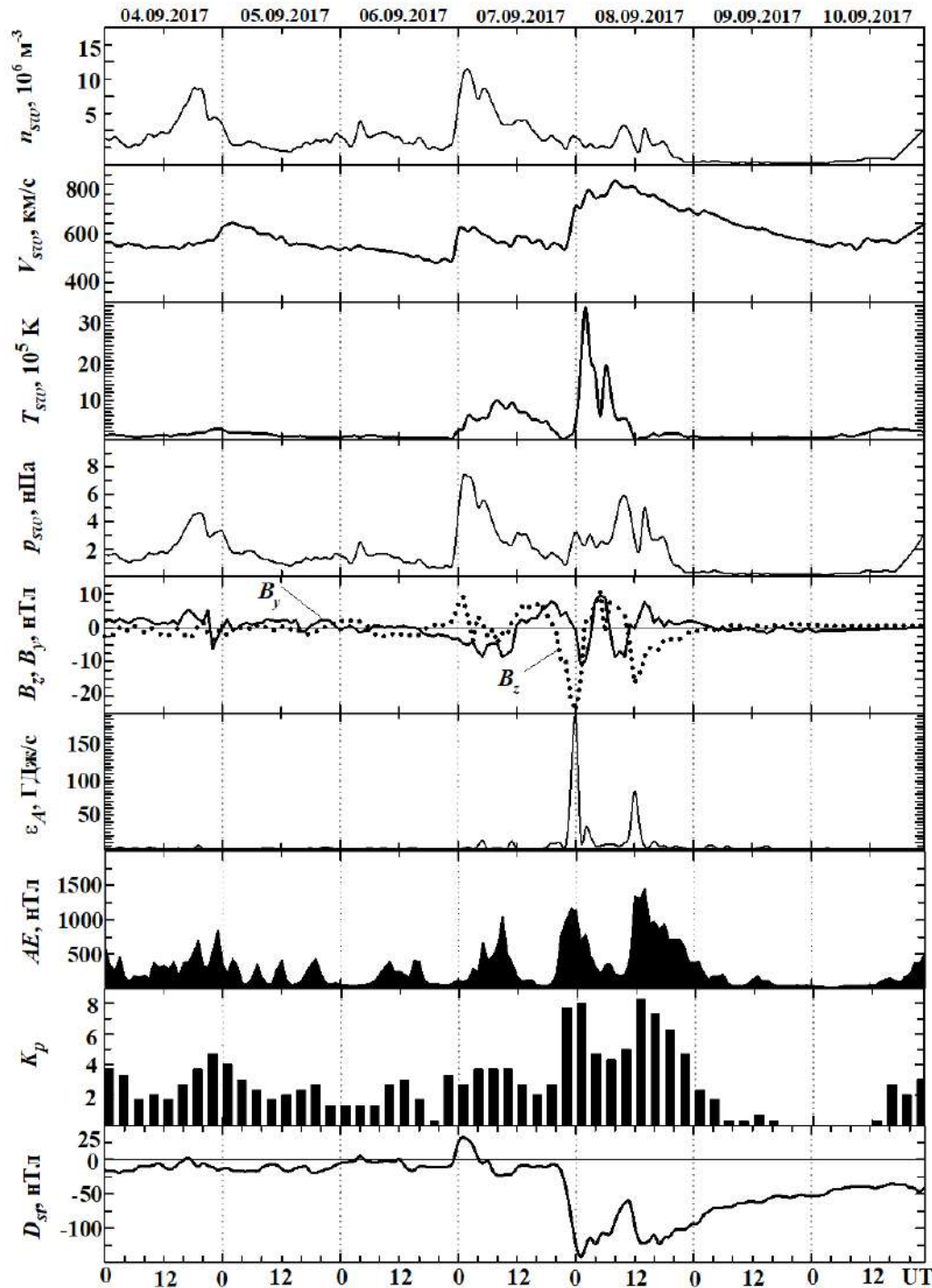


Рис. 3.5. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряних компонент B_z та B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , переданої сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу, AE -індексу, K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 4 – 10 вересня 2017 р. Дати вказані уздовж осі абсцис.

Таблиця 3.1.

Статистичні характеристики основних параметрів сонячного вітру,
міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітного поля

	n_{swmax}	V_{swmax}	T_{swmax}	B_{ymax}	B_{zmin}	D_{stmin}	D_{stmax}	AE_{max}	K_{pmax}
N	153	153	153	153	153	153	142	136	153
\bar{p}	31.99	617.25	4.81	10.42	-10.73	-69.52	20.68	1094.89	5.76
σ	17.70	89.95	3.58	5.13	4.29	34.57	12.59	250.63	0.75
σ_p	1.43	7.27	0.29	0.41	0.35	2.79	1.06	21.49	0.06
σ_p / \bar{p}	0.04	0.01	0.06	0.03	0.05	0.04	0.03	0.01	0.01

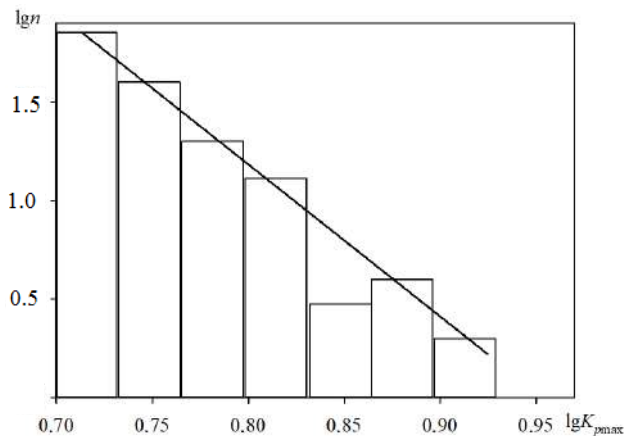


Рис. 3.6. Гістограма для $\lg K_{pmax}$. Прямая лінія – регресія (1).

Якщо ця регресія справедлива також для $K_{pmax} > 8.3$, то при K_{pmax} , рівному 9, 10 и 11 маємо число подій за цикл сонячної активності, що дорівнює 0.78, 0.33 и 0.15. Тоді середній інтервал часу Δt між магнітними бурями з цими K_{pmax} становить близько 15, 36 та 80 років. Очевидно, що значення Δt сильно занижені. Це означає, що співвідношення (3.1) можна застосувати при $K_{pmax} < 9$.

Гістограма для $\lg K_{pmax}$ може бути апроксимована лінійним законом, а для K_{pmax} – степеневим. Гістограма для V_{sw} апроксимована нормальним законом з $\bar{V}_{sw} \approx 617$ км/с та $\sigma \approx 90$ км/с. Інші гістограми можуть бути апроксимовані законом Релея.

Обговорення. У роботі проведено статистичний аналіз параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітної активності протягом 24-го циклу сонячної активності. Загальна кількість бур з $K_{p\max} \geq 5$ склало 153. Досить велика статистика дозволила надійно оцінити значення \bar{p} , σ та σ_p .

Число бур при збільшенні $K_{p\max}$, як і слід було очікувати, швидко зменшувалося. Тільки для двох бур $K_{p\max} = 8.3$. Значення $D_{st\min} \approx -223$ нТл 17 березня 2015 р. та $D_{st\min} = -204$ нТл 23 червня 2015 р. У той самий час протягом 23-го циклу сонячної активності спостерігалось три бурі зі значно меншими значеннями $D_{st\min}$, а саме -383 нТл (30 жовтня 2003 р.), -471 нТл (20 листопада 2003 р.) та -383 нТл (8 листопада 2004 р.).

Таким чином, геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж в 23-го циклі.

Головні результати досліджень.

1. Сформовано та проаналізовано статистичну вибірку з 153 геомагнітних бур з максимальним планетарним індексом $K_p \geq 5$ (бурі рівнів G1–G4). Це дозволило отримати статистично достовірні характеристики параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та індексів геомагнітної активності протягом усього 24-го циклу сонячної активності.

2. Визначено статистичні характеристики основних параметрів сонячного вітру та геомагнітної активності.

3. Оцінено повторюваність екстремальних бур. Показано, що зі зростанням максимального K_p кількість подій різко зменшується. Бур з $K_{p\max} = 8.3$ за цикл було лише дві. Прогнозування для $K_p > 9$ показало значну рідкісність таких подій.

4. Доведено, що геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу була суттєво спокійнішою, ніж у 23-му циклі сонячної активності.

3.4. Геомагнітні ефекти бур 28 квітня–2 травня 2023 р.

Дані та методи. Для аналізу збурень геомагнітного поля наприкінці квітня – початку травня 2023 р. використано результати вимірювань, що проводяться на мережі INTERMAGNET [https://www.intermagnet.org/new_data_download.html]. Розрізнення за часом складає 1 хв, а за амплітудою – 0.1 нТл. Аналізу підлягали часові варіації X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля, що були зареєстровані на 20 магнітних станціях як західної, так і східної півкулі (табл. 3.2, 3.3). Станції у кожній півкулі зосереджувалися поблизу фіксованого меридіану. Це дозволило прослідкувати широтну залежність магнітних збурень.

Таблиця 3.2.

Загальні відомості про станції Західної півкулі, сходи та заходи Сонця над відповідними координатами

	Станція та країна	Географічні координати, широта/довгота	Геомагнітні координати, широта/довгота	Схід, висота 0 км/ висота 200 км	Захід, висота 0 км/ висота 200 км
1	Qeqertarsuaq (Godhavn) GDH Greenland	69.2520°N, 53.5330°W	+77.52°, +32.69°E	22:58°/ –	17:46°/ –
2	Iqaluit IQA Canada	63.7530°N, 68.5180°W	+72.83°, +6.24°	22:53°/ –	15:51°/ –
3	Ottawa OTT Canada	45.4030°N, 75.5520°W	+54.46°, –3.51°	23:44/ 22:05	14:04/ 15:43
4	Fredericksburg FRD United States of America	38.2100°N, 77.3670°W	+47.25°, –5.47°W	23:53/ 22:29	13:42/ 15:05
5	Pilar PIL Argentina	31.6670°S, 63.8810°W	–22.33°, +8.08°	00:55/ 23:41	14:23/ 15:38
6	Akademik Vernadsky base Faraday Islands AIA	65.2450°S, 64.2580°W	–55.91, +6.30	23:01/ –	16:18°/ –

Таблиця 3.3.

Загальні відомості про станції Східної півкулі, сходи та заходи Сонця над відповідними координатами

	Станція та країна	Географічні координати, широта/довгота	Геомагнітні координати, широта/довгота	Схід, висота 0 км/висота 200 км	Захід, висота 0 км/висота 200 км
1	Paratunka (Petrovlovsk) PET Russia	52.9710°N, 158.2480°E	+46.44° -137.07°	17:50/ 15:37	08:58/ 11:10
2	Khabarovsk KHB Russia	47.6100°N, 134.6900°E	+39.05°, -156.42°	19:41/ 17:54	10:13/ 11:59
3	Cheongyang CYG Korea	36.3700°N, 126.8540°E	+27.41°, -162.32°	20:37/ 19:16	10:19/ 11:40
4	Kakadu KDU Australia	12.6900°S, 132.4700°E	-20.96°, -153.66°	20:49/ 19:46	09:24/ 10:27
5	Charters Towers CTA Australia	20.0900°S, 146.2640°E	-27.05° -138.48°	19:45/ 18:40	08:38/ 9:44
6	Canberra CNB Australia	35.3200°S, 149.3600°E	-41.75°, -132.81°	19:10/ 17:51	08:18/ 10:08
7	Macquarie Island MCQ Australia	54.5000°S, 158.9500°E	-59.32°, -116.38°	17:41/ 15:19	08:57/ 11:19
8	Casey Station CSY Antarctica	66.2830°S, 110.5330°E	-75.38°, -174.88°	19:46/ -	13:22/ -

Стан космічної погоди. Для аналізу використали часові залежності параметрів сонячного вітру, компонентів міжпланетного магнітного поля, енергетичної функції Акасофу, індексів K_p та D_{st} (рис. 3.7). Вихідні дані представлено на сайтах [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] та [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>].

Концентрація частинок у сонячному вітрі з 28 квітня до 12:00 UT (тут і далі UT – всемірний час) 3 травня 2023р. знаходилася на рівні фонового значення $((2...3) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3})$.

Швидкість частинок у сонячному вітрі зростає від фонового значення 300...350 км/с до 700 км/с, яка, флюктуючи, поступово зменшувалася до фонового значення.

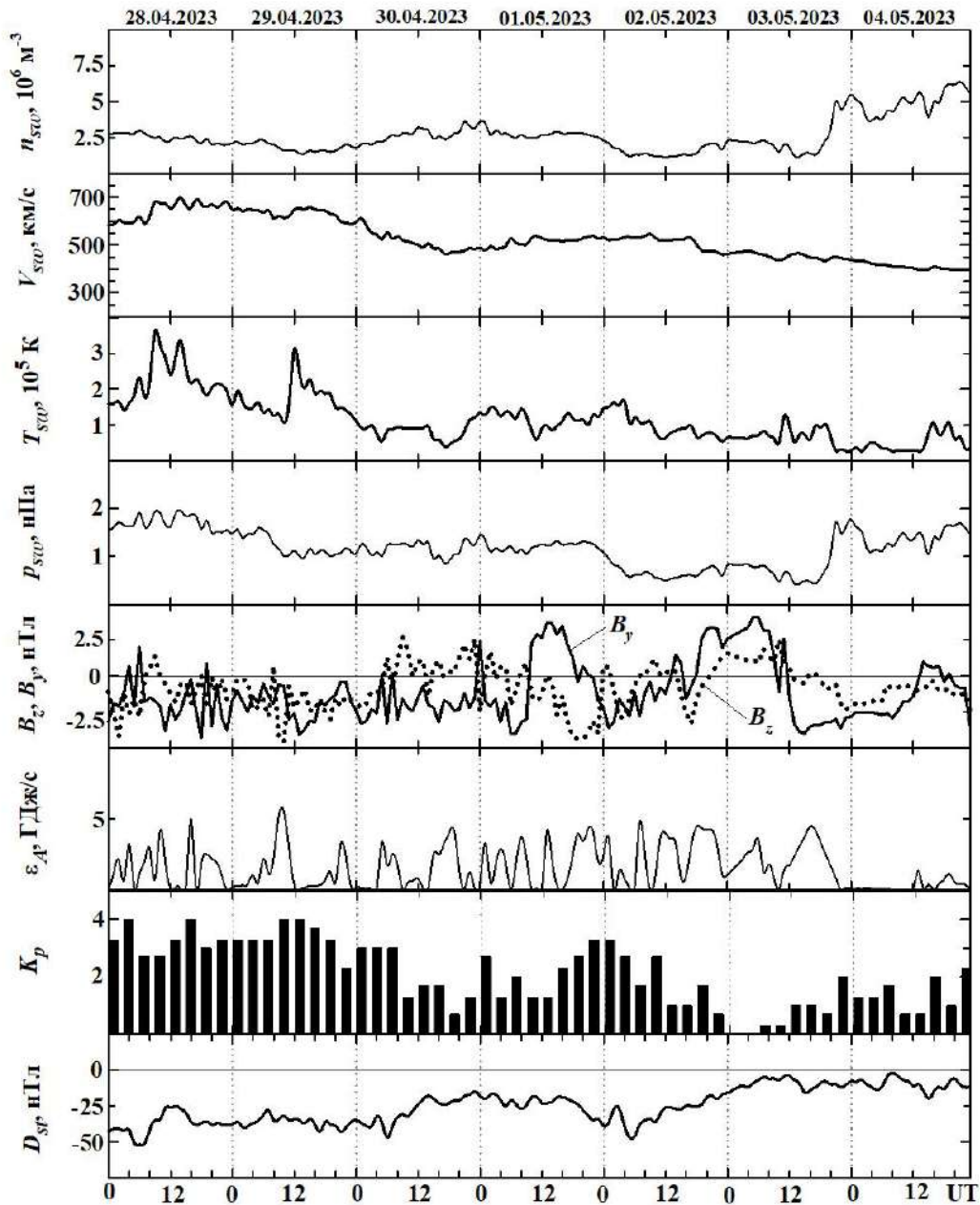


Рис. 3.7. Часові варіації параметрів сонячного вітру: вимірювані концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , вимірювані компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі за одиницю часу; K_p -індексу та D_{st} -індексу (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) в період 28 квітня – 04 травня 2023 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

Температура частинок у сонячному вітрі зросла від фонового значення $(0.5...1) \cdot 10^5$ К до $(2...3.6) \cdot 10^5$ К.

Динамічний тиск частинок у сонячному вітрі 28 – 29 квітня та 1 і 4 травня зростав від фонового значення 0.5 нПа до 1...2 нПа.

Мали місце знекозмінні варіації компонентів міжпланетного магнітного поля. Так B_y -компонент змінювався від -4.3 до 4.1 нТл, B_z -компонент – від -4.6 до 2.7 нТл.

Параметр Акасофу, що описує приплив енергії в одиницю часу в магнітосферу епізодично зростав від фонового значення ~ 1 до $4...5.5$ ГДж/с.

28 – 29 квітня та 1 – 2 травня 2023 р. індекс K_p зростав до 4. В цей же час D_{st} -індекс зменшувався до $-(50...52)$ нТл. Саме в ці дні виникали помірні геокосмічні бурі. В якості контрольних днів розглядалися 3 та 4 травня 2023 р.

Результати аналізу. Спочатку розглянемо магнітні станції у Західній півкулі.

Станція GDH. Часові варіації X -, Y - і Z -компонентів цієї високоширотної станції показано на рис. 3.8, *а*. Найбільший розмах, тобто різниця між максимальним і мінімальним значеннями варіацій, для X - і Y -компонентів мав місце 29 квітня 2023 р., а для Z -компоненти – 28 квітня 2023 р. (рис. 3.8, *а*). Ці розмахи склали відповідно 550, 500 і 780 нТл (табл. 3.4).

Станція IQA. Для цієї станції найбільший розмах усіх компонентів спостерігався 29 квітня 2023р. (рис. 3.8, *б*). Його значення сягали 1000, 750 і 750 нТл для X -, Y - і Z -компонентів відповідно (табл. 3.4).

Станція OTT. Часові варіації геомагнітних компонентів представлені на рис. 3.9, *а*. Найбільший розмах не перевищував 100...110 нТл (див. табл. 3.4).

Станція FRD. Найбільші варіації рівня усіх компонентів не перевищували 50...60 нТл. (рис. 3.9, *б*). Розмах сягав 70...90 нТл (табл. 3.4).

Станція PIL. На відміну від інших станцій, ця станція знаходиться у південній півкулі. Найбільшими варіаціями всіх компонентів були 28 та 29 квітня 2023 р. (рис. 3.10, *а*). Вони сягали 60...70 нТл (табл. 3.4).

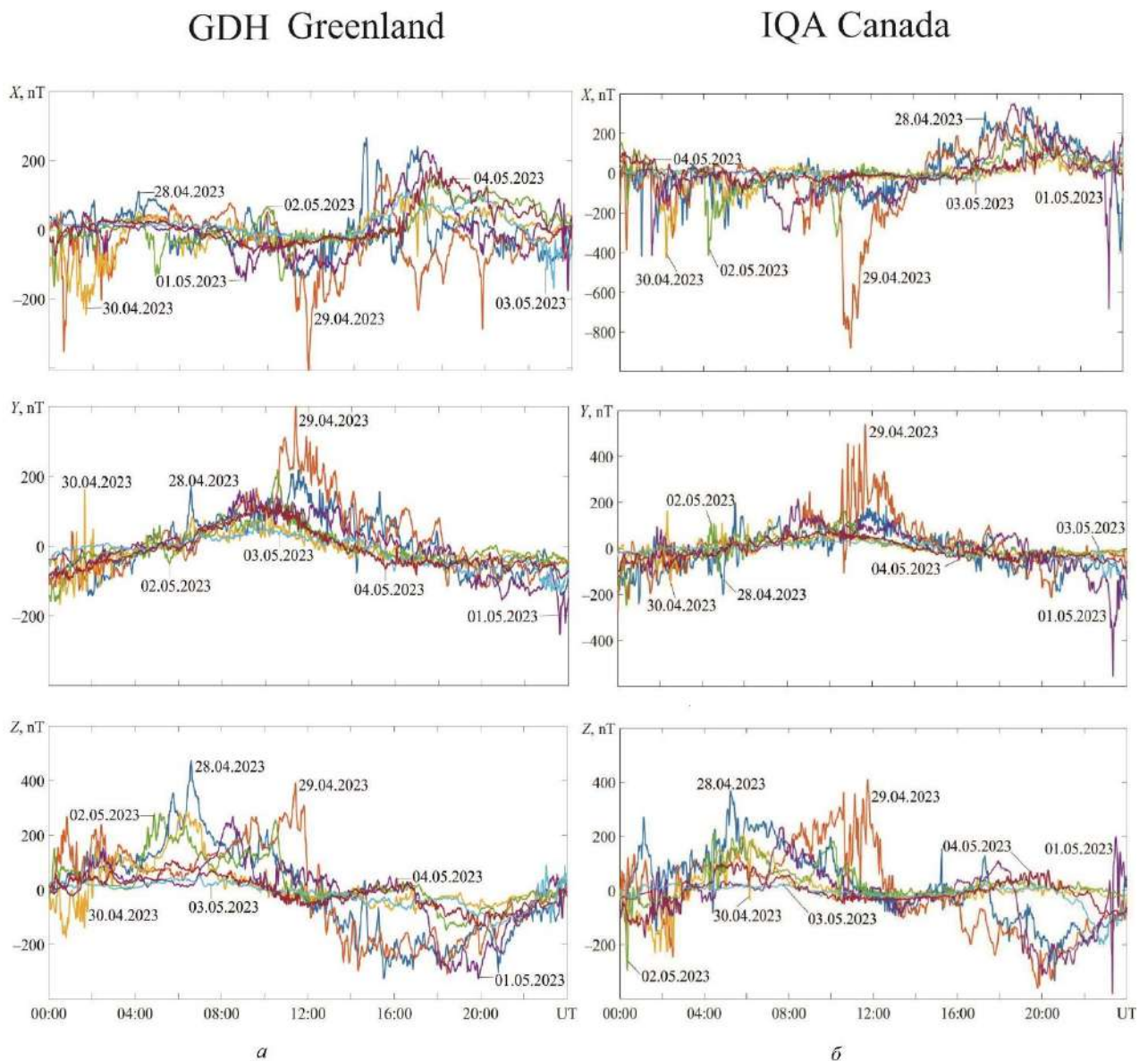


Рис. 3.8. Часові варіації рівня X -, Y - і Z -компонентів: a – на станції GDH; b – на станції IQA. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

Станція AIA. Ця станція знаходиться у південних високих широтах. 28 та 29 квітня 2023 р. ці три компоненти варіювали у межах до 100...120 нТл (рис. 3.10, b). 1 та 2 травня 2023 р. ці варіації були у 2...3 рази менше. Ще меншими вони були у контрольні дні 3 та 4 травня 2023 р. (див. табл. 3.4).

OTT Canada

FRD United States of America

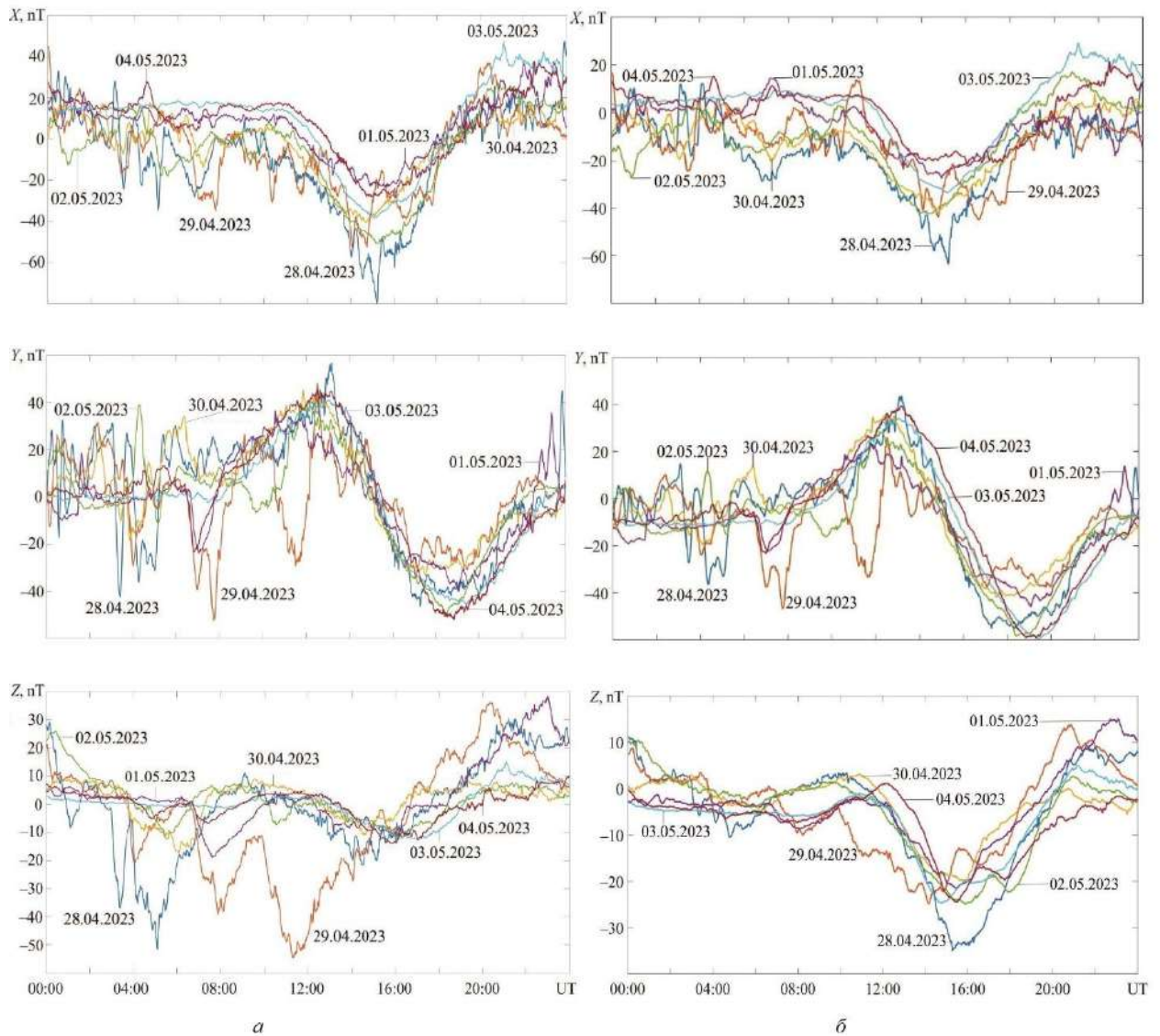


Рис. 3.9. Часові варіації рівня X-, Y- і Z-компонентів: *a* – на станції OTT; *б* – на станції FRD. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

Далі розглянемо станції у Східній півкулі.

Станція PET. Часові варіації рівня всіх компонентів показано на рис. 3.11, *a*. Найбільший розмах (до 85 та 80 нТл) мав місце відповідно 28 та 29 квітня 2023 р. (табл. 3.5).

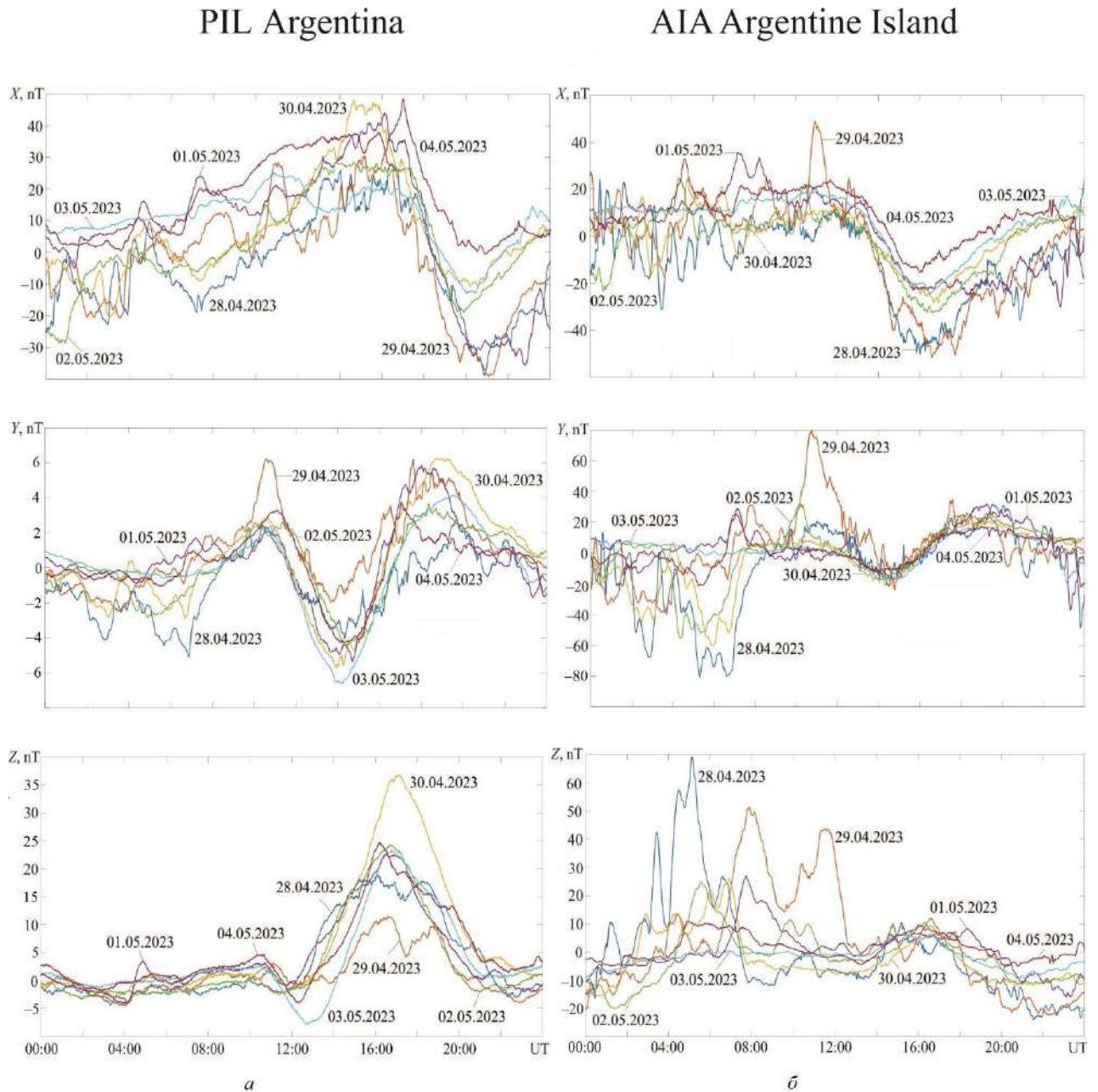


Рис. 3.10. Часові варіації рівня X -, Y - і Z -компонентів: a – на станції РІЛ; b – на станції АІА. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

Станція КНВ. З рис. 3.11, b можна бачити, що найбільші варіації сягали 90 та 77 нТл відповідно 28 та 29 квітня 2023 р. Самі варіації були подібними до варіацій на станції РЕТ.

Станція СУГ. Найбільш сильні варіації X - і Y -компонентів спостерігалися також 28 та 29 квітня 2023 р. (рис. 3.12, a). Розмах сягав

70...80 нТл (див. табл. 3.5). Ця та інші станції, що розглядаються далі, знаходяться у південній півкулі.

Таблиця 3.4.

Розмах варіацій компонентів геомагнітного поля (нТл) на станціях Західної півкулі

Станція	Компонент	28 квітня	29 квітня	1 травня	2 травня	3 травня	4 травня
GDH	X	380	550	340	270	280	240
	Y	310	500	370	350	290	200
	Z	780	650	550	430	120	240
IQA	X	750	1000	980	500	130	260
	Y	360	750	760	126	100	140
	Z	680	750	520	470	200	200
OTT	X	110	73	60	75	88	66
	Y	95	100	60	110	80	90
	Z	80	90	58	38	24	18
FRD	X	70	55	46	56	55	40
	Y	90	65	60	75	95	80
	Z	45	40	35	23	24	25
PIL	X	60	70	75	53	40	48
	Y	60	70	80	53	35	48
	Z	20	33	30	24	30	30
AIA	X	75	100	45	40	40	40
	Y	110	120	60	75	20	65
	Z	100	70	35	30	13	15

Станція KDU. Найбільш суттєві (до 60...65 нТл) варіації X-компонента мали місце 29 квітня та 1 травня 2023 р. (рис. 3.12, б). Досить значними (до 55...63 нТл) були варіації Y-компонента 2 – 3 травня 2023 р. (табл. 3.5).

Станція СТА. Розмах X-компонента до 45...50 нТл реєструвався з 28 квітня до 2 травня 2023 р. (рис. 3.13, а). Дещо більшим (до 55...65 нТл) був розмах для Y-компонента (див. табл. 3.5).

Станція CNB. Найбільш значимі (до 50...60 нТл) варіації X- і Y-компонентів спостерігалися 28 та 29 квітня 2023 р. (рис. 3.13, б). При цьому розмах складав 80 нТл (табл. 3.5).

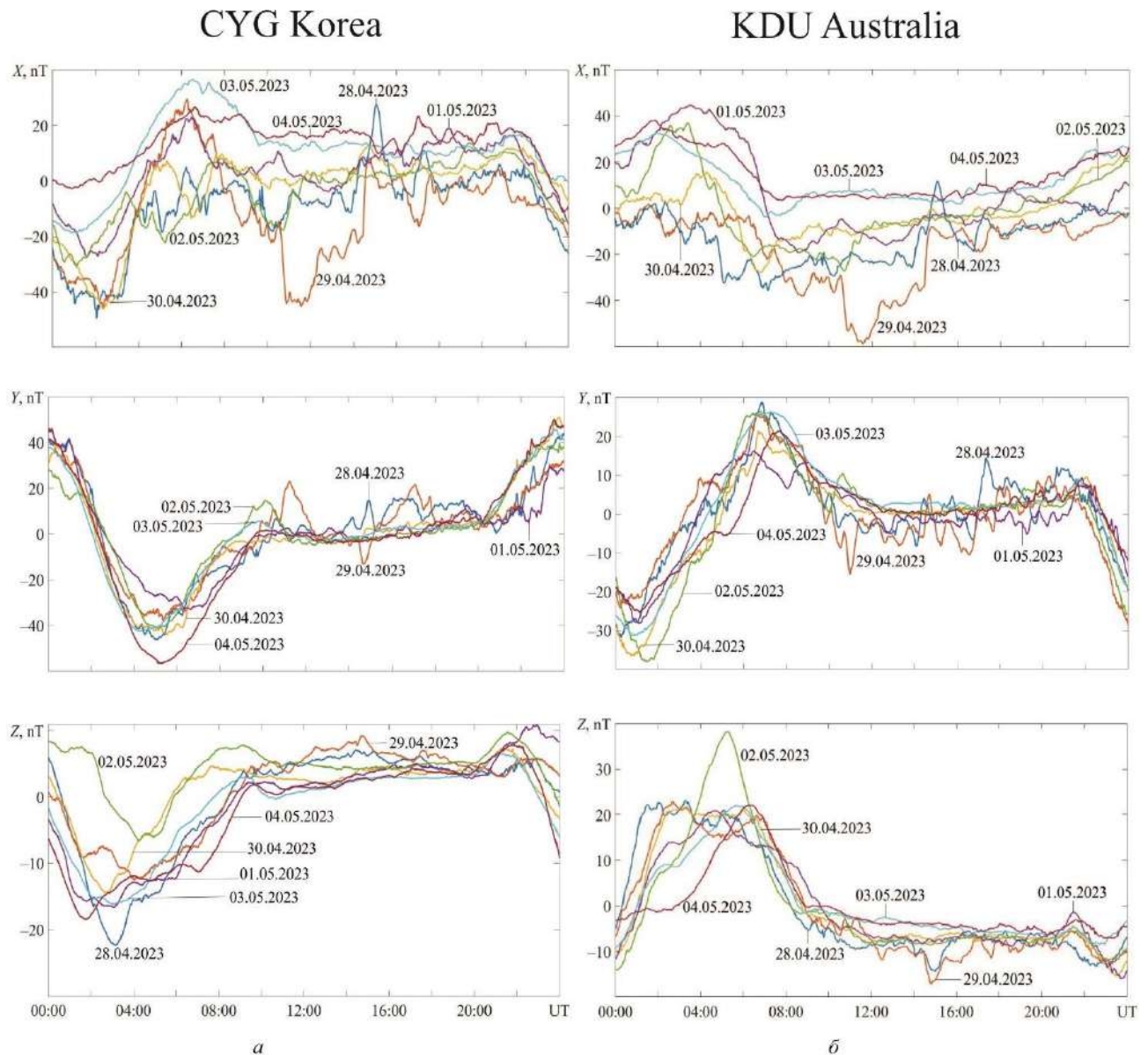


Рис. 3.12. Часові варіації рівня X -, Y - і Z -компонентів: a – на станції CYG; b – на станції KDU. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

Станція CSY. X - і Y -компоненти на високоширотній станції збурювалися більш за все 28 та 29 квітня 2023 р., а Z -компонент – 1 та 2 травня 2023 р. (рис. 3.14, b). Варіації сягали 270...420 нТл. У контрольні дні розмах не перевищував 150...190 нТл (див. табл. 3.5).

Таблиця 3.5.

Розмах варіацій компонентів геомагнітного поля (нТл) на станціях Східної півкулі

Станція	Компонент	28 квітня	29 квітня	1 травня	2 травня	3 травня	4 травня
PET	X	85	80	60	55	50	50
	Y	85	70	60	60	65	85
	Z	30	25	30	95	20	23
KHB	X	108	75	65	54	50	50
	Y	70	70	65	65	65	100
	Z	17	20	20	15	10	20
CYG	X	70	70	47	40	50	32
	Y	50	80	60	80	80	100
	Z	27	20	25	17	20	20
KDU	X	40	55	46	56	55	40
	Y	40	65	60	75	95	80
	Z	35	40	35	23	24	25
CTA	X	60	70	75	53	40	48
	Y	60	70	80	53	35	48
	Z	20	33	30	24	30	30
CNB	X	75	100	45	40	40	40
	Y	110	120	60	75	20	65
	Z	100	70	35	30	13	15
MCQ	X	770	700	100	250	140	80
	Y	400	360	60	100	20	20
	Z	460	350	120	280	30	20
CSY	X	270	300	170	220	190	100
	Y	300	420	270	290	140	150
	Z	220	260	300	270	90	140

Обговорення. За даними космічної погоди обидві магнітні бурі 28 – 29 квітня та 1 – 2 травня 2023 р. були помірними. Як видно із проведеного аналізу, дні 28 – 29 квітня були більш збуреними, ніж 1 – 2 травня 2023 р. (див. табл. 3.4, 3.5). Це можна пояснити тим, що буря 28 – 29 квітня 2023 р. була дещо більш інтенсивною ($K_p \max \approx 4$), ніж 1 – 2 травня 2023 р. ($K_p \max \approx 3.3$). Крім того, перша буря продовжувалась до 09:00 30 квітня 2023 р. Її тривалість досягла 57 годин. Буря 1 – 2 травня 2023 р. спостерігалася впродовж 21 години.

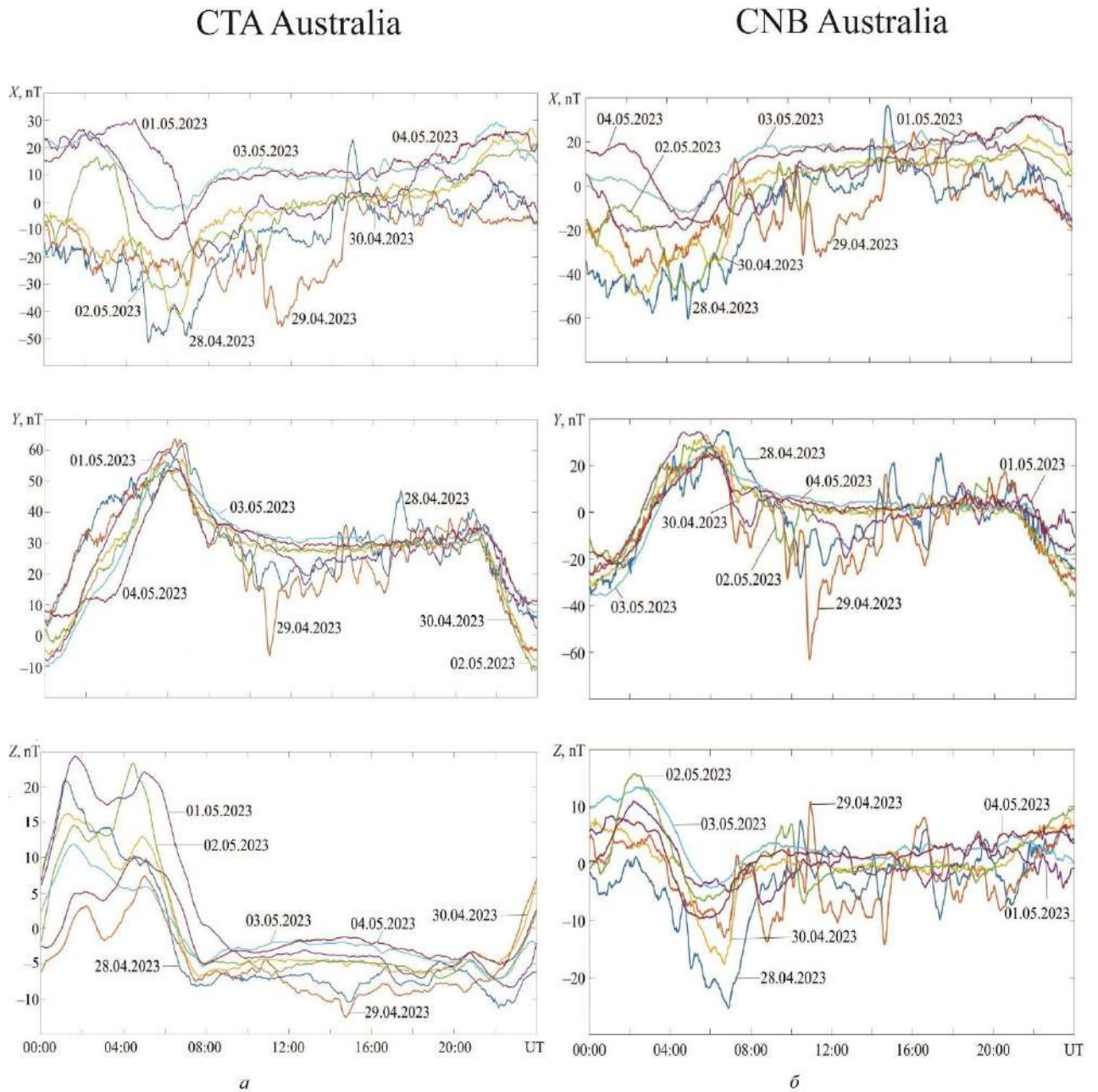


Рис. 3.13. Часові варіації рівня X -, Y - і Z -компонентів: a – на станції СТА; b – на станції CNB. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

У контрольні дні варіації X - і Z -компонентів зазвичай були меншими в 1.3...2.1 рази. Різниця в рівнях Y -компонента у дні з магнітними бурями та в контрольні дні була не значною.

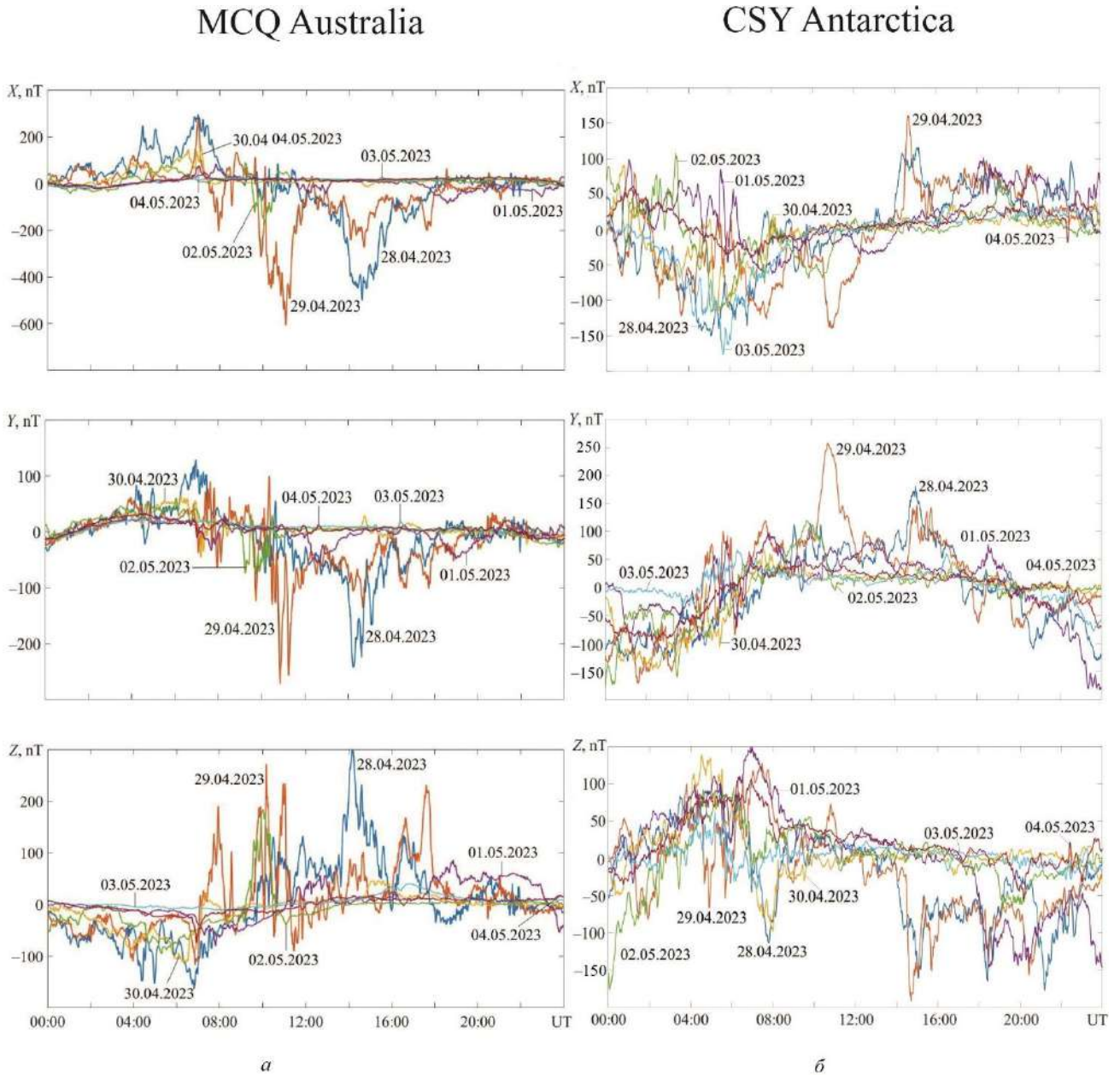


Рис. 3.14. Часові варіації рівня X -, Y - і Z -компонентів: *a* – на станції MCQ; *б* – на станції CSY. Цифри біля кривих показують дні помірних бур та спокійних умов у квітні та травні 2023 р.

Із аналізу табл. 3.4 та 3.5 випливає, що зменшення географічної широти супроводжувалося зменшенням геомагнітної активності. Виключенням є станція MCQ, де варіації рівня геомагнітного поля майже на порядок були більшими, ніж на інших станціях північної півкулі.

Цікаво порівняти дані станцій FRD та PIL, з одного боку, та дані станцій CYG та CNB, з іншого боку, які знаходилися приблизно на однаковій відстані від екватору, але в різних півкулях.

Із табл. 3.4 видно, що величина збурень на станціях FRD та PIL відрізнялася не більше, ніж в 1.1...1.5 рази. Ще меншою була відмінність у варіаціях для станцій CYG і CNB (табл. 3.5). Не суттєво також відрізнялися магнітні збурення для станцій, які мали близькі географічні координати, але знаходилися у західній (FRD, PIL) і східній (CYG, CNB) півкулях.

Оскільки географічні довготи станцій помітно відрізнялися, то і час настання збурень відрізнявся.

Таким чином, на прикладі помірних магнітних бур у порівнянні з контрольними днями оцінено максимальний розмах варіацій компонентів геомагнітного поля у глобальних масштабах. Ці дані можуть використовуватися в якості реперних під час дослідження більш сильних магнітних бур.

Головні результати досліджень.

1. Встановлено, що помірні геомагнітні бурі 28 квітня – 2 травня 2017 року були зумовлені взаємодією магнітосфери Землі з високошвидкісними потоками сонячного вітру коронального походження та областями міжпланетного стискання.

2. Визначено, що основним чинником розвитку бур стала тривала від’ємна компонента міжпланетного магнітного поля B_z , яка забезпечила ефективний енергетичний обмін між сонячним вітром і магнітосферою.

3. Встановлено, що бурі мали помірну інтенсивність (рівень G1–G2), мінімальні значення індексу D_{st} досягали близько $-50...-70$ нТл, максимальні значення індексу K_p становили 5–6, спостерігалось значне зростання індексу AE , що свідчить про активізацію авроральних електрострумів.

4. Бурі мали багатоетапний характер розвитку з чітко вираженими фазами початкового імпульсу, головної фази та відновлення. Відзначено повторюваність активізації, зумовлену структурою потоку сонячного вітру.

5. Виявлено варіації компонент геомагнітного поля, пов'язані з посиленням кільцевого струму та струмів у хвості магнітосфери. Показано, що навіть помірні бурі можуть спричиняти суттєві варіації магнітного поля середніх широт.

3.5. Геомагнітні ефекти бур 4 – 7 листопада 2023 р.

Магнітна буря 4 – 7 листопада 2023 р. мала низку цікавих особливостей, які розглядаються нижче. Головна з них полягає в тому, що буря була багатокроковою. Фактично вона складалася з п'яти окремих бур, найбільшою з яких була буря у другій половині 5 листопада 2023 р. Тривалість багатокрокової бурі становила не менше 5 діб.

У цьому підрозділі описано особливості широтних і довготних проявів багатокрокової геомагнітної бурі 4 – 7 листопада 2023 р., а також проведено порівняльний аналіз з іншими видатними геомагнітними бурями.

Дані та методи. Для аналізу часових варіацій рівня компонент геомагнітного поля залучалися дані вимірювань станцій, що належать до міжнародної мережі INTERMAGNET (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). Перевага надавалася станціям, згрупованим навколо певного меридіана у східній та західній півкулях (рис. 3.15).

Перелік геомагнітних станцій наведено в табл. 3.6 та табл. 3.7.

Аналізу підлягали часові варіації рівнів X -, Y - та Z -компонент геомагнітного поля 2 – 8 листопада 2023 р. Роздільна здатність за амплітудою становила 1 нТл, а за часом – 1 хв. Для отримання варіацій рівня компонент спочатку обчислювалося середнє значення рівня кожної компоненти за відповідну добу, яке потім віднімалося від початкового часового ряду. Далі проводилося порівняння рівня варіацій 4 – 7 листопада 2023 р. з рівнем варіацій у контрольні дні (2, 3 і 8 листопада 2023 р.).

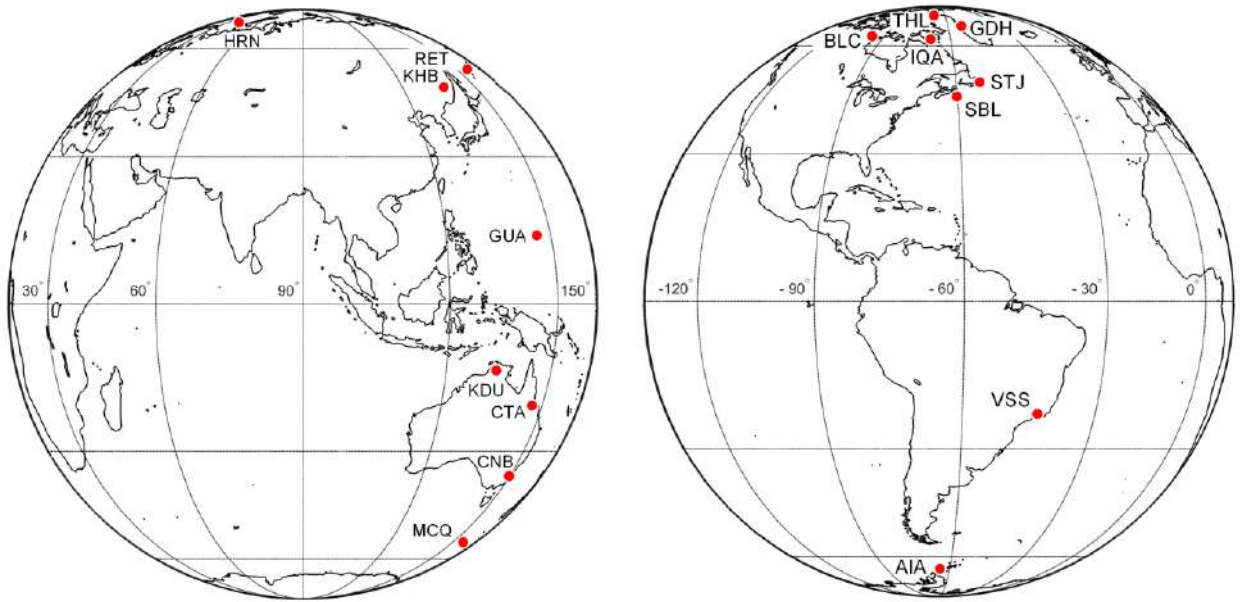


Рис. 3.15. Карта геомагнітних станцій

Стан космічної погоди. До середини доби 4 листопада 2023 р. значення концентрації n_{sw} частинок сонячного вітру не перевищували $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (рис. 3.16). У другій половині доби 4 і 5 листопада 2023 р. Значення n_{sw} перевищували відповідно $52 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$ і $42 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, тобто зросли більш ніж на порядок. Один потужний сплеск n_{sw} і два інші сплески мали місце 4 і 5 листопада 2023 р., а 6 листопада спостерігався слабший сплеск n_{sw} .

Швидкість V_{sw} частинок сонячного вітру 4 листопада 2023 р. флюктувала поблизу значення 400 км/с. Після 08:00 UT (UT – тут і далі всесвітній час) вона, зазнаючи флюктуацій, зроста приблизно до 700–735 км/с. Це зростання тривало щонайменше до кінця доби 8 листопада 2023 р. Швидкість V_{sw} різко змінювалася 5 листопада 2023 р. і двічі збільшувалася 6 листопада 2023 р.

Температура частинок T_{sw} сонячного вітру до початку доби 5 листопада 2023 р. не перевищувала $\sim 10^5 \text{ К}$. 5 – 8 листопада 2023 р. вона, сильно флюктуюючи, зростала до $(3-5) \cdot 10^5 \text{ К}$. Максимальне значення $T_{sw} \approx 5.1 \cdot 10^5 \text{ К}$ було зафіксовано в нічний час 6 листопада 2023 р. 5 і 6 листопада реєструвалася низка сплесків температури частинок сонячного вітру.

Таблиця 3.6.

Загальні відомості про станції Західної півкулі, сходи та заходи Сонця над відповідними координатами

	Станція та країна	Географічні координати, широта/довгота	Геомагнітні координати, широта/довгота	Схід/Захід на висоті 0 км	Схід/Захід на висоті 200 км
1	Qaanaaq (Thule) THL Greenland	77.4700°N, 69.2270°W	+86.59°, +12.69°	(сутінки)	10:27/ 22:15
2	Qeqertarsuaq (Godhavn) GDH Greenland	69.2520°N, 53.5330°W	+77.52°, +32.69°	12:24/ 18:14	09:15/ 21:23
3	Iqaluit IQA Canada	63.7530°N, 68.5180°W	+72.83°, +6.24°	12:35/ 20:03	10:10/ 22:28
4	Baker Lake BLC Canada	64.3180°N, 96.0120°W	+72.31°, -34.65°	14:26/ 21:49	11:59/ 00:16
5	St John's STJ Canada	47.5950°N, 52.6770°W	+55.99°, +24.42°	10:25/ 20:07	08:55/ 21:37
6	Sable Island SBL Canada	43.9321°N, 60.0095°W	+52.74°, +15.14°	10:44/ 20:43	09:20/ 22:07
7	Vassouras VSS Brazil	22.4000°S, 43.6500°W	-14.10°, +27.56°	08:09/ 21:11	07:01/ 22:19
8	Akademik Vernadsky base Faraday Islands AIA Antarctica	65.2450°S, 64.2580°W	-55.91°, +6.30°	07:15/ 00:48	06:10/ 01:52

Розраховані значення тиску p_{sw} сонячного вітру у спокійних умовах не перевищували ~ 1 нПа. Практично синхронно з n_{sw} вони зростали до 11 нПа і 16 нПа відповідно 4 і 5 листопада 2023 р. З 6 по 8 листопада 2023 р. їх значення не перевищували 5 нПа. Різкі сплески p_{sw} (усього 5 сплесків) спостерігалися 4, 5 і 6 листопада 2023 р.

З 2 листопада 2023 р. і до першої половини доби 4 листопада 2023 р. значення проєкцій міжпланетного магнітного поля не перевищували одиниць нТл. Найбільші варіації їх рівня мали місце 5 листопада 2023 р. Значення B_y змінювалися від $-31,8$ нТл до $10,2$ нТл, а значення B_z варіювали від $-23,4$ нТл

до 22,5 нТл. П'ять провалів у значеннях B_z було відзначено 4, 5 і 6 листопада 2023 р.

Значення параметра Акасофу ϵ_A у спокійних умовах флюктували поблизу значення ~ 1 ГДж/с. 5 і 6 листопада 2023 р. загалом було зафіксовано 5 сплесків. Найпотужніші з них досягали значень відповідно 716 і 515 ГДж/с.

До середини доби 4 листопада 2023 р. значення K_p -індексу змінювалися в межах від 0 до 2.3. У другій половині доби 4 листопада 2023 р. його значення суттєво зросли. Максимальне значення 7.3 було зафіксовано 5 листопада 2023 р. П'ять сплесків K_p -індексу спостерігалися 4, 5, 6 і 7 листопада 2023 р.

Таблиця 3.7.

Загальні відомості про станції Східної півкулі, сходи та заходи Сонця над відповідними координатами

	Станція та країна	Географічні координати, широта/довгота	Геомагнітні координати, широта/довгота	Схід/Захід на висоті 0 км	Схід/Захід на висоті 200 км
1	Hornsund HRN Norway	77.0000°N, 15.5500°E	+74.26°, +123.50°	(сутінки)	04:45/ 16:35
2	Paratunka (Petrovlovsk) PET Russia	52.9710°N, 158.2480°E	+46.44° -137.07°	20:36/ 05:44	18:54/ 07:27
3	Khabarovsk KHB Russia	47.6100°N, 134.6900°E	+39.05°, -156.41°	21:53/ 07:34	20:23/ 09:04
4	Guam GUA United States of America	13.5900°N, 144.8700°E	+6.10°, -143.44°	20:16/ 07:49	19:14/ 08:51
5	Kakadu KDU Australia	12.6900°S, 132.4700°E	-20.96°, -153.66°	20:34/ 09:11	19:32/ 10:14
6	Charters Towers CTA Australia	20.0900°S, 146.2640°E	-27.05° -138.47°	19:31/ 08:26	18:25/ 09:32
7	Canberra CNB Australia	35.3200°S, 149.3600°E	-41.75°, -132.81°	18:54/ 08:37	17:35/ 09:57
8	Macquarie Island MCQ Australia	54.5000°S, 158.9500°E	-59.32°, -116.38°	17:23/ 08:48	14:57/ 11:14

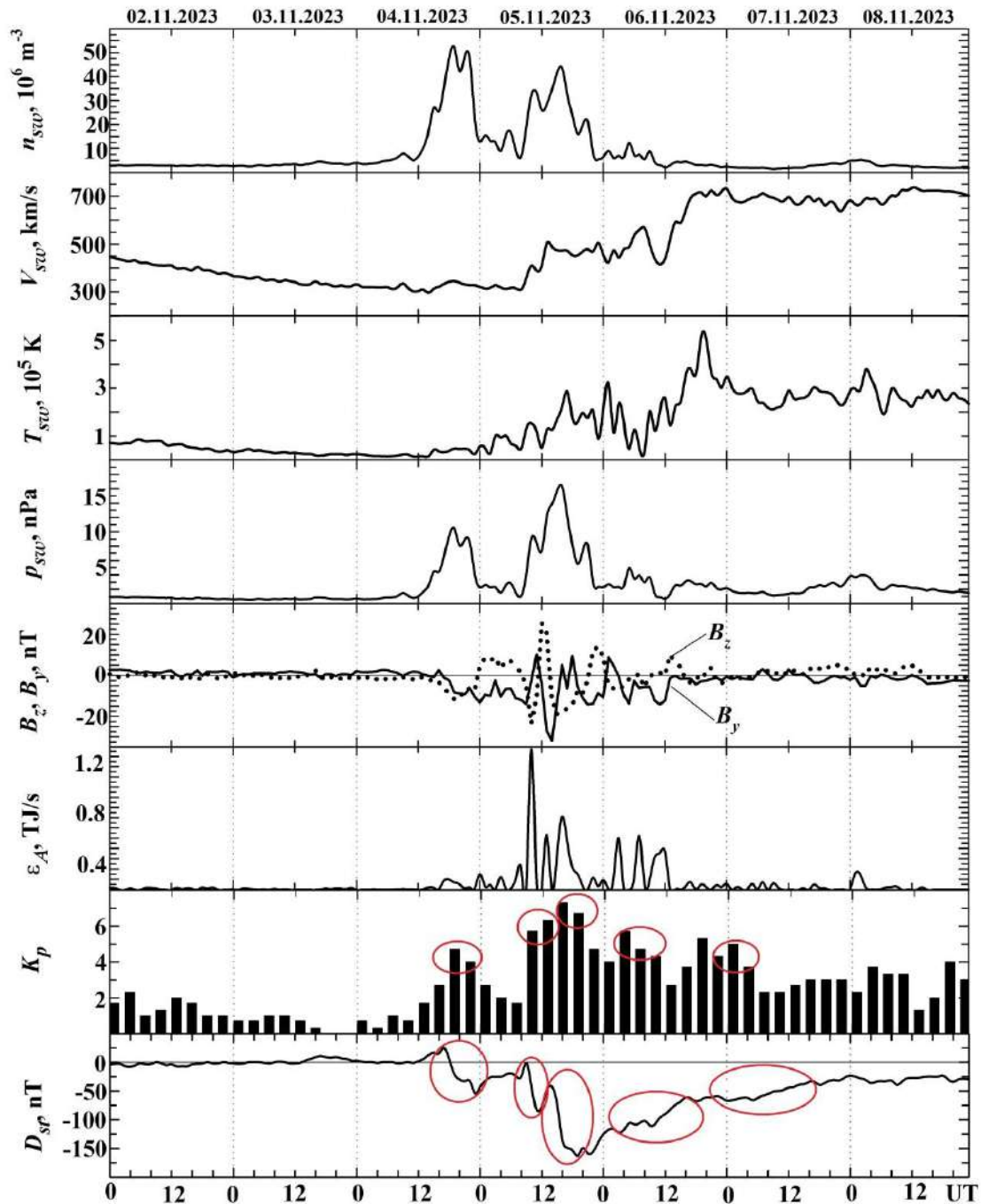


Рис. 3.16. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) у період з 2 по 8 листопада 2023 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

До першої половини доби 4 листопада 2023 р. значення D_{st} -індексу флюктуювали в межах $\pm(10-15)$ нТл. Після незначного (до 14 нТл) збільшення цього індексу з 12:00 до 16:00 4 листопада 2023 р. спостерігалось досить різке перше зменшення D_{st} -індексу до -62 нТл. Після значних флюктуацій з 14:00 до 16:00 відбулося друге, більш суттєве, зменшення індексу – від -50 нТл до -172 нТл. Мала місце головна фаза магнітної бурі. Після 22:00 5 листопада 2023 р. розпочалась фаза відновлення, яка тривала до 8 листопада 2023 р.

Значне багаторазове зменшення рівнів B_z і D_{st} , а також істотне збільшення параметра Акасофу та індексу K_p свідчили про те, що на Землі розпочалась багатокрокова геомагнітна буря. Далі ці складові бурі розглянемо детальніше.

Головною особливістю геокоосмічної та магнітної бурі 4–7 листопада 2023 р. було те, що мали місце неодноразові сплески параметрів сонячного вітру й геомагнітного поля. Загалом виділено п'ять сплесків і стільки ж падінь D_{st} -індексу, які супроводжувалися п'ятьма сплесками значень K_p -індексу (табл. 3.8). Із цього випливає, що геомагнітна буря 4–7 листопада 2023 р. була багатокроковою.

Результати аналізу. Розглянемо часові варіації всіх трьох компонент геомагнітного поля окремо для східної та західної півкуль. Почнемо зі східної півкулі. Розглянемо магнітні бурі за датами (табл. 3.8).

Магнітна буря 4 листопада 2023 р. Для всіх станцій ця буря припала на перехідний період доби від ночі до дня. На високоширотній станції HRN розмах варіацій рівня X -, Y - та Z -компонент геомагнітного поля становив приблизно 160 нТл, 120 нТл і 120 нТл відповідно (рис. 3.17). На середньоширотній станції PET розмах не перевищував 70 нТл, 40 нТл і 25 нТл відповідно (рис. 3.18). На іншій середньоширотній станції КНВ розмах цих самих компонент був близьким до 85 нТл, 40 нТл і 15 нТл (рис. 3.19). Для низькоширотної станції GUA розмах становив 50 нТл, 15 нТл і 20 нТл (рис. 3.20). Для іншої низькоширотної станції KDU, яка розташована на близькій

географічній широті, але зміщена за довготою приблизно на 1300 км, розмах варіацій не перевищував 25 нТл, 15 нТл і 25 нТл відповідно (рис. 3.21).

Таблиця 3.8.

Розмах варіацій рівня компонент геомагнітного поля на станціях східної півкулі 4–7 листопада 2023 р.

Станція	Компонента	4 листопада	5 листопада	5 листопада	6 листопада	7 листопада
HRN	X	160	240	480	120	600
	Y	120	200	600	80	300
	Z	120	180	330	360	360
PET	X	70	100	180	35	30
	Y	40	120	200	60	15
	Z	25	25	180	15	25
KHB	X	85	170	170	50	50
	Y	40	100	125	40	25
	Z	15	25	45	20	15
GUA	X	50	160	130	70	50
	Y	15	30	50	40	25
	Z	20	30	30	55	20
KDU	X	25	160	160	25	60
	Y	15	25	55	15	10
	Z	25	15	30	15	15
СТА	X	60	150	135	50	40
	Y	90	55	75	60	60
	Z	20	20	30	5	10
CNB	X	60	130	170	70	70
	Y	70	90	140	30	15
	Z	25	40	65	20	15
MCQ	X	120	450	1100	500	250
	Y	100	200	800	100	100
	Z	120	400	900	200	100

Далі розглянемо станції, розташовані в південній півкулі. Для низькоширотної станції СТА розмах варіацій був близьким до 60 нТл, 90 нТл і 20 нТл (рис. 3.22). Для середньоширотної станції CNB розмах варіацій досягав таких значень: 60 нТл, 70 нТл і 25 нТл для X-, Y- та Z-компонент відповідно (рис. 3.23). На іншій середньоширотній станції MCQ розмах варіацій був суттєво більшим: 120 нТл, 100 нТл і 120 нТл (рис. 3.24).

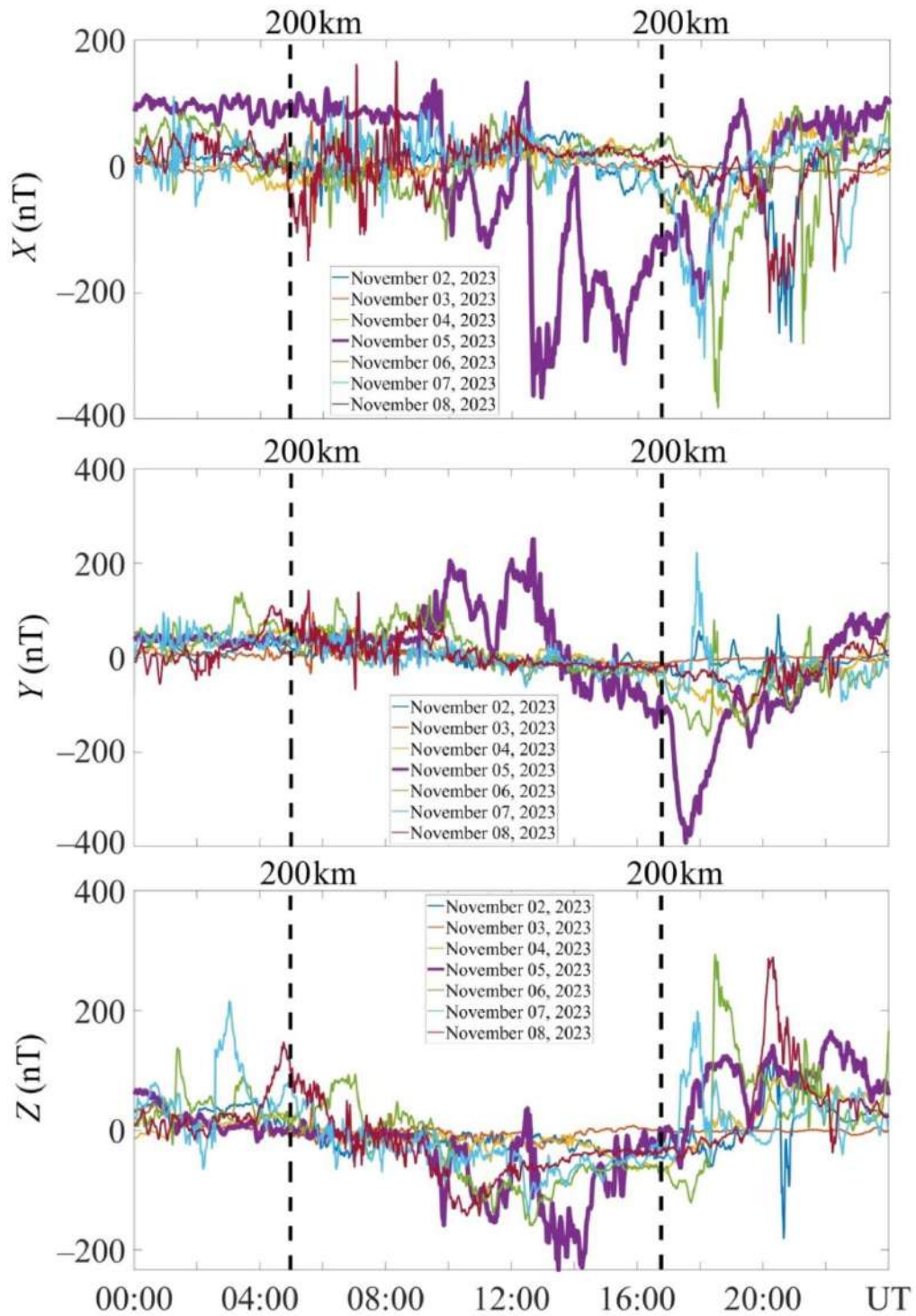


Рис. 3.17. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції HRN у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

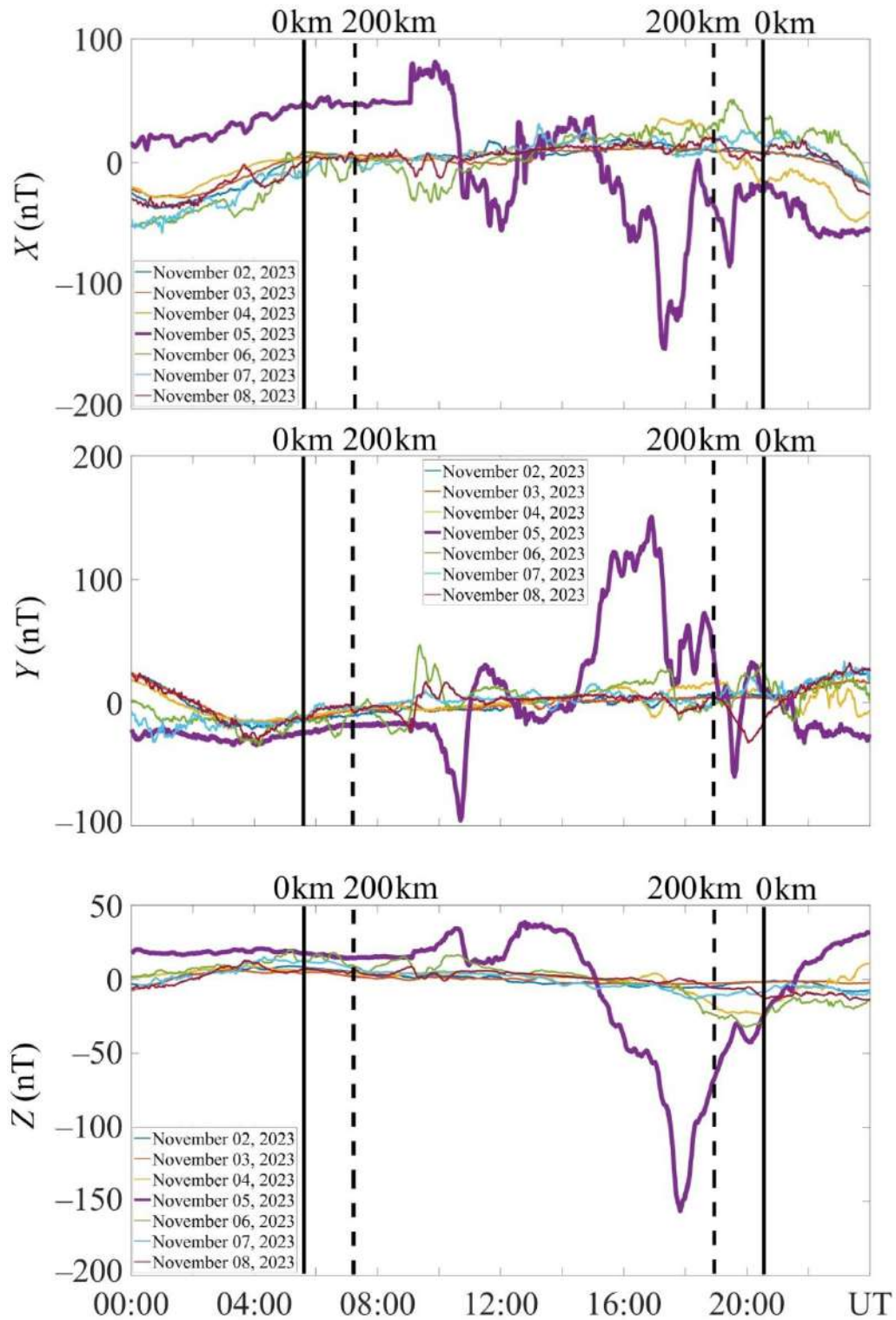


Рис. 3.18. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції РЕТ у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

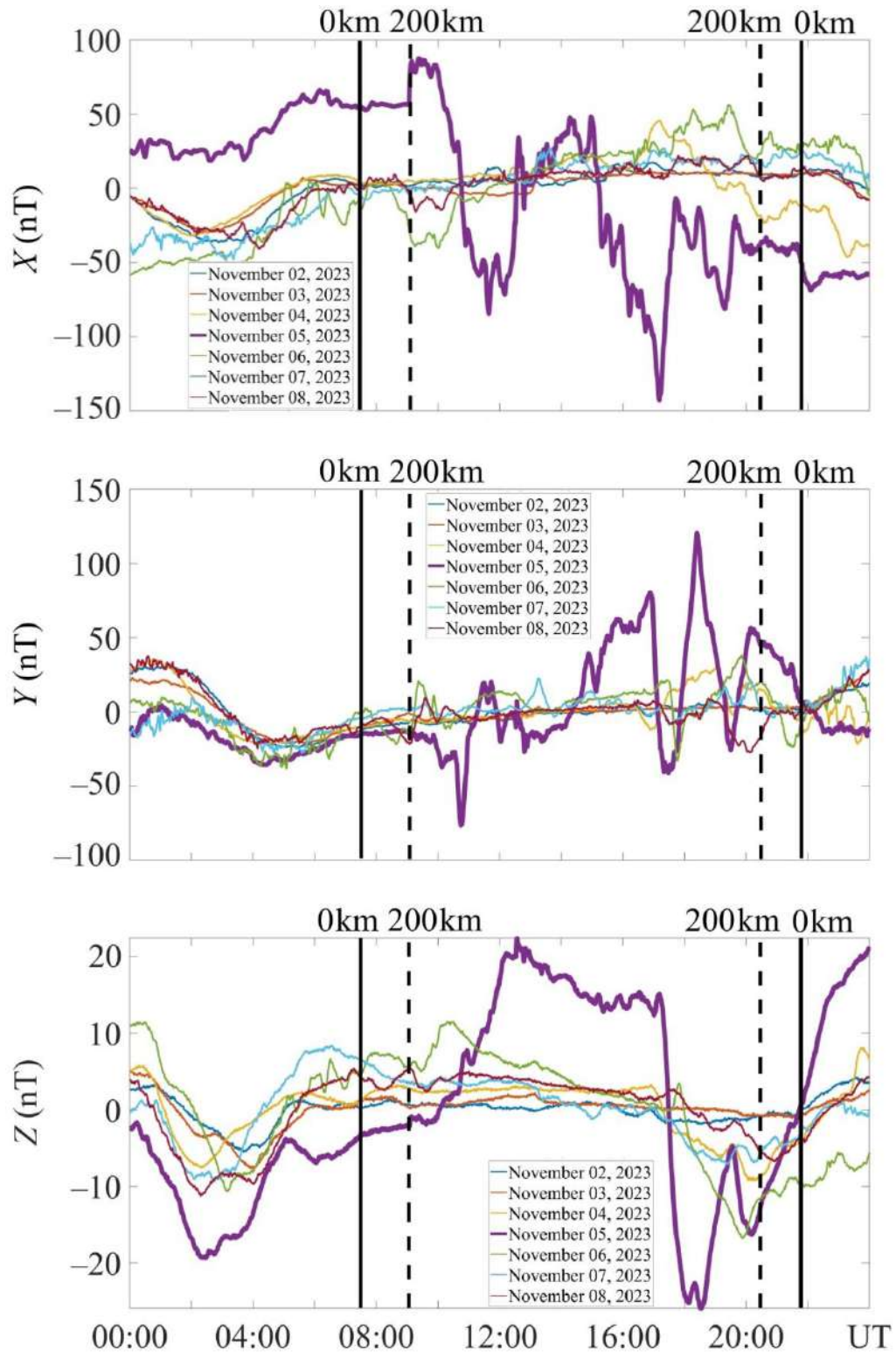


Рис. 3.19. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції КНВ у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

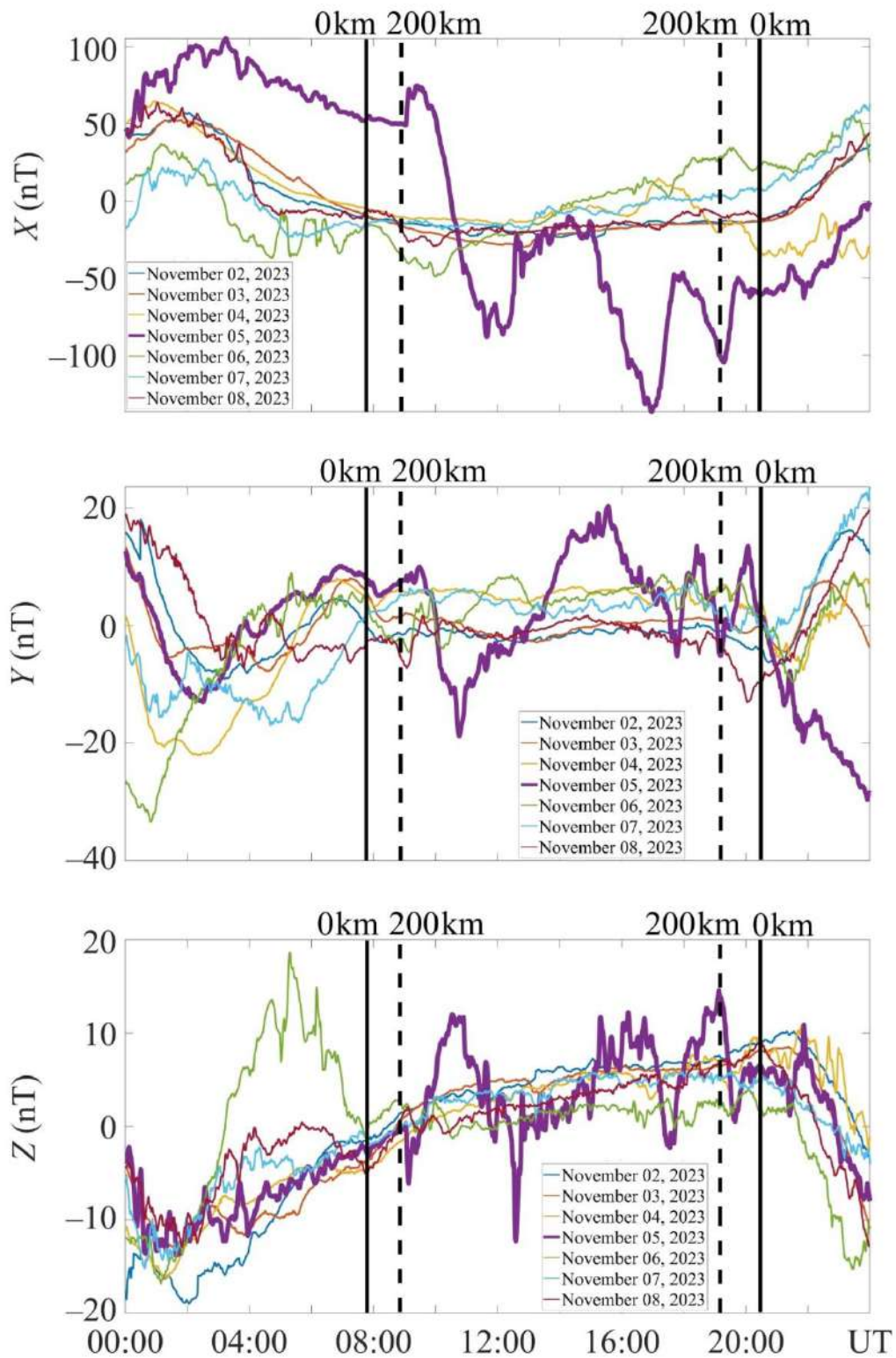


Рис. 3.20. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції GUA у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

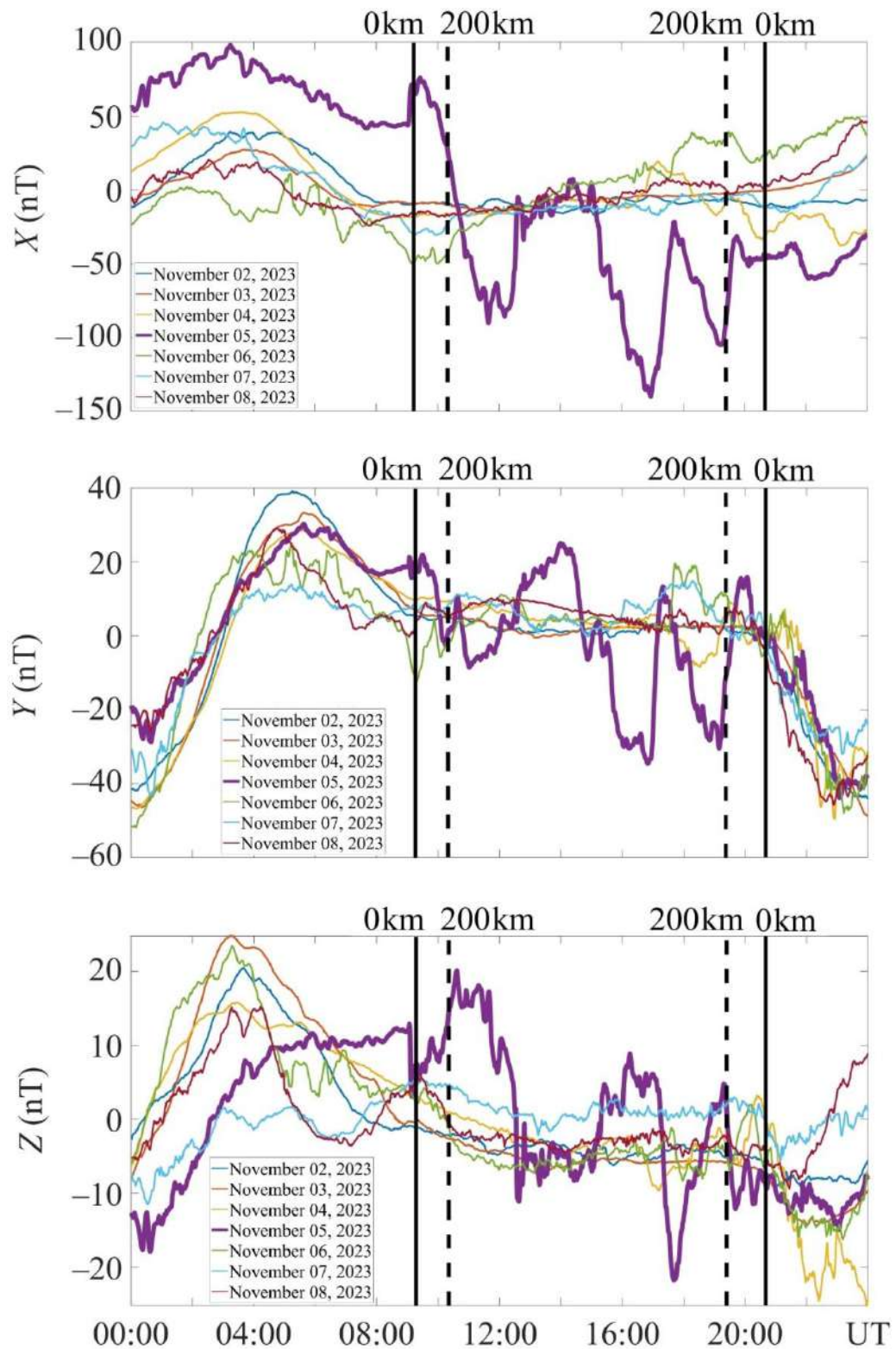


Рис. 3.21. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції KDU у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

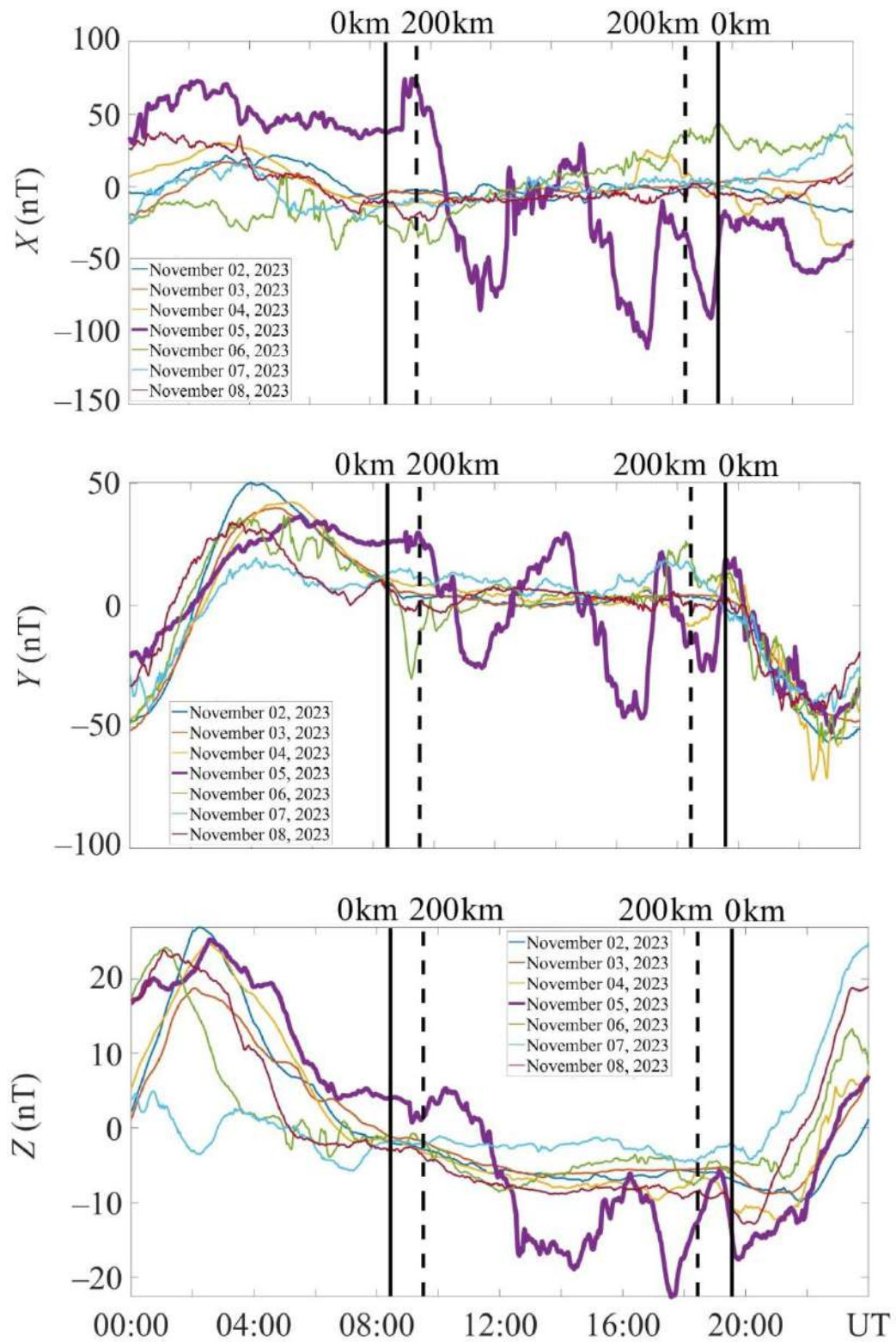


Рис. 3.22. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції СТА у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

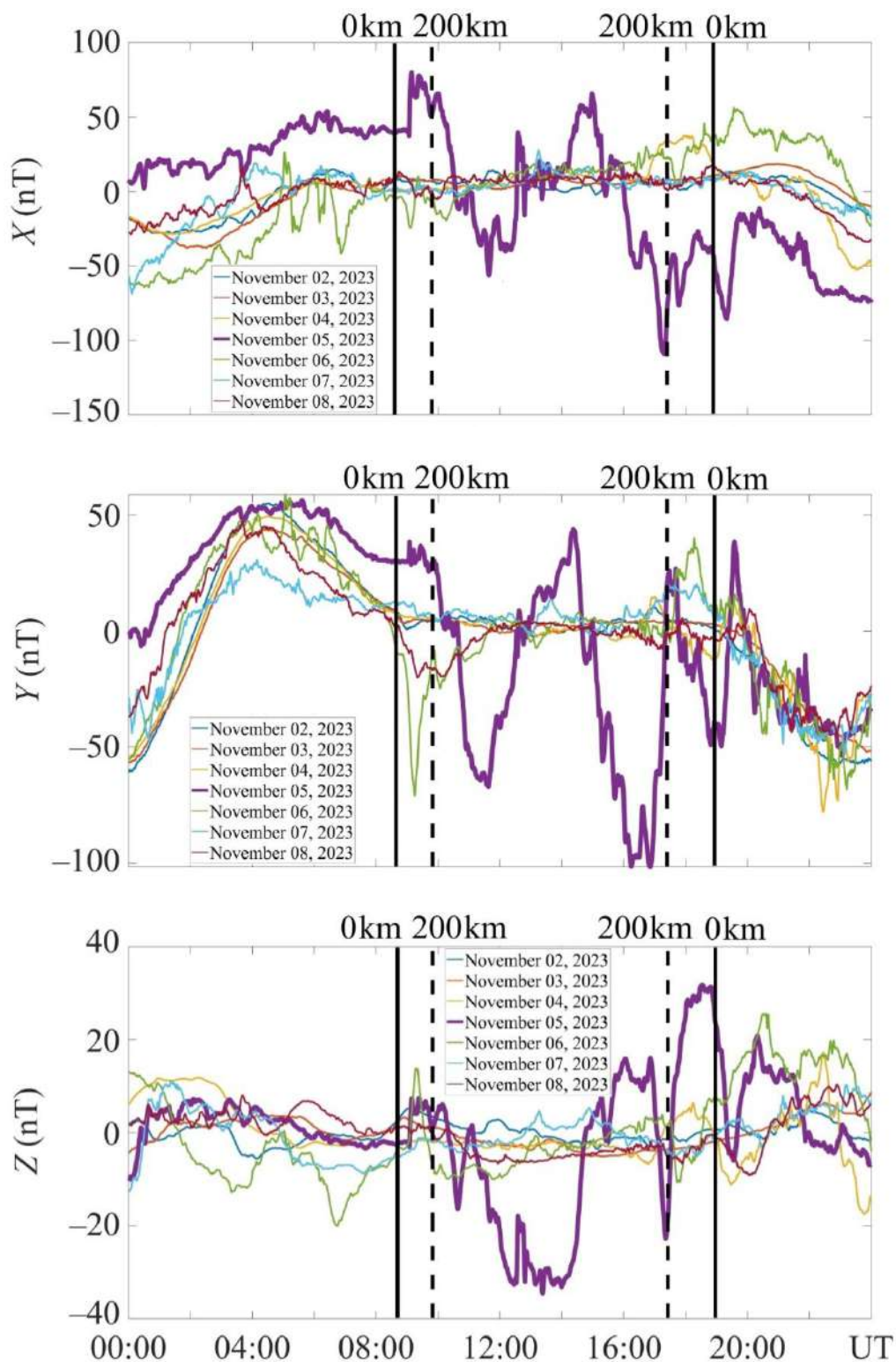


Рис. 3.23. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції CNB у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

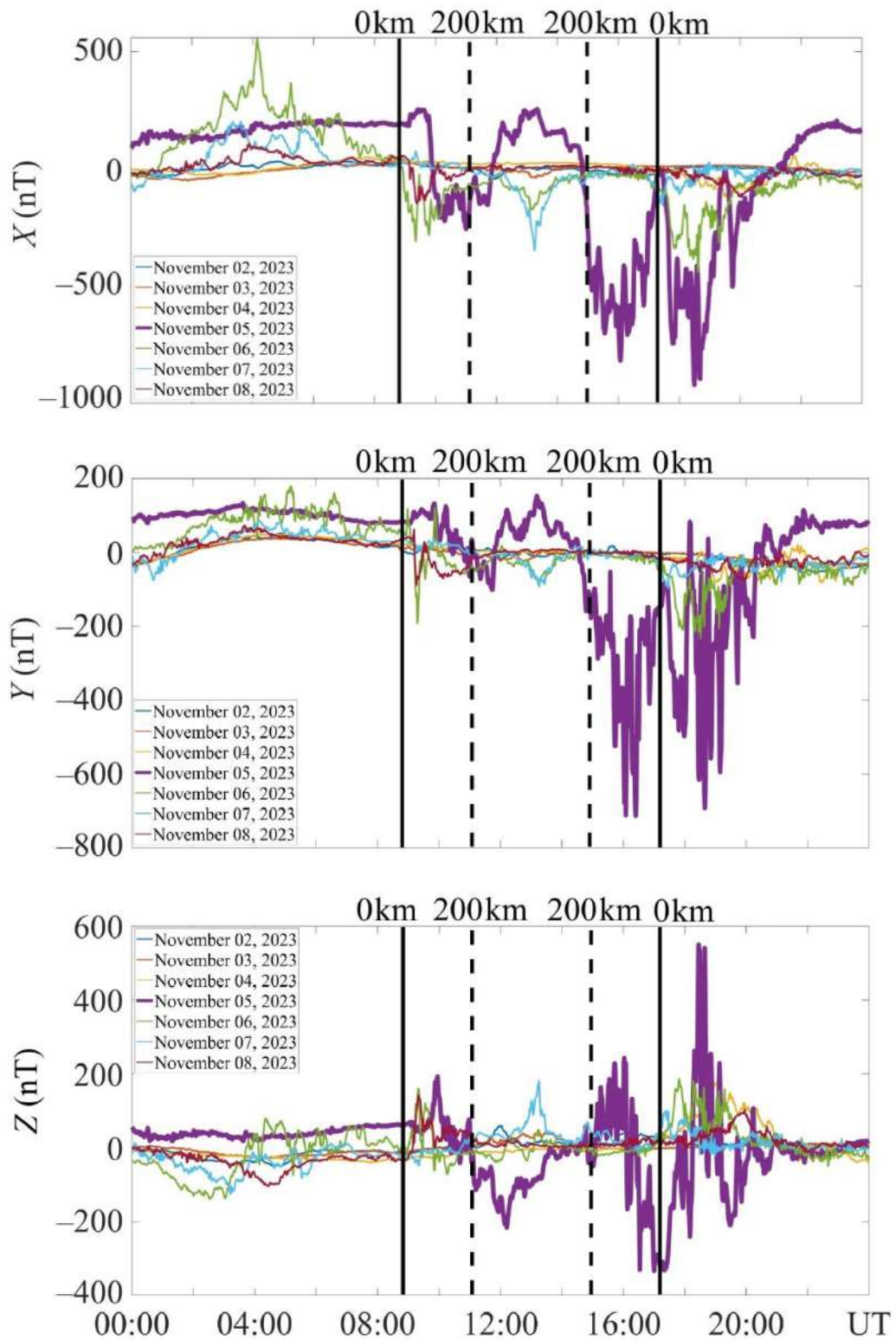


Рис. 3.24. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції MCQ у східній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

Магнітна буря 5 листопада 2023 р. (перша). 5 листопада 2023 р. мали місце дві бурі: перша – приблизно з 09:00 до 11:00, а друга – приблизно з 13:00 до 16:00. Спочатку розглянемо першу з них.

На станції HRN розмах варіацій рівня геомагнітного поля для X -, Y - та Z -компонент не перевищував відповідно 240 нТл, 200 нТл і 180 нТл (рис. 3.17). На станції PET він становив 100 нТл, 120 нТл і 25 нТл (рис. 3.18). Розмах варіацій на станції КНВ досягав 170 нТл, 100 нТл і 25 нТл (рис. 3.19). На станції GUA розмах був близьким до 160 нТл, 30 нТл і 30 нТл (рис. 3.20). На станції KDU він не перевищував 160 нТл, 25 нТл і 15 нТл (рис. 3.21).

У південній півкулі на станції СТА розмах варіацій становив 150 нТл, 55 нТл і 20 нТл (рис. 3.22). На станції CNB він досягав 130 нТл, 90 нТл і 40 нТл (рис. 2.23). На найпівденнішій станції MCQ розмах варіацій був близьким до 450 нТл, 200 нТл і 400 нТл (рис. 3.24).

Магнітна буря 5 листопада 2023 р. (друга). На високоширотній станції HRN розмах варіацій рівня геомагнітного поля досягав 480 нТл, 600 нТл і 330 нТл для X -, Y - та Z -компонент (рис. 3.17). На станції PET він не перевищував 180 нТл, 200 нТл і 180 нТл (рис. 3.18). Розмах варіацій на станції КНВ був близьким до 170 нТл, 125 нТл і 45 нТл (рис. 3.19). Для низькоширотної станції GUA він становив 130 нТл, 50 нТл і 30 нТл (рис. 3.20). На станції KDU розмах досягав 160 нТл, 55 нТл і 30 нТл (рис. 3.21). Для південноширотної станції СТА він перебував у межах 135 нТл, 75 нТл і 30 нТл (рис. 3.22). На станції CNB розмах не перевищував 170 нТл, 140 нТл і 65 нТл (рис. 3.23). Для найпівденнішої станції MCQ він становив близько 1100 нТл, 800 нТл і 900 нТл (рис. 3.24).

Магнітна буря 6 листопада 2023 р. На станції HRN, розташованій у високих широтах, розмах варіацій рівня геомагнітного поля був близьким до 120 нТл, 80 нТл і 360 нТл для X -, Y - та Z -компонент відповідно (рис. 3.17). На станції PET він становив 35 нТл, 60 нТл і 15 нТл, тобто був суттєво меншим (рис. 3.18). Розмах варіацій на станції КНВ не перевищував 50 нТл, 40 нТл і 20 нТл (рис. 3.19). На станції GUA він перебував у межах 70 нТл, 40 нТл і

55 нТл (рис. 3.20). Для станції KDU розмах не перевищував 25 нТл, 15 нТл і 15 нТл (рис. 3.21).

Далі розглянемо станції в південній півкулі. На станції СТА розмах варіацій був близьким до 50 нТл, 60 нТл і 5 нТл (рис. 3.22). Для станції CNB він становив 70 нТл, 30 нТл і 20 нТл (рис. 3.23). На станції MCQ розмах був найбільшим – 500 нТл, 100 нТл і 200 нТл (рис. 3.24).

Магнітна буря 7 листопада 2023 р. Строго кажучи, ця буря розпочалася близько 22:00 6 листопада 2023 р. На високоширотній станції HRN розмах варіацій рівня геомагнітного поля досягав 600 нТл, 300 нТл і 360 нТл для X-, Y- та Z-компонент (рис. 3.17). На середньоширотних станціях PET і KHV він був помітно меншим. На станції PET розмах не перевищував 30 нТл, 15 нТл і 25 нТл (рис. 3.18), а на станції KHV перебував у межах 50 нТл, 25 нТл і 15 нТл (рис. 3.19). На низькоширотних станціях розмах був близьким до 50 нТл, 25 нТл і 20 нТл для станції GUA (рис. 3.20) та 60 нТл, 10 нТл і 15 нТл для станції KDU (рис. 3.21). Для станцій СТА і CNB він становив близько 40 нТл, 60 нТл і 10 нТл (рис. 3.22), а також 70 нТл, 15 нТл і 15 нТл (рис. 3.23) відповідно. Як і в інші дні, на станції MCQ розмах був суттєво більшим — він досягав 250 нТл, 100 нТл і 100 нТл (рис. 3.24).

Тепер перейдемо до західної півкулі. Опишемо магнітні бурі окремо для 4, 5, 6 і 7 листопада 2023 р. (табл. 3.9).

Магнітна буря 4 листопада 2023 р. На високоширотній станції THL розмах рівня варіацій геомагнітного поля наближався до 130 нТл, 100 нТл та 50 нТл для X-, Y- та Z-компонент відповідно (рис. 3.25). Станції GDH, IQA та VLC також належать до високоширотних. На станціях GDH, IQA та VLC розмах варіацій досягав 200 нТл, 180 нТл та 25 нТл (рис. 3.26), 150 нТл, 120 нТл та 240 нТл (рис. 3.27) та 300 нТл, 120 нТл і 350 нТл (рис. 3.28) відповідно. На середньоширотних станціях STJ та SBL він не перевищував 100 нТл, 30 нТл та 25 нТл (рис. 3.29) та 25 нТл, 90 нТл і 8 нТл (рис. 3.30) відповідно.

Таблиця 3.9.

Розмах варіацій рівня компонент геомагнітного поля на станціях західної півкулі 4–7 листопада 2023 р.

Станція	Компонента	Дні листопада 2023 г.				
		04	05	05	06	07
THL	X	130	130	530	270	130
	Y	100	375	450	275	150
	Z	50	100	425	100	125
GDH	X	200	200	760	350	270
	Y	180	360	540	230	240
	Z	250	230	460	280	520
IQA	X	150	450	1100	450	450
	Y	120	240	530	300	420
	Z	240	180	660	500	240
BLC	X	300	180	510	510	400
	Y	120	260	400	300	210
	Z	350	450	650	550	400
STJ	X	50	70	150	80	30
	Y	100	100	140	120	90
	Z	30	100	210	110	60
SBL	X	25	75	180	50	35
	Y	90	100	130	75	100
	Z	8	20	110	35	5
VSS	X	120	60	300	30	15
	Y	20	25	80	25	10
	Z	30	20	80	10	15
AIA	X	50	125	160	50	40
	Y	100	100	150	60	30
	Z	60	100	200	75	50

Для станцій VSS і AIA, розташованих у південній півкулі, розмах варіацій становив близько 120 нТл, 20 нТл і 30 нТл (рис. 3.31) та 50 нТл, 100 нТл і 60 нТл (рис. 3.32) відповідно.

Магнітна буря 5 листопада 2023 р. (перша). На станції THL розмах варіацій досягав 130 нТл, 375 нТл і 100 нТл (рис. 3.25). На інших високоширотних станціях GDH, IQA та BLC він становив відповідно 200 нТл, 360 нТл і 230 нТл (рис. 3.26), 450 нТл, 240 нТл і 180 нТл (рис. 3.27)

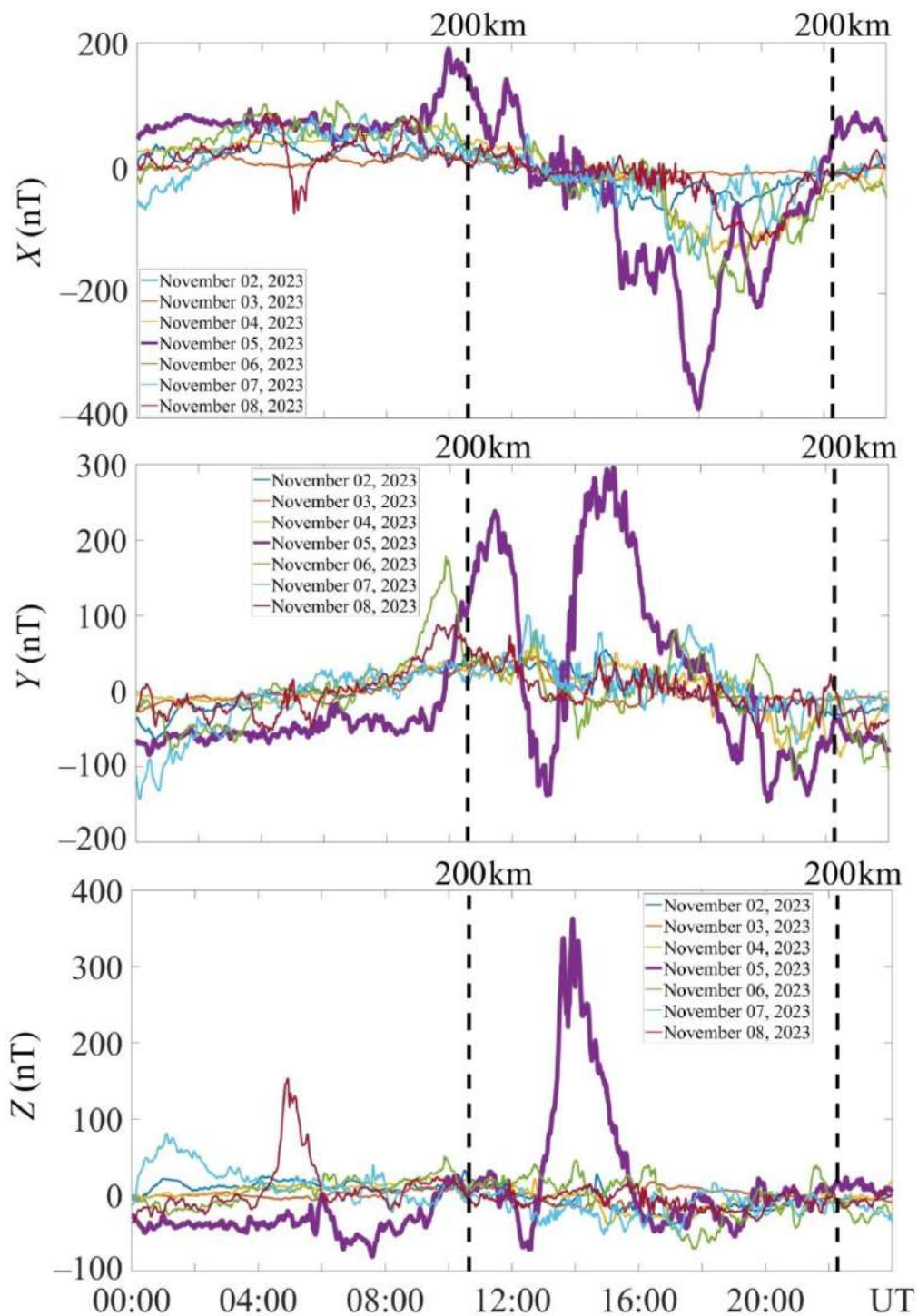


Рис. 3.25. Часові варіації X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля для станції THL у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

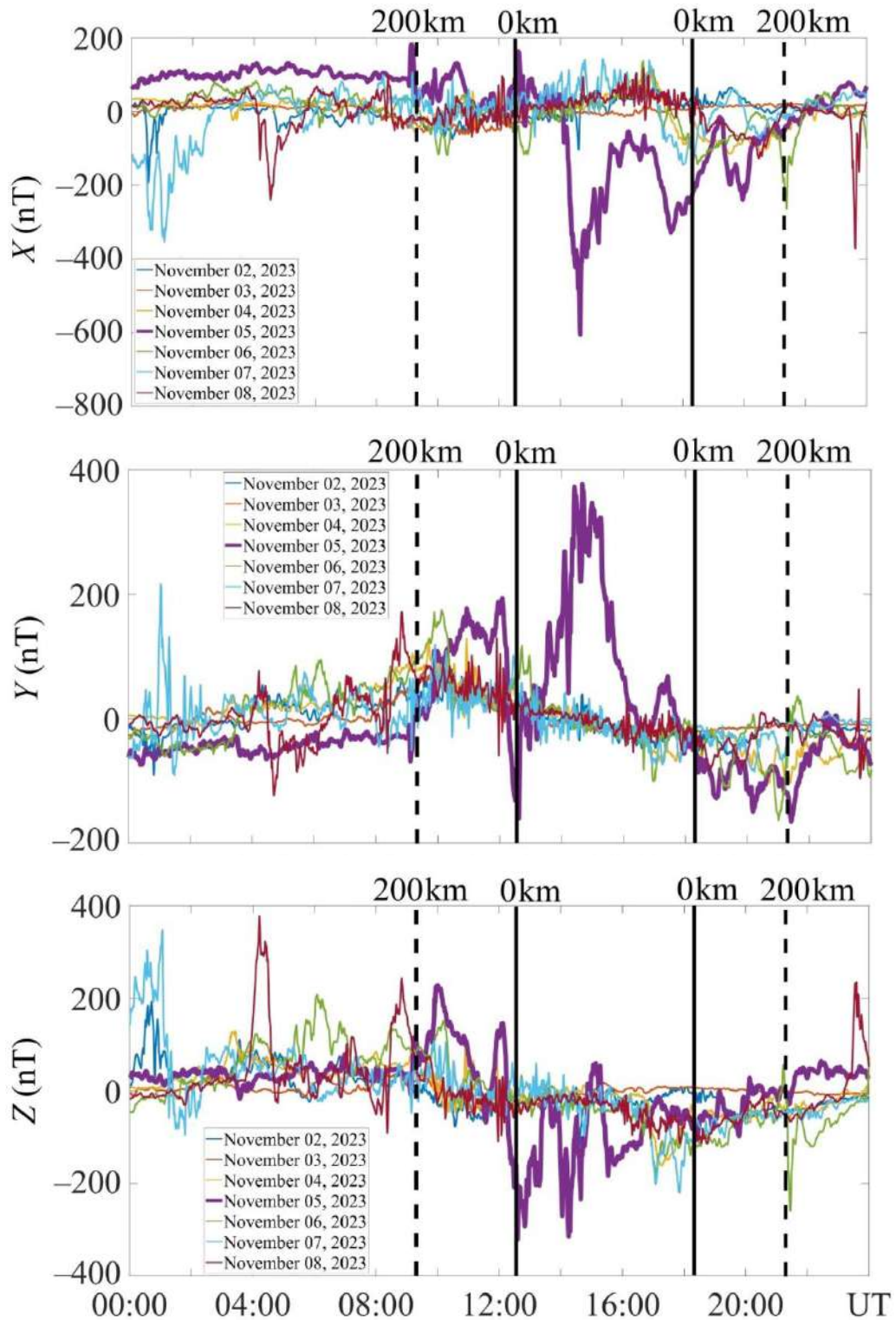


Рис. 3.26. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції GDH у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

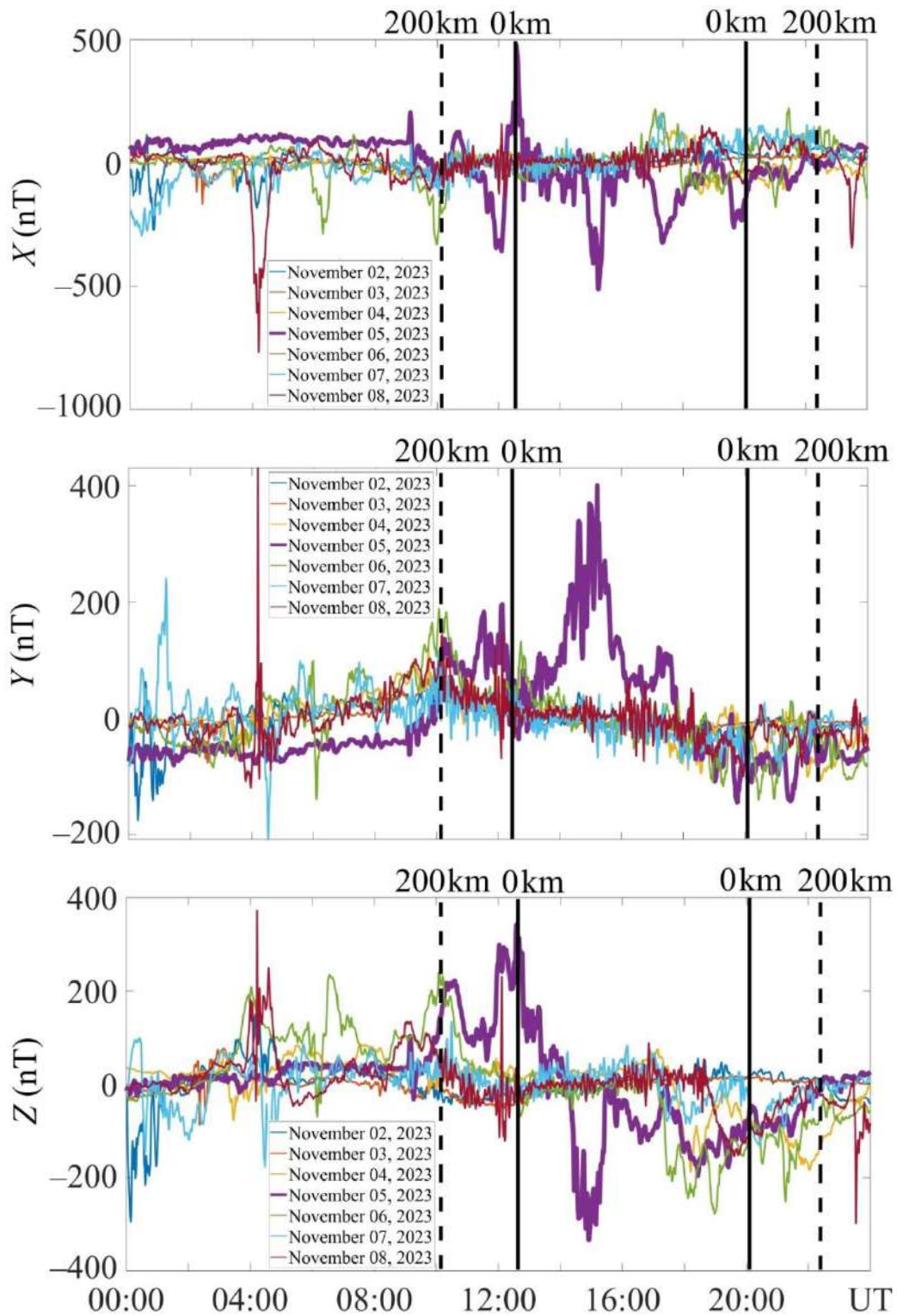


Рис. 3.27. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції IQA у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

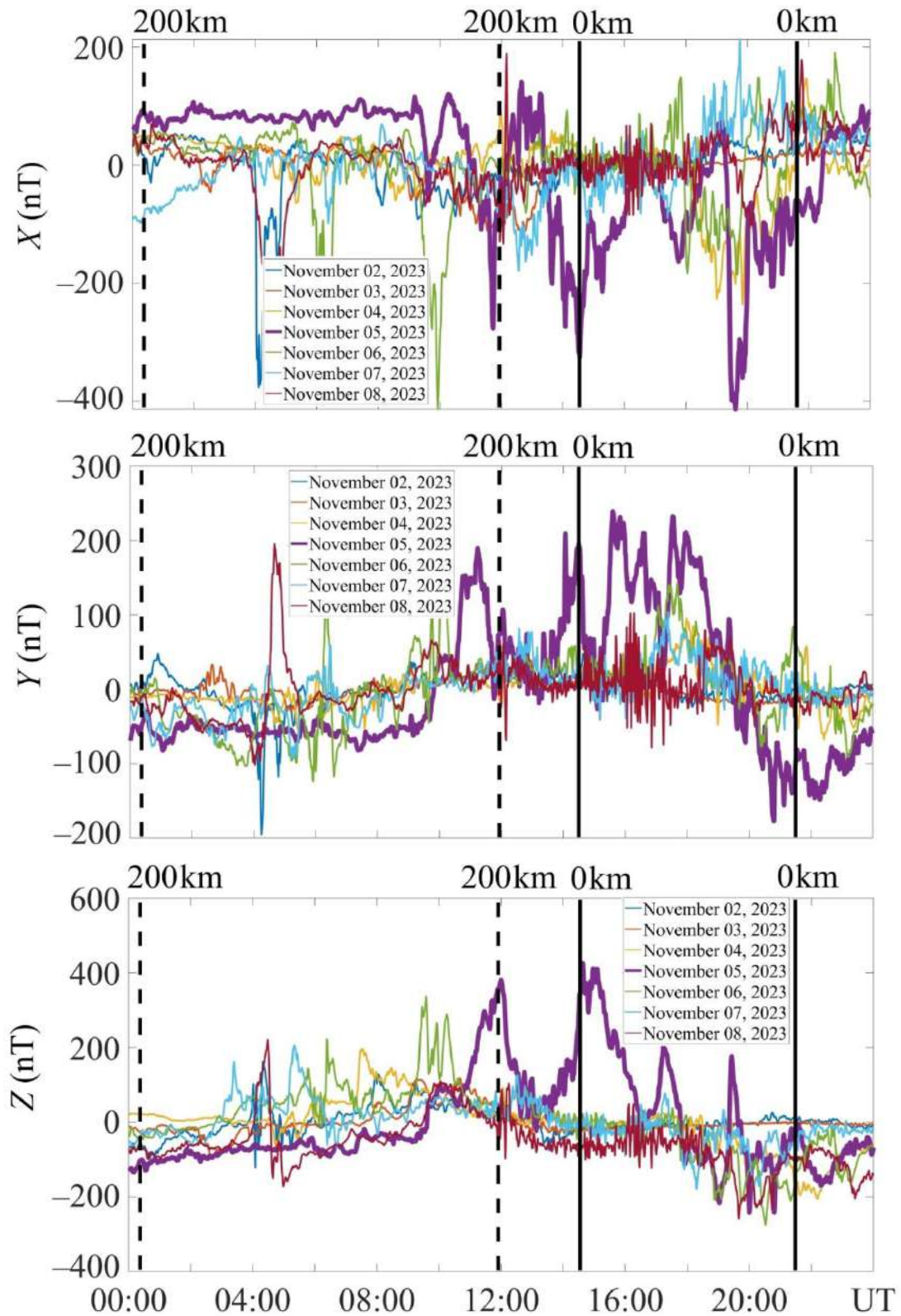


Рис. 3.28. Часові варіації X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля для станції VLC у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

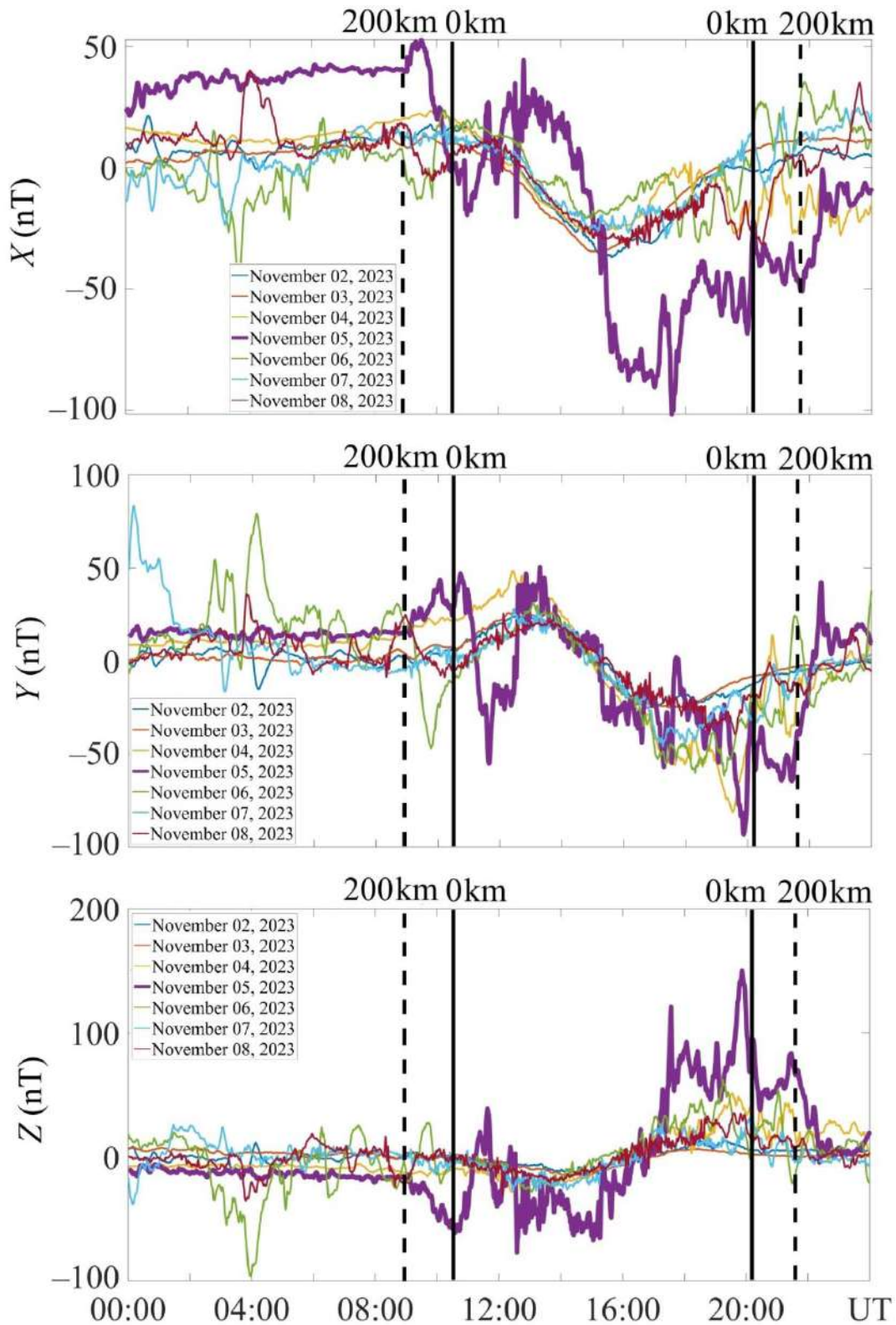


Рис. 3.29. Часові варіації X-, Y- і Z-компонент геомагнітного поля для станції STJ у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

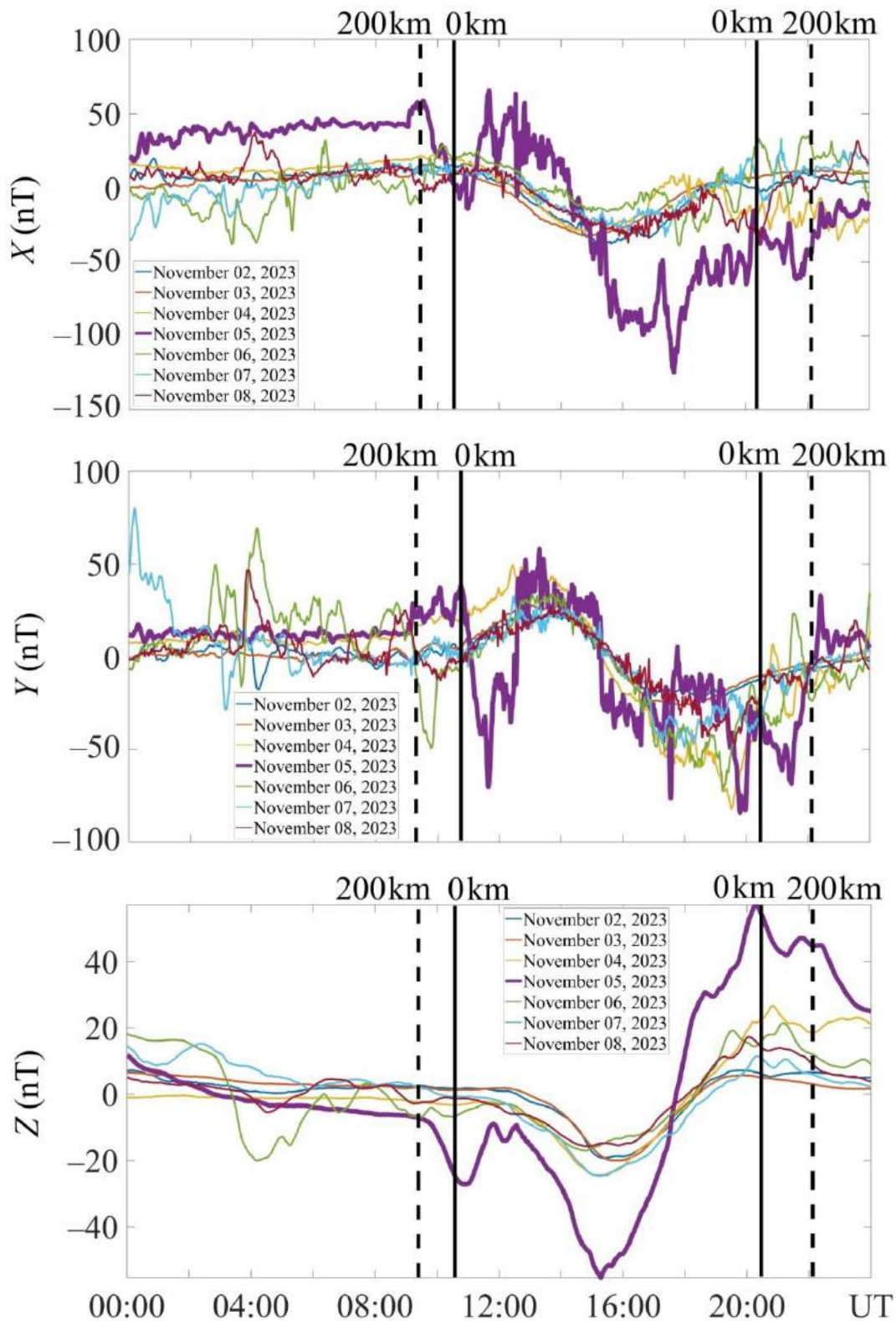


Рис. 3.30. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції SBL у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

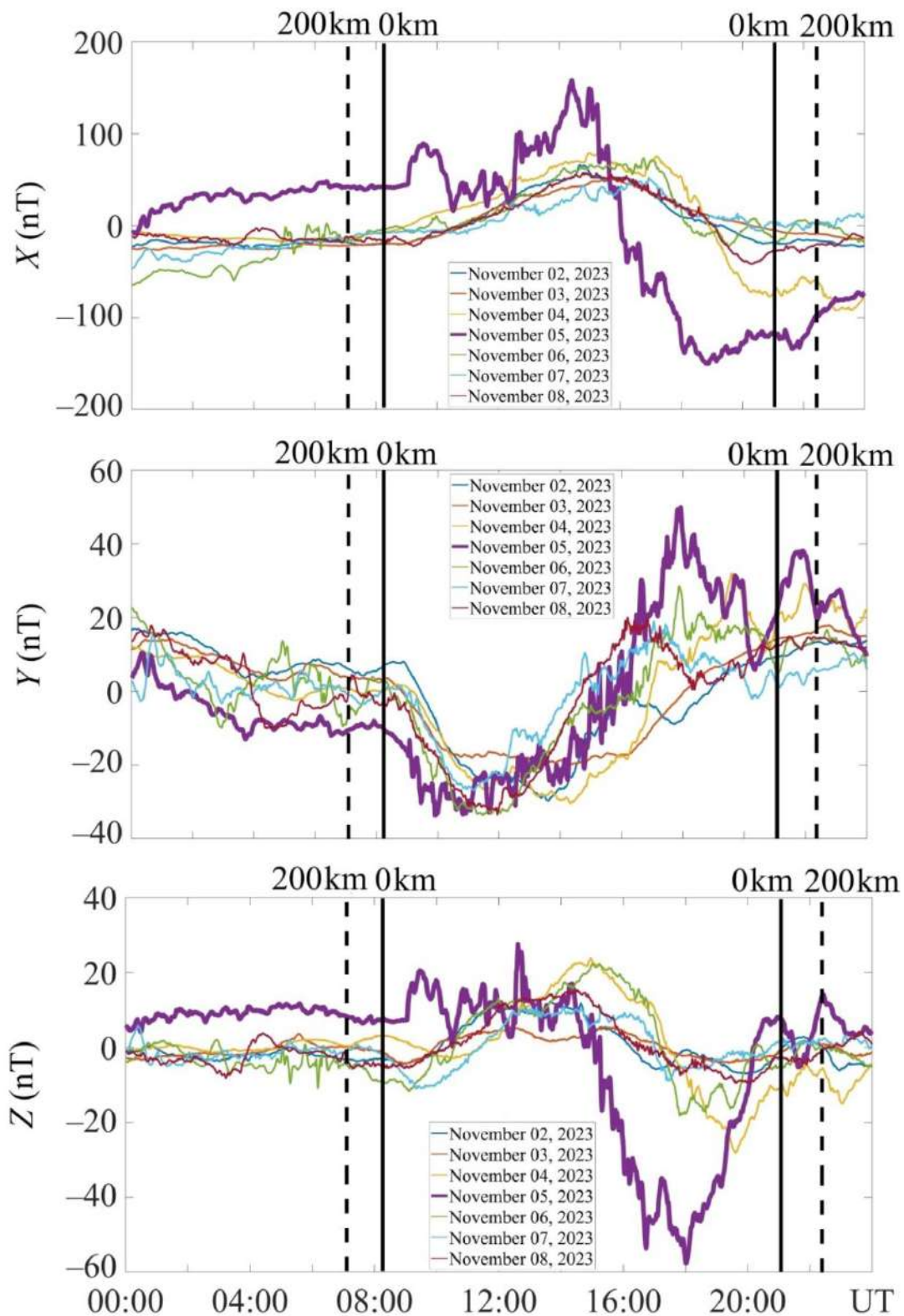


Рис. 3.31. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції VSS у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

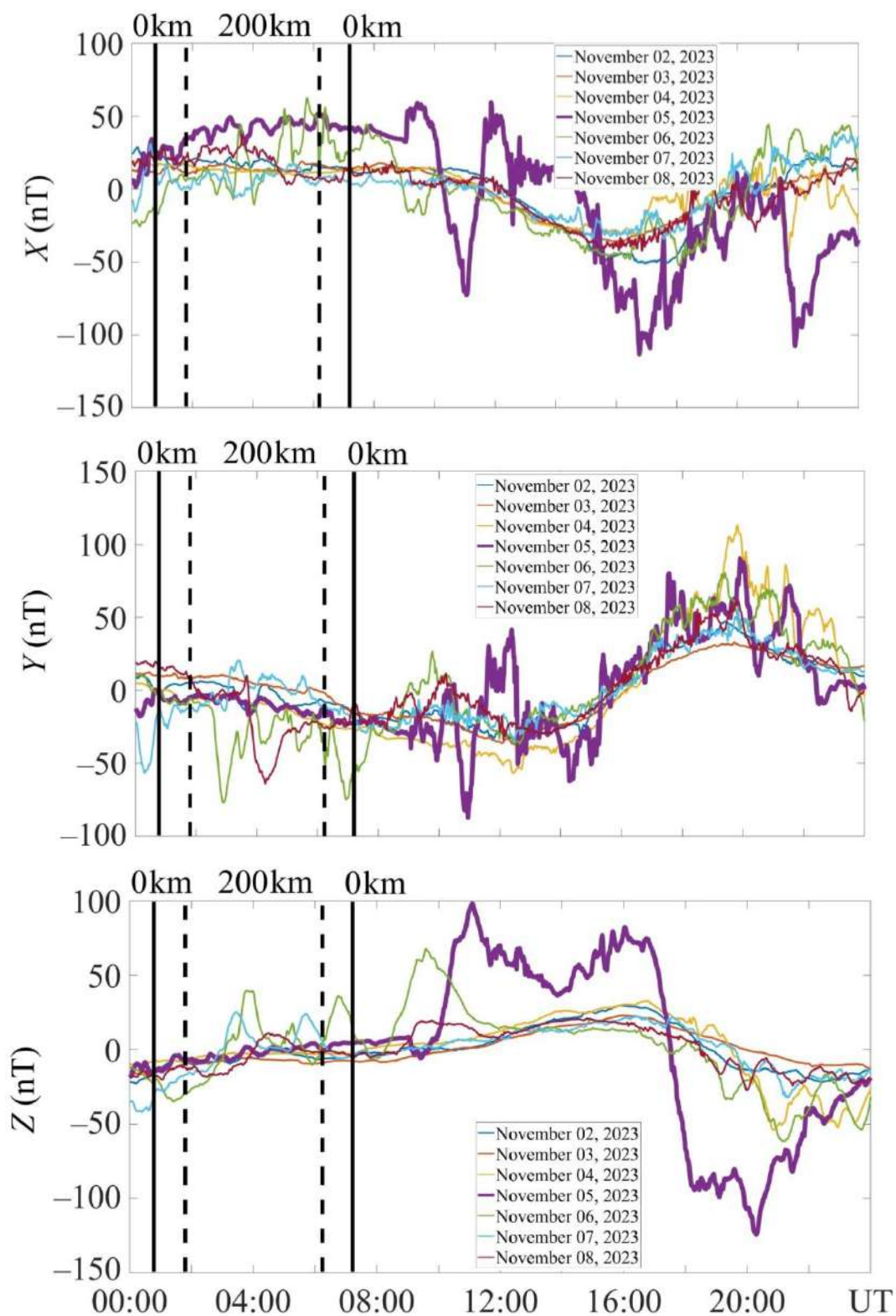


Рис. 3.32. Часові варіації X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля для станції AIA у західній півкулі 2 – 8 листопада 2023 р. Суцільними вертикальними лініями показано моменти сходу та заходу Сонця на рівні Землі, а пунктирними – в іоносфері на висоті 200 км

та 180 нТл, 260 нТл і 450 нТл (рис. 3.28). На середньоширотних станціях STJ і SBL розмах не перевищував відповідно 70 нТл, 100 нТл і 100 нТл (рис. 3.29) та 75 нТл, 100 нТл і 20 нТл (рис. 3.30).

Для станцій VSS і AIA він становив відповідно 60 нТл, 25 нТл і 20 нТл (рис. 3.31) та 125 нТл, 100 нТл і 100 нТл (рис. 3.32).

Магнітна буря 5 листопада 2023 р. (друга). У високих широтах на станції THL розмах варіацій рівня геомагнітного поля був значним і становив 530 нТл, 450 нТл і 425 нТл для X-, Y- та Z-компонент відповідно (рис. 3.25). Ще більшим він був на станціях GDH, IQA та VLC, а саме 760 нТл, 540 нТл і 460 нТл (рис. 3.26), 1100 нТл, 530 нТл і 660 нТл (рис. 3.27) та 510 нТл, 400 нТл і 650 нТл (рис. 3.28) відповідно.

Для середньоширотних станцій STJ і SBL розмах був помітно меншим, а саме 150 нТл, 140 нТл і 210 нТл (рис. 3.29) та 180 нТл, 130 нТл і 110 нТл (рис. 3.30) відповідно.

Для станцій VSS і AIA він становив 60 нТл, 25 нТл і 20 нТл (рис. 3.31) та 125 нТл, 100 нТл і 100 нТл (рис. 3.32) відповідно.

Магнітна буря 5 листопада 2023 р. (друга). У високих широтах на станції THL розмах варіацій рівня геомагнітного поля був значним і становив 530 нТл, 450 нТл і 425 нТл для X-, Y- та Z-компонент відповідно (рис. 3.25). Ще більшим він був на станціях GDH, IQA та VLC, а саме 760 нТл, 540 нТл і 460 нТл (рис. 3.26), 1100 нТл, 530 нТл і 660 нТл (рис. 3.27) та 510 нТл, 400 нТл і 650 нТл (рис. 3.28) відповідно.

Для середньоширотних станцій STJ і SBL розмах був помітно меншим, а саме 150 нТл, 140 нТл і 210 нТл (рис. 3.29) та 180 нТл, 130 нТл і 110 нТл (рис. 3.30) відповідно.

Для станцій VSS і AIA, розташованих у південній півкулі, розмах варіацій становив 300 нТл, 80 нТл і 80 нТл (рис. 3.31) та 160 нТл, 150 нТл і 200 нТл (рис. 3.32) відповідно.

Магнітна буря 6 листопада 2023 р. На всіх високоширотних станціях розмах варіацій був достатньо великим, а саме 270 нТл, 275 нТл і 100 нТл на

станції THL (рис. 3.25), 350 нТл, 230 нТл і 280 нТл на станції GDH (рис. 3.26), 450 нТл, 300 нТл і 500 нТл на станції IQA (рис. 3.27) та 510 нТл, 300 нТл і 550 нТл на станції BLC (3.28).

На середньоширотних станціях STJ і SBL розмах варіацій був помітно меншим: відповідно 80 нТл, 120 нТл і 110 нТл (рис. 3.29) та 50 нТл, 75 нТл і 35 нТл (рис. 3.30) відповідно.

Порівняно невеликим був розмах варіацій на станціях у південній півкулі: 30 нТл, 25 нТл і 10 нТл на станції VSS (рис. 3.31) та 50 нТл, 60 нТл і 75 нТл на станції AIA (рис. 3.32).

Магнітна буря 7 листопада 2023 р. На станції THL розмах варіацій рівня геомагнітного поля не перевищував 130 нТл, 150 нТл і 125 нТл для X-, Y- та Z-компонент відповідно (рис. 3.25). На інших високоширотних станціях GDH, IQA та BLC він досягав 270 нТл, 240 нТл і 520 нТл (рис. 3.26), 450 нТл, 420 нТл і 240 нТл (рис. 3.27) та 400 нТл, 210 нТл і 400 нТл (рис. 3.28) відповідно. На середньоширотних станціях STJ і SBL розмах не перевищував 30 нТл, 90 нТл і 60 нТл (рис. 3.29) та 35 нТл, 100 нТл і 5 нТл (рис. 3.30) відповідно. На станціях VSS і AIA розмах варіацій був близьким до 15 нТл, 10 нТл і 15 нТл (рис. 3.31) та 40 нТл, 30 нТл і 50 нТл (рис. 3.32) відповідно.

Оцінка енергетики геокосмічної бурі, магнітосферної бурі та магнітної бурі.

Енергетика геокосмічної бурі. Сонячний вітер чинить на геокосмічне середовище динамічний тиск, магнітний тиск та тепловий тиск. Найбільшим з них є динамічний тиск. Саме його будемо співвідносити з енергетикою геокосмічної бурі. Потужність динамічного тиску сонячного вітру визначається за формулою:

$$P_{sw} = p_{sw} S_{m0} V_{sw},$$

де p_{sw} – динамічний тиск сонячного вітру, $S_{m0} \approx 1.28 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ – площа перерізу магнітосфери при її радіусі $R_m \approx 10 R_E$, $R_E \approx 6380 \text{ км}$ – радіус Землі, V_{sw} – швидкість сонячного вітру.

Результати розрахунку потужності динамічного тиску сонячного вітру для п'яти сплесків p_{sw} з 4 до 7 листопада 2023 р. наведено у табл. 3.10. Видно, що при зміні p_{sw} від 3 нПа до 16.3 нПа і V_{sw} від 300 км/с до 700 км/с, потужність коливалася від 26 ТВт до 103 ТВт.

Енергія геокоsmічної бурі

$$E_{sw} = \frac{1}{2} P_{swmax} \Delta T_{sw},$$

де ΔT_{sw} – тривалість впливу (табл. 3.10).

Енергетика магнітосферної бурі. Потужність тиску магнітного поля сонячного вітру на магнітосферу будемо описувати за допомогою параметра Акасофу [135]:

$$\varepsilon_A = \frac{4\pi}{\mu_0} E_{m0} R_{ef}^2 B^2 V_{sw} \sin^4(\theta/2),$$

де μ_0 – магнітна проникність у вакуумі, $R_{ef} \approx 7R_E$, $\theta = \arctan(B_y/B_z)$. Енергія магнітосферної бурі,

$$E_A = \frac{1}{2} \varepsilon_{Amax} \Delta T_m,$$

де ΔT_m – тривалість сплеску параметра Акасофу. Результати оцінок ε_{Amax} , E_A і T_m наведено в табл. 3.10. Із табл. 3.10 видно, що енергетика магнітосферної бурі значно поступається енергетиці геокоsmічної бурі.

Енергетика магнітної бурі. Енергію магнітної бурі будемо описувати за допомогою скоригованого D_{st} -індексу [112]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_{md} \frac{|D_{st}^*|}{B_0}.$$

Тут $E_{md} = 0.8$ ЕДж – повна енергія дипольного геомагнітного поля, $B_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ Тл – значення магнітної індукції на екваторі,

$$D_{st}^* = D_{st} - bp_{sw}^{1/2} + c,$$

де $b = 5 \cdot 10^5$ нТл·Па^{1/2}, p_{sw} задається у Па, $c = 20$ нТл. Якщо p_{sw} вимірювати в нПа, то

Таблиця 3.10.

Основні енергетичні параметри повторюваних магнітних бур 4–7 листопада 2023 р. (жирним виділено параметри найсильнішої бурі)

Параметр, характеристика бурі	4 листопада	5 листопада	6 листопада	7 листопада
Динамічний тиск сонячного вітру, нПа	11	10 16.3	5	3
Швидкість сонячного вітру, км/с	350	300 500	700	700
Параметр плазми сонячного вітру β	0.47	0.19	0.54	0.42
Потужність геокоосмічної бурі, ТВт	49	38 103	44	26
Енергія геокоосмічної бурі, ЕДж	1.1	0.34 2.2	0.63	0.56
Тривалість геокоосмічної бурі, год	12	5 12	8	12
Потужність магнітосферної бурі, ГДж/с	126	502 716	515	100
Енергія магнітосферної бурі, ПДж	0.9	1.8 8.2	3.7	0.44
Тривалість магнітосферної бурі, год	4	2 6	4	2.4
Максимальна потужність магнітної бурі, ГВт	130	440 800	110	90
Енергія магнітної бурі, ПДж	3.7	4.7 8.6	1.6	1.3
Тривалість головної фази магнітної бурі, год	8	3 3	4	4
K_{pmax} -індекс	5	6.3 7.3	5.7	5
D_{stmax} -індекс	-60	-88 -172	-107 -25	-71 -25
Тип бурі	G1, minor	G2, moderate G3, strong	G2, moderate	G1, minor

Примітка: параметр плазми β – це відношення теплового тиску сонячного вітру до магнітного тиску сонячного вітру.

$$D_{st}^* = D_{st} - 15.8 p_{sw}^{1/2} + 20.$$

При тривалості головної фази магнітної бурі ΔT_{ms} для максимального значення потужності бурі маємо

$$P_{ms} = \frac{E_{ms}}{\Delta T_{ms}}.$$

Результати оцінок потужності, енергії та тривалості магнітних бур також наведено в табл. 3.10. З табл. 3.10 випливає, що енергетика магнітних бур у сотні разів менша за енергетику геокосмічної бурі.

Що стосується співвідношення енергій геокосмічної та магнітосферної бур, то виявилось, що перша з них у сотні – тисячі разів більша за другу. При цьому потужності та енергії магнітної та магнітосферної бур є порівнянними.

Джерела та механізми магнітних бур. У проміжку часу 4–7 листопада 2023 р. спостерігалось п'ять магнітних бур різної інтенсивності. Першим чотирьом бурям передували сплески щільності частинок n_{sw} , швидкості V_{sw} , динамічного тиску p_{sw} у сонячному вітрі, параметра Акасофу ϵ_A , та падіння рівня B_z -компоненти міжпланетного магнітного поля (рис. 3.16). Структури у сонячному вітрі з різко підвищеними значеннями n_{sw} , $|B_z|$ і V_{sw} , називають оболонками (sheath) [155]. Вони являють собою плазмоїди з “замороженим” у них магнітним полем. Такі структури описані в роботах [155]. Подібні структури призвели до двоетапної магнітної бурі 23–24 квітня 2023 р. [142]. Саме оболонки стали причиною перших чотирьох магнітних бур.

Для бурі 4 листопада 2023 р. концентрація n_{sw} збільшилася від $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $60 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, швидкість V_{sw} від ~ 200 км/с до 250 км/с, а рівень B_z -компоненти зменшився приблизно від 0 нТл до -10 нТл. Для двох бур 5 листопада 2023 р. значення n_{sw} зростало від $10 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $55 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ і від $\sim 20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $65 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ відповідно, швидкість V_{sw} збільшувалася від 200 км/с до 400 км/с і від 400 км/с до 500 км/с, рівень B_z -компоненти зменшувався від ~ 0 нТл до -20 нТл і від ~ 0 нТл до -25 нТл. Бурі 6 листопада 2023 р. у період з 08:00 до

16:00 передувало зростання концентрації n_{sw} від $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $20 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, швидкості V_{sw} від ~ 0 нТл до -10 нТл.

Джерелом п'ятої бурі, що мала місце наприкінці доби 6 листопада та протягом 7 листопада 2023 р., стало різке зростання швидкості сонячного вітру від 400 до 700 км/с. При цьому концентрація n_{sw} змінювалася в межах $(1-5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, а рівень B_z -компоненти варіював приблизно від 0 нТл до -8 нТл. В основі механізму цієї бурі лежав високошвидкісний потік сонячного вітру.

Далі порівняємо магнітні бурі в листопаді 2023 р. Розглянемо окремо станції у східній півкулі (табл. 3.8) та західній півкулі (табл. 3.9).

Східна півкуля. Усі магнітні бурі припали переважно на нічний час. До спільних закономірностей для всіх п'яти магнітних бур належить таке. Зазвичай найбільше змінювався рівень X -компоненти, дещо менше рівень Y -компоненти, а найменше змінювався рівень Z -компоненти. У низці випадків ця тенденція порушувалася (табл. 3.8).

Найслабшою була магнітна буря 4 листопада 2023 р. Перша буря 5 листопада 2023 р. була сильнішою за попередню, але слабшою за другу бурю 5 листопада 2023 р. Буря 6 листопада 2023 р. була помітно слабшою за бурю 5 листопада 2023 р. Проте найслабшою серед усіх бур на більшості станцій була буря з 6 на 7 листопада 2023 р. Винятком є станції HRN і частково MCQ.

Отже, найсильнішою була друга буря 5 листопада 2023 р., яка тривала приблизно з 13:00 до 16:00. Розмах варіацій рівня всіх компонент перевищував розмах для інших бур 4–7 листопада 2023 р. приблизно у 3 – 10 разів.

Західна півкуля. У цій півкулі магнітні бурі припадали переважно на денний час, ніж на нічний. На станціях західної півкулі не завжди найбільший розмах варіацій спостерігався для X -компоненти. Часто більший розмах фіксувався для Y - і Z -компонент (табл. 3.9). Як і у східній півкулі, інтенсивність магнітних бур з 4 до 5 листопада 2023 р. спочатку зростала, а з 5 до 7 листопада 2023 р. зменшувалася. Найсильнішою була буря з 13:00 до 16:00 5 листопада 2023 р. Найслабшими були бурі або 4, або 7 листопада

2023 р. Розмах варіацій 5 листопада був у 3–10 разів більшим, ніж 4 або 7 листопада 2023 р.

Енергетика магнітних бур. Розрахунок енергетичних характеристик, наведених у табл. 3.10, підтверджує, що найінтенсивнішою магнітною бурєю протягом 4 – 7 листопада 2023 р. була буря 5 листопада, яка розпочалася приблизно о 13:00. Ця буря належить до класу G3, тобто сильних (strong). Для неї індекс $K_p = 7.3$, тоді як для інших бур індекс K_p змінювався від 5 до 6.3, яким відповідає клас бурі G1, другорядна (minor), або G2, помірна (moderate). Для сильної бурі мінімальне значення D_{stmin} -індекс становило -172 нТл, тоді як для інших воно змінювалося в межах від -25 нТл до -88 нТл. Потужність сильної геокоосмічної бурі досягала 103 ТВт, що у 2–4 рази перевищувало потужність інших бур, а енергія наближалася до 2,2 ЕДж, що у 2–6 разів перевищувало енергію інших бур. Енергетика сильної магнітосферної та магнітної бур 5 листопада 2023 р., що розпочалася близько 13:00, значно (до порядку величини) перевищувала енергетику відповідних бур в інші часові інтервали.

Отже, магнітну бурю, що розпочалася близько 13:00 5 листопада і на яку наклалися менш інтенсивні бурі 6 та 7 листопада 2023 р., можна вважати головною бурєю. Вона тривала щонайменше п'ять діб.

Головна магнітна буря. Межі варіацій трьох компонент геомагнітного поля протягом головної бурі в листопаді 2023 р. на станціях у східній та західній півкулях розглянемо окремо.

Східна півкуля. Фонові варіації рівня компонент геомагнітного поля зазвичай перебували в межах від ± 5 нТл до ± 25 нТл (табл. 3.11). Під час магнітної бурі 5 листопада 2023 р. варіації рівня досягали багатьох сотень нТл і суттєво залежали від широти. Як правило, розмах варіацій рівня був найбільшим для у Х-компоненти. Для станцій HRN і MCQ він досягав 480 нТл і 110 нТл відповідно. Для всіх станцій східної півкулі максимальне перевищення розмаху варіацій змінювалося в межах 8 – 22 рази, 1.4 – 20 рази та 1.5 – 18 разів для Х-, Y- і Z-компонент відповідно (табл. 3.12).

Таблиця 3.11.

Максимальні межі варіацій рівня компонент геомагнітного поля на станціях
східної півкулі

Станція	Фонові значення, нТл			Збурені значення 5 листопада 2023 р., нТл		
	X- компонента	Y- компонента	Z- компонента	X- компонента	Y- компонента	Z- компонента
HRN	-20 20	-20 20	-20 20	-380 100	-400 200	-230 100
PET	-10 10	-5 5	-5 5	-150 30	-60 140	-150 30
KHB	-5 5	-5 5	-5 5	-130 40	-50 75	-25 20
GUA	-5 5	-10 10	-5 5	-130 0	-30 20	-16 14
KDU	-10 10	-20 20	-10 10	-140 20	-40 15	-10 20
СТА	-5 5	-20 20	-10 10	-100 35	-50 25	-22 8
CNB	-10 10	-20 20	-2 2	-105 65	-100 40	-35 30
MCQ	-25 25	-20 20	-20 20	-900 200	-720 80	-340 560

Таблиця 3.12.

Максимальне перевищення (рази) розмаху варіацій рівня протягом
геомагнітної бурі 5 листопада 2023 р. над розмахом у контрольні дні для
станцій східної півкулі

Станція	X-компонента	Y-компонента	Z-компонента
HRN	12	15	8
PET	9	20	18
KHB	17	12.5	4.5
GUA	12.5	2.5	3
KDU	8	1.4	1.5
СТА	13.5	1.9	1.5
CNB	8.5	3.5	16
MCQ	22	20	14

Західна півкуля. Зазвичай фонові варіації компонент геомагнітного поля змінювалися в межах від ± 5 нТл до ± 40 нТл (табл. 3.13). Протягом головної магнітної бурі варіації становили багато сотень нТл. Як правило, найбільші розмахи варіацій рівня були притаманні X-компоненті. Розмах варіацій для X-, Y- і Z-компонент протягом головної магнітної бурі листопада 2023 р. збільшувався відповідно у 13 – 26.5 раза, 13 – 22.5 раза та 11.5 – 27.5 раза (табл. 3.14).

Широтна залежність інтенсивності бур. Для всіх бур 4–7 листопада 2023 р. на станціях східної півкулі спостерігалася одна й та сама тенденція: зі зменшенням широти розмах варіацій зменшувався, а з віддаленням станції від екватора в південному напрямку розмах варіацій рівня зростав.

Таблиця 3.13.

Максимальні межі варіацій рівня компонент геомагнітного поля на станціях західної півкулі

Станція	Фонові значення, нТл			Збурені значення 5 листопада 2023 р., нТл		
	X- компонента	Y- компонента	Z- компонента	X- компонента	Y- компонента	Z- компонента
THL	-10	-10	-10	-390	-150	-65
	10	10	10	140	300	360
GDH	-20	-20	-20	-600	-160	-320
	20	20	20	160	380	140
IQA	-40	-20	-20	-600	-130	-350
	40	20	20	500	400	310
BLC	-20	-10	-20	-400	-180	-220
	20	10	20	110	120	430
STJ	-5	-5	-5	-100	-95	-60
	5	5	5	50	45	150
SBL	-5	-5	-2	-130	-80	-55
	5	5	2	50	50	55
VSS	-10	-2	-2	-150	-30	-60
	10	2	2	150	50	20
AIA	-5	-5	-5	-120	-60	-125
	5	5	5	40	90	75

Таблиця 3.14.

Максимальне перевищення (рази) розмаху варіацій рівня протягом геомагнітної бурі 5 листопада 2023 р. над розмахом у контрольні дні для станцій західної півкулі

Станція	X-компонента	Y-компонента	Z-компонента
THL	26.5	22.5	21
GDH	19	13.5	11.5
IQA	14	13	11.5
BLC	13	15	16
STJ	15	15	21
SBL	18	13	27.5
VSS	15	20	20
AIA	16	15	20

Найбільший розмах спостерігався на станції HRN (широта близько 77° пн. ш.), де він досягав багатьох сотень нТл. Причиною такої поведінки є потужна іоносферна струмова система у високих широтах. У середніх широтах ця система слабша, і розмах варіацій не перевищував 100–200 нТл. Значним був також розмах варіацій (~100 – 1000 нТл) на середньоширотній станції MCQ, що є характерним саме для цієї станції [144]. Нагадаємо, що всі бурі 4–7 листопада 2023 р. припали переважно на нічний час. Лише на станції HRN бурі спостерігалися як у нічний, так і в денний час (рис. 3.17).

У західній півкулі частина бур припадала на денний час, частина – на нічний, а також на перехідний час доби. Розмах варіацій рівня на високоширотній станції THL (близько 77° пн. ш.) (рис. 3.25) досягав багатьох сотень нТл. Ще більшим був розмах на станції GDH (широта 69° пн. ш.) (рис. 3.26), яка розташована в зоні полярного овалу. Значним розмах варіацій був також на високоширотних станціях IQA (рис. 3.27) та BLC (рис. 3.28). У день головної магнітної бурі він становив 1100 нТл, 530 нТл і 660 нТл для X-,

Y- і Z-компонент відповідно. На середньоширотних станціях STJ (рис. 3.29), SBL (рис. 3.30) і VSS (рис. 3.31) розмах зазвичай не перевищував 100–200 нТл. На високоширотній станції AIA (рис. 3.32) він також перебував у межах 30–200 нТл. Помітне (до 300 нТл) збільшення розмаху варіацій рівня X-компоненти на станції VSS 5 листопада 2023 р. можна пояснити зростанням густини кільцевого струму та іоносферного струму в області екваторіальної іонізаційної аномалії (широта 22° пд. ш.).

Головною причиною відхилення величини розмаху варіацій рівня геомагнітного поля від тенденції у широтній залежності (зі зменшенням широти розмах мав би зменшуватися) є неоднорідність іоносферної струмової системи за широтою та довготою. Ця неоднорідність обумовлена цілим комплексом фізичних ефектів. Ці ефекти, що залежать від місцевого часу, спричинені впливом термосферних вітрів, амбіполярної дифузії, іоносферно-плазмосферною взаємодією, модифікацією іоносферної провідності та електродинамічними процесами. Збурення під час бурі концентрації електронів, повного електронного вмісту та іоносферної струмової системи мають форму «язика», тобто сильно неоднорідні за широтою та довготою. Неоднорідність іоносферної струмової системи призводить до неоднорідності в широтній залежності розмаху варіацій рівня геомагнітного поля.

Слід також мати на увазі, що величина магнітного ефекту у високих і середніх широтах визначається густиною іоносферних струмів, а в низьких широтах – величиною кільцевого струму.

Порівняльний аналіз інтенсивних магнітних бур. Порівняємо головну магнітну бурю 5 листопада 2023 р. з однією з найінтенсивніших у 25-му циклі сонячної активності двоступеневою бурею 23–24 квітня 2023 р. [143], з найінтенсивнішою у 25-му циклі сонячної активності бурею 10–11 травня 2024 р. [144], а також із суперунікальною бурею типу Каррінгтонського явища 1 вересня 1859 р. (табл. 3.15). Перелічені бурі належать до типів G3 (strong), G4 (severe), G5 (extreme) та G7 (superunique). Їм відповідає K_p -індекс

7+, 8+, 9 і 11, а також мінімальні значення D_{st} -індексу -172 нТл, -212 нТл, -412 нТл і <-1000 нТл. Енергії динамічного тиску (геокоsmічної бурі) становили 2,2 ЕДж, 1,8 ЕДж, 6,5 ЕДж та > 500 ЕДж, а потужності цих бур були близькі до 0.1 ПВт, 0.1 ПВт, 0.4 ПВт і > 10 ПВт. Енергії магнітосферної бурі (міжпланетного магнітного поля) не перевищували 8.2 ПДж, 50 ПДж, 270 ПДж і > 450 ПДж, а їхні потужності знаходилися в межах 0.7 ТДж/с, 2.8 ТДж/с, 15 ТДж/с та > 25 ТДж/с. Енергії магнітної бурі становили 8.6 ПДж, 9.7 ПДж, 20 ПДж і 60 ПДж, а їхні потужності досягали 0.8 ТВт, 0.67 ТВт, 1.4 ТВт та понад 1.6 ТВт. Тривалість головної фази була близьки до 3, 4, 4 і 10 год, а загальна тривалість бур була не менше 5 діб.

Таким чином, магнітна буря 5 листопада 2023 р. за всіма показниками поступалася бурям 23–24 квітня 2023 р., 10–11 травня 2024 р. і тим більше суперунікальній бурі. Головною особливістю бур 4–7 листопада 2023 р. була їхня п'ятикрокова послідовність.

Головні результати досліджень.

1. Унікальність магнітної бурі 4 – 7 листопада 2023 р. у тому, вона була п'ятикроковою, тобто фактично складалася з п'яти бур різної інтенсивності.

2. Енергія динамічного тиску складових бурі досягала 1,1 ЕДж, 0,34 ЕДж, 2,2 ЕДж, 0,63 ЕДж та 0,56 ЕДж, а їхня потужність була близькою до 49 ТВт, 38 ТВт, 103 ТВт, 44 ТВт і 26 ТВт відповідно.

3. Енергія збуреного міжпланетного магнітного поля становила 0,9 ПДж, 1,8 ПДж, 8,2 ПДж, 3,7 ПДж та 0,44 ПДж, а потужність не перевищувала 126 ГДж/с, 502 ГДж/с, 716 ГДж/с, 515 ГДж/с і 100 ГДж/с відповідно.

4. Енергія складових магнітної бурі перебувала в межах 3,7 ПДж, 4,7 ПДж, 8,6 ПДж, 1,6 ПДж та 1,3 ПДж.

5. Магнітні бурі 4 листопада 2023 р. ,5 листопада 2023 р. (перша буря), 5 листопада 2023 р. (друга вона ж головна буря), 6 листопада 2023 р. та 6 – 7 листопада 2023 р. відносяться відповідно до бур типу G1 (другорядний), G2 (помірний), G3 (сильний), G2 (помірний) і G1 (другорядний).

Таблиця 3.15.

Основні параметри strong, severe, extreme and superunique magnetic storms

Параметр, характеристика бури	5 листопада 2023 р.	23–24 квітня 2023 р.	10–11 травня 2024 р.	Супер- унікальна
K_p max-індекс	7+	8+	9	11
D_{st} max-індекс	-172	-212	-412	<-1000
Потужність геокоsmічної бури, ПВт	0.1	0.1	0.4	>10
Енергія геокоsmічної бури, ЕДж	2.2	1.8	6.5	>500
Тривалість геокоsmічної бури, год	12	10	9	>30
Потужність магнітосферної бури, ТДж/с	0.7	2.8	15	>25
Енергія магнітосферної бури, ПДж	8.2	50	270	>450
Тривалість магнітосферної бури, год	6	10	10	10
Максимальна потужність магнітної бури, ТВт	0.8	0.67	1.4	1.6
Енергія магнітної бури, ПДж	8.6	9.7	20	60
Тривалість головної фази магнітної бури, год	3	4	4	10
Загальна тривалість магнітної бури, год	>120	>120	>120	>120
Тип бури	G3 Strong	G4 Severe	G5 Extreme	G7 Superunique

6. В обох півкулях спостерігалася тенденція до зменшення розмаху варіацій рівня геомагнітного поля зі зменшенням широти. Відхилення від цієї закономірності зумовлені неоднорідністю збурень іоносферної струмової системи.

7. Магнітні бурі мали місце як у денний, так і в нічний час доби, а також у перехідні часові інтервали. Залежність розмаху варіацій рівня від часу доби виражена відносно слабо.

8. Порівняно з контрольними добами розмах варіацій рівня протягом бур збільшувався приблизно у 20–28 разів.

9. Найбільш інтенсивною з п'яти бур 4–7 листопада 2023 р. була друга буря 5 листопада 2023 р., названа головною.

10. Головна магнітна буря 5 листопада 2023 р. за всіма показниками помітно або суттєво поступалася бурям 23–24 квітня 2023 р., 10–11 травня 2024 р. і тим більше суперунікальній бурі.

3.6. Висновки до розділу 3

1. У вересні 2017 року спостерігався високий рівень сонячної активності, зокрема потужні спалахи класу X (6 вересня – X2.2 та X9.3, 7 вересня – X1.3, 10 вересня – X8.2), які супроводжувалися корональними викидами маси. Це спричинило значні зміни параметрів сонячного вітру та енергопоток у магнітосферу Землі.

Під час сонячного спалаху класу X9.3 H -, D - та Z -компоненти головного магнітного поля різко зменшилися відповідно на 30, 60 і 15 нТл. Водночас рівень флуктуацій H - та D -компонент у діапазоні періодів ~ 100 – 1000 с був на порядок меншим.

2. Визначено основні статистичні характеристики параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля та геомагнітного поля для 153 подій магнітних бур з $K_{p\max} \geq 5$ мали місце протягом 24-го циклу сонячної активності.

Геомагнітна обстановка протягом 24-го циклу сонячної активності була більш спокійною, ніж в 23-го циклі.

3. Аналіз часових варіацій рівня X -, Y - і Z -компонентів геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій INTERMAGNET для геомагнітних ефектів бур з 28 квітня до 2 травня 2023 р показав наступне.

Встановлено межі варіацій рівня компонентів геомагнітного поля у глобальних масштабах у магнітоспокійних умовах і під час помірних магнітних бур.

У магнітоспокійних умовах розмах варіацій геомагнітного поля при зменшенні географічної широти поступово зменшувався від 200...260 до 30...50 нТл.

Впродовж геомагнітних бур розмах варіацій X - і Z -компонентів збільшувався в 1.3...2.1 рази у порівнянні з розмахом у контрольні дні. Варіації Y -компонента були помітно меншими.

Варіації рівня всіх компонентів на станціях, що знаходилися приблизно на однаковій відстані від екватора, але в різних півкулях були близькими. Це стосується як Західної, так і Східної півкуль.

Також близькими були варіації геомагнітного поля на станціях, що дислокувалися приблизно на одній широті, але в різних півкулях.

4. Геомагнітна буря 4–7 листопада 2023 р. мала виражений багатокроковий характер і складалася з п'яти послідовних збурень різної інтенсивності.

Найпотужнішою була друга буря 5 листопада 2023 р. (G3), яка визначала енергетичні та амплітудні характеристики всієї багатоетапної події.

Встановлено чітку широтну залежність амплітуди варіацій геомагнітного поля: максимальні збурення спостерігалися у високих широтах, що пов'язано з інтенсифікацією авроральної електрострумової системи.

Основним фізичним механізмом розвитку бур були sheath-структури сонячного вітру з підвищеним динамічним тиском і від'ємною компонентою B_z .

Енергетичний аналіз показав наявність чіткої ієрархії енергетичних масштабів. Енергія геокосмічної бурі значно (на кілька порядків) перевищує енергію магнітосферної бурі, тоді як енергії магнітосферної та магнітної бур є близькими за порядком величини.

Подія 4 – 7 листопада 2023 р. належить до сильних бур 25-го циклу сонячної активності, однак поступається екстремальним подіям 2023 – 2024 рр.

РОЗДІЛ 4. ГЕОМАГНІТНІ ЕФЕКТИ КАТАСТРОФІЧНИХ ЯВИЩ

У цьому розділі описано результати аналізу великомасштабних збурень геомагнітного поля, що супроводжували землетрус в Албанії 26 листопада 2019 р. та потужний вибух супервулкану Тонга 15 січня 2022 р.

Результати цього розділу опубліковано в роботах [175, 176].

4.1. Засоби та методи

Землетруси належать до найбільш енергоємних катастрофічних явищ літосферного походження і супроводжуються комплексом фізичних процесів, здатних впливати на стан геомагнітного поля Землі [180–182]. Геомагнітні ефекти землетрусів проявляються у вигляді короткочасних збурень або квазірегулярних варіацій компонент геомагнітного поля, які реєструються як у приепіцентральных районах, так і на значних відстанях від джерела події [175, 183–186, 192–196].

Ще в 1970-ті рр. Л. Ф. Чорногор 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 [104, 107, 177–179]. Згідно цієї парадигми, обидві системи відносяться до відкритих динамічних і, головне, нелінійних систем. Такі системи мають нетривіальні властивості [104, 107, 177–179]. Завдяки наявності прямих і зворотних, позитивних і негативних зв'язків в системах можливі процеси самоорганізації, виникнення нестійкостей, тригерні механізми вивільнення енергії, тощо [104, 107, 177–179]. Розгляд системи СМСМІАЗ є доцільним при вивченні впливу потоків енергії, речовини та випромінювання «зверху», наприклад, під час геокосмічних бур [1]. У разі потоків «знизу» досить обмежитися розглядом системи ЗАІМ. Потoki «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.) [2, 50, 180–189, 190, 191].

Землетруси були першим джерелом, яке дозволило простежити виникнення збурень у атмосфері й іоносфері, тобто виявити взаємодію підсистем у системі ЗАІМ [192–196]. Як виявилось, збурення від літосфери до атмосфері й іоносфері переносяться електромагнітними й акустико-гравітаційними хвилями (АГХ) [192–195].

Досить довго та з перемінним успіхом ведеться пошук магнітних передвісників землетрусів. Огляд відповідних робіт виконано в [186]. Можливий механізм виникнення періодичного магнітного передвісника описаний в роботі [181]. У статті [186] 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. Було зроблено висновок, що землетрус міг викликати збурення, які поширюються в іоносфері зі швидкістю ~ 20 км/с та ~ 230 – 320 м/с. Більшу швидкість мають МГД хвилі, а меншу – АГХ. Цікавим було б підтвердити результати роботи [186] шляхом аналізу часових варіацій рівня геомагнітного поля для інших землетрусів з близькою магнітудою.

Вибухи супервулканів належать до надзвичайно рідкісних, але надпотужних катастрофічних явищ, енерговиділення яких може істотно перевищувати енергію окремих землетрусів. Такі події супроводжуються масштабними механічними, тепловими та електромагнітними процесами, здатними викликати глобальні збурення геофізичних полів, зокрема геомагнітного [176, 187, 197–204].

Геомагнітні ефекти супервулканічних вибухів можуть бути зумовлені різкими змінами температури та тиску в атмосфері, утворенням потужних ударних хвиль і викидом великих об'ємів іонізованого матеріалу. Поширення акустогравітаційних хвиль від місця вибуху призводить до збурення

іоносфери, що супроводжується перебудовою іоносферних струмів та, як наслідок, варіаціями геомагнітного поля [209–216, 220–224].

За даними магнітометричних спостережень, геомагнітна реакція на подібні події може проявлятися у вигляді глобальних квазіперіодичних варіацій та короточасних імпульсів, синхронізованих з моментом вибуху та подальшим поширенням хвильових збурень. Особливістю таких ефектів є їх значна просторова протяжність і відносно узгоджений характер змін компонент геомагнітного поля на різних станціях [225–231].

Інтерпретація геомагнітних ефектів супервулканічних вибухів ґрунтується на уявленнях про сильний електродинамічний зв'язок між нижніми та верхніми шарами атмосфери. Масштабність і тривалість зафіксованих збурень свідчать про можливість формування глобальної геомагнітної відповіді на події такого рівня енерговиділення, що має важливе значення для розуміння процесів у системі Земля–геокосмос [177–179, 232].

4.2. Геомагнітні ефекти землетрусу

Вимірювання виконано за допомогою магнітометра-флюкметра, 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.

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

Загальні відомості. 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° півн.ш., 19.53° 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.

При пошуку магнітного передвісника землетрусу, а також реакції геомагнітного поля на землетрус, який відбувся, необхідний ретельний аналіз стану космічної погоди.

Стан космічної погоди. 24, 25 та в першій половині доби 26 листопада 2019 р. концентрація заряджених частинок у сонячному вітрі флюктувала в межах $(2-3) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ (рис. 4.1). 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 $(0.5-1) \cdot 10^5 \text{ К}$, а тиск частинок – 0.5–1.5 нПа. B_y та B_z компоненти міжпланетного магнітного поля флюктували 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. 4.2 – 4.4). З рис. 4.2а можна бачити, що 25 листопада 2019 р. в інтервалі часу 01:00–07:00 рівень H -компоненти змінювався від ~ 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. 4.2б). Крім того, з 02:00 до

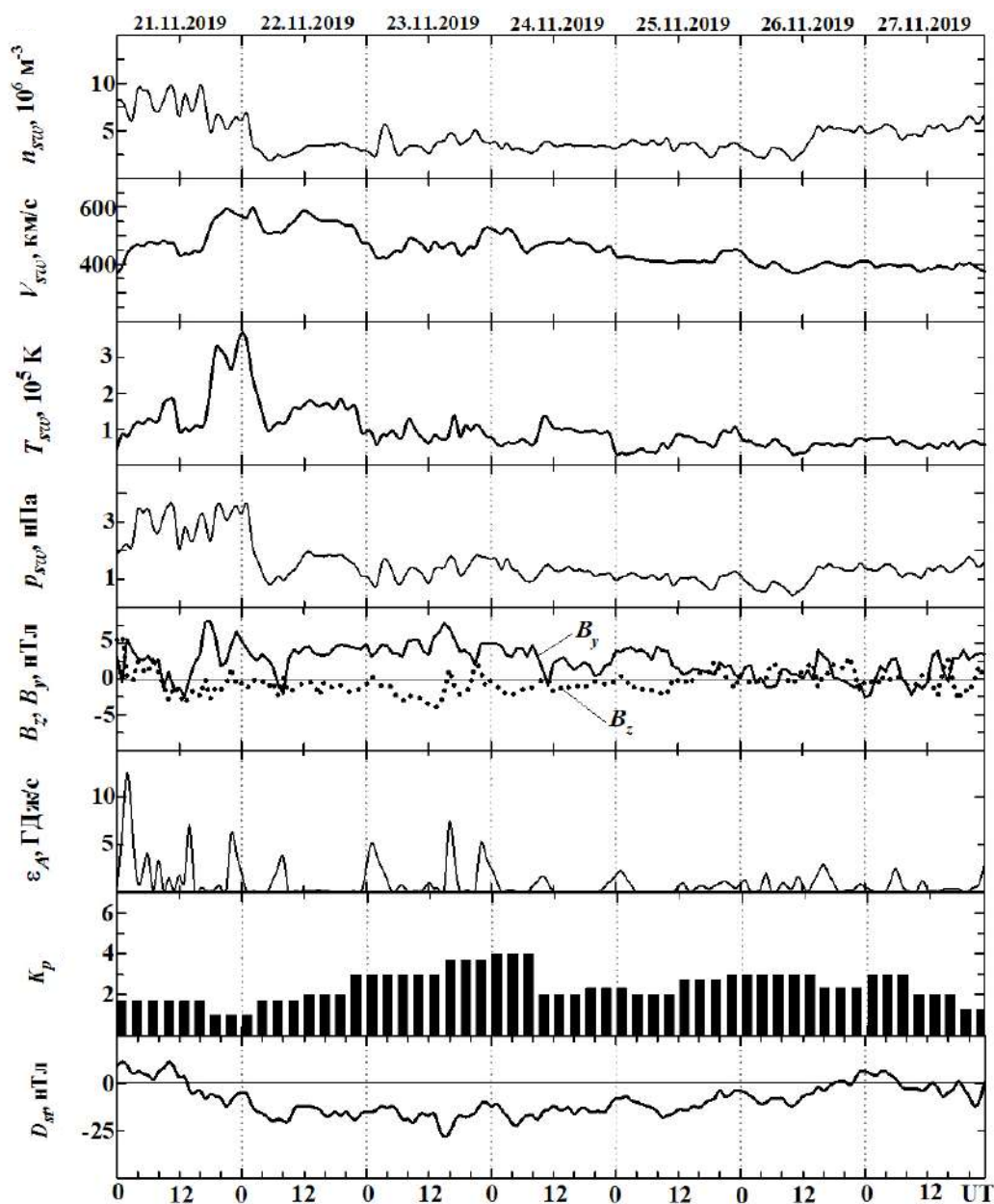


Рис. 4.1. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ϵ_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) протягом 21–27 листопада 2019 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

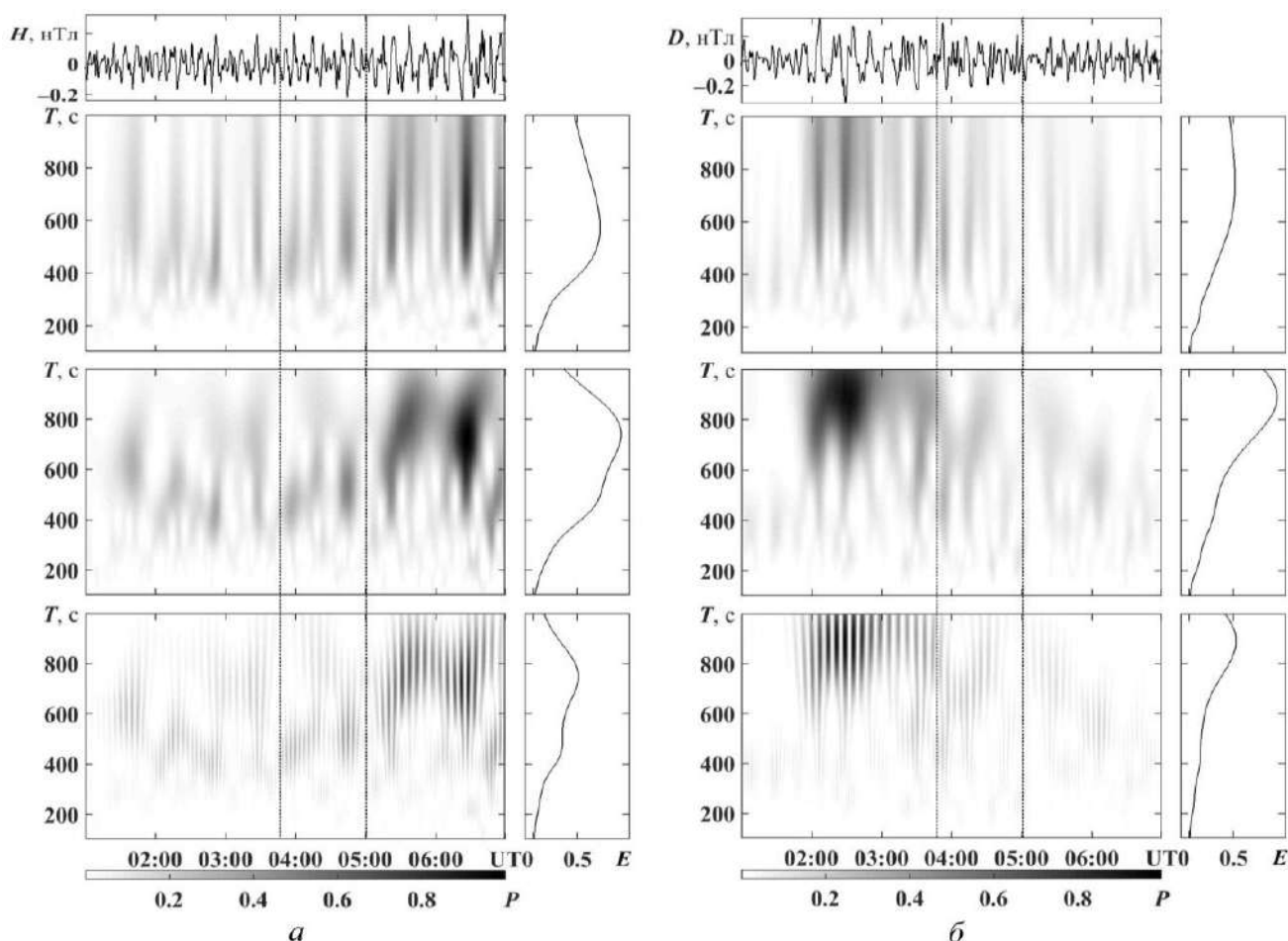


Рис. 4.2. Результати системного спектрального аналізу рівнів H (а) та D компонент (б) геомагнітного поля 25 листопада 2019 р. Панелі зверху вниз: аналізований сигнал, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення з материнською функцією в якості функції 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.

03:30 реєструвалися сильні (з амплітудою до 0.2–0.3 нТл) коливання з $T \approx 700\text{--}1000$ с.

У день землетрусу приблизно до 03:00 рівень H -компоненти зазвичай не перевищував ~ 0.1 нТл (рис. 4.3а). З 03:00 і по 04:10 рівень дещо (до ~ 0.2 нТл) виріс. Вдруге збільшення амплітуди флуктуацій до ~ 0.2 нТл мало місце в інтервалі часу 04:41–06:50. Переважали коливання з $T \approx 600\text{--}800$ с.

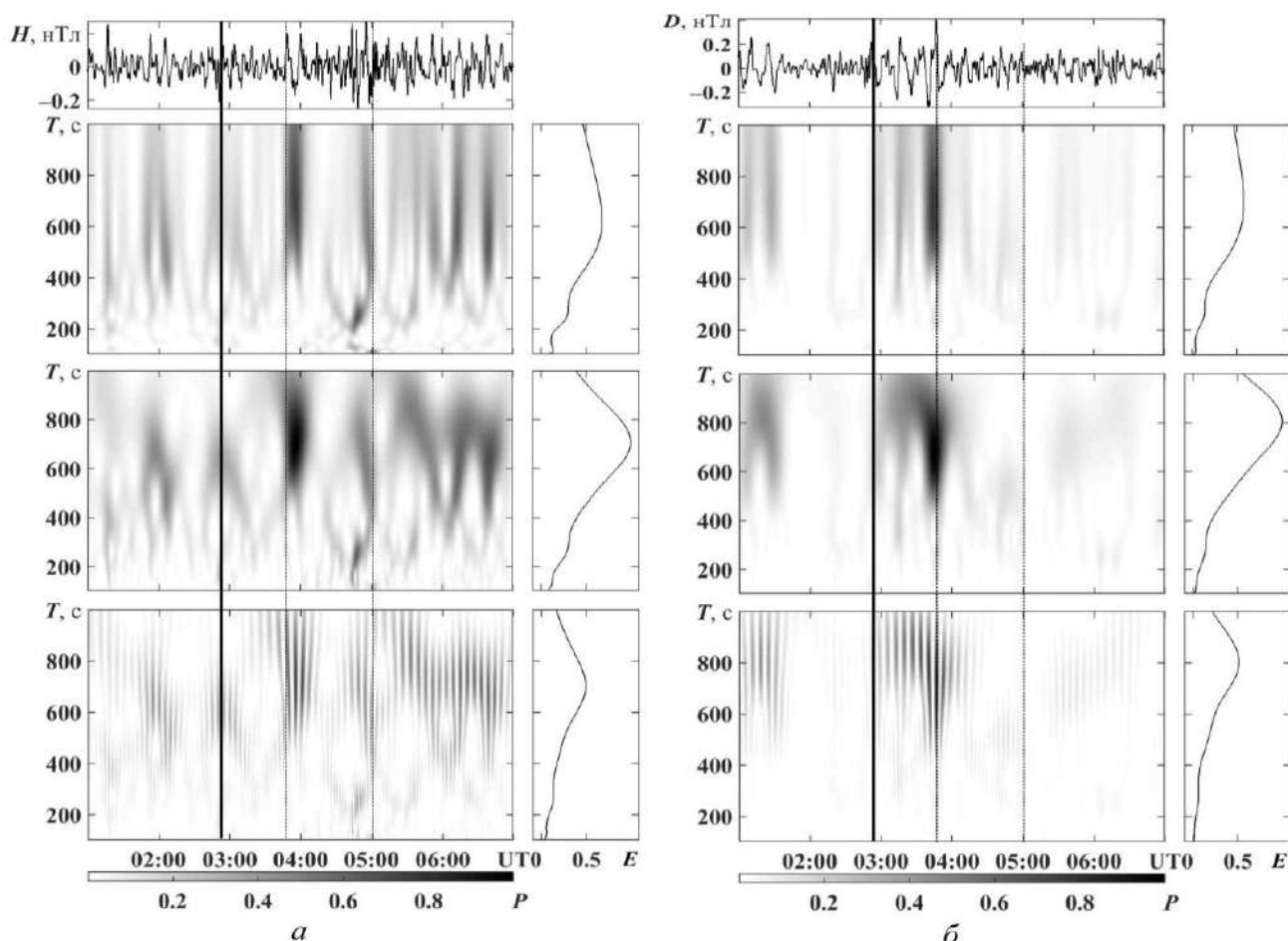


Рис. 4.3. Те саме, що і на рис. 4.2, для 26 листопада 2019 р. Суцільною лінією показано час головного поштовху магнітудою 6.4.

Збільшення рівня D -компоненти до 0.2 нТл спостерігалось більш ніж за дві години до землетрусу (рис. 4.3б). 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. 4.4а). 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 флюктуював у межах 0.1–0.2 нТл (рис. 4.4б). В окремі моменти часу він збільшувався до 0.3 і навіть до 0.5 нТл. В спектрі спостерігалися періоди від 200 до 1000 с.

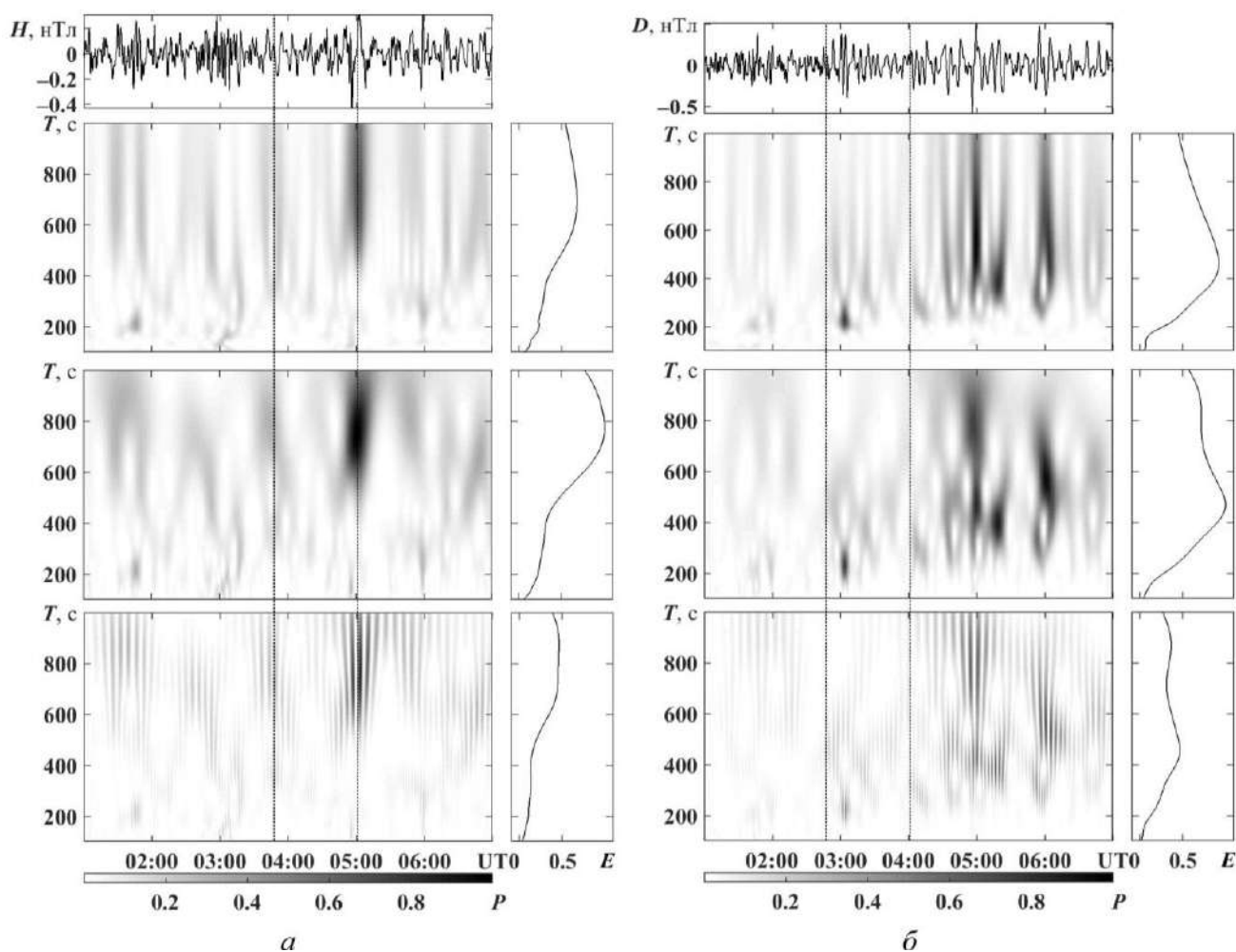


Рис. 4.4. Те ж саме, що й на рис. 4.2, для 27 листопада 2019 р.

Можливість генерації АГХ. Вдруге характер варіацій рівня H і D компонент змінювався через час Δt_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, отримаємо, 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 [54].

Збурення концентрації електронів. Рух газу в полі АГХ супроводжується захопленням зарядженої компоненти плазми, тобто періодичною модуляцією

концентрації електронів N . Оцінимо відносну амплітуду δ_N варіацій N . З роторного рівняння Максвелла випливає, що [186]:

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

де μ_0 – магнітна стала, Δj – збурення густини іоносферного струму в динамо-області атмосфери, j_0 – незбурене значення густини струму, Δz – товщина динамо-області. Припускаючи, що $\Delta B \approx 0.2$ нТл, $j_0 \approx 10^{-7}$ А/м², $\Delta z \approx 30$ км, отримаємо, що $\delta_N \approx 5.3\%$.

Описані в данному розділі результати в цілому узгоджуються з результатами роботи [186]. 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 природніх збурень ($K_p = 3$).

Головні результати досліджень

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.

4.3. Геомагнітні ефекти вибуху супервулкану

В цьому підрозділі описані результати спостережень за варіаціями геомагнітного поля, що були викликані вибухом вулкану Тонга. При цьому головна увага приділялася аналізу квазіперіодичних процесів, збуренню системи нейтрального вітру, іоносферних струмів на висотах динамо-області атмосфери. Були описані часові варіації геомагнітного поля, що спостерігалися на низці віддалених від вулкану магнітних станцій із мережі INTERMAGNET. Актуальною задачею є більш детальний аналіз магнітного ефекту вулкану Тонга.

Метою цього підрозділу є аналіз великомасштабних збурень геомагнітного поля, викликаного потужним вибухом вулкану Тонга, що відбувся 15 січня 2022 р.

Загальні відомості. Вулкан Тонга знаходиться в південній частині Тихого океану в Полінезії (географічні координати: 20.54° пд. ш., 175.38° зх. д.). Його активність різко зросла 15 січня 2022 р. У інтервалі часу 04:00–05:00 UT спостерігалось п'ять вибухів. Найбільш інтенсивним був вибух о 04:15 UT. Він викликав зареєстровані збурення у всіх підсистемах системи Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера [197–199].

Вулкан Тонга знаходиться в океані на глибині близько 200 м. Виверження вулкану продовжувалося приблизно з 04:00 до 16:00 UT. За цей час в атмосферу було викинуто 2.9 Гт продуктів виверження. Їхній об'єм сягав 1.9 км^3 . Продуктивність вулкану складала 67 кт/с або 44 тис. $\text{м}^3/\text{с}$. Максимальна висота викидів сягала 58 км, в чому полягає головна унікальність вулкану Тонга.

За оцінками [197, 198], теплова енергія вулкану складала $3.6 \cdot 10^{18}$ Дж, а потужність – 9 ПВт. За своєю енергією вулкан Тонга поступався лише вулканам Кракатау ($5 \cdot 10^{19}$ Дж) та Пінатубо ($2 \cdot 10^{19}$ Дж), проте висота викидів цих вулканів не перевищувала відповідно 37–43 та 40–47 км.

Для вулкану Тонга індекс вулканічної вибуховості $VEI \approx 5.8$, а для вулканів Кракатау та Пінатубо $VEI \approx 6$ [197].

Оцінки енергії вибуху вулкану за даними різних авторів змінюються в широких межах: від 4–18 до 478 ± 191 Мт ТНТ. За даними [197, 198], ця енергія не перевищувала 16–18 Мт ТНТ.

Стан космічної погоди. Варіації космічної погоди досліджувалися за даними сайту [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] (рис.4.5).

14 січня 2022 р. концентрація частинок n_{sw} у сонячному вітрі зросла від $(3-4) \cdot 10^6$ до $16.7 \cdot 10^6$ m^{-3} . Значення n_{sw} немонотонно зменшувалося до початкового рівня впродовж доби 15 січня 2022 р. Швидкість частинок у сонячному вітрі 12–14 січня 2022 р. була близькою до 350 км/с. Упродовж наступної доби вона виросла до 620 км/с і залишалася майже такою 16–18 січня 2022 р. 15 січня 2022 р. спостерігалось два сплеска температури частинок від $(0.2-0.3) \cdot 10^5$ К до $3 \cdot 10^5$ та $4 \cdot 10^5$ К. 14 січня 2022 р. B_z компонента міжпланетного магнітного поля зменшилася від ~ 8 до -13.8 нТл. 14 січня K_p -індекс виріс від 0 до 5.7. Індекс D_{st} зменшився від ~ 14 до -91 нТл. Приблизно з 16 до 22 UT мала місце помірна магнітна буря. 15–18 січня спостерігалася відновлювальна фаза цієї бурі.

Дані та методи. Для аналізу використано дані вимірювань на світовій мережі магнітних станцій Intermagnet [<https://www.intermagnet.org/>]. Перелік станцій наведено у табл. 4.1. Положення станцій відносно вулкану показано на рис. 4.6. Ці станції знаходилися по різні сторони від джерела збурень. Аналізу підлягали X-, Y- та Z-компоненти геомагнітного поля. Часова роздільна здатність – 1 хв, похибка не перевищувала 1 нТл.

Проаналізовано часові варіації рівня геомагнітного поля з 12 по 18 січня 2022 р. Найбільш магнітоспокійними були доби 13 та 17 січня 2022 р. Саме вони використовувалися в якості контрольних.

Важливо те, що варіації геомагнітного поля 15 січня 2022 р. та у контрольні дні суттєво відрізнялися. У контрольні дні ці варіації були більш-

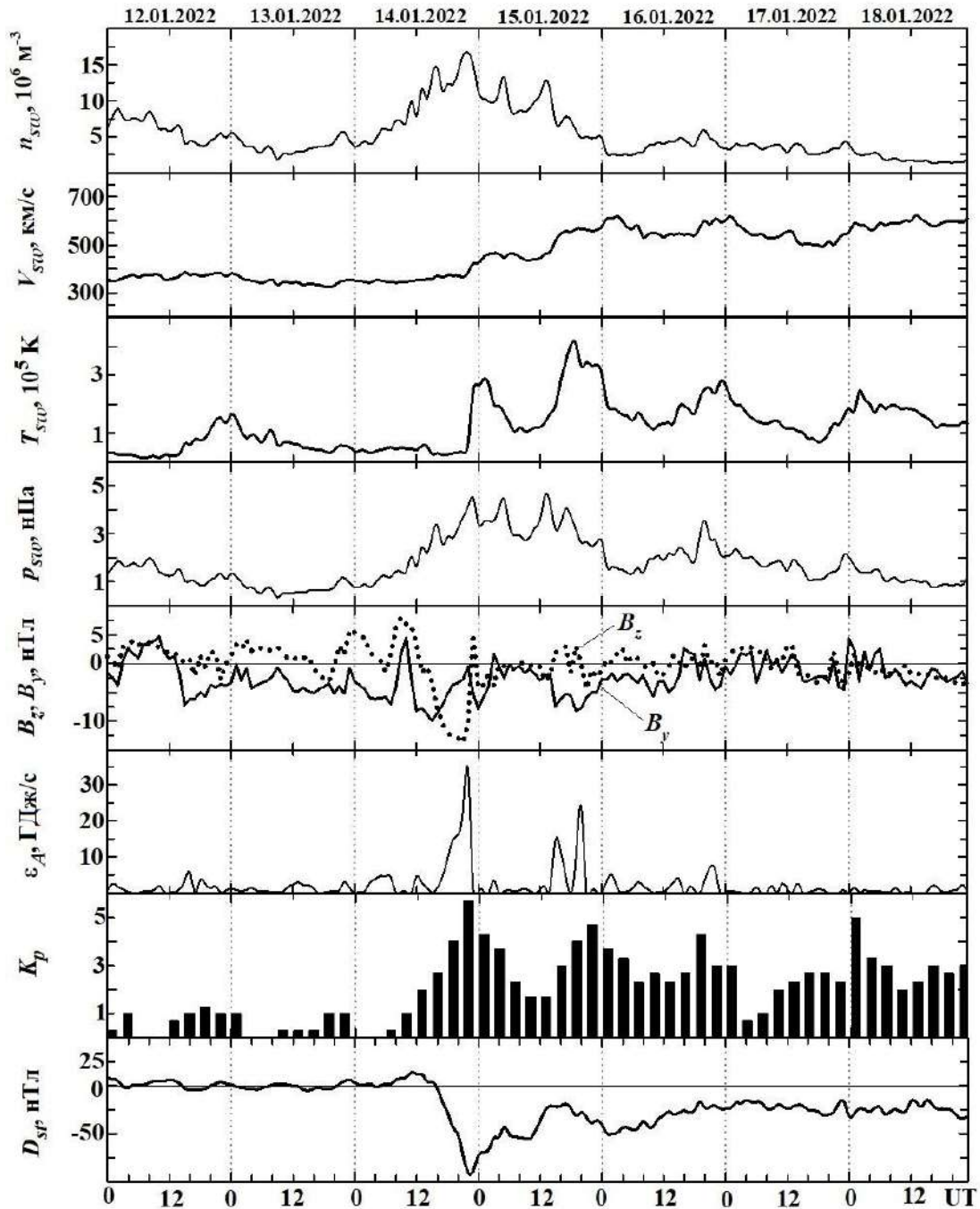


Рис. 4.5. Часові варіації параметрів сонячного вітру: виміряні концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , виміряні компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; розрахованих значень енергії ε_A , що передається сонячним вітром магнітосфері Землі в одиницю часу; K_p -індекса та D_{st} -індекса (за даними сайту <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) протягом 12–18 січня 2022 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

Таблиця 4.1.

Перелік станцій із мережі Intermagnet

Станція	Широта	Довгота	Країна	Відстань від вулкану, км
PPT	17.57° пн. ш.	149.57° зх. д.	Французька Полінезія	2730
СТА	20.09° пд. ш.	146.26° сх. д.	Австралія	3990
HON	21.32° пн. ш.	158.00° зх. д.	США	5024
KNY	31.42° пн. ш.	130.88° сх. д.	Японія	8135

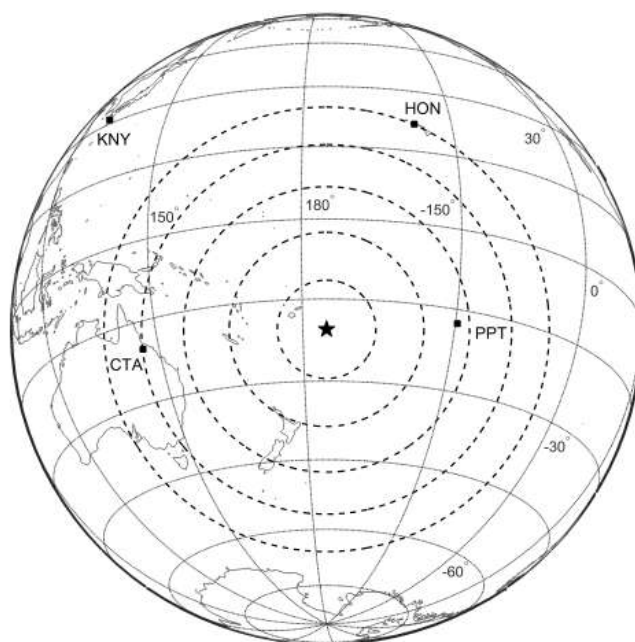


Рис. 4.6. Контурна мапа з зображенням магнітних станцій мережі Intermagnet. Місце знаходження вулкану вказано зірочкою

менш плавними, а у день вибуху вони стали немонотонними. Спостерігалися як аперіодичні, так і квазіперіодичні варіації.

Результати аналізу. Для пошуку можливої реакції геомагнітного поля на вибух вулкану відмічалися будь-які суттєві зміни характеру варіацій рівня X-, Y- і Z-компонент.

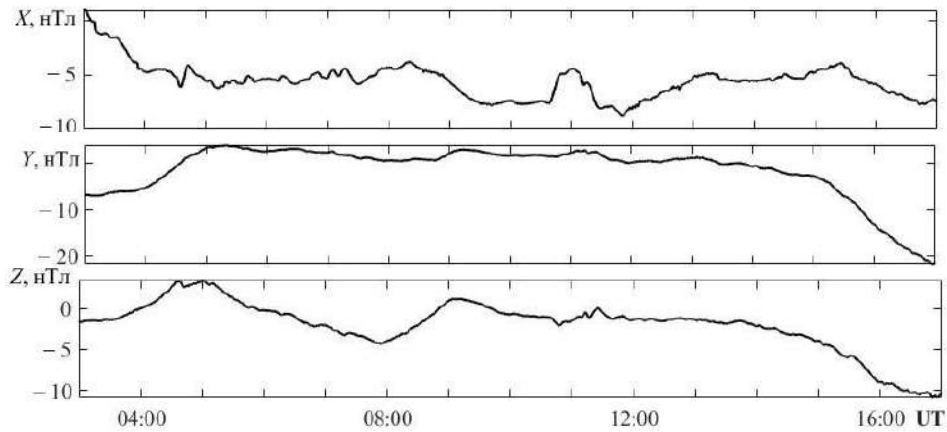
Станція PPT. У контрольні дні 13 та 17 січня 2022 р. в інтервалі часу 03:00–17:00 значення рівня X -компоненти флюктували приблизно від -12 до -5 нТл (рис. 4.7). Рівень Y -компоненти з 03:00 до 05:00 збільшувався від (-7) – (-10) до 3 – 5 нТл. Потім він флюктував у межах 2 – 3 нТл, поступово зменшуючись від ~ 0 до (-20) – (-25) нТл.

У день вибуху вулкану немонотонність рівня компонент збільшилася, дещо зросли флюктуації їхнього рівня. Суттєво зменшився тренд усіх компонент. Рівень X -компоненти зріс від -20 до 10 нТл, Y -компоненти зменшився від 10 до -25 нТл, а Z -компоненти – від 3 до -10 нТл. Крім того, спостерігалися шість груп збурень з часом запізнювання $\Delta t_1 \approx 16$ хв, $\Delta t_2 \approx 37$ хв, $\Delta t_3 \approx 50$ хв, $\Delta t_4 \approx 96$ хв, $\Delta t_5 \approx 150$ хв і $\Delta t_6 \approx 235$ хв (рис. 4.7). Найбільші (до 10 нТл) збурення мали місце після 14:00.

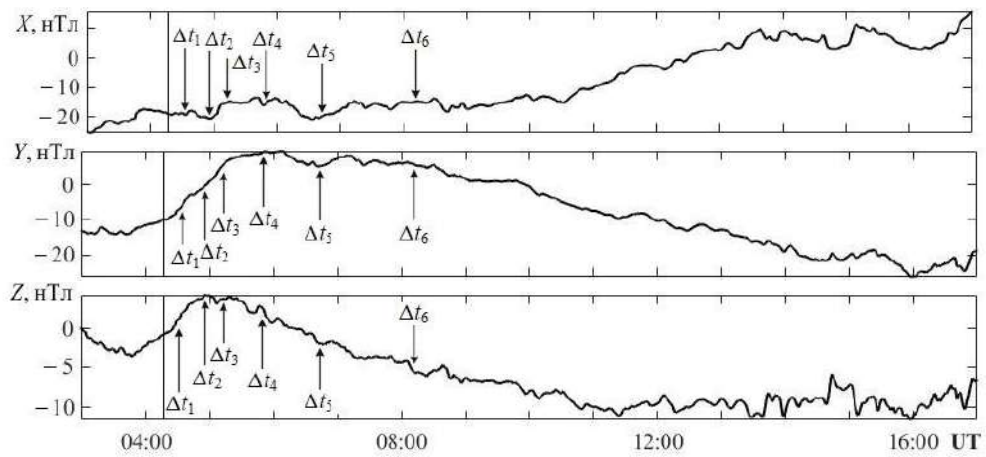
Станція СТА. У контрольні дні варіації рівня компонент були більш невеликими (рис. 4.8). Винятком були варіації X -компоненти 17 січня 2022 р. При цьому рівень флюктував у межах ± 5 нТл. У цей день тренд \bar{X} зростав від -10 до 0 нТл, тренд \bar{Y} , навпаки, зменшувався від 25 до 0 нТл, а тренд \bar{Z} від 12 до -7 нТл. 13 січня 2022 р. тренд \bar{X} з 03:00 до 04:00 різко зменшився від -18 до -28 нТл та й залишився на цьому рівні. Тренд \bar{Y} з 03:00 до 07:00 різко зменшився від 10 до 2 нТл, а потім зріс до 5 нТл. Далі він поступово зменшувався від 5 до 0 нТл. Тренд \bar{Z} з 03:00 до 07:00 різко зменшився від 0 до -8 нТл, а далі він флюктував біля рівня -5 нТл.

15 січня 2022 р. флюктуації рівня всіх компонент значно зросли. Тренд \bar{X} зріс від -20 до 15 нТл. Для Y -компоненти, крім флюктуацій, спостерігався глибокий провал від ~ 20 до -40 нТл, що мав місце з 05:45 до 08:30 (рис. 4.8). Для Z -компоненти з 04:00 до 07:15 також спостерігався провал від ~ 10 до -15 нТл, на зміну якому прийшов сплеск від -15 до ~ 22 нТл. Крім цього, на всіх компонентах мали місце збурення з часом запізнювання $22, 49, 71, 137, 217$ і 338 хв (рис. 4.8).

13.01.2022



15.01.2022



17.01.2022

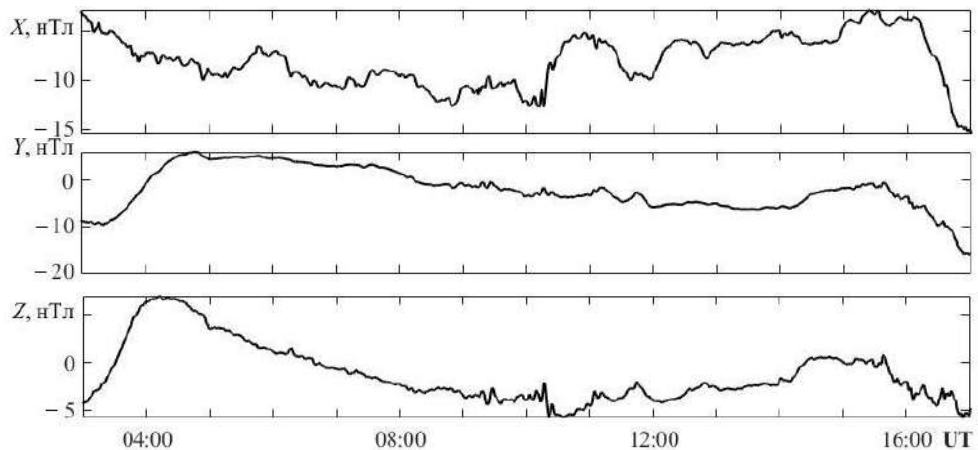


Рис. 4.7. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів на станції PPT у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

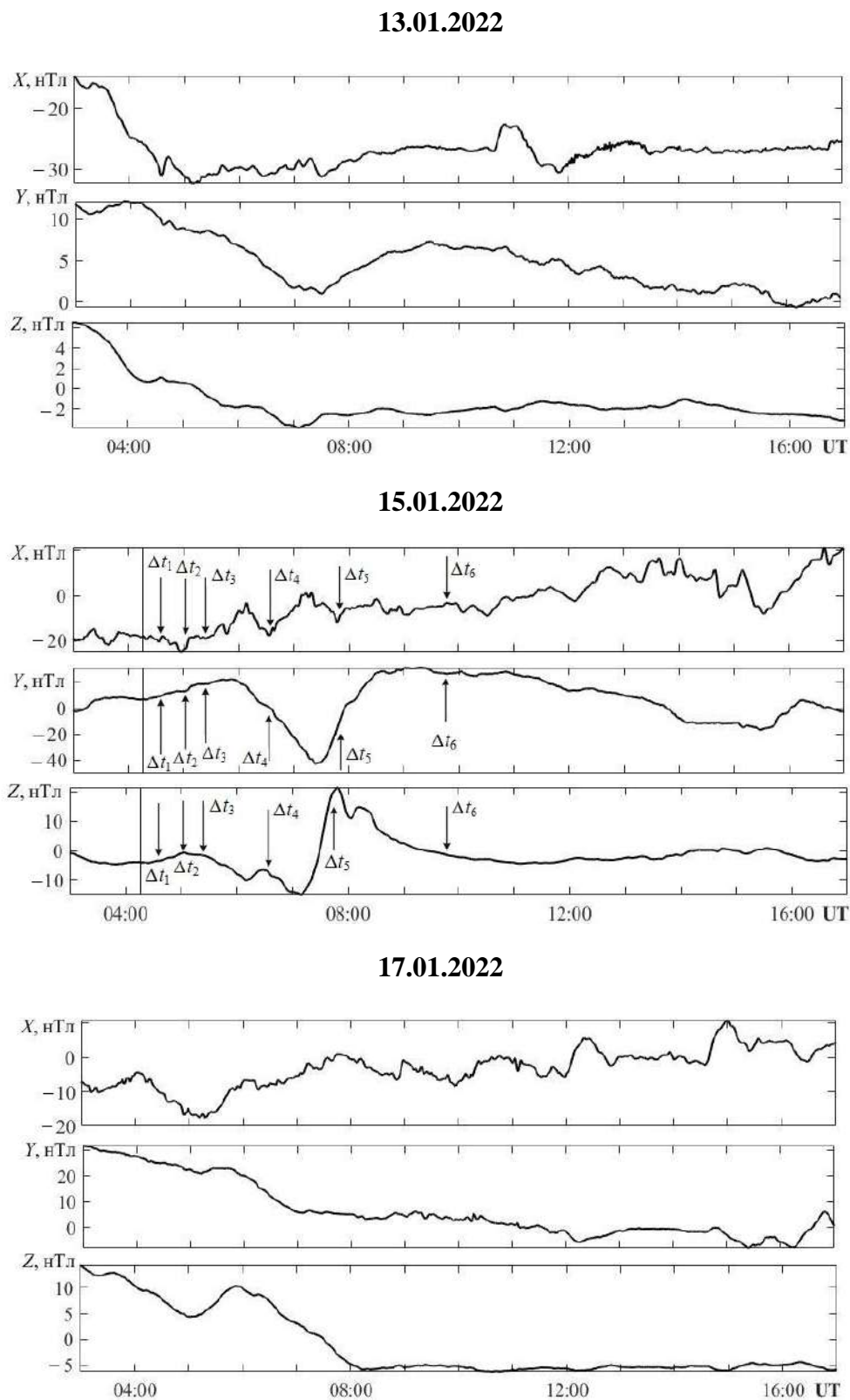


Рис. 4.8. Часові варіації X -, Y - і Z -компонентів на станції СТА у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

Станція HON. 13 січня 2022 р. тренд \bar{X} зростав від -7 до 5 нТл. Тренд \bar{Y} , навпаки, зменшувався від 5 до -10 нТл (рис. 4.9). Тренд \bar{Z} також зменшувався від 4 до 0 нТл. Рівень флуктуацій усіх компонент не перевищував $\pm(1-2)$ нТл. 17 січня 2022 р. поведінка трендів була подібною, але рівень флуктуацій сягав ± 5 нТл.

15 січня 2022 р. тенденція в трендах в цілому зберіглася, проте приблизно з 05:55 до 07:35 спостерігався провал, який сягав -10 , -5 та -2 нТл відповідно для X -, Y - і Z -компонент. Крім того, мали місце збурення з часом запізнювання 26, 61, 89, 173, 272 та 424 хв (рис. 4.9).

Станція KNY. 13 січня 2022 р. в трендах X , Y і Z з 00:00 до 08:00 спостерігався глибокий провал (рис. 4.10). З 08:00 до 17:00 мали місце незначні (± 1 нТл) флуктуації рівня геомагнітного поля.

17 січня 2022 р. глибокий провал також мав місце для \bar{Y} і \bar{Z} . Рівень флуктуацій усіх компонент сягав ± 5 нТл.

У день вибуху вулкану глибокий провал спостерігався з 00:00–01:00 до 04:00–05:00. Частота та рівень флуктуацій збільшилися. Спостерігалось шість груп збурень з часом запізнювання 39, 95, 140, 270, 435 та 685 хв (рис. 4.10). Амплітуда збурень сягала $4-5$ нТл. У компоненті Y виділявся квазіперіодичний процес з періодом $T \approx 70$ хв, амплітудою 4 нТл та часом запізнювання 435 хв.

Час запізнювання та вдавану горизонтальну швидкість поширення збурень наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Час запізнювання та вдавана горизонтальна швидкість поширення збурень

Станція	Δt_1 , хв	v'_1 , м/с	Δt_2 , хв	v'_2 , м/с	Δt_3 , хв	v'_3 , м/с	Δt_4 , хв	v'_4 , м/с	Δt_5 , хв	v'_5 , м/с	Δt_6 , хв	v'_6 , м/с
РРТ	16	4100	37	1420	50	1011	96	500	150	314	235	198
СТА	22	3900	49	1510	71	1008	137	504	217	314	338	200
HON	26	4000	61	1490	89	1000	173	498	272	313	424	200
KNY	39	3988	95	1507	140	1004	270	512	435	315	685	199

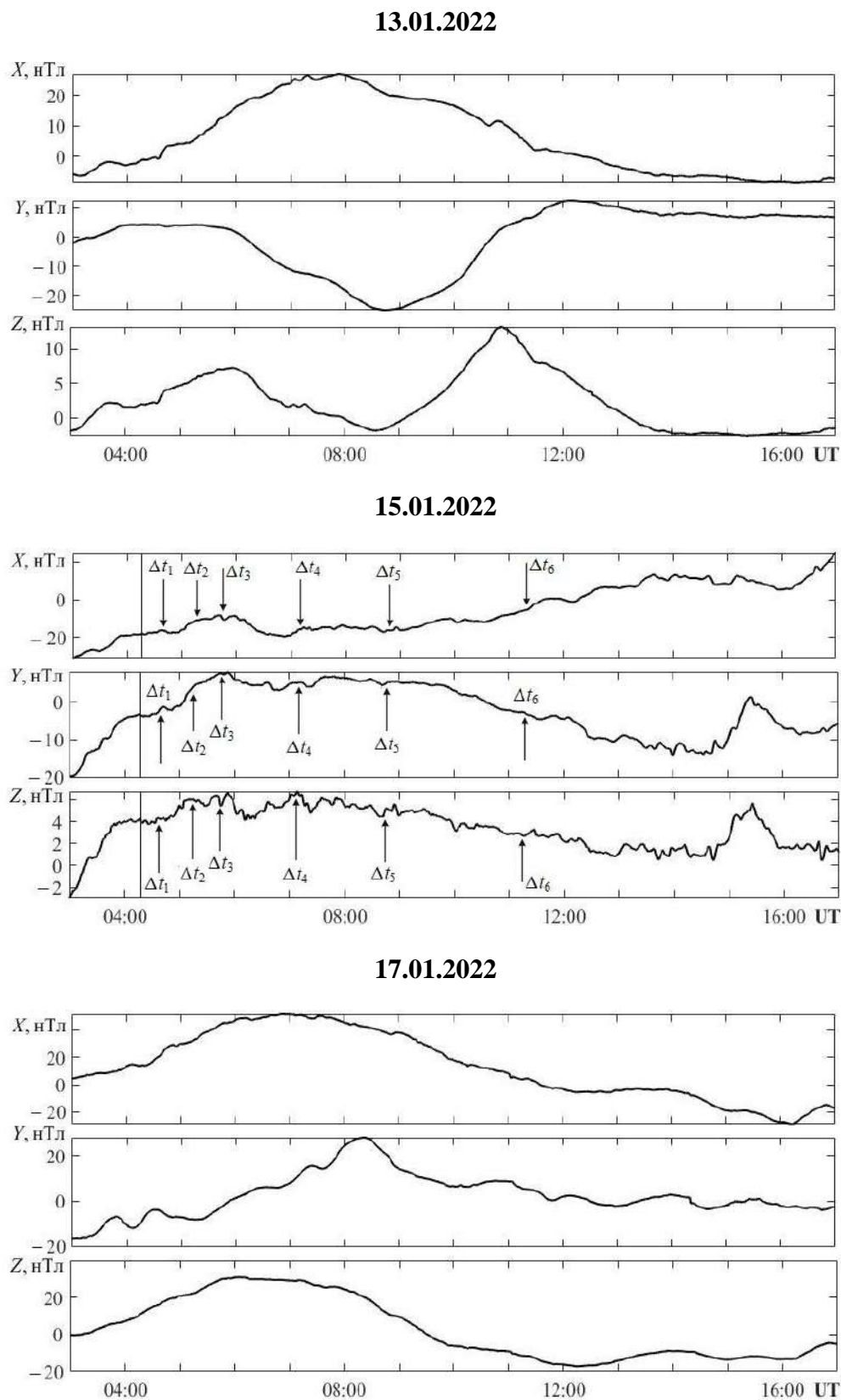


Рис. 4.9. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів на станції HON у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

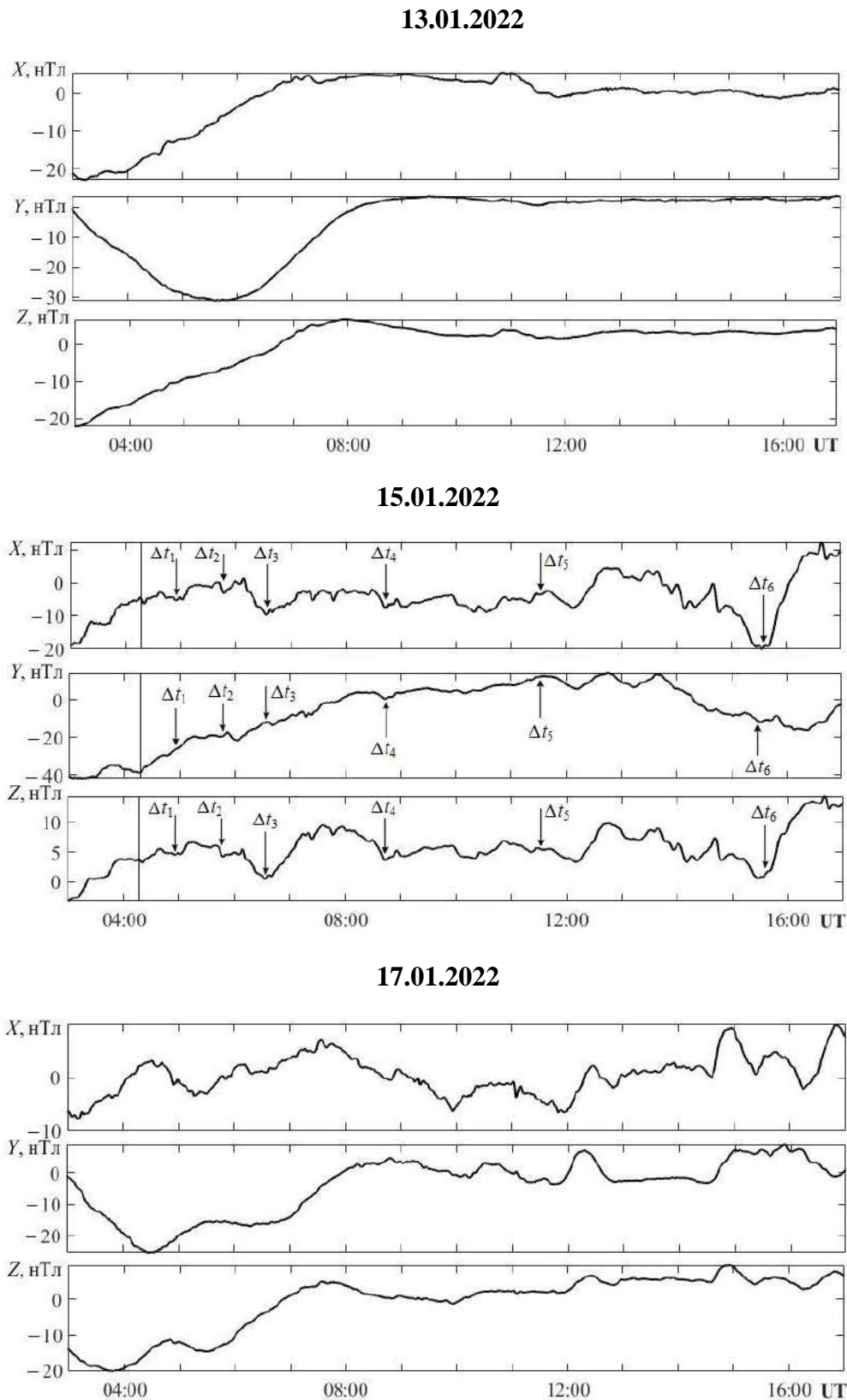


Рис. 4.10. Часові варіації X -, Y - і Z -компонентів на станції KNY у день вибуху вулкану та у контрольні дні. Вертикальною лінією позначено момент найпотужнішого вибуху. Стрілки вказують на можливі моменти реакції магнітного поля

При обчисленні вдової швидкості вважалося, що збурення від вулкану у вигляді вибухової хвилі спочатку вертикально поширювалося за час Δt_0 до іоносфери, а потім воно поширювалося вздовж іоносфери, викликаючи варіації геомагнітного поля. Такий механізм міг реалізовуватися при збудженні у іоносфері МГД хвиль або атмосферних гравітаційних хвиль. Хвилі Лемба та цунамі, навпаки, поширювалися вздовж поверхні Землі, викликаючи збурення у іоносфері та магнітному полі над місцем їх знаходження. У цьому випадку час поширення до іоносфери також складав Δt_0 . Тоді скоригована вдова горизонтальна швидкість дається наступним співвідношенням:

$$v' = \frac{r}{\Delta t - \Delta t_0},$$

де r – відстань від епіцентру вибуху до станції, де Δt – час запізнювання збурення магнітного поля.

Із табл. 4.2 видно, що зі збільшенням відстані від епіцентру вулкану всі значення часу запізнювання поступово збільшувалися. Якщо всі групи збурень викликані вибухом вулкану, необхідно встановити природу хвиль, що переносили збурення. У першій групі швидкість $v'_1 \approx 4$ км/с, а другій – $v'_2 \approx 1.5$ км/с. Такі швидкості властиві повільним МГД хвилям [189]. Саме такі швидкості поширення збурень ми неодноразово спостерігали після пусків потужних ракет [50, 189, 233].

Швидкість v'_3 близька до 1 км/с. Швидше за все це швидкість вибухової хвилі. Подібні швидкості після вибуху вулкану Тонга відмічали також автори [211, 214, 223]. Швидкість ~ 1 км/с також спостерігали після пусків ракет [50, 189, 233], потужних землетрусів [234] тощо.

Швидкість $v'_4 \approx 500$ м/с властива атмосферним гравітаційним хвилям [50, 54, 187, 189, 223, 233].

Швидкість $v'_5 \approx 313$ – 315 м/с мають хвилі Лемба [54]. Ці хвилі генеруються тільки під час потужних (не менше 10 Мт ТНТ) вибухів. Важливо, що вони

поширюються практично без загасання та дисперсії вздовж поверхні Землі по декілька разів огинаючи планету. Прояви хвилі Лемба після вибуху вулкану Тонга також виявили автори [199, 204, 213–215, 220].

Найменшу швидкість $v'_6 \approx 200$ м/с мають хвилі на поверхні Світового океану – цунамі, які здатні згенерувати атмосферні хвилі. Останні викликають квазіперіодичні збурення в іоносфері. Прояви хвиль цунамі також спостерігали автори робіт [201–208].

Отримані результати свідчать про те, що потужний вибух вулкану згенерував цілий спектр хвиль різної фізичної природи. Про це також згадується у роботах [199].

Механізм генерації збурень. Атмосферні хвилі густини на висотах іоносфери генерують або МГД хвилі, або сторонній електричний струм з густиною

$$j = eNv,$$

де e – заряд електрона, N – концентрація електронів у іоносфері, v – швидкість частинок у полі атмосферної хвилі. За $v = 1\text{--}10$ м/с, $N \approx 10^{11}$ м⁻³ маємо $j \approx 1.6 \cdot 10^{-8}\text{--}1.6 \cdot 10^{-7}$ А/м². З роторного рівняння Максвелла витікає, що збурення геомагнітного поля

$$\Delta B \approx \mu_0 j \Delta z,$$

де μ_0 – магнітна стала, Δz – товщина шару іоносфери, що дає внесок у збурення. За $j \approx 1.6 \cdot 10^{-8}\text{--}1.6 \cdot 10^{-7}$ А/м² та $\Delta z \approx 50$ км маємо $\Delta B \approx 1\text{--}10$ нТл. Для хвилі Лемба амплітуда збурення Y -компоненти складала ~ 4 нТл (рис. 4.10).

Значне (десятки нанотесла) аперіодичне зменшення компонент, швидше за все викликане генерацією під дією вулкану іоносферної «діри» зі зменшенням повного електронного вмісту ΔN_V від 3 до 10 TECU [223]. На висотах динамо-області це зменшення не перевищувало $\Delta N_V \approx 0.3\text{--}0.6$ TECU. Саме для динамо-області

$$\Delta B \approx \mu_0 e w \Delta N_V,$$

де w – швидкість вітру у динамо-області. За $w \approx 50$ м/с маємо $\Delta B \approx 30\text{--}60$ нТл, що добре погоджується з результатами спостережень (рис. 4.8).

Таким чином, вибух вулкану призвів до збурень у всій системі Земля (літосфера, океан) – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (геомагнітне поле), до перебудови взаємодії між підсистемами (океан – атмосфера – іоносфера – геомагнітне поле).

Головні результати досліджень.

1. У результаті аналізу часових варіацій X -, Y - і Z -компонент геомагнітного поля, зареєстрованих на станціях, що віддалені на відстані $\sim 2000\text{--}8000$ км від епіцентру вибуху вулкану Тонга, встановлено, що геомагнітний ефект носив глобальний характер.

2. Виявлено шість груп збурень компонент геомагнітного поля, які могли бути викликані вибухом вулкану. Швидкості, близькі до ~ 4 та 1.5 км/с, властиві МГД хвилям. Швидкість близька до ~ 1 км/с, характерна для вибухової хвилі. Швидкість ~ 500 м/с мають атмосферні гравітаційні хвилі. Збурення, що мали швидкості ~ 315 і 200 м/с, мабуть, поширювалися за рахунок хвилі Лемба та цунамі.

3. Оцінено амплітуду квазіперіодичних збурень геомагнітного поля, що складала $1\text{--}10$ нТл. Такі значення добре узгоджуються з результатами спостережень.

4. Оцінки величини аперіодичних збурень дали значення $30\text{--}60$ нТл, що також погоджувалося з результатами вимірювань.

5. Підтверджено, що потужний вибух вулкану призвів до збурення усіх підсистем у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

4.4. Висновки до розділу 4

1. Результати геомагнітного ефекту албанського землетрусу, який відбувся 26 листопада 2019 р. показали наступне.

Підтверджено можливість реєстрації геомагнітної реакції на потужний землетрус на значній відстані від епіцентру, що свідчить про ефективний міжсистемний зв'язок у системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера.

Обґрунтовано, що сейсмічна подія може ініціювати генерацію акустико-гравітаційних та магнітогідродинамічних хвиль, які забезпечують перенесення збурень від літосфери до іоносфери та магнітосфери.

Встановлено хвильову природу зафіксованих варіацій геомагнітного поля, пов'язану з модуляцією іоносферних струмів і концентрації електронів.

Показано можливість існування магнітних передвісників землетрусів у діапазоні періодів сотень секунд.

Доведено, що за умов відносно спокійної космічної погоди сейсмічний чинник може бути визначальним у формуванні локальних геомагнітних збурень.

Отримані результати підтверджують справедливість системної парадигми взаємодії геофізичних підсистем та наявність сейсмо-іоносферно-магнітосферного зв'язку.

2. У результаті проведеного дослідження над аналізом великомасштабних збурень геомагнітного поля, викликаного потужним вибухом вулкану Тонга, що відбувся 15 січня 2022 р., встановлено наступне.

Підтверджено, що потужний вибух вулкану Тонга спричинив великомасштабні збурення геомагнітного поля, які мали глобальний характер і реєструвалися на значних відстанях (до кількох тисяч кілометрів) від джерела.

Встановлено, що геомагнітні варіації були зумовлені генерацією комплексу хвиль різної фізичної природи – магнітогідродинамічних, вибухових, атмосферних гравітаційних, хвиль Лемба та хвиль цунамі, які забезпечили багатоканальний перенос енергії у системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера.

Показано, що часові затримки збурень із віддаленням від епіцентру узгоджуються з характерними швидкостями поширення відповідних хвиль, що підтверджує їх фізичну інтерпретацію.

Обґрунтовано механізм формування магнітних збурень через модуляцію іоносферних струмів атмосферними хвилями густини та генерацію магнітогідродинамічних збурень у плазмі.

Встановлено, що навіть за наявності помірної геомагнітної активності внесок вулканічного чинника був істотним і простежувався у структурі аперіодичних та квазіперіодичних варіацій.

Отримані результати підтверджують системний характер взаємодії підсистем геокосмосу та демонструють, що надпотужні вулканічні вибухи є ефективним джерелом глобальних геофізичних і магнітосферних збурень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано комплексне експериментально-теоретичне дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля Землі, зумовлених природними збуреннями в системі Сонце – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля. У ході виконання роботи отримано такі основні результати та сформульовано такі висновки.

1. Геомагнітне поле Землі підтверджено як складну нелінійну динамічну систему, у якій часові варіації рівня флуктуацій компонент X , Y та Z відображають процеси різної фізичної природи і масштабів. Показано, що аналіз саме рівня флуктуацій, а не лише абсолютних значень компонент, дозволяє більш чутливо виявляти переходи системи між квазістаціонарними та збуреними станами.

2. Розроблено та апробовано методичний підхід до аналізу часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля на основі спектральних і системних методів обробки часових рядів. Показано, що застосування системного спектрального аналізу дозволяє виділяти характерні частотні діапазони, у яких реалізуються різні механізми формування геомагнітних збурень.

3. Уперше в єдиному методичному підході виконано порівняльний аналіз рівня флуктуацій геомагнітного поля під час сонячних затемнень різних типів (2021–2024 рр.), що відбувалися за різних геофізичних і географічних умов. Встановлено, що сонячні затемнення супроводжуються переважно зменшенням рівня флуктуацій у низькочастотному діапазоні та перебудовою спектрального складу флуктуацій, зумовленою зниженням іоносферної електропровідності.

Виявлено, що геомагнітне поле реагує на сонячні затемнення з певною часовою затримкою, яка проявляється у зміщенні максимумів або мінімумів рівня флуктуацій відносно моментів максимального затемнення. Така особливість зумовлена релаксаційними процесами в іоносферних струмових

системах, що відіграють визначальну роль у формуванні спостережуваних геомагнітних ефектів.

4. Показано, що під час сонячних і геокосмічних бур відбувається істотне зростання рівня флуктуацій геомагнітного поля в широкому діапазоні частот, що відображає активацію хвильових процесів, плазмових нестійкостей і розвиток турбулентності в магнітосферно-іоносферному середовищі. Встановлено, що розширення спектрального складу флуктуацій є характерною ознакою інтенсивних фаз геомагнітних бур.

Уперше визначені основні статистичні характеристики геомагнітних бур впродовж 24-го циклу сонячної активності.

На прикладі детального аналізу геомагнітних бур 28 квітня – 2 травня 2023 р. та 4 – 7 листопада 2023 р. показано, що різні фази бурі характеризуються специфічними змінами рівня флуктуацій компонент геомагнітного поля. Зокрема, головна фаза бурі супроводжується максимальним зростанням амплітуди флуктуацій, тоді як фаза відновлення характеризується поступовим зменшенням їх інтенсивності та звуженням спектру.

5. Аналіз геомагнітних ефектів катастрофічних явищ (землетрусів і вибухів супервулканів) з позицій змін рівня та спектрального складу флуктуацій геомагнітного поля показав, що такі події супроводжуються аперіодичними та квазіперіодичними флуктуаціями, які зумовлені перш за все атмосферно-іоносферними механізмами вертикального переносу енергії.

6. Встановлено, що горизонтальні компоненти X і Y більшою мірою відображають глобальні магнітосферні процеси.

7. Встановлено характерні часові масштаби та амплітудні рівні флуктуацій геомагнітного поля для різних типів збурень, що дозволяє використовувати рівень флуктуацій як узагальнений параметр для ідентифікації типу геофізичної події та оцінки її інтенсивності.

8. Отримані результати мають фундаментальне значення для розвитку фізики геокосмічних процесів, оскільки поглиблюють уявлення про

нелінійну динаміку магнітосферно-іоносферної системи. Практичне значення роботи полягає в можливості використання отриманих закономірностей для задач моніторингу космічної погоди, інтерпретації магнітометричних даних та оцінки впливу геомагнітних збурень на природні й технічні системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чорногор Л. Ф., Домнін І. Ф. Фізика геокосмічних бур: Монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, Інститут іоносфери НАН і МОН України, 2014. 408 с.
2. Чорногор Л. Ф. Фізика потужного радіовипромінювання в геокосмосі: Монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. 448 с.
3. Чорногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. Космічна наука і технологія. 2021. Т. 27, № 1 (128). С. 3–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>.
4. Kivelson M. G., Russell C. T. Introduction to Space Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 568 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781139878296>.
5. Hargreaves J. K. The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 420 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628924>.
6. Akasofu S.-I. Polar and Magnetospheric Substorms. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1968. 280 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-3461-6>.
7. Gonzalez W. D., Tsurutani B. T. Geomagnetic storms and space weather effects. Space Science Reviews. 1987. Vol. 46. P. 173–204. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00171902>.
8. Axford W. I., Hines C. O. A unifying theory of high latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms. Canadian Journal of Physics. 1961. Vol. 39. P. 1433–1464. DOI: <https://doi.org/10.1139/p61-172>.
9. NOAA Space Weather Prediction Center (SWPC). Space weather data and forecasts of geomagnetic activity (Kp, Dst indices, G1–G5 storm scale). Available <https://www.swpc.noaa.gov>.
10. Beer T. On atmospheric wave generation by the terminator. Planet. Space Sci. 1978. Vol. 26. P. 185–188.

11. Somsikov V. M. Solar terminator and dynamic phenomena in the atmosphere: A review. *Geomagn. Aeron.* 2011. Vol. 51. P. 707–719. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793211060168>.

12. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю., Luo Y., Цимбал А. М., Шевелев М. Б. Варіації геомагнітного поля, що супроводжували сонячне затемнення 10 червня 2021 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2021. Вип. 34. С. 63–78. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-07>.

13. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2023. Вип. 36. С. 44–60. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-36-04>.

14. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Rozumenko V. T. Main features of the geomagnetic effect of the October 14, 2023 annular solar eclipse in the Americas. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2024. Vol. 265. Art. 106354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106354>.

15. Chernogor L. F., Holub M. Yu. Geomagnetic effect of the solar eclipse of April 8, 2024, in the North American sector. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, No. 3. P. 3133–3149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.002>.

16. Bauer L. A. Results of international magnetic observations made during the total solar eclipse of May 18, 1901, including results obtained during previous solar eclipses. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1902. Vol. 7, No. 4. P. 155–192. DOI: <https://doi.org/10.1029/TE007i004p00155>.

17. Chree C. Magnetic and electric observations at Kew Observatory relating to the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1915. Vol. 20, No. 2. P. 71–74. DOI: <https://doi.org/10.1029/TE020i002p00071>.

18. Bauer L. A., Fisk H. W. On the results of some magnetic observations during the solar eclipse of August 21, 1914. *Terrestrial Magnetism and*

Atmospheric Electricity. 1916. Vol. 21, No. 2. P. 57–86.

DOI: <https://doi.org/10.1029/TE021i002p00057>.

19. Bauer L. A. Results and analysis of magnetic observations during the solar eclipse of May 29, 1919. Summary I. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1920. Vol. 25, No. 3. P. 81–98.

DOI: <https://doi.org/10.1029/TE025i003p00081>.

20. Chapman S. The effect of a solar eclipse on the Earth's magnetic field. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. 1933. Vol. 38, No. 3. P. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1029/TE038i003p00175>.

21. Özcan O., Aydoğdu M. Possible effects of the total solar eclipse of August 11, 1999 on the geomagnetic field variations over Elazığ, Turkey. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2004. Vol. 66, No. 11. P. 997–1000.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.03.009>.

22. Curto J. J., Heilig B., Pinol M. Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2006. Vol. 111, A7. Art. A07312.

DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JA011499>.

23. Egbdal J., Ambolt N. The effect on geomagnetism of the solar eclipse of 30 June 1954. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1955. Vol. 7. P. 40–48. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(55\)90105-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(55)90105-7).

24. Nagata T., Nakata Y., Rikitake T., Yokoyama I. Effect of the solar eclipse on the lower parts of the ionosphere and the geomagnetic field. Reports of Ionosphere Research in Japan. 1955. Vol. 9. P. 121–135.

25. Nagata T., Rikitake T., Nakata Y. The effect of a solar eclipse on the lower part of the ionosphere and on the geomagnetic field. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1956. Vol. 6. P. 236–242.

26. Kato Y., Ossaka J. The effect of the solar eclipse on the Sq current of the diurnal variation. Science Reports of the Tohoku University. Series 5: Geophysics. 1956. Vol. 7 (Supplement). P. 21–29.

27. Rikitake T., Uyeda S., Tanaoka I., Nakagawa E. Preliminary report on the effect of the solar eclipse of April 19, 1958 on the geomagnetic field. Reports of Ionospheric Research in Japan. 1958. Vol. 12. P. 174–181.
28. Kato Y. The effect on geomagnetic field of the solar eclipse of October 12, 1958. Science Reports of the Tohoku University. Series 5: Geophysics. 1960. Vol. 12, No. 1. P. 1–10.
29. Tauer J. On methods used for determining the effect of a solar eclipse on the geomagnetic field. *Studia Geophysica et Geodaetica*. 1964. Vol. 8, No. 1. P. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02607050>.
30. Kato Y. The effect on the geomagnetic micropulsation of the solar eclipse of 20 July 1963. Science Reports of the Tohoku University. Series 5: Geophysics. 1964. Vol. 16, No. 2. P. 49–62.
31. Matsushita S. Effects of a solar eclipse on the equatorial geomagnetic field. *Annales de Géophysique*. 1966. Vol. 22. P. 471–477.
32. Bomke H. A., Blake H. A., Harris A. K., Hulse W. H., Sheppard D. J., Giesecke A. A., Pantoja A. Recombination coefficient and coronal contribution to E-layer ionization from magnetic observations of a solar eclipse. *Journal of Geophysical Research*. 1967. Vol. 72, No. 23. P. 5913–5918. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05913>.
33. Giesecke A. A., Casaverde M., Kato Y., Aoyama I., Takei S. The effect on the geomagnetic field of the solar eclipse of Nov. 12, 1966 at and near the dip equator. Reports of Ionosphere and Space Research in Japan. 1968. Vol. 22. P. 61–69.
34. Lilley F. E. M., Woods D. V. Magnetic observations of the solar eclipse of 23 October 1976 in Australia. *Nature*. 1977. Vol. 266. P. 823–824. DOI: <https://doi.org/10.1038/266823a0>.
35. Rastogi R. G. Solar eclipse effects on geomagnetism. Proceedings of the Indian National Science Academy. 1982. Vol. 48A (Supplement 3). P. 464–472.
36. D’Costa A., Perez G. Change of the geomagnetic pulsation regime in the period of the solar eclipse on October 12, 1977. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1984. Vol. 24, No. 4. P. 658–661.

37. Takeda M., Araki T. Ionospheric currents and fields during the solar eclipse. *Planetary and Space Science*. 1984. Vol. 32, No. 8. P. 1013–1019. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(84\)90057-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(84)90057-6).

38. Nevanlinna H., Häkkinen L. Geomagnetic effect of the total solar eclipse on July 22, 1990. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 1991. Vol. 43, No. 4. P. 319–321. DOI: <https://doi.org/10.5636/jgg.43.319>.

39. Walker G. O., Li T. Y. Y., Wong Y. W., Kikuchi T., Huang Y. N. Ionospheric and geomagnetic effects of the solar eclipse of 18 March 1988 in East Asia. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1991. Vol. 53, No. 1–2. P. 25–37. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(91\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(91)90017-2).

40. Brenes J., Leandro G., Fernández W. Variation of the geomagnetic field in Costa Rica during the total solar eclipse of July 11, 1991. *Earth, Moon, and Planets*. 1993. Vol. 63. P. 105–117. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00575100>.

41. Orozco A. L., Barreto L. M. Magnetic effects during the solar eclipse of July 11, 1991. *Geofísica Internacional*. 1993. Vol. 32, No. 1. P. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1993.32.1.1147>.

42. Thoa N. T. K., Chau H. D., Hao T. Q., Tri P. V., Son V. T., Truong L. V., Nam V. H. Magnetic and ionospheric observations during the October 24, 1995 total solar eclipse in Vietnam. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 1997. Vol. 8, No. 2. P. 155–164. DOI: [https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155\(ASEE\)](https://doi.org/10.3319/TAO.1997.8.2.155(ASEE)).

43. Střeščík J. The response of the 11 August 1999 total solar eclipse in the geomagnetic field. *Earth, Moon, and Planets*. 1999. Vol. 85. P. 561–566. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1017047627850>.

44. Malin S. R. C., Özcan O., Tank S. B., Tunçer M. K., Yazici-Çakin O. Geomagnetic signature of the 1999 August 11 total eclipse. *Geophysical Journal International*. 2000. Vol. 140, No. 3. P. F13–F16. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2000.00061.x>.

45. Korte M., Lühr H., Förster M., Haak V., Bencze P. Did the solar eclipse of August 11, 1999 show a geomagnetic effect? *Journal of Geophysical Research*:

Space Physics. 2001. Vol. 106, No. A9. P. 18563–18575. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001JA900006>.

46. Hvoždara M., Prigancová A. Geomagnetic effects due to an eclipse-induced low-conductivity ionospheric spot. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2002. Vol. 107, No. A12. Art. SIA 14-1–SIA 14-13. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JA009260>.

47. Onovughe E. V. Geomagnetic diurnal variation during the total solar eclipse of 29 March 2006. *International Journal of Astronomy*. 2013. Vol. 2, No. 4. P. 51–55. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.astronomy.20130204.01>.

48. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти сонячних затемнень в атмосфері і геокосмосі. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. 480 с.

49. Chernogor L. F. Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. Vol. 48, No. 5. P. 652–673. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793208050101>.

50. Chernogor L. F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-Earth environment. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 542 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b15614>.

51. Черногор Л. Ф. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 10 червня 2021 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2022. Т. 38, № 1. С. 11–24. DOI: [DOI: https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.016](https://doi.org/10.15407/kfnt2022.01.016).

52. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. 2-nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 628 p.

53. Tian Z., Sui Y., Zhu S., Sun Y.-Y. Enhancement of electron density in the ionospheric F2 layer near the first contact of the total solar eclipse on 21 August 2017. *Earth Space Sci*. 2021. Vol. 9. e2021EA002016. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021EA002016>.

54. Gossard E. E., Hooke W. H. *Waves in the atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves – Their generation and propagation*. Amsterdam,

Elsevier Scientific Publishing Co. (Developments in Atmospheric Science, №2), 1975. 470 p.

55. Heilig, B. Csontos A., Kovács P. The geomagnetic effect of the solar eclipse of August 11, 1999. *Contribut. Geophys. Geod.*, 2001. Vol. 31. P. 323–330.

56. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Holub M. Yu., Leus S. G., Rozumenko V. T. Solar flare of September 2017 magnetic effect. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. May 27 – 29, 2020. Kyiv, Ukraine. P. 76–77.*

57. Чорногор Л. Ф., Голуб М. Ю., Luo Y. Статистика геомагнітних бур протягом циклу сонячної активності (2009–2020 рр.). *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. «Радіофізика та електроніка»*. 2020. Вип. 33. С. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06>.

58. Чорногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Помірні магнітні бурі 28 квітня – 2 травня 2023 р. *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. «Радіофізика та електроніка»*. 2023. Вип. 35. С. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-35-04>.

59. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Rozumenko V. T. The multi-step geomagnetic storm of November 4–7, 2023, as a topic of applied physics. *Proceedings of the XXI International scientific conference electronics and applied physics. APHYS 2025. October, 21–24, 2025, Kyiv, Ukraine. P. 111 – 112.*

60. Chernogor L. F. Magnetospheric effects during the approach of the Chelyabinsk meteoroid. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. Vol. 58, No. 2. P. 252–265. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793218020044>.

61. Blagoveshchensky D. V., Sergeeva M. A., Corona-Romero P. Features of the magnetic disturbance on September 7–8, 2017 by geophysical data. *Advances in Space Research*. 2019. Vol. 64, No. 1. P. 171–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.03.037>.

62. Fagundes P. R., Pezzopane M., Habarulema J. B., Venkatesh K., Dias M. A. L., Tardelli A., de Abreu A. J., Pillat V. G., Pignalberi A., Bolzan M. J. A., Ribeiro B. A. G., Vieira F., Raulin J. P., Denardini C. M., Arcanjo M. O., Seemala

G. K. Ionospheric disturbances in a large area of the terrestrial globe by two strong solar flares of September 6, 2017, the strongest space weather events in the last decade. *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 66, No. 7. P. 1775–1791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.032>.

63. Fagundes P. R., Tsali-Brown V. Y., Pillat V. G., Arcanjo M. O., Venkatesh K., Habarulema J. B., Bolzan M. J. A., de Jesus R., de Abreu A. J., Tardelli A., Vieira F., Denardini C. M. Ionospheric storm due to solar coronal mass ejection in September 2017 over the Brazilian and African longitudes. *Advances in Space Research*. 2023. Vol. 71, No. 1. P. 46–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.040>.

64. Bergardt O. I., Ruohoniemi J. M., St-Maurice J.-P., Marchaudon A., Kosch M. J., Yukimatu A. S., Nishitani N., Shepherd S. G., Marcucci M. F., Hu H., Nagatsuma T., Lester M. Global diagnostics of ionospheric absorption during X-ray solar flares based on 8–20 MHz noise measured by over-the-horizon radars. *Space Weather*. 2019. Vol. 17. P. 907–924. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018SW002130>.

65. Chakraborty M., Singh A. K., Rao S. S. Solar flares and geomagnetic storms of September 2017: Their impacts on the TEC over 75°E longitude sector. *Advances in Space Research*. 2021. Vol. 68, No. 4. P. 1825–1835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.012>.

66. Anderson T. S., McCarthy M. P., Holzworth R. H. Detection of VLF attenuation in the Earth-ionosphere waveguide caused by X-class solar flares using a global lightning location network. *Space Weather*. 2020. Vol. 18. e2019SW002408. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019SW002408>.

67. Bothmer V., Daglis I. *Space Weather: Physics and Effects*. New York, NY: Springer-Verlag, 2006. ISBN: 3-642-06289-X.

68. Qian L., Wang W., Burns A. G., Chamberlin P. C., Coster A., Zhang S.-R., Solomon S. C. Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11 September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol. 124. P. 2298–2311.

DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JA026175>.

69. Mitra A. P. Ionospheric Effects of Solar Flares. Springer Science+Business Media B. V., Dordrecht. 1974.

DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-2231-6>.

70. Mostafa N., Ghamry E., Ellithi A., Gobashy M., Fathy A. Multi-space observations of the storm sudden commencement (September 2017) and its effect on the geomagnetic field. *Advances in Space Research*. 2022. Vol. 70, No. 3. P. 641–651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.023>.

71. Oikonomou C., Haralambous H., Paul A., Ray S., Alfonsi L., Cesaroni C., Sur D. Investigation of the negative ionospheric response of the 8 September 2017 geomagnetic storm over the European sector. *Advances in Space Research*. 2022. Vol. 70, No. 4. P. 1104–1120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.035>.

72. Daglis I. A. Geospace storm dynamics. *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, Vol. 176. Springer, Dordrecht, 2004. P. 11–36. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-2754-0_2.

73. Zhang S.-R., Coster A. J., Erickson P. J., Goncharenko L. P., Rideout W., Vierinen J. Traveling ionospheric disturbances and ionospheric perturbations associated with solar flares in September 2017. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol. 124. P. 5894–5917. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JA026585>.

74. Goodman J. M. *Space Weather and Telecommunications*. Springer, 2005.

75. Blagoveshchenskii D. V. Effect of Geomagnetic Storms (Substorms) on the Ionosphere: 1. A Review. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53, No. 3. P. 275–290. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793213030031>.

76. Blagoveshchenskii D. V. Effect of magnetic storms (substorms) on HF propagation: A review. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013. Vol. 53, No. 4. P. 409–423. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793213040038>.

77. Blagoveshchensky D., Sergeeva M. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument

study. *Advances in Space Research*. 2019. Vol. 63, No. 1. P. 239–256. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117718305787>.

78. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. Effects of the strong ionospheric storm of August 26, 2018: Results of multipath radiophysical monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. Vol. 61, No. 1. P. 73–91. DOI: <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>.

79. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding. *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 66, No. 2. P. 226–242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>.

80. Guo Q., Chernogor L. F. Polar Communications. In: Cui W., Fu S., Hu Z. (eds) *Encyclopedia of Ocean Engineering*. Springer, Singapore, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6963-5_112-1.

81. Freeman J. W. *Storms in Space*. Cambridge University Press, London, New York, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01771.x>.

82. Song P., Singer H., Siscoe G. (Eds.) *Space Weather (Geophysical Monograph)*. Union, Washington D.C., 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118668351>.

83. Benestad R. E. *Solar activity and Earth's climate*. Springer-Praxis, 2002. P. 287. DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-30621-8>.

84. Carlowicz M. J., Lopez R. E. *Storms from the Sun*. Joseph Henry Press, Washington DC, 2002. ISBN: 0-309-07642-0.

85. Lathuillère C., Menvielle M., Lilensten J., Amari T., Radicella S. M. From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments. *Annales Geophysicae*. 2002. Vol. 20, No. 7. P. 1081–1104. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-20-1081-2002>.

86. Lilensten J., Bornarel J. *Space Weather. Environment and Societies*. Springer, 2006. ISBN: 978-1-4020-4331-4.

87. Danilov A. D., Morozova L. D. Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics (review). *Geomagnetism and Aeronomy*. 1985. Vol. 25, No. 5. P. 705–721.

88. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms. In: *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Florida, USA: CRC Press, Boca Raton. Vol. 2. 1995. P. 195–248.

89. Buonsanto M. Ionospheric storms – A review. *Space Science Reviews*. 1999. Vol. 88, No. 3–4. P. 563–601.

DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>.

90. Danilov A. D., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *Int. J. Geomag. Aeron.* 2001. Vol. 2, No. 3. P. 209–224. URL: <http://ijga.agu.org/v02/gai99312/gai99312.htm>.

91. Danilov A. D. F-region influence on geomagnetic disturbances – A review. *Heliogeophysical Research*. 2013. No. 5. P. 1–33. URL: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=189>.

92. Blanch E., Altadill D., Boška J., Burešová D., Hernández-Pajares M. November 2003 event: Effects on the Earth's ionosphere observed from ground-based ionosonde and GPS data. *Annales Geophysicae*. 2005. Vol. 23. P. 3027–3034. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3027-2005>.

93. Pirog O. M., Polekh N. M., Zhrebtsov G. A., Smirnov V. F., Shi J., Wang X. Seasonal variations of the ionospheric effects of geomagnetic storms at different latitudes of East Asia. *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37, No. 5. P. 1075–1080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.007>.

94. Liu J., Wang W., Burns A., Yue X., Zhang S., Zhang Y., Huang C. Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm. *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 121, No. 1. P. 727–744. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>.

95. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zhrebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Advances in Space Research*. 2017. Vol. 60, No. 11. P. 2464–2476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>.

96. Borries C., Berdermann J., Jakowski N., Wilken V. Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120, No. 4. P. 3175–3186. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JA020988>.

97. Кацко С.В., Ємельянов Л.Я., Черногор Л.Ф. Особливості іоносферної бурі 21–24 грудня 2016 р. *Кінематика і фізика небесних тіл*. 2021. Т. 37, № 2. С. 57–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.057>.

98. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms. *Journal of Geophysical Research*. 1959. Vol. 64, No. 3. P. 305–321. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305>.

99. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J. Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116 (A11328). DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2011JA017042>.

100. Willis D. M., Stevens P. R., Crothers S. R. Statistics of the largest geomagnetic storms per solar cycle (1844–1993). *Annales Geophysicae*. 1997. Vol. 15, No. 6. P. 719–728. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0719-5>.

101. Yakovchouk O. S., Mursula K., Holappa L., Veselovsky I. S., Karinen A. Average properties of geomagnetic storms in 1932–2009. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, No. A3. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011JA017093>.

102. Abe O.E., Fakomiti M.O., Igboama W.N., Akinola O.O., Ogunmodimu O., Migoya-Orué Y. O. Statistical analysis of the occurrence rate of geomagnetic storms during solar cycles 20–24. *Advances in Space Research*. 2023. Vol. 71, No. 5. P. 2240–2251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.033>.

103. Al Shidi Q., Pulkkinen T., Toth G., Brenner A., Zou S., Gjerloev J. A large simulation set of geomagnetic storms – Can simulations predict ground magnetometer station, observations of magnetic field perturbations? *Space Weather*. 2022. Vol. 20, id: e2022SW003049. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003049>.

104. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes. *Int. J. Remote Sens.* 2011. Vol. 32, No. 11. P. 3199–3218. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>.

105. Chernogor L. F. Statistical Characteristics of Geomagnetic Storms in the 24th Cycle of Solar Activity. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2021. Vol. 37, No. 4. P. 193–199. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591321040048>.

106. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.* 2007. Vol. 7, GI3001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GI000125>.

107. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Phys. Radio Astron.* 2008. Vol. 13, No. 2. P. 120–137.

108. Chernogor L. F., Shevelev M. B. Latitudinal dependence of quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the greatest geospace storm of September 7–9, 2017. *Space Sci. and Technol.* 2020. Vol. 26, No. 2. P. 72–83. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2020.02.072>.

109. Daglis I. A. *Space Storms and Space Weather Hazards.* New York: Springer Dordrecht. 2001. <https://www.springer.com/gp/book/9781402000300>.

110. De Abreu A. J., Correia E., De Jesus R., Venkatesh K., Macho E. P., Roberto M. Statistical analysis on the ionospheric response over South American mid- and near high-latitudes during 70 intense geomagnetic storms occurred in the period of two decades. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2023. Vol. 245, id: 106060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106060>.

111. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? Magnetic storms. In: Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K., Eds. *Geoph. Monog. Series.* 1997. Vol. 98. P. 203–226. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM098p0203>.

112. Gonzalez W.D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 5771–5792.
DOI: <https://doi.org/10.1029/93JA02867>.
113. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Ionospheric disturbances during the severe magnetic storm of November 7–10, 2004. *Geomagn. Aeron.* 2007. Vol. 47. P. 720–738.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793207060059>.
114. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Results of Radar Studies of Processes in the Ionosphere that Accompanied the Strongest Geomagnetic Storm of September 25, 1998. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki.* 2003. Vol. 9. P. 57–94.
115. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 1. *Space Science and Technology.* 2007. Vol. 13, No. 5. P. 58–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2007.05.058>.
116. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 2. *Space Science and Technology.* 2007. Vol. 13, No. 5. P. 77–96. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2007.05.077>.
117. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Specific features of the ionospheric storm of March 20–23, 2003. *Geomagn. Aeron.* 2005. Vol. 45, No. 6. P. 745–757.
118. Grigorenko E. I., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F., Chernyaev S. V. Dynamic processes in the ionosphere during the severe magnetic storm of May 30–31, 2003. *Geomagn. Aeron.* 2005. Vol. 45, No. 6. P. 758–777.
119. Hsu C.-T., Pedatella N.M. Effects of forcing uncertainties on the thermospheric and ionospheric states during geomagnetic storm and quiet periods. *Space Weather.* 2023. Vol. 21, id: e2022SW003216.
DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003216>.

120. Kamide Y., Maltsev Y.P. Geomagnetic Storms. In: Kamide Y., Chian A., Eds. Handbook of the Solar-Terrestrial Environment. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 2007. P. 355–374. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-46315-3_14.

121. Katsko S.V., Emelyanov L.Ya., Chernogor L.F. Features of the Ionospheric Storm on December 21–24, 2016. Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2021. Vol. 37, No. 2. P. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591321020045>.

122. Katsko S.V., Emelyanov L.Ya., Domnin I.F., Chernogor L.F. Ionosphere response to geomagnetic storms on 7–8 September 2017 over Kharkiv (Ukraine). URSI GASS, Rome, Italy, 29 August – 5 September 2020. DOI: <https://doi.org/10.23919/URSIGASS49373.2020.9232440>.

123. Koskinen H.E.J. Physics of space storms. From Solar Surface to the Earth. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00319-6>.

124. Laskar F.I., Sutton E.K., Lin D., Greer K.R., Aryal S., Cai X. Thermospheric temperature and density variability during 3–4 February 2022 minor geomagnetic storm. Space Weather. 2023. Vol. 21, id: e2022SW003349. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003349>.

125. Laštovička J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere. J. Atmos. Terr. Phys. 1996. Vol. 58. P. 831–843. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00106-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00106-9).

126. Lin D., Wang W., Merkin V.G., Huang C., Oppenheim M., Sorathia K. Origin of dawnside subauroral polarization streams during major geomagnetic storms. AGU Advances. 2022. Vol. 3. id: e2022AV000708. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022AV000708>.

127. Luo Y., Chernogor L.F., Garmash K.P., Guo Q., Rozumenko V.T., Zheng Y. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August–2 September 2019 geospace storm: influence on high frequency

radio wave characteristics. *Ann. Geophys.* 2021. Vol. 39. P. 657–685. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>.

128. Luo Y., Chernogor L. F. Characteristic Features of the Magnetic and Ionospheric Storms on December 21–24, 2016. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2022. Vol. 38, No. 5. P. 262–278. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591322050051>.

129. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P. Magneto-Ionospheric Effects of the Geospace Storm of March 21–23, 2017. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2022. Vol. 38, No. 4. P. 210–229. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591322040055>.

130. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. М. Геокоsmічний ефект бурі 5–6 серпня 2019 р. *Космічна наука і технологія.* 2021. Т. 27, № 2. С. 45–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>.

131. Moldwin M. *An introduction to space weather.* Cambridge: Cambridge University Press. 2008.

132. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere. In: Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K., Eds. *Magnetic storms. Geoph. Monog. Series, 98.* 1998. P. 249–290. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM098p0227>.

133. Tariq M. A., Yuyan Y., Shah M., Shah M. A., Iqbal T., Liu L. Ionospheric-Thermospheric responses to the May and September 2017 geomagnetic storms over Asian regions. *Advances in Space Research.* 2022. Vol. 70, No. 11. P. 3731–3744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.050>.

134. Aa E., Zhang S. R., Lei J., Huang F., Erickson P. J., Coster A. J., Luo B., Kerr R. B. Significant midlatitude plasma density peaks and dual-hemisphere SED during the 10–11 May 2024 supergeomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2024. Vol. 129, No. 11. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024JA033360>.

135. Akasofu S.-I. *Electrodynamics of the magnetosphere: Geomagnetic storms.* *Space Science Reviews.* 1966. Vol. 6. P. 21–143.

DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00213406>.

136. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120, No. 10. P. 9023–9037. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JA021629>.

137. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J. D., Doornbos E., van den IJssel J. Global ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. Vol. 122, No. 11. P. 11,716–11,742. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JA024174>.

138. Astafyeva E., Yasyukevich Y. V., Maletckii A., Oinats A., Vesnin A., Yasyukevich A. S., Syrovatskii S., Guendouz N. Ionospheric disturbances and irregularities during the 25–26 August 2018 geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022. Vol. 127, No. 1, e2021JA029843. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021JA029843>.

139. Bojilova R., Mukhtarov P., Pancheva D. Global Ionospheric Response During Extreme Geomagnetic Storm in May 2024. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 21. P. 4046. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16214046>.

140. Cherniak I., Zakharenkova I. New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high latitude ionospheric irregularities monitoring: case study of June 2015 geomagnetic storm. *Earth, Planets and Space*. 2017. Vol. 69. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0652-0>.

141. Chernogor, L. F. Energetics of Physical Processes Operated on May 8–12, 2024: From the Solar Storm to Lithospheric Disturbances. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, No. 6, P. 4825–4849. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.069>.

142. Chernogor, L. F. A two-step geospace storm as a new tool for experimentally estimating the threshold condition for the formation of a substorm current wedge. *Annales Geophysicae*. 2025. Vol. 43. P. 15–35. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-43-15-2025>.

143. Chernogor, L. F., Bessarabova, V. O. Global manifestations of a unique geospace storm on May 10–13, 2024 in the F-region of the ionosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2025. Vol. 41, No. 5. P. 209–220. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591325050022>.

144. Chernogor, L. F., Rozumenko, V. T., Shevelev, M. B., Zheng, Yu. Global Features of the Extreme Geomagnetic Storm on May 10–11, 2024. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 76, Is. 2. P. 939–967. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.05.004>.

145. Chernogor L. F., Tkachenko M. Yu. Global variations of total electron content during the ionospheric storm on November 5, 2023. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference in part of the Science Day in Ukraine. May 28 – May 31, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 76–78.*

146. Chernogor L. F., Tkachenko M. Yu. The Impact of Ionospheric Weather on GNSS Radio Systems. *Proceedings of the XX International Scientific Conference Electronics and Applied Physics – APHYS 2024. October, 22–25, 2024, Kyiv, Ukraine. P. 248 – 249.*

147. Despirak I., Setsko P., Lubchich A., Hajra R., Sakharov Y., Gurbax Lakhina, Selivanov V., Tsurutani B. T. Geomagnetically induced currents (GICs) during strong geomagnetic activity (storms, substorms, and magnetic pulsations) on 23–24 April 2023. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2024. Vol. 261. P. 106293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106293>.

148. Evans J. S., Correia J., Lumpe J. D., Gholipour R., Valladares C. E., Jayachandran P. T., Thayer J. P., Burch J. L., Strickland D. J., Meng C.-I. GOLD observations of the thermospheric response to the 10–12 May 2024 geomagnetic storm. *Geophysical Research Letters*. 2024. Vol. 51, No. 16. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.22541/essoar.171926407.71074494/v1>.

149. Ghag K., Raghav A., Bhaskar A., Soni S. L., Sathe B., Shaikh Z., Dhamane O., Tari P. Quasi-planar ICME sheath: a cause of the first two-step extreme geomagnetic storm of the 25th solar cycle observed on 23 April 2023.

Advances in Space Research. 2024. Vol. 73. P. 6288–6297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.011>.

150. 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. The geomagnetic superstorm of 10 May 2024: Citizen science observations. EGU sphere. 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2174>.

151. Hajra R., Tsurutani B. T., Lakhina G. S., Lu Q., Du A., Mishev A., et al. Interplanetary causes and impacts of the 2024 May superstorm on the geosphere: an overview. The Astrophysical Journal. 2024. Vol. 974, No. 2. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad7462>.

152. Hayakawa H., Ebihara Y., Mishev A., Koldobskiy S., Kusano K., Bechet S., Yashiro S., Iwai K., Shinbori A., Mursula K., Miyake F., Shiota D., et al. The Solar and Geomagnetic Storms in May 2024: a flash data report. arXiv:2407.07665 [astro-ph.SR]. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.07665>.

153. Huang, F., Lei, J., Yue, X., Li, Z., Zhang, N., Cai, Y., Zhang, S.-R., Wang, Y., Zhong, J., Luan, X. Interplay of Gravity Waves and Disturbance Electric Fields to the Abnormal Ionospheric Variations During the 11 May 2024 Superstorm. AGU Advances. 2025. Vol. 6, No. 1. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024AV001379>.

154. Karan D. K., Martinis C. R., Daniell R. E., Eastes R. W., Wang W., McClintock W. E., Michell R. G., England S. GOLD observations of the merging of the southern crest of the equatorial ionization anomaly and aurora during the 10 and 11 May 2024 Mother's Day super geomagnetic storm. G. Res. Let. 2024. Vol. 51, Is. 15. Article e2024GL110632. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024GL110632>.

155. Kilpua E., Koskinen H. E. J., Pulkkinen T. I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. Living Reviews in Solar Physics. 2017. Vol. 14, article 5. DOI: <http://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6>.

156. Kim J.-H., Kwak Y.-S., Kim Y., Jee G. Analysis of the energy inflow into high-latitude regions during the geomagnetic storm period on November 3–4, 2021. AGU Fall Meeting Abstracts (SA31B-2849). 2023. URL: <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1405852>.

157. Kim J., Kwak Y. S., Lee C., Scarsi L., Arbinger J. Observational evidence of thermospheric wind and composition changes and the resulting ionospheric disturbances in the European sector during extreme geomagnetic storms. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2023. Vol. 13, 24. DOI: <https://doi.org/10.1051/swsc/2023025>.

158. Kruparova O., Krupar V., Szabo A., Lario D., Nieves-Chinchilla T., Martinez Oliveros J. C. Unveiling the Interplanetary Solar Radio Bursts of the 2024 Mother's Day Solar Storm. *The Astrophysical Journal Letters*. 2024. Vol. 970, L13. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad5da6>.

159. Nava B., Rodríguez-Zuluaga J., Alazo-Cuartas K., Kashcheyev A., Migoya-Orué Y., Radicella S. M., Amory-Mazaudier C., Fleury R. Middle- and low-latitude ionosphere response to 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016. Vol. 121, No. 4. P. 3421–3438. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JA022299>.

160. Parker W. E., Linares R., et al. Satellite Drag Analysis During the May 2024 Gannon Geomagnetic Storm. 2024. arXiv:2406.08617 [astro-ph.EP]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08617>.

161. Piersanti M., Alberti T., Bemporad A., Berrilli F., Bruno R., Capparelli V., Carbone V., Cesaroni C., Consolini G., Cristaldi A., Del Corpo A., Del Moro D., Di Matteo S., Ermolli I., Fineschi S., Giannattasio F., Giorgi F., Giovannelli L., Guglielmino S. L., Laurenza M., Lepreti F., Marcucci M. F., Martucci M., Mergè M., Pezzopane M., Pietropaolo E., Romano P., Sparvoli R., Spogli L., Stangalini M., Vecchio A., Vellante M., Villante U., Zuccarello F., Heilig B., Reda J., Lichtenberger J. Comprehensive analysis of the geoeffective solar event of 21 June 2015: effects on the magnetosphere, plasmasphere, and ionosphere systems. *Solar Physics*. 2017. Vol. 292. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1186-0>.

162. Ponomarchuk S. N., Zolotukhina N. A. Disturbances of ionospheric radio channel during magnetic storms in November–December 2023. *Solar-Terrestrial Physics*. 2024. Vol. 10, No. 4. P. 84–98. DOI: <http://doi.org/10.12737/stp-104202410>.

163. Raghav A., Shaikh Z., Vemareddy P., Mishra D., Bhaskar A., Sathe B., Dhamane O., Tari P. The possible cause of the most intense geomagnetic superstorm of the 21st century on 20 November 2003. *Solar Physics*. 2023. Vol. 298, No. 64. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02157-y>.

164. Ram S. Tulasi, Veenadhari B., Dimri A. P., Bulusu J., Bagiya M., Gurubaran S., Parihar N., Remya B., Seemala G., Singh Rajesh, Sripathi S., Singh S. V., Vichare G. Super-Intense Geomagnetic Storm on 10–11 May 2024: Possible Mechanisms and Impacts. *Space Weather*. 2024. Vol. 22, No. 12. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024SW004126>.

165. Regi M., Perrone L., Del Corpo A., Spogli L., Sabbagh D., Cesaroni C., Alfonsi L., Bagiacchi P., Cafarella L., Carnevale G., De Lauretis M., Di Mauro D., Di Pietro P., Francia P., Heilig B., Lepidi S., Marcocci C., Masci F., Nardi A., Piscini A., Redaelli G., Romano V., Sciacca U., Scotto C. Space Weather Effects Observed in the Northern Hemisphere during November 2021 Geomagnetic Storm: The Impacts on Plasmasphere, Ionosphere and Thermosphere Systems. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 22. P. 5765. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14225765>.

166. Singh R., Scipion D. E., Kuyeng K., et al. Ionospheric Disturbances observed over the Peruvian sector during the Mother's Day Storm (G5-level) on May 10–12, 2024. *ESS Open Archive*. DOI: <https://doi.org/10.22541/essoar.172108210.04033367/v1>.

167. Souza J. R., Dandenault P., Santos A. M., Riccobono J., Migliozzi M. A., Kapali S., Kerr R. B., Mesquita R., Batista I. S., Wu Q., Pimenta A. A., Noto J., Huba J., Peres L., Silva R., Wrasse C. Impacts of storm electric fields and traveling atmospheric disturbances over the Americas during 23–24 April 2023

geomagnetic storm: experimental analysis. *J. of Geoph. Res.: Space Physics*. 2024. Vol. 129. No. 7. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024JA032698>.

168. Spogli L., Cesaroni C., Di Mauro D., Pezzopane M., Alfonsi L., Musicò E., Povero G., Pini M., Dosis F., Romero R. M., Linty N. U., Abadi P., Nuraeni F., Husin A., Le H. M., Tran T. L., La T. V., Pillat V. G., Flourey N. Formation of ionospheric irregularities over Southeast Asia during the 2015 St. Patrick's Day storm. *J. of Geoph. Res.: Space Physics*. 2016. Vol. 121. P. 12,211–12,233. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JA023222>.

169. Spogli L., Sabbagh D., Regi M., Cesaroni C., Perrone L., Alfonsi L., Di Mauro D., Lepidi S., Campuzano S. A., Marchetti D., De Santis A., Malagnini A., Scotto C., Cianchini G., Xuhui Shen, Ippolito A. Ionospheric response over Brazil to the August 2018 geomagnetic storm as probed by CSES-01 and Swarm satellites and by local ground-based observations. *J. of Geoph. Res.: Space Physics*. 2021. Vol. 126, No. 2. e2020JA028368. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JA028368>.

170. Tilahun A. M., Uluma E., Ejigu Y. G. Variation of Total Electron Content During a Severe Geomagnetic Storm of 23–24 April 2023. *Astrophys. and Space Sci.* 2023. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5332574/v1>.

171. Vichare G., Bagiya M. S. Manifestations of strong IMF-By on the equatorial ionospheric electrodynamics during 10 May 2024 geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2024. Vol. 51, No. 23. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024GL112569>.

172. Xia H., Wang H., Zhang K. Extreme Responses of the Ionospheric Radial Currents to the Main Phase of the Super Geomagnetic Storm on 10 May 2024. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2024. Vol. 129, No. 12. P. 1–12. e2024JA033126. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024JA033126>.

173. Yamazaki Y., Matzka J., Siqueira da Silva M. V., Kervalishvili G. N., Korte M., Rauberg J. Assessment of Geomagnetic Activity for the Kp=9 “Gannon Storm” in May 2024 Based on Version 3.0 Hpo Indices. *ESS Open Archive*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.22541/essoar.171838396.68563140/v1>.

174. Yan Q., Yao H. B. Recent geomagnetic storms observed by Macau Science Satellite-1. *Earth and Planetary Physics*. 2024. Vol. 8, No. 4. P. 565–569. DOI: <http://doi.org/10.26464/epp2024047>.

175. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Голуб М. Ю., Леус С. Г., Шевелев М. Б., Луо У. Геомагнітний ефект албанського землетрусу 26 листопада 2019 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2020. Вип. 32. С. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-05>.

176. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Великомасштабні збурення геомагнітного поля, що супроводжували потужний вибух вулкану Тонга 15 січня 2022 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка»*. 2023. Вип. 37. С. 31–46. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2022-37-03>.

177. Черногор Л. Ф. Фізика Землі, атмосфери і геокосмосу з позицій системної парадигми. *Радіофізика та радіоастрономія*. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.

178. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера як відкрита динамічна нелінійна фізична система. Ч. 1. *Нелінійний світ*. 2006. Т. 4, № 12. С. 655–697.

179. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера як відкрита динамічна нелінійна фізична система. Ч. 2. *Нелінійний світ*. 2007. Т. 5, № 4. С. 198–231.

180. Chernogor L. F. Geomagnetic Disturbances Accompanying the Great Japanese Earthquake of March 11, 2011. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. Vol. 59, No. 1. P. 62–75. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793219010043>.

181. Chernogor L. F. Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. Vol. 59, No. 3. P. 374–382. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793219030041>.

182. Guo Q., Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T., Zheng Y. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan

on 7 July 2018. J. of Atmosph. and Solar-Terrest. Phys. 2019. Vol. 186. P. 88–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.003>.

183. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Garmash K. P., Chernogor L. F., Shulga S. M. HF radio-wave characteristic variations over China during moderate earthquake in Japan on September 5, 2018. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series: Radio Physics and Electronics. 2019. Vol. 30. P. 16–26. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-30-02>.

184. Luo Y., Garmash K. P., Chernogor L. F., Shulga S. M. Geomagnetic field fluctuations during Chuysk earthquakes on September–October 2003. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series: Radio Physics and Electronics. 2019. Vol. 31. P. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-09>.

185. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Yu. Seismic-ionospheric effects: results of radio soundings at oblique incidence. Radio Physics and Radio Astronomy. 2020. Vol. 25, No. 3. P. 218–230. DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.03.218>.

186. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P. Geomagnetic Effect of Turkish Earthquake of January 24, 2020. Radio Phys. Radio Astron. 2020. Vol. 25, No. 4. P. 276–289. DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra25.04.276>.

187. Черногор Л. Ф. Фізика і екологія катастроф: Монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна 2012. 556 с.

188. Chernogor L. F., Garmash K. P. Magnetospheric and Ionospheric Effects Accompanying the Strongest Technogenic Catastrophe. Geomagnetism and Aeronomy. 2018. Vol. 58, No. 5. P. 673–685. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016793218050031>.

189. Черногор Л. Ф. Радіофізичні і геомагнітні ефекти стартів ракет: Монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. 386 с.

190. Черногор Л. Ф. Можливий вплив запусків ракетно-космічної техніки на магнітне поле Землі. Вплив ракетно-космічної техніки на навколишнє середовище. GEOS, 2016. С. 795.

191. Chernogor L. F., Vertogradov G. G., Uryadov V. P., Vertogradova E. G., Shamota M. A. 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. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011; Vol. 53, No. 12. P. 688–705.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9262-z>.

192. Bolt B. A. Seismic air waves from the Great Alaskan earthquake. *Nature*. 1964 Jun 13. Vol. 202, No. 4937. P. 1095–1096.

DOI: <https://doi.org/10.1038/2021095a0>.

193. Donn W. L., Posmentier E. S. Ground-coupled air waves from the Great Alaskan earthquake. *J. of Geophys. Res.* 1964. Vol. 69, No. 24, P. 5357–5361.

DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ069i024p05357>.

194. Davies K., Baker D. M. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *J. of Geophys. Res.*, 1965. Vol. 70, No. 9. P. 2251–2253. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ070i009p02251>.

195. Row R. V. Evidence of long-period acoustic gravity waves launched into the F region by the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *J. of Geophys. Res.*, 1966. Vol. 71, No. 1. P. 343–345. DOI: <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00343>.

196. Moore G. W. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature*. 1964. Vol. 203. P. 508–509.

DOI: <https://doi.org/10.1038/203508b0>.

197. Chernogor L. F. Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system. *Space Science and Technology*. 2023. Vol. 29, No. 2. P. 54–77. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2023.02.054>.

198. Chernogor L. F. Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18 – 21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts. P. 12–13. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580141>.

199. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippres A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors RJ, Mendo-Pérez G, Mikesell TD, Munaibari E, Oyola-Merced M, Park I, Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022. Vol. 377, No. 6601. P. 95–100.

DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>.

200. Poli P., Shapiro N. M. Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha’apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, No. 8. e2022GL098123. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>.

201. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, No. 6. e2022GL098153. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>.

202. Heidarzadeh M., Gusman A. R., Ishibe T., Sabeti R., Šepić J. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 261. P. 112165.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>.

203. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by

the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. Vol. 179. P. 1549–1560. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03058-0>.

204. Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*. 2022. Vol. 377, No. 6601. P. 91–94. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>.

205. Lynett P. The Tsunamis Generated by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano on January 15, 2022. 16 March 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1377508/v1>.

206. Ramírez-Herrera M. T, Coca O., Vargas-Espinosa V. Tsunami Effects on the Coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Eruption, Tonga. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. Vol. 179. P. 1117–1137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03017-9>.

207. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*. 2022. Vol. 74. P. 61. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>.

208. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geoscience Letters*. 2022. Vol. 9, P. 24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>.

209. Chernogor L. F., Shevelev M. B. A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space science and technology*. 2024. Vol. 30, No. 1. P. 66–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.066>.

210. Carr J. L., Horváth Á., Wu D. L., Friberg M. D. Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49. e2022GL098131. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098131>.

211. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 9. P. 2179.

DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092179>.

212. Ern M., Hoffmann L., Rhode S., Preusse P. The mesoscale gravity wave response to the 2022 Tonga volcanic eruption: AIRS and MLS satellite observations and source backtracing. *Geophysical Research Letters*. 2022. Vol. 49, No. 10. e2022GL098626. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098626>.

213. 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., Šepić J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Belikov I. B., Gubanov D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. Vol. 179. P. 1533–1548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>.

214. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C.-C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave signatures in the Northern Hemisphere after Hunga-Tonga volcano eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, No. 8. e2022GL098222. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098222>.

215. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, No. 8. e2022GL098324. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098324>.

216. Vergoz J., Hupe P., Listowski C., Le Pichon A., Garcés M. A., Marchetti E., Labazuy P., Ceranna L., Pilger C., Gaebler P., Näsholm S. P., Brissaud Q., Poli P., Shapiro N., De Negri R., Mialle P. IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga,

Tonga: A global analysis. *Earth and Planetary Science Letters*. 2022. Vol. 591. P. 117639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639>.

217. Witze A. Why the Tongan volcanic eruption was so shocking. *Nature*. 2022. Vol. 602. P. 376–378. <https://media.nature.com/original/magazine-assets/d41586-022-00394-y/d41586-022-00394-y.pdf>.

218. Wright C. J., Hindley N. P., Alexander M. J., Barlow M., Hoffmann L., Mitchell C. N., Prata F., Bouillon M., Carstens J., Clerbaux C., Osprey S. M., Powell N., Randall C. E., Yue J. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption. *Nature*. 2022. Vol. 609. P. 741–746. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>.

219. 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. 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.* 2022. Vol. 2, No. 3. P. 100134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>.

220. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. Vol. 9. P. 871275. DOI: <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>.

221. Burt S. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai on 15 January 2022. *Weather*. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha’apai. 2022. Vol. 77, No.3. P. 76-81. DOI: <https://doi.org/10.1002/wea.4182>.

222. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Geophys. Res. Lett.*, 2022. Vol. 20, No.7. e2022SW003101. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022SW003101>.

223. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2022. Vol. 49, No. 10. e2022GL098827. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098827>.

224. Harding B. J., Wu Y.-JJ., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. Impacts of the January 2022 Tonga Volcanic Eruption on the Ionospheric Dynamo: ICON-MIGHTI and Swarm Observations of Extreme Neutral Winds and Currents. *Geophys. Res. Lett.*, 2022. Vol. 49, No.9. e2022GL098577. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098577>.

225. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2022. Vol. 49, No. 11. e2022GL099002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL099002>.

226. Rajesh P. K., Lin C. C. H., Lin J. T., Lin C. Y., Liu J. Y., Matsuo T., Huang C. Y., Chou M. Y., Yue J., Nishioka M., Jin H., Choi J. M., Chen S. P., Marty Chou, Tsai H. F. Extreme poleward expanding super plasma bubbles over Asia-Pacific region triggered by Tonga volcano eruption during the recovery-phase of geomagnetic storm. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, No. 15. e2022GL099798. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL099798>.

227. Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space.* 2022. Vol. 74, No. 57. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01619-0>.

228. Shinbori A., Otsuka Y., Sori T., Nishioka M., Perwitasari S., Tsuda T., Nishitani N. Electromagnetic conjugacy of ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and SuperDARN Hokkaido pair of radars observations. *Earth, Planets and Space.* 2022. Vol. 74, No. 106. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01665-8>.

229. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylkevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. Global

propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Let.* 2022. Vol. 49, No. 7. e2022GL098158. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098158>.

230. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. Magnetic Signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Let.*, 2022. Vol. 49, No. 10. e2022GL098454. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL098454>.

231. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga eruption event on 15 January 2022. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2022. Vol. 127, No. 7. e2022JA030540. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022JA030540>.

232. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. Wave-Related, Electrical, and Magnetic Effects Due to the January 15, 2022 Catastrophic Eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha'apai Volcano. *J. Volcanolog. Seismol.* 2022. Vol. 16, No. 4. P. 251–263. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0742046322040029>.

233. Luo Y., Chernogor L. F., Zhdanko Y. H. Geospace perturbations that accompanied rocket launches from the Baikonur cosmodrome. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2022. Vol. 38, No. 6. P. 3–24. DOI: <https://doi.org/10.15407/kfnt2022.06.003>.

234. Heki K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Let.* 2006. Vol. 33, L14303. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL026249>.

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці в фахових виданнях:

1. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Бухтоподібні варіації геомагнітного поля, що супроводжували катастрофічний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2023. Т. 39, №5. С. 3–23. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591323050033>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Розрахунок основних параметрів іоносферних збурень. Участь у фізичній інтерпретації отриманих результатів.)

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та основних результатів, їхній аналіз. Розробка математичної моделі.)

2. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Геомагнітний ефект сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. Т. 40, № 3. С. 3–25. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324030024>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Виконання аналітичних обчислень та розрахунків. Опис стану космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та висновків.)

3. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Помірні магнітні бурі 28 квітня – 2 травня 2023 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. Т. 40, № 6. С. 19–44. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324060023>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Написання окремих

розділів. Аналіз часових варіацій. Участь у фізичному тлумаченні отриманих результатів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Фізичне тлумачення. Написання обговорення та основних результатів.)

**Наукові праці в наукових виданнях, які індексуються
в наукометричній базі SCOPUS:**

4. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Bay-Shaped Variations in the Geomagnetic Field that Accompanied the Catastrophic Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2023. Vol. 39, No. 5. P. 247–260. DOI: <https://doi.org/S0884591323050033>.

5. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic Effect of the Solar Eclipse of October 25, 2022, in Eurasia. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. Vol. 40, No. 3. P. 117–137. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324030024>.

6. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. Main Features of the Geomagnetic Effect of the October 14, 2023 Annular Solar Eclipse over the Americas. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2024. Vol. 265. P. 106354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106354>.

7. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Moderate Magnetic Storms on April 28–May 2, 2023. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. Vol. 40, No. 6. P. 306–326. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324060023>.

8. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic effect of the solar eclipse of April 8, 2024, in the North American sector. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, Iss. 3. P. 3133–3149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.002>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Bay-shaped variations in the geomagnetic field that accompanied the catastrophic explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University*. May 23–26, 2023. Kyiv, Ukraine. P. 102–103.

2. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Large-scale geomagnetic field disturbances caused by the strong explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. APHYS 2023. October 17–21, 2023. Kyiv, Ukraine. P. 87–88.

3. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic effect of the October 25, 2022 partial solar eclipse in the Euro-Asian regio. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. May 28–31, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 81–83.

4. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. Global variations of the geomagnetic effect during the October 14, 2023 annular solar eclipse in the Americas. APHYS 2024. October 22–25, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 262–263.

5. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Features of the geomagnetic effect caused by the solar eclipse on April 8, 2024 in the American region. APHYS 2024. October 22–25, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 256–257.

6. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Yhang Yu. Features of the multi-step geomagnetic storm on November 4–7, 2023: observation results at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky Station. XII International Antarctic Conference. May 13–14, 2025. Kyiv, Ukraine. P. 68.

7. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Zheng Yu. Features of the multi-step geomagnetic storm on November 4–7, 2023: observation results at the Ukrainian Antarctic station Akademik Vernadsky. Astronomy and Space Physics in Kyiv University. May 27–30, 2025. Kyiv, Ukraine. P. 95–96.

8. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. The multi-step geomagnetic storm of November 4–7, 2023, as a topic of applied physics. Proceedings of the XXI International scientific conference electronics and applied physics. APHYS 2025. October, 21–24, 2025, Kyiv, Ukraine. P. 111–112.