

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра космічної радіофізики

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

Леонід ЧОРНОГОР

«\_\_»\_\_\_\_\_2025 року

Кваліфікаційна робота магістра

на тему:

**«ВАРІАЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ЩО СУПРОВОДЖУВАЛИ  
ДІЮ НА ІОНОСФЕРУ ПОТУЖНИМ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯМ»**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66

Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,

Освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»

**БОЙКОВ Денис Віталійович**

Керівник завідувач кафедри космічної радіофізики,

доктор фіз.-мат. наук, професор,

член-кореспондент НАНУ ЧОРНОГОР Л. Ф.

Консультант: аспірантка Голуб М. Ю.

Харків 2025 рік

## Реферат

Бойкова Д. В., Варіації геомагнітного поля, викликані дією потужного радіовипромінювання, Кваліфікаційна робота магістра, Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2025, 60 сторінок, 19 ілюстрацій, 28 джерел посилання.

В даній роботі були розглянуті варіації геомагнітного поля, викликані дією потужного радіовипромінювання.

Для аналізу часових варіацій рівня компонентів геомагнітного поля залучалися дані вимірювань станції, що належить міжнародній мережі INTERMAGNET ([https://intermagnet.org/data\\_download.html](https://intermagnet.org/data_download.html)). Перевага надавалася станції, які була найближчою до нагрівного стенда Тромсе.

*Ключові слова:* геомагнітне поле, іоносфера, потужне радіовипромінювання, флуктуації рівня, геокосмічні збурення.

## Abstract

Boikova D. V., *Variations of the Geomagnetic Field Caused by the Influence of Powerful Radio Emission*, Master's Qualification Thesis, Kharkiv, V. N. Karazin Kharkiv National University, Faculty of Radiophysics, Biomedical Electronics and Computer Systems, Department of Space Radiophysics, 2025, 60 pages, 14 illustrations, 28 references.

In this work, variations of the geomagnetic field caused by the influence of powerful radio emission were examined.

To analyze the temporal variations in the levels of geomagnetic field components, measurement data from a station belonging to the international INTERMAGNET ([https://intermagnet.org/data\\_download.html](https://intermagnet.org/data_download.html)) network were used. Preference was given to the station located closest to the Tromsø heating facility.

*Keywords:* geomagnetic field, ionosphere, high-power radio emission, fluctuations level, geospace disturbances.

## Зміст

ВСТУП .....	4
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	
1.1. Загальні відомості про геокосмос.....	6
1.2. Нагрівні стенди.....	9
1.3. Головні ефекти в іоносфері та магнітному полі, викликані дією потужного радіовипромінювання.....	11
1.4. Висновки до розділу 1.....	14
2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ	
2.1. Відомості про базу даних <i>Intermagnet</i> .....	16
2.2. Методи обробки даних.....	17
2.3. Стан космічної погоди.....	18
2.4. Висновки до розділу 2.....	20
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	
3.1. Варіації рівня компонентів геомагнітного поля.....	21
3.2. Результати системного спектрального аналізу .....	41
3.3. Фізичне тлумачення отриманих результатів.....	53
3.4. Висновки до розділу 3.....	55
ВИСНОВКИ	
Список використаної літератури.....	58

## ВСТУП

Геомагнітне поле Землі – це складна фізична система, яка визначає особливості взаємодії планети з навколоземним космічним простором. Воно забезпечує захист біосфери від потоків заряджених частинок, формує магнітосферу та впливає на поведінку електропровідної плазми в іоносфері.

Геомагнітне поле Землі є одним із найважливіших природних факторів, що визначають умови існування навколоземного простору та процеси у верхніх шарах атмосфери. Його варіації відображають як природні геофізичні явища – магнітні бурі, суббурі, іоносферні струми, – так і техногенні впливи, пов'язані з діяльністю людини.

Одним із джерел антропогенних збурень геомагнітного поля є потужне радіовипромінювання, що створюється спеціальними наземними установками для дослідження іоносфери, а також високочастотними передавачами та радіолокаційними системами. Такі випромінювання, взаємодіючи з плазмою іоносфери, можуть призводити до локальних і навіть великомасштабних змін електронної концентрації, виникнення штучних електричних струмів і, як наслідок, варіацій магнітного поля поблизу зони опромінення.

Протягом останніх десятиліть вчені активно досліджують не лише природні варіації геомагнітного поля, зумовлені сонячною активністю, але й антропогенні зміни, що виникають унаслідок діяльності людини. Зокрема, потужні радіотехнічні системи, здатні випромінювати енергію у високочастотному діапазоні, можуть викликати штучні варіації геомагнітного поля, змінюючи електрофізичні властивості іоносфери.

Дослідження цих варіацій має важливе значення для розуміння механізмів взаємодії електромагнітних хвиль із навколоземною плазмою, оцінки впливу техногенних факторів на магнітосферу та іоносферу, а також для вдосконалення методів активного зондування атмосфери.

*Актуальність* теми зумовлена зростанням потужності сучасних радіотехнічних систем і збільшенням кількості експериментів з активного впливу

на іоносферу, що потребує глибшого аналізу можливих наслідків для геомагнітного середовища Землі. а також оцінки можливих наслідків такого впливу для навігаційних, радіотехнічних і комунікаційних систем.

*Метою роботи* є виявлення можливості генерації штучних квазіперіодичних збурень геомагнітного поля в високих широтах під дією потужного періодичного радіовипромінювання ВЧ діапазона

*Об'єкт дослідження* – варіації компонент геомагнітного поля, викликані дією потужного радіовипромінювання високоширотного нагрівного станда Тромсьо на іоносферу.

*Предмет дослідження* – параметри варіацій компонент геомагнітного поля, викликані дією потужного радіовипромінювання.

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

## 1.1. Загальні відомості про геокосмос

Геокосмосом називають навколосемний простір, який охоплює верхні шари атмосфери, іоносферу, магнітосферу та зони взаємодії Землі з космічним середовищем [1, 4, 25]. Це складна багатокомпонентна система, у якій взаємодіють потоки заряджених частинок, електромагнітні поля, плазма та нейтральні гази.

Вивчення геокосмосу має важливе значення для розуміння фізичних процесів у навколосемному середовищі, впливу космічної погоди на технічні системи, а також для прогнозування геофізичних явищ, зокрема варіацій геомагнітного поля [2, 5, 24].

Атмосфера – це газова оболонка Землі, що простягається від поверхні планети на висоту понад 1000 км. Вона складається переважно з азоту (78%), кисню (21%) та незначних домішок інших газів (аргон, вуглекислий газ, водяна пара). За температурними характеристиками атмосфера поділяється на шари [5]:

Тропосфера (0–12 км) – основна маса повітря, де відбуваються погодні процеси.

Стратосфера (12–50 км) – містить озоновий шар, який поглинає ультрафіолетове випромінювання.

Мезосфера (50–85 км) – шар із різким зниженням температури.

Термосфера (85–800 км) – спостерігається зростання температури до 1000–1500 °С через поглинання короткохвильового випромінювання Сонця.

Екзосфера (понад 800 км) – зовнішня межа атмосфери, поступово переходить у міжпланетний простір.

Верхні шари атмосфери є зоною інтенсивної взаємодії сонячного випромінювання з газами, що створює умови для формування іоносфери.

Іоносфера – це частина атмосфери на висотах приблизно від 60 до 1000 км, у якій під дією сонячного ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання

гази частково іонізуються. Вона є електропровідною плазмовою оболонкою, що суттєво впливає на поширення радіохвиль і електромагнітних сигналів [5, 27].

Основні шари іоносфери: D-шар (60–90 км) – існує вдень, слабо іонізований, поглинає довгі радіохвилі; E-шар (90–140 км) – відбиває короткі радіохвилі, важливий для радіозв'язку; F1 і F2-шари (140–400 км) – найбільш іонізовані області, що визначають умови поширення сигналів короткохвильового діапазону [5, 27].

Іоносфера бере участь у формуванні електричних струмів (екваторіальних і середньозиротних), які зумовлюють добові варіації геомагнітного поля [13, 24].

Магнітосфера – це область навколо Землі, у якій рух заряджених частинок визначається її магнітним полем. Вона утворюється внаслідок взаємодії геомагнітного поля з потоком заряджених частинок сонячного вітру [4, 24, 26].

Структура магнітосфери включає: денну сторону, яка стискається під тиском сонячного вітру (на відстані  $\approx 10$  радіусів Землі); нічний бік (магнітний хвіст), що простягається у космос на сотні радіусів Землі; радіаційні пояси Ван Аллена, у яких накопичуються високоенергетичні електрони та протони [4, 24].

Під час підвищення сонячної активності у магнітосфері відбуваються магнітні бурі та суббурі, що викликають збурення в іоносфері, полярні сьйва та короточасні варіації геомагнітного поля [20, 24].

Геомагнітне поле – це природне магнітне поле Землі, яке має близьку до дипольної структури. Основним його джерелом є рухи розплавленої провідної речовини у зовнішньому ядрі Землі (механізм геодинамо) [4, 18].

Компоненти геомагнітного поля:

1. Головне поле – формується у ядрі Землі та є відносно стабільним.
2. Локальні аномалії – спричинені магнітними властивостями гірських порід земної кори.
3. Змінні компоненти (варіації) – зумовлені струмами в іоносфері й магнітосфері, а також впливом сонячної активності [16, 17, 20].

Середня індукція геомагнітного поля на поверхні Землі становить 30 – 60 мкТл (30 000 – 60 000 нТл) [4]. Його варіації можуть бути як природного

(сонячного), так і техногенного походження. Варіації цього поля спостерігаються у широкому діапазоні часових масштабів – від секундних (під час магнітних бур) до багаторічних (геомагнітні віки) [24].

Атмосфера, іоносфера, магнітосфера та геомагнітне поле тісно взаємопов'язані [2, 24]:

1. Сонячне випромінювання змінює ступінь іонізації іоносфери.
2. Іоносферні струми спричиняють варіації геомагнітного поля.
3. Магнітосфера реагує на зміни сонячного вітру, породжуючи потоки заряджених частинок, які взаємодіють з іоносферою.

Таким чином, геокосмос є відкритою динамічною нелінійною електромагнітною системою, у якій взаємодіють земні та космічні процеси [1, 2, 24].

## 1.2. Нагрівні стенди

Перші дослідження штучного впливу на іоносферу розпочалися зі створення у 1961 р. в СРСР стенда, який працював поблизу гірчастоти електронів і мав рекордну для того часу ефективну потужність близько 1 ГВт [3]. У 1970-х роках з'явилися нові установки ВЧ-діапазону, серед яких американський стенд «Платтевілль» та низькоширотна система Аресібо з потужністю до 300 МВт [3, 6].

У СРСР подальший розвиток привів до створення стендів «Зименки» і «Сура», причому останній забезпечував до 320 МВт ефективного випромінювання. Також працювали комплекси в Харкові, Москві, Мончегорську та низькоширотний стенд «Гісар» [3].

Одним із найважливіших об'єктів став високоширотний стенд Тромсе (Норвегія, з 1980 р.), який і нині активно використовується для досліджень [9]. У 1990 р. був введений у дію комплекс HAARP (Аляска), що має одну з найбільших у світі потужностей – до 4 ГВт [14]. Разом із установками HIPAS та SPEAR він формує сучасну експериментальну базу для вивчення іоносферних процесів [3, 9].

Тепловий (нагрівний) механізм виникає тоді, коли електрони під дією електричного поля радіохвилі набувають упорядкованої швидкості, яка під час зіткнень переходить у тепловий рух [3, 6]. Через значну різницю мас електрон майже не передає енергію важким частинкам, і частка втрат при одному зіткненні становить

$$\delta \approx \frac{m}{m_i},$$

а для непружних зіткнень з молекулами

$$\delta \approx (10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}).$$

Розглянемо баланс енергії в одиниці об'єму плазми. Потужність, яку електрони отримують від хвилі відповідно до закону Джоуля–Ленца, дорівнює

$$P_{\text{Л}} = \sigma E^2,$$

де  $\sigma$  – провідність плазми [6].

Енергія, що електрони втрачають у зіткненнях з іонами та нейтральними частинками, описується [3, 6]

$$P_{\text{вт}} = 3n_e k(T_e - T_{e0})\nu_e,$$

де  $T_e$  – температура електронів у полі хвилі,  $T_{e0}$  – початкова температура,  $\nu_e$  – ефективна частота зіткнень.

У стаціонарному режимі

$$P_{\text{JL}} = P_{\text{вт}},$$

і рівняння балансу тепла набуває вигляду

$$\sigma E^2 = 3n_e k(T_e - T_{e0})\nu_e.$$

Для гармонічного електричного поля

$$E(t) = E_0 \cos \omega t,$$

осциляторна швидкість електронів, отримана з рівняння руху,

$$m \frac{dv}{dt} = -eE - m\nu_e v,$$

має вигляд

$$v(t) = \frac{eE_0}{m\sqrt{\omega^2 + \nu_e^2}} \cos(\omega t - \varphi).$$

Потужність, що передається електронами в середньому за період коливання,

$$\langle P_{\text{JL}} \rangle = \frac{\sigma E_0^2}{2}.$$

Після підстановки в баланс отримуємо формулу для збуреної температури електронів:

$$T_e = T_{e0} \left( 1 + \frac{E_0^2}{E_p^2} \right),$$

де

$$E_p = \sqrt{\frac{6n_e k T_{e0} \nu_e}{\sigma}}$$

– плазмове поле, що визначає характерну величину нагріву.

Як впливає з формули для збуреної температури електронів, при  $E_0 = E_p$  температура електронів зростає удвічі:

$$T_e = 2T_{e0}.$$

Таким чином, плазмове поле  $E_p$  є ключовим параметром, що визначає ефективність теплового впливу радіохвилі на електрони плазми [3, 6].

### **1.3. Головні ефекти в іоносфері та магнітному полі, викликані дією потужного радіовипромінювання**

Потужне радіовипромінювання (ПРВ), зокрема в діапазоні високих частот (HF) і надвисоких частот (VHF, UHF), здатне істотно впливати на іоносферу та геомагнітне поле Землі [3, 7, 9]. Це явище активно досліджується в радіофізиці та космічній фізиці, бо воно може змінювати провідність іоносфери, електронну концентрацію та електромагнітну взаємодію між шарами атмосфери і магнітосферою.

*Ефекти в іоносфері.* Під впливом потужного радіовипромінювання спостерігаються такі ефекти [7, 8, 9, 14]:

1. Нагрів електронів. Електрони поглинають енергію радіохвиль і нагріваються. Нагрів електронів змінює температуру іоносферного плазмового середовища, що впливає на швидкість поширення радіохвиль та на відбиття HF сигналів.

2. Іонізація. ПРВ підвищує енергію електронів і сприяє додатковій іонізації газів іоносфери. Це призводить до зміни електронної концентрації ( $N_e$ ), особливо у F- та D-шарах.

3. Генерація плазмових хвиль. Потужне випромінювання може викликати плазмові коливання: іон-acoustic, Langmuir-хвилі. Ці коливання можуть взаємодіяти з іншими хвилями і викликати самопідсилення сигналу або формування нестійкостей плазми.

4. Формування штучних аномалій іоносфери. Локальне впливання ПРВ створює області підвищеної іонізації — штучні «плазмові хмари». Це може впливати на роботу радіолокаційних систем і навігаційних сигналів GPS/GNSS.

5. Стимуляція ефектів розсіяння. Потужні HF-промені призводять до нелінійного розсіяння сигналів на іоносферних структурах. Це явище використовується в експериментальних станціях типу HAARP, EISCAT, для вивчення іоносферних процесів.

*Ефекти в магнітному полі.* ПРВ може впливати і на геомагнітне поле через взаємодію з іоносферою та магнітосферою [2, 10–13]:

1. Індукція електричних струмів. Потужне радіовипромінювання підвищує провідність іоносфери, що призводить до появи індукованих струмів (Telluric currents) у магнітосфері та земній корі.

2. Зміни локального магнітного поля. Локальні електричні струми змінюють локальну напруженість магнітного поля, що можна зафіксувати магнітометрами. Це явище використовується для дослідження ефектів магнітної рефракції радіохвиль.

3. Взаємодія з плазмовими хвилями. Магнітне поле спрямовує і стабілізує плазмові коливання, викликані ПРВ. Може формувати штучні електромагнітні аномалії, що впливають на поширення HF і VHF сигналів.

Наведемо характерні приклади експериментів [3, 9, 14].

1. HAARP (Alaska, США): дослідження нагріву іоносферного електронного газу HF-променем і спостереження за плазмовими хвилями.

2. EISCAT (Швеція, Норвегія, Фінляндія): вплив радіохвиль на верхні шари атмосфери та магнітне поле.

3. Sura (Росія): експерименти зі створення штучних іоносферних неоднорідностей та їх впливу на сигнал GPS.

4. Tromsø (Норвегія) — EISCAT Heating Facility: установку створено поруч із полярною станцією EISCAT Scientific Association (Ramfjordmoen, ~ 30 км на південь від Тромсе). Частоти роботи становлять приблизно 3.85–8 МГц для HF-нагріву. Система має кілька передавальних антенних масивів/прошалок (напр.,

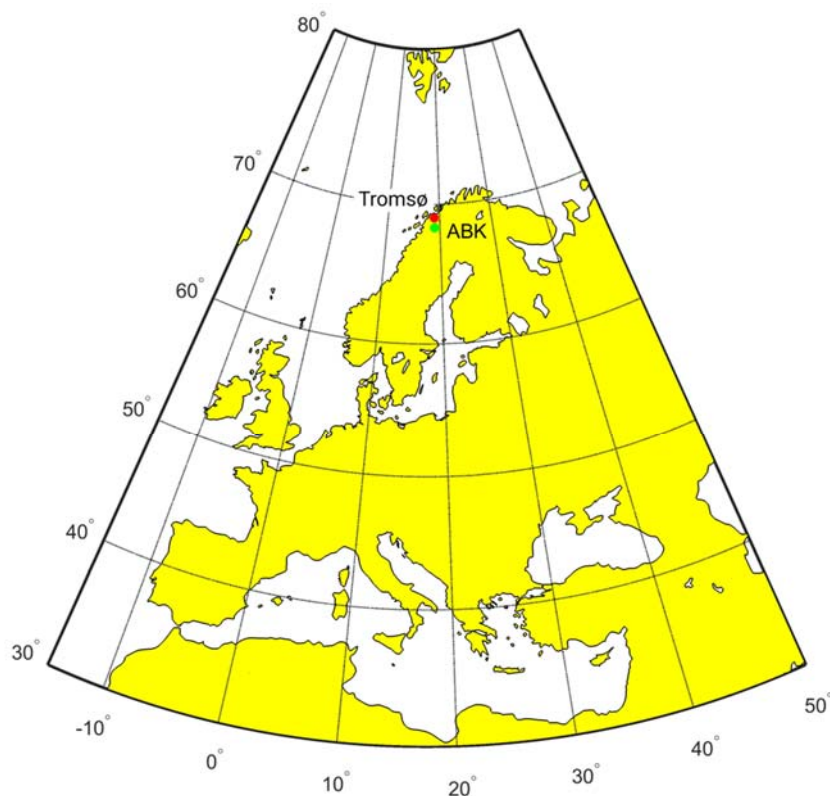
з масиви) та декілька передавачів. Область застосування: дослідження плазми іоносфери, контрольоване введення енергії в іоносферу, дослідження взаємодій плазми, магнітного поля і радіохвиль.

Саме станція Tromsø має важливе значення для високоширотних досліджень, бо розташована в зоні, де магнітне поле майже вертикальне, це дає особливі умови для вивчення плазмових й електромагнітних явищ [9]. Тому в даній роботі, для аналізу часових варіацій рівня компонентів геомагнітного поля залучалися дані вимірювань станції, які була найближчою до нагрівного стенда Тромсе (географічні координати – Норвегія 69.6492° N, 18.9543° E).

Взагалі були досліджені дані з 10 станцій, розташованих у Європі, користуючись даними зі світової мережі INTERMAGNET ([https://intermagnet.org/data\\_download.html](https://intermagnet.org/data_download.html)), (табл. 1.1) [15–17]. Але в цій роботі детально досліджується дані однієї станції (ABK), яка знаходиться у Швеції, приблизно в 140 км. від нагрівного стенду Тромсьо (Норвегія) (рис. 1.1).

Таблиця 1.1. Загальні відомості про станції

	Станція та країна	Географічні координати, широта/довгота	Відстань до джерела, км
1	Abisko (ABK) Sweden	68.3580°N, 18.8230°E	139
2	Hornsund (HRN) Norway	77.0000°N, 15.5500°E	830
3	Nurmijarvi (NUR) Finland	60.5100°N, 24.6600°E	1041
4	Borok (BOX) Russia	58.0700°N, 38.2300°E	1570
5	Niemegk (NGK) Germany	52.0700°N, 12.6800°E	1977
6	Kiev (KIV) Ukraine	50.7200°N, 30.3000°E	2178
7	Lviv (LVV) Ukraine	49.9000°N, 23.7500°E	2204
8	Furstenfeldbruck (FUR) Germany	48.1700°N, 11.2800°E	2420
9	Duronia (DUR) Italy	41.6500°N, 14.4700°E	3120
10	San Fernando (SFS) Spain	36.6670°N, 5.9450°W	3960



*Рис. 1.1.* Географічне розташування іоносферного нагрівного стану Тромсе та магнітометричної станції, що використовувалися для спостереження та аналізу варіацій геомагнітного поля

#### 1.4. Висновки до розділу 1

Геокосмос – це складна багаторівнева система, що включає атмосферу, іоносферу, магнітосферу та геомагнітне поле. Іоносфера є провідною ланкою, через яку здійснюється енергетичний і електромагнітний обмін між Сонцем і Землею. Іоносфера забезпечує захист планети від сонячного вітру, але водночас є джерелом геомагнітних збурень. Геомагнітне поле відображає як внутрішні процеси у надрах Землі, так і зовнішні космічні впливи.

Вивчення геокосмосу є ключовим для розвитку супутникових технологій, прогнозування космічної погоди та розуміння природних і техногенних процесів у навколоземному просторі.

Потужне радіовипромінювання змінює електронну концентрацію і температуру іоносфери, створює плазмові коливання і локальні аномалії. Взаємодія з геомагнітним полем викликає індуковані струми та локальні зміни магнітного поля. Ці ефекти використовуються як для досліджень іоносфери, так і для технічних експериментів у радіофізиці та космічних технологіях.

Нагрівні стенди у радіофізиці – це ефективний інструмент для дослідження температурних властивостей геокосмосу. Вони є невід’ємною частиною сучасних науково-дослідних центрів, що працюють у сфері радіоелектроніки, телекомунікацій та космічних технологій.

В цій роботі ми будемо користуватися даними зі станції, яка була розташована найближче саме до станції Tromsø. Цей стенд дозволяє вивчати такі ефекти, як нагрів електронів у іоносфері, генерація плазмових хвиль, штучні неоднорідності (наприклад, поле-зумовлені канали) та вплив на магнітне поле. Станція має важливе значення для високоширотних досліджень, бо розташована в зоні, де магнітне поле майже вертикальне – це дає особливі умови для вивчення плазмових й електромагнітних явищ.

## 2. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

### 2.1. Відомості про базу даних *Intermagnet*

INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network) – це міжнародна мережа спостережних магнітних обсерваторій, яка забезпечує стандартизовані цифрові вимірювання геомагнітного поля Землі через численні станції по всьому світу [28]. Мета – забезпечити дані високої якості, у (майже) реальному часі, для наукових, прикладних та операційних задач.

Мережа започаткована офіційно на початку 1990-х роках. На сьогодні мережа налічує понад 130 станцій (станом на 2025 рік) у більш ніж 40 країнах.

Обсерваторії (“IMO” – INTERMAGNET Magnetic Observatories) підключені до мережі, мають дотримуватися чітких технічних стандартів. Дані передаються до центрів збору – так званих Geomagnetic Information Nodes (GINs) – у режимі близькому до реального часу. Встановлені принципи, що дані повинні бути загальнодоступні для наукового використання, із певними обмеженнями на комерційне використання [28].

Кожна обсерваторія обладнана високоточними магнітометрами, які вимірюють три компоненти магнітного поля Землі:  $X$  – північна складова;  $Y$  – східна складова;  $Z$  – вертикальна складова.

Основні типи приладів:

- Флюксгейт-магнітометри – для безперервного вимірювання змін магнітного поля у реальному часі.
- Абсолютні магнітометри (наприклад, DI-Flux) – для калібрування відносних приладів.
- Протонні прецесійні магнітометри – для визначення абсолютного значення повного вектора поля  $F$ .
- Датчики температури, нахилу, вологості – для компенсації впливу зовнішніх факторів.

Збір і попередня обробка даних відбувається, як безперервна реєстрація з частотою 1 Гц або вище. Усереднення до 1-хвилинних значень (використовується

для основних наукових цілей). Автоматичне виявлення та усунення сплесків шуму, корекція температурних зсувів.

Дані використовуються для досліджень варіацій магнітного поля Землі, викликаних внутрішньою динамікою Землі, космічними факторами, геомагнітними бурями тощо.

У даній роботі досліджуються геомагнітні явища та просторово-часові зміни магнітного поля саме за допомогою даних з світової мережі INTERMAGNET ([https://intermagnet.org/data\\_download.html](https://intermagnet.org/data_download.html)). Дані мають стандартний формат, що полегшує їх обробку. Використовувалися архівні дані за 2013 і 2019 рр.

## 2.2. Методи обробки даних

За вихідними часовими даними мережі Інтермагнет спочатку обчислювався тренд. Тренд – це повільна (низькочастотна) зміна середнього рівня або параметрів компонент геомагнітного поля в часі, що відображає довготривалі процеси у середовищі. Далі з часових варіацій компонент геомагнітного поля віднімався тренд. Після цього до різниці застосовувався системний спектральний аналіз, описаний у роботі [1].

У даній роботі, досліджувалися геомагнітні збурення з 22 по 28 лютого 2013 року та з 18 по 24 жовтня 2019 року, за допомогою системного спектрального аналізу. В цій роботі визначалася реакція часових залежностей компонент геомагнітного поля на дію потужного радіовипромінювання за 25 лютого 2013 року, та у контрольні дні – 24 та 26 лютого 2013 року. Також досліджувалися реакція геомагнітного поля на дію цього ж джерела за 21 жовтня 2019 року та у контрольні дні – 20 та 22 жовтня 2019 року, отриманих після видалення тренду на інтервалі 60 хв, та фільтрації на інтервалі від 2 до 60 хв для рівня  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ -компонент.

### 2.3. Стан космічної погоди

Стан космічної погоди – це сукупність фізичних умов у космічному просторі (переважно у Сонячно-Земній системі), що визначають: активність Сонця, характеристики сонячного вітру, стан магнітосфери Землі, параметри іоносфери та радіаційних поясів. Ці умови впливають на геомагнітні бурі, радіозв'язок і навігацію, супутники та космічну техніку, електроенергетичні системи, авіацію та високоширотні комунікації.

Тож перед тим, як аналізувати магнітні варіації, було необхідно дослідити стан космічної погоди.

В роботі використовувалися дані з міжнародного сайту від NASA Goddard Space Flight Center (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) [12, 28]. Космічна погода досліджувалася для діб з 22 по 28 лютого 2013 року. В цей період стан космічної погоди був загалом спокійним (рис. 2.1). Інколи спостерігалось слабке до помірного збурення (26 – 27 лютого), однак потужних геомагнітних бур не було.  $K_p$ -індекс не перевищував рівень 4, а  $D_{st}$ -індекс не опускався нижче  $-32$  нТл.

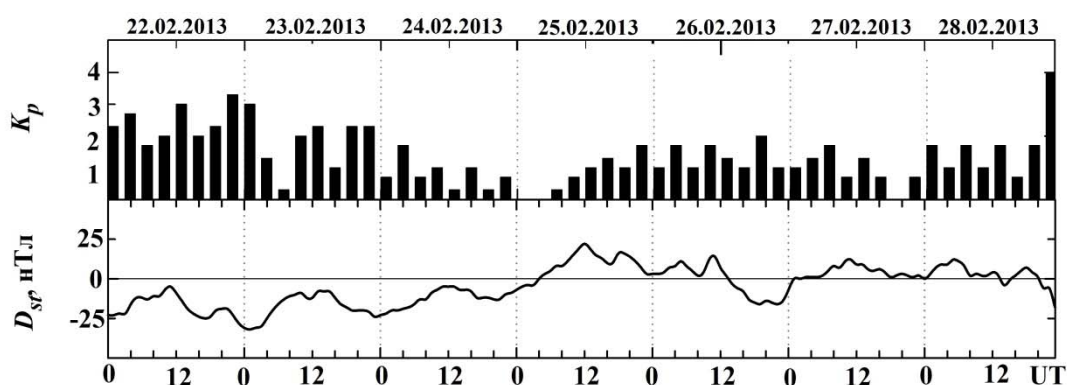


Рис. 2.1. Часові варіації параметрів сонячного вітру:  $K_p$ -індексу та  $D_{st}$ -індексу (за даними сайта <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) у період 22 – 28 лютого 2013 року. Дати вказані вздовж осі абсцис.

Але імовірність авроральної (північної) активності для широти Тромсе ( $\approx 70^\circ\text{N}$ ) навіть, коли  $K_p = 2-3$  може давати помітні полярні саява. Тож буря відсутня, фіксується лише короткочасне слабке до помірного збурення наприкінці інтервалу.

Далі досліджувалася космічна погода для діб з 18 жовтня по 24 жовтня 2019 року (рис. 2.1). З рисунку видно, що 18 – 22 жовтня  $K_p$ -індекс був 1–2, іноді до 3 (магнітосфера у спокійному стані).

23 жовтня  $K_p$ -індекс переважно 2 – 3, короткочасні підвищення (слабке збурення).

24 жовтня значення підвищуються до 3–4 – помірна геомагнітна активність, але бурі немає, бо  $K_p$ -індекс  $< 5$ . Увесь період характеризується спокійною до слабко збуреної космічної погоди, без магнітних бур.

18 – 22 жовтня  $D_{st}$ -індекс коливається від 0 до  $-20$  нТл, тобто знаходиться у спокійному стані. 23 жовтня є невелике підвищення до  $\sim +10$  нТл, що може відображати коротку розрядку кільцевого струму (магнітосфера стабільна). 24 жовтня відбувається різкий спад до близько  $-25 \dots -30$  нТл – слабке до помірного збурення, але бурі немає (не досягає  $-50$  нТл). Тож на кінець періоду спостерігається ослаблення магнітосфери, але масштабу бурі воно не досягає.

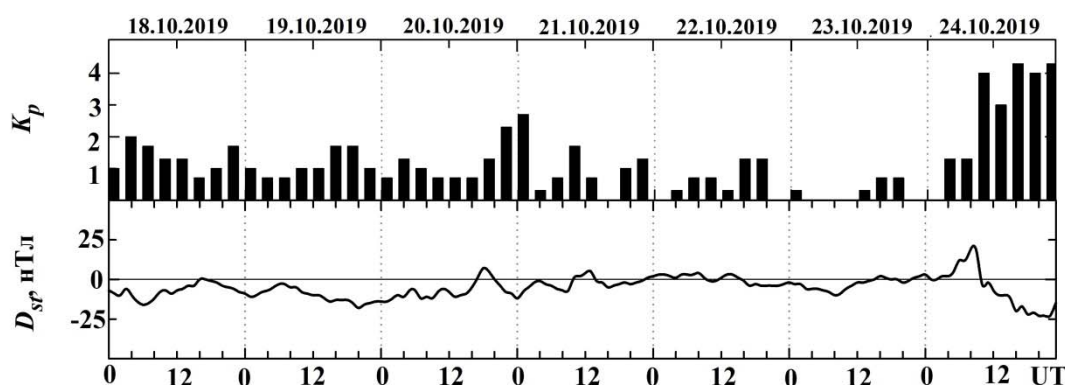


Рис. 2.1. Часові варіації параметрів сонячного вітру:  $K_p$ -індексу та  $D_{st}$ -індексу (за даними сайта <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) у період 18 – 24 жовтня 2019 року. Дати вказані вздовж осі абсцис.

## 2.4. Висновки до розділу 2

У ході роботи було використано дані глобальної мережі геомагнітних обсерваторій INTERMAGNET ([https://intermagnet.org/data\\_download.html](https://intermagnet.org/data_download.html)), що забезпечує стандартизовані, високоточні та довготривалі ряди вимірювань компонент магнітного поля Землі.

Для обробки сигналів застосовано методи виділення тренду, що дозволило розділити сигнал на дві складові: повільно змінну (трендову), яка характеризує загальний фон і стабільну компоненту магнітного поля, та швидкозмінну (флуктуаційну), що відображає короточасні варіації, пов'язані з динамікою космічно-іоносферних процесів.

Різниця між вихідним сигналом та трендом дозволила отримати варіаційну складову, де зосереджена інформація про геомагнітні збурення, зокрема пов'язані з дією на іоносфері потужного радіовипромінювання.

Застосування системного спектрального аналізу забезпечило перехід до частотного представлення сигналу, що дало можливість: виявити домінуючі періодичні компоненти, оцінити енергетичну структуру флуктуацій, розмежувати повільні та швидкі процеси, встановити характер і масштаб штучних збурень у магнітному полі, викликаних дією потужного радіовипромінювання.

Таким чином, комбінація даних INTERMAGNET із методами виділення тренду та спектрального аналізу забезпечило всебічне та фізично обґрунтоване дослідження структурних особливостей часових рядів геомагнітного поля. Отримані результати дозволили достовірно інтерпретувати природу збурень та оцінювати умови космічної погоди в період спостережень.

Встановлено, що в період геомагнітної бурі з 22 по 28 лютого 2013 року, буря була відсутня, фіксувалося лише короточасне слабке до помірного збурення наприкінці інтервалу.

Космічна погода для періоду з 18 жовтня по 24 жовтня 2019 року масштабу бурі вона так і не досягла.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

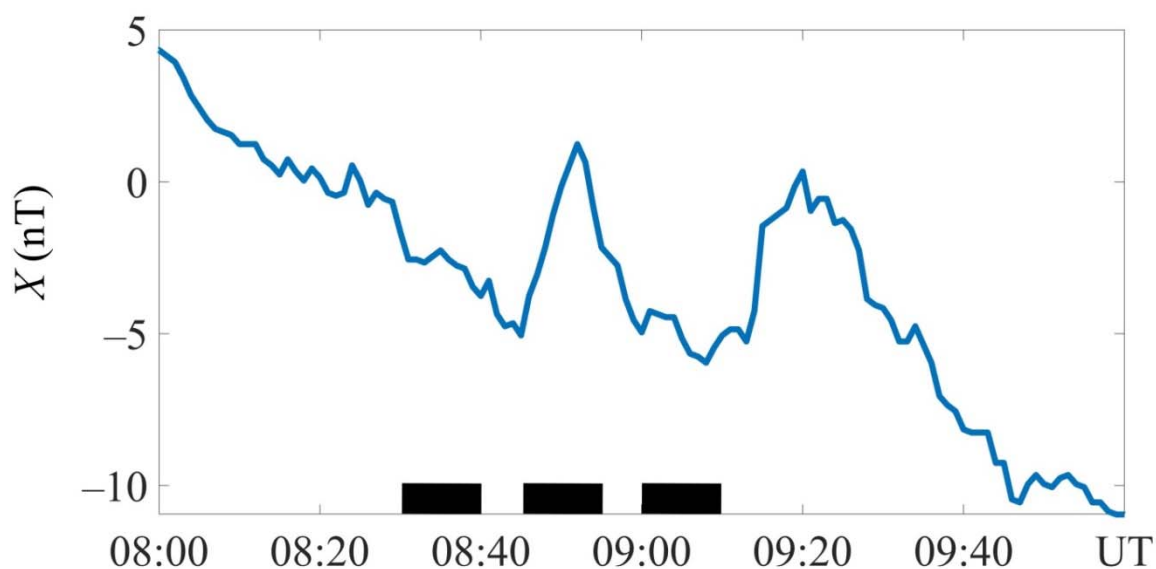
#### 3.1. Варіації рівня компонентів геомагнітного поля

У цьому розділі наведено результати аналізу часових змін компонент геомагнітного поля ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), отриманих із бази даних INTERMAGNET для станції АВК для геомагнітної бурі за 25 лютого 2013 року, та у контрольні дні – 24 та 26 лютого 2013 року. Також досліджуються результати збурень за 21 жовтня 2019 року та у контрольні дні – 20 та 22 жовтня 2019 року, отриманих після видалення тренду на інтервалі 60 хв, фільтрації на інтервалі від 2 до 60 хв для  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ -компонент. Дослідження виконувалося на основі добових та внутрішньодобових варіацій з урахуванням можливого впливу космічної погоди, змін параметрів сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля.

Початковим етапом аналізу було вивчення фонового (квазистаціонарного) рівня компонент, що відповідає спокійному стану геомагнітного поля. Для цього було визначено трендову складову сигналу та виділено короткоперіодичні флуктуації. Важливо було дослідити, як нагрівний стенд на станції Тромсьо, який працював за в цей період, впливав на зміну іоносферних струмів на фоні геофізичного стану атмосфери.

Розглянемо рисунки для першої геомагнітної бурі 25 лютого 2013 року та у контрольні дні – 24 та 26 лютого 2013 року. Стенд почав нагрівати атмосферу в цю дату кожні 10 хв та з перервою в 5 хв, в період з 8:30 до 9:15. У дослідженні використовувалися дані нагрівного експерименту, проведеного на стенді EISCAT Heating (Тромсё, Норвегія) 25 лютого 2013 року. Нагрів атмосфери здійснювався високочастотним випромінюванням у діапазоні 3.85–8 МГц, з використанням робочих частот близько 5.4 МГц та 6.7 МГц у режимах O-mode і X-mode. Загальна потужність передавачів становила до 1.2 МВт, що забезпечувало ефективну випромінювану потужність порядку сотень МВт. Експеримент проводився за схемою крокового збільшення потужності з інтервалами приблизно 1 хв, а промінь був спрямований у магнітний зеніт для максимального впливу на іоносферу. Одночасно велося спостереження радарними та оптичними засобами

для реєстрації плазмових ефектів і варіацій параметрів геомагнітного поля. На рисунку 3.1 наведено часовий хід  $X$ -компоненти геомагнітного поля у проміжку з 08:00 – 10:00 UT. Загалом у цей період прослідковується стійка тенденція до зменшення  $X$ -компоненти приблизно з  $+4...+5$  нТл до  $-10$  нТл, що відображає зміну іоносферних струмів на фоні геофізичного стану іоносфери.



*Рис. 3.1.* Часові варіації  $X$ -компоненти геомагнітного поля на станції АВК під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрів здійснювався серіями по 10 хвилин із 5-хвилинними паузами у період із 08:30 до 09:15 UT 25 лютого 2013 року.

З 08:30 до 09:15 UT проводився штучний нагрів іоносфери стендом у Тромсьо, який виконувався циклічно: 10 хв нагрівання та 5 хв перерва.

У проміжку роботи нагріву у часовому ряді спостерігаються характерні варіації флуктуацій, після 08:30 UT на фоні загального тренду зниження спостерігається поява виражених короткоперіодичних коливань, що є ознакою зміни локальної електропровідності іоносфери внаслідок нагріву. Близько 08:55 – 09:05 UT реєструється помітне імпульсне збільшення  $X$ -компоненти (від’ємні значення піднімаються ближче до нульового рівня). Це характерна реакція іоносферної плазми на період нагрівання у циклі.

09:10–09:20 UT – спостерігається повторне підсилення флуктуацій, за яким слідує стабільне зниження амплітуди після завершення нагріву (після 09:15 UT).

Після 09:20 UT та до 10:00 UT – варіації стають поступово згладженими, і  $X$ -компонента зменшується до  $-10$  нТл, що свідчить про згасання ефектів штучного впливу та повернення іоносфери до фонового стану.

Далі розглянемо контрольні дні та поведінку до та після нагріву (рис. 3.2).

На рис. 3.2 наведені часові варіації компоненти  $X$  геомагнітного поля за 24.02.2013 року в інтервалі від 06:00 до 11:00 UT. На початку спостережень, у період 06:00 – 07:00 UT, сигнал зберігає відносно стабільний рівень біля  $+5\dots+7$  нТл, що відповідає фоновому стану геомагнітного поля.

Починаючи приблизно з 07:10–07:20 UT, спостерігається поступове зниження амплітуди, що свідчить про початок збурення. Подальше зниження стає виразним у проміжку 08:00 – 09:00 UT, коли значення  $X$ -компоненти переходить у негативну область (близько  $0\dots-5$  нТл).

Найбільш інтенсивна фаза збурення відмічається в інтервалі 09:00–10:30 UT, коли амплітуда досягає мінімальних значень близько  $-10\dots-12$  нТл. У цей період формується виражена серія різких коливань, що вказує на підвищену геомагнітну активність.

Після 10:30 UT спостерігається часткове відновлення сигналу до рівнів близько  $-5\dots-7$  нТл, що свідчить про ослаблення збурення, хоча повне повернення до фонового стану ще не відбулося.

26 лютого 2013 року у проміжку 06:00–10:11 UT. На початку інтервалу з 06:00 до 07:00 UT значення сигналу утримуються на рівні  $-8\dots-10$  нТл, що відповідає слабкозбуреному або близькому до фонового стану.

Перші помітні коливання з'являються близько 07:00–07:20 UT, що можна вважати початком розвитку збурення. У цей період спостерігаються короточасні пікові відхилення амплітуди.

Після 07:30 UT відбувається стійке посилення збурення, яке проявляється у поступовому зниженні сигналу до значень  $-12\dots-15$  нТл, причому до 09:00 UT встановлюється тривала фаза спадання.

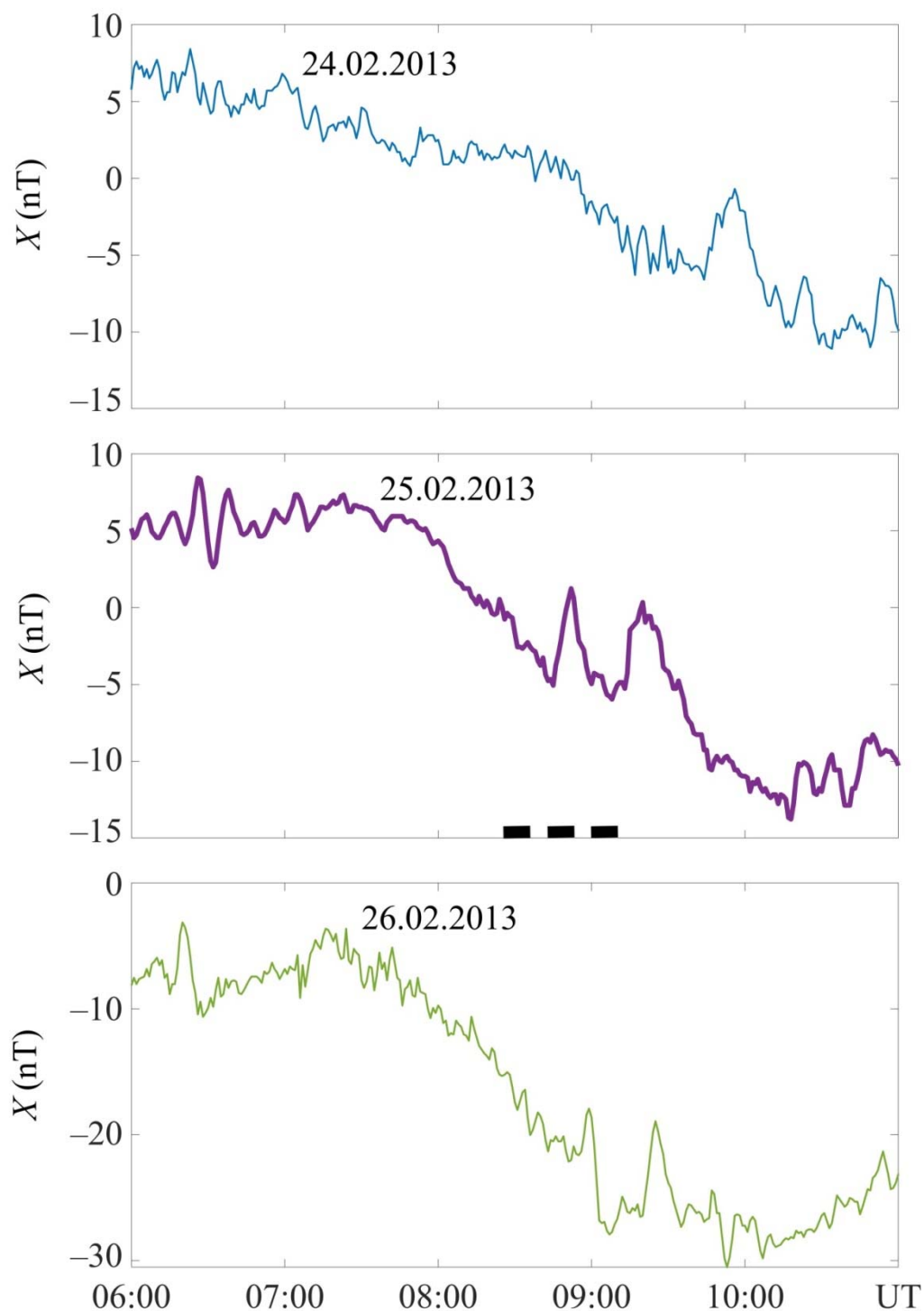


Рис. 3.2. Часові варіації  $X$ -компонент геомагнітного поля флуктуацій, зареєстровані на станції АВК 25 лютого 2013 року під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрівання здійснювалось серіями тривалістю 10 хвилин із 5-хвилинними паузами у період з 08:30 до 09:15 UT. Для порівняння наведено дані за 24 та 26 лютого 2013 року, які використовуються як контрольні дні без впливу нагрівання

Найінтенсивніша фаза збурення спостерігається у проміжку 09:00–10:20 UT, де амплітуда досягає мінімальних значень від  $-22$  до  $-30$  нТл. У цей час фіксуються різкі та нерівномірні флуктуації – це є ознакою максимального рівня геомагнітної нестабільності.

Після 10:30 UT починається фаза відновлення, коли амплітуда поступово збільшується до рівнів  $-18\dots-20$  нТл, що свідчить про ослаблення збурень, хоча повного повернення до фонового рівня ще немає.

На рис. 3.3 показан часовий хід  $Y$ -компоненти геомагнітного поля в інтервалі з 08:00 до 10:00 UT. Загалом простежується поступове зменшення значення  $Y$ -компоненти від приблизно  $+6\dots+7$  нТл на початку періоду до  $-4\dots-5$  нТл після 09:20 UT, що відображає зміну стану іоносферних струмів на фоні добової динаміки.

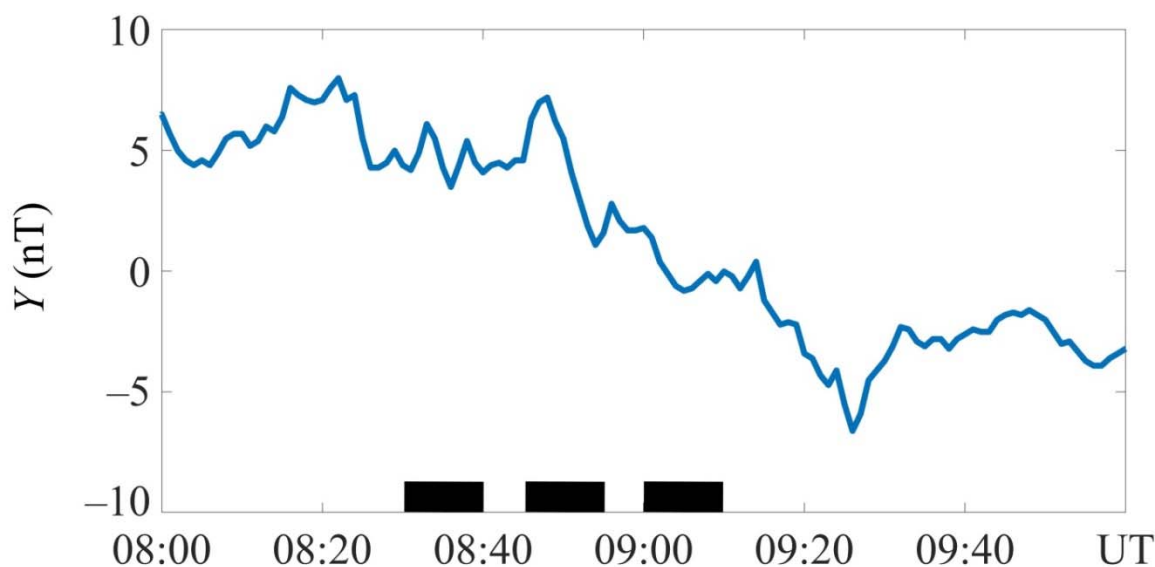


Рис. 3.3. Часові варіації  $Y$ -компоненти геомагнітного поля на станції АВК під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрів здійснювався серіями по 10 хвилин із 5-хвилинними паузами у період із 08:30 до 09:15 UT 25 лютого 2013 року

З 08:30 до 09:15 UT проводився штучний нагрів іоносфери стендом у Тромсе, який мав циклічний режим 10 хвилин нагріву, 5 хвилин паузи.

Характер зміни сигналу під час нагріву у проміжку 08:30–09:15 UT на графіку спостерігаються виражені короткоперіодичні флуктуації та зміни рівнів  $Y$ -компоненти, що накладаються на загальний тренд зниження. Зокрема 08:30–08:50 UT на фоні повільного зниження зберігаються хвилеподібні варіації, характерні для зміни електропровідності під час нагріву.

08:50–09:10 UT реєструється помітне зниження амплітуди та потім різке падіння близько 09:00–09:05 UT, що може відповідати посиленню іоносферних струмів у відповідь на вплив нагріву.

Після 09:15 UT (припинення нагріву) відбувається згасання флуктуацій та поступове стабілізування сигналу, після чого  $Y$ -компонента стабілізується на рівні  $-3\dots-5$  нТл.

Далі розглянемо контрольні дні та поведінку до та після нагріву атмосфери стендом (рис. 3.4). На рисунку подано часові варіації  $Y$ -компоненти геомагнітного поля 24 лютого 2013 року у проміжку з 06:00 до 11:00 UT.

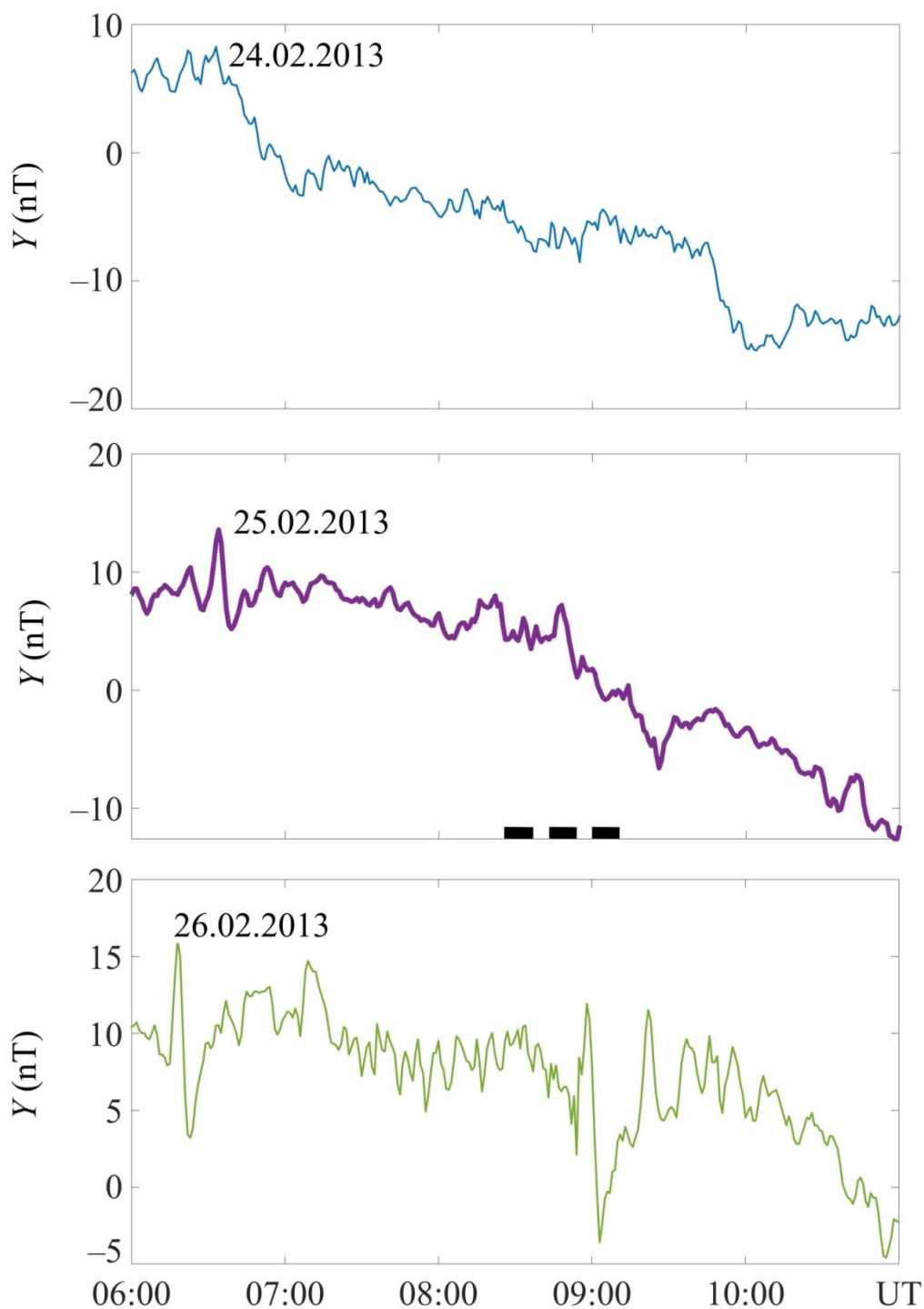
У початковий період спостережень (06:00–06:30 UT) значення компоненти знаходяться в межах  $6\dots 8$  нТл, що відповідає відносно спокійному стану геомагнітного поля з незначними флуктуаціями.

Перші ознаки збурення проявляються приблизно о 06:35–06:50 UT, коли відзначається поступове зниження амплітуди сигналу і зростання нерівномірності коливань. Це свідчить про початок розвитку геомагнітного збурення.

Після 07:00 UT спостерігається виражене зменшення значень компоненти, що супроводжується коливаннями. Значення знижуються від близько  $+5$  нТл до  $-5\dots-7$  нТл до 08:30 UT, що відповідає стадії розвитку збурення.

Найбільш інтенсивна фаза збурення відзначається у проміжку з 08:30 до 10:00 UT, коли величина  $Y$ -компоненти досягає  $-10\dots-15$  нТл, а коливання стають більш амплітудними та нерегулярними. Це відповідає максимуму рівня магнітних флуктуацій.

Після 10:10–10:20 UT спостерігається фаза послаблення збурення, за якої значення частково стабілізуються в діапазоні  $-11\dots-8$  нТл, що вказує на початок відновлення стану магнітосфери.



*Рис. 3.4.* Часові варіації  $Y$ -компонент геомагнітного поля флуктуацій, зареєстровані на станції АВК 25 лютого 2013 року під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрівання здійснювалось серіями тривалістю 10 хвилин із 5-хвилинними паузами у період з 08:30 до 09:15 UT. Для порівняння наведено дані за 24 та 26 лютого 2013 року, які використовуються як контрольні дні без впливу нагрівання

На початку спостережень 26 лютого 2019 року (06:00–06:20 UT) значення  $Y$ -компоненти становлять близько 9–11 нТл, що відповідає відносно спокійному стану геомагнітного поля.

Перші ознаки збурення фіксуються близько 06:30–06:50 UT, де спостерігається різкий імпульсний сплеск амплітуди до  $\sim 15$  нТл, після чого значення компоненти тимчасово зменшуються до  $\sim 4$ –6 нТл. Ця особливість сигналу вказує на раптове короткочасне збурення магнітосфери.

У період 06:50–09:00 UT значення компоненти стабілізуються в діапазоні 8–12 нТл, але амплітуда коливань залишається підвищеною. Це свідчить про стадію розвитку збурення, коли зберігається підвищена турбулентність магнітного поля.

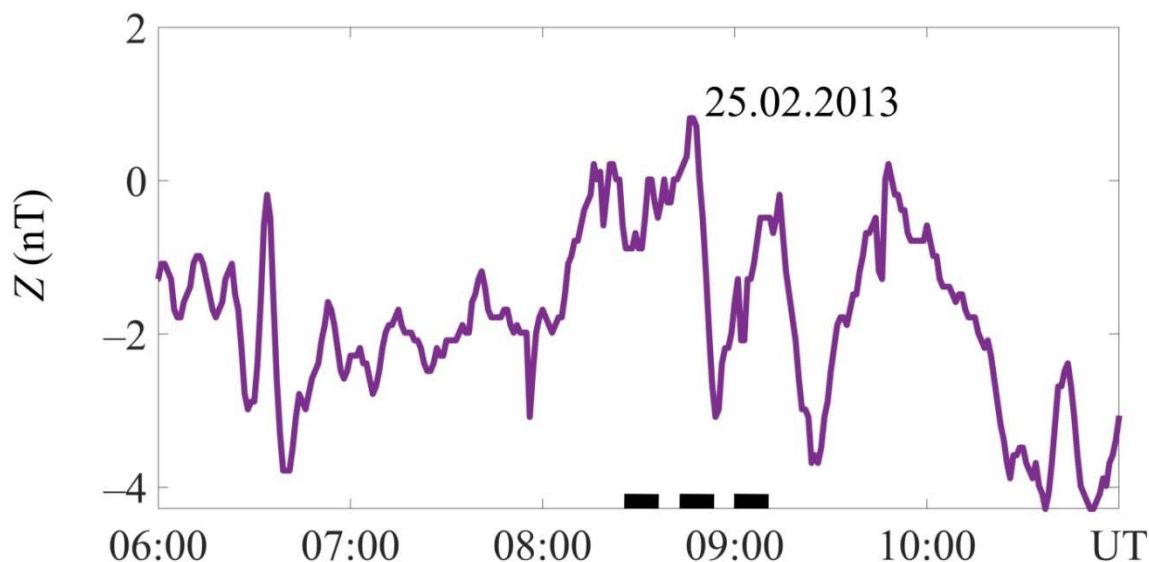
Найбільш інтенсивні флуктуації спостерігаються у проміжку 09:00–09:40 UT, де фіксується різкий спад до  $\sim -1$  нТл з подальшим таким же різким поверненням до  $\sim 12$  нТл. Це відповідає максимальній фазі збурення, коли структура магнітного поля зазнає різкої нестабільності.

Після 09:40 UT спостерігається поступове зменшення амплітуди та загальне зниження рівня компоненти до 0...–5 нТл до кінця періоду спостереження. Це вказує на фазу затухання збурення та часткове відновлення магнітосфери.

На рис. 3.5 подано часовий хід вертикальної  $Z$ -компоненти геомагнітного поля в інтервалі 08:00–10:00 UT. Загальна амплітуда коливань становить приблизно від  $-3.5$  нТл до  $+1$  нТл, що свідчить про наявність помітних короткоперіодичних змін у струмових системах іоносфери та магнітосфери над районом спостережень.

У проміжку з 08:30 до 09:15 UT проводився штучний нагрів іоносфери нагрівним стендом Тромсе за циклічною схемою – 10 хвилин нагрів, 5 хвилин пауза.

У 08:30–08:50 UT на фоні поступового підвищення  $Z$ -компоненти відбуваються дрібні хвилеподібні коливання, що відображають зміни електропровідності та перерозподіл струмів у нижній іоносфері.



*Рис. 3.5.* Часові варіації  $Z$ -компоненти геомагнітного поля на станції АВК під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрів здійснювався серіями по 10 хвилин із 5-хвилинними паузами у період із 08:30 до 09:15 UT 25 лютого 2013 року

Близько 08:55–09:00 UT спостерігається різке зменшення  $Z$ -компоненти до  $\sim -3$  нТл, що може бути пов'язане з посиленням локальних іоносферних струмів у відповідь на нагрів.

О 09:00–09:15 UT відмічаються повторні коливання з амплітудою близько 2–3 нТл, амплітуда яких узгоджується з циклічністю режиму «нагрів–пауза».

Тобто в моменти активного нагріву  $Z$ -компонента знижується, а під час пауз частково відновлюється.

Після припинення нагріву (після 09:15 UT) відбувається поступове стабілізування сигналу, але зберігаються хвилеподібні варіації меншої амплітуди, що відповідає поверненню іоносфери до фонового стану.

Далі розглянемо контрольні дні та поведінку до та після нагріву атмосфери стендом (рис. 3.6). На початку інтервалу 06:00–06:40 UT 24 лютого 2013 року,  $Z$ -компонента змінюються в діапазоні від  $-5$  до  $+3$  нТл, що відповідає помірним пульсаціям у магнітосфері.

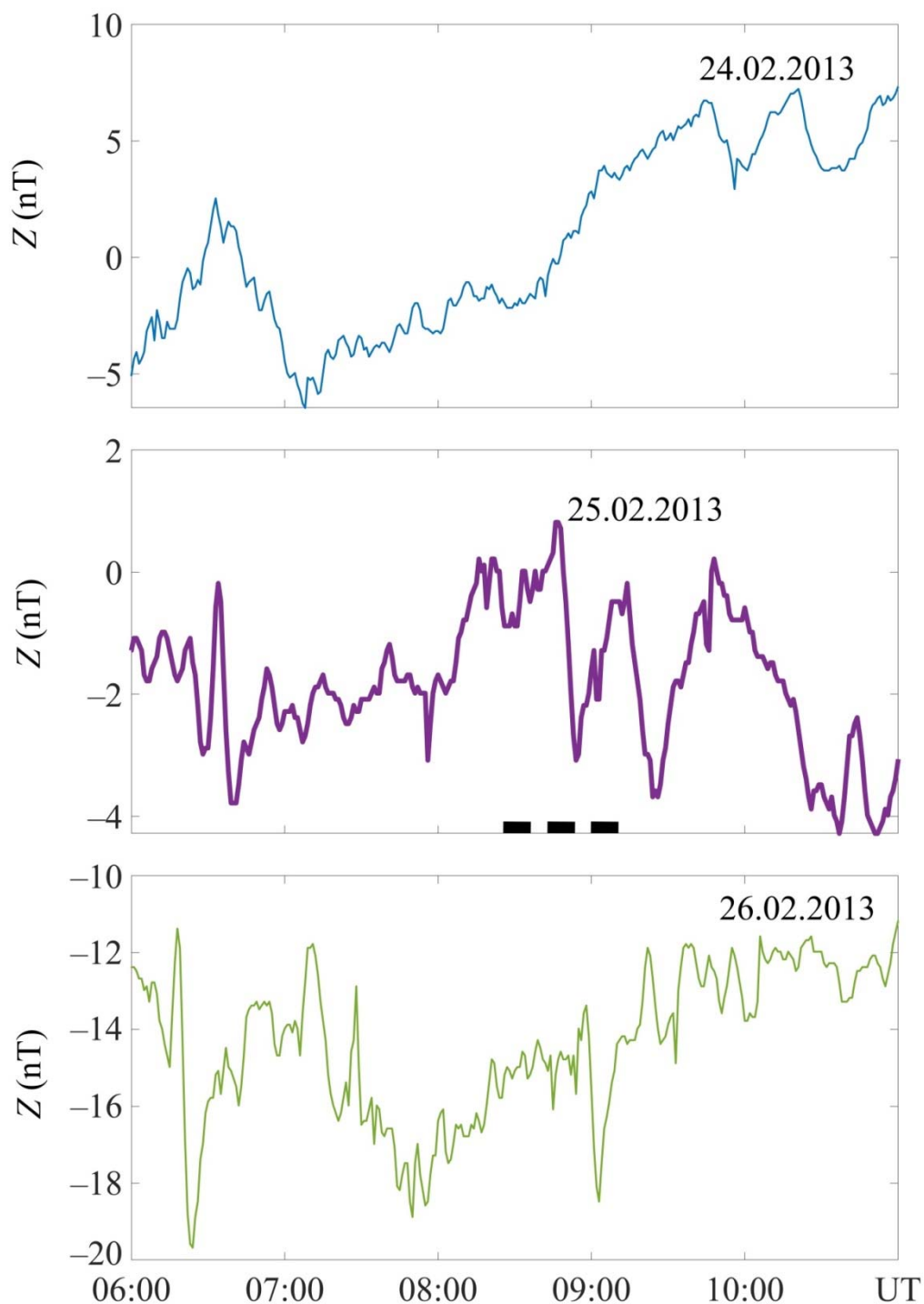


Рис. 3.6. Часові варіації  $Z$ -компонент геомагнітного поля флуктуацій, зареєстровані на станції АВК 25 лютого 2013 року під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрівання здійснювалось серіями тривалістю 10 хвилин із 5-хвилинними паузами у період з 08:30 до 09:15 UT. Для порівняння наведено дані за 24 та 26 лютого 2013 року, які використовуються як контрольні дні без впливу нагрівання

Близько 07:00 UT спостерігається різке зниження до приблизно  $-6$  нТл, після чого крива переходить до фази поступового відновлення.

В інтервалі 07:50–09:15 UT рівень флуктуацій залишається відносно низьким, амплітуда коливань не перевищує  $2-3$  нТл, що свідчить про спокійніший стан магнітосфери.

Починаючи з 09:30 UT, спостерігається помітне зростання  $Z$ -компоненти, яке продовжується до 10:30 UT. Амплітуда коливань збільшується і сягає  $6-8$  нТл, що свідчить про підсилення геомагнітних коливань.

Після 10:30 UT відзначаються виразні короткоперіодичні флуктуації з амплітудою до  $8-9$  нТл, які характерні для підвищеної іоносферної і магнітосферної активності.

Максимальні коливання зафіксовано у другій половині аналізованого інтервалу (приблизно після 09:30 UT).

Найменший рівень варіацій спостерігається між 08:00 та 09:30 UT, коли амплітуда коливань є мінімальною.

26 лютого 2013 року весь сигнал характеризується негативними значеннями, що відповідає домінуванню висхідних іоносферних струмів у приполярній області. Упродовж розглянутого інтервалу спостерігається нерівномірна та імпульсна структура флуктуацій, з кількома фазами підсилення активності.

У часовому інтервалі 06:20–07:20 UT спостерігаються різкі імпульсні відхилення, зокрема мінімум до  $\sim -19$  нТл, що свідчить про короткочасне локальне посилення авроральних струмів.

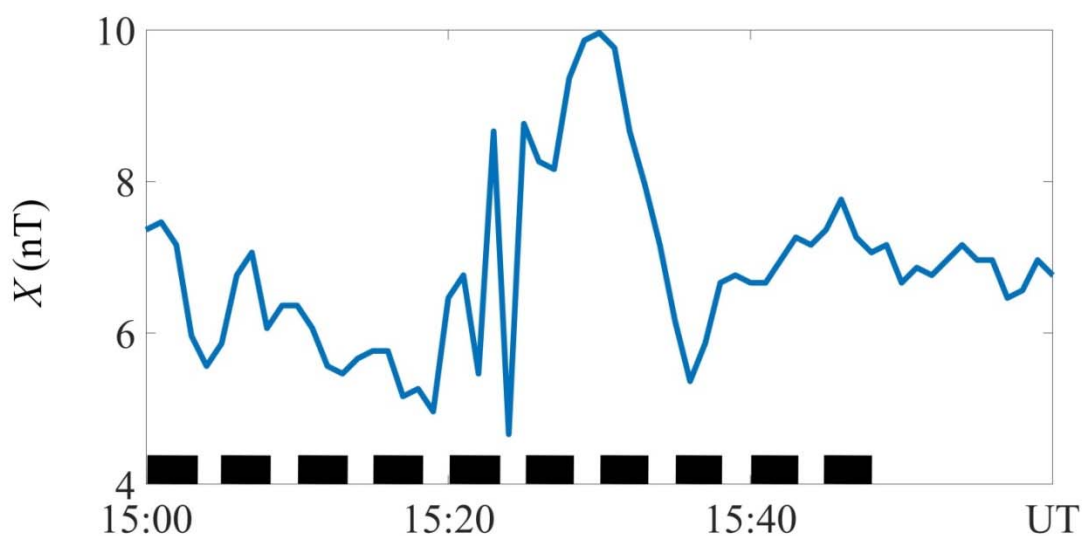
У проміжку 07:30–09:00 UT амплітуда флуктуацій залишається підвищеною (приблизно  $-14...-18$  нТл), значення сигналу коливається нерівномірно, що вказує на нестабільний перебіг іоносферно-магнітосферної взаємодії.

Поблизу 09:30 UT відзначається ще один серії імпульсів, амплітуда яких сягає  $-18$  нТл.

Після 10:00 UT спостерігається поступова стабілізація флуктуацій:  $Z$ -компонента підвищується до рівня  $-12...-13$  нТл та демонструє менш різкі, хвилеподібні варіації, що свідчить про ослаблення авроральної активності.

Далі розглянемо рисунки для другої геомагнітної бурі 21 жовтня 2019 року та у контрольні дні – 20 та 22 жовтня 2019 року. Стенд почав нагрівати атмосферу в цю дату –3 хв. нагрів та з перервою в 2 хв, в період з 15:00 до 15:40.

На рисунку 3.7 показані часові зміни  $X$ -компоненти геомагнітного поля у проміжку від 15:00 до 16:00 UT у день проведення експерименту з нагрівання іоносфери. До моменту увімкнення нагрівача поле характеризується плавними змінами з амплітудою близько 1–2 нТл навколо значення  $\sim 7$  нТ. Це відповідає спокійному стану локальної іоносферно-магнітосферної системи.



*Рис. 3.7.* Часові варіації  $X$ -компоненти геомагнітного поля на станції АВК під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрів здійснювався серіями по 3 хвилини із 2-хвилинними паузами у період з 15:00 до 15:40 UT 21 жовтня 2019 року

Після 15:00 UT, одразу після початку нагрівання, характер сигналу зазнає помітних змін. У діапазоні 15:15–15:25 UT спостерігається різке зростання амплітуди флуктуацій. Значення  $X$ -компоненти коливається між  $\sim 4$  і 9 нТл, проявляючи короткоперіодичні імпульсні варіації.

Близько 15:25–15:30 UT фіксується максимум  $X$ -компоненти ( $\sim 10$  нТ), що може бути пов'язано з локальним перерозподілом струмових систем, спричиненим нагріванням плазми в області дії стенду.

Після 15:35 UT коливання стабілізуються, але рівень флуктуацій залишається підвищеним порівняно з початковим етапом.

Далі розглянемо контрольні дні та поведінку до та після нагріву атмосфери стендом (рис.3.8). 20 жовтня 2019 року амплітуда сигналу протягом усього інтервалу зазнає значних нерівномірних коливань, що свідчить про наявність флуктуацій у струмових системах іоносфери та магнітосфери. 13:00–14:00 UT спостерігаються різкі імпульсні зміни амплітуди у діапазоні 0...14 нТл, включаючи короточасні локальні мінімуми. Це вказує на період посиленого електричного струмового збурення у приполярній зоні.

14:00–16:00 UT – залишається підвищений рівень нерівномірних флуктуацій, амплітуда коливається у межах 5...12 нТл, із кількома локальними піками до 15–16 нТл.

Після 16:00 UT відбувається поступове зростання середнього рівня  $X$ -компоненти до 18–20 нТл. Флуктуації стають більш плавними, хоча імпульсні максимуми зберігаються.

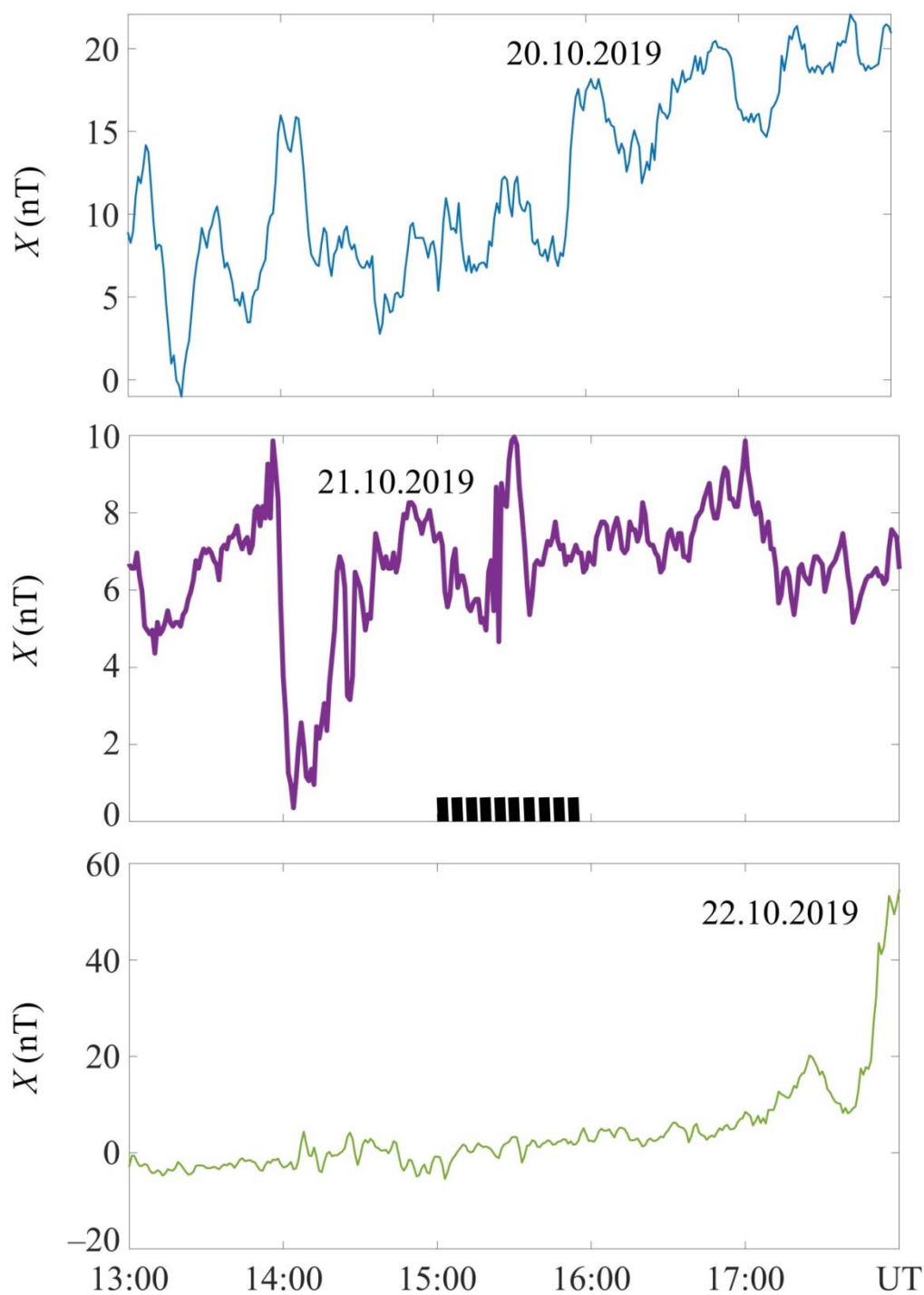
Загалом упродовж 22 жовтня 2019 року простежуються помірні флуктуації, що згодом переходять у різке зростання амплітуди, яке свідчить про розвиток збурення в геомагнітній системі.

У період 13:00–15:30 UT рівень  $X$ -компоненти перебуває в діапазоні приблизно від  $-5$  до  $+5$  нТл, спостерігаються дрібномасштабні флуктуації з малою амплітудою.

Проміжок 15:30–17:00 UT відзначається поступове збільшення амплітуди коливань. Сигнал починає зростати до 5–15 нТл, з'являється хвилеподібна структура флуктуацій.

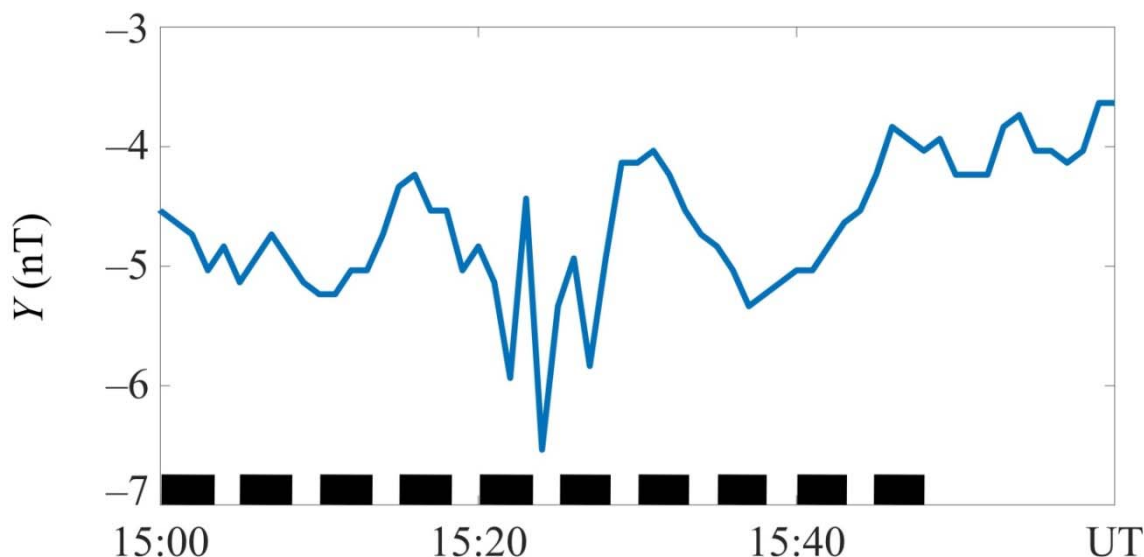
Така поведінка вказує на введення додаткової енергії в іоносферно-магнітосферну систему.

Період після 17:00 UT – різке зростання амплітуди спостерігається стрімкий підйом значень  $X$ -компоненти до 40–60 нТл.



*Рис. 3.8.* Часові варіації  $X$ -компонент геомагнітного поля флуктуацій, зареєстровані на станції АВК 21 жовтня 2019 року під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрівання здійснювалось серіями тривалістю 3 хвилини із 2-хвилинними паузами у період з 15:00 до 15:40 UT. Для порівняння наведено дані за 20 та 21 жовтня 2019 року, які використовуються як контрольні дні без впливу нагрівання

На рис. 3.9 показані часові варіації  $Y$ -компоненти геомагнітного поля в інтервалі 15:00–16:00 UT. До моменту початку штучного нагрівання іоносфери (близько 15:00 UT) значення  $Y$ -компоненти утримується на рівні близько  $-4.7\dots-5.2$  нТл із малими коливаннями, що свідчить про відносно спокійний стан локальної іоносферної електродинаміки.



*Рис. 3.9.* Часові варіації  $Y$ -компоненти геомагнітного поля на станції АВК під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стану Tromsø. Нагрів здійснювався серіями по 3 хвилини із 2-хвилинними паузами у період з 15:00 до 15:40 UT 21 жовтня 2019 року

Після вмикання нагрівного стану о 15:00 UT спостерігається зміна рівня та характеру флуктуацій. Приблизно в інтервалі 15:20–15:30 UT реєструються різкі імпульсні збурення, амплітуда яких збільшується до  $-6.5\dots-7.0$  нТл. Такі короточасні пікові відхилення можна інтерпретувати як прояв формування дрібномасштабних неоднорідностей плазми та пов'язаних з ними перерозподілів струмів у іоносфері під дією нагрівання.

Після 15:30 UT інтенсивність імпульсних варіацій зменшується, і значення  $Y$ -компоненти стабілізується на рівні  $-4.0\dots-4.5$  нТл, що є вищим, ніж до

нагрівання. Це свідчить про підвищення середньої провідності та зміну локальних іоносферних умов, спричинених енергетичним впливом нагрівача.

Далі розглянемо контрольні дні та поведінку до та після нагріву атмосфери стендом (рис.3.10). Протягом 20 жовтня 2019 року спостерігається поступова зміна рівня сигнатури з характерними повільними флуктуаціями, що вказує на розвиток слабкозбуреного стану геомагнітного поля (рис. 3.10). У період 13:00–14:00 UT початкові значення компоненти перебувають на рівні  $-25\dots-20$  нТл, спостерігається невеликий локальний зсув та слабкі короткоперіодичні флуктуації. Це свідчить про переважно спокійний стан поля на початку інтервалу.

В інтервалі 14:00–16:00 UT відбувається стійке підвищення значень  $Y$ -компоненти від приблизно  $-20$  до  $-5$  нТл з одночасним збільшенням амплітуди хвилеподібних коливань.

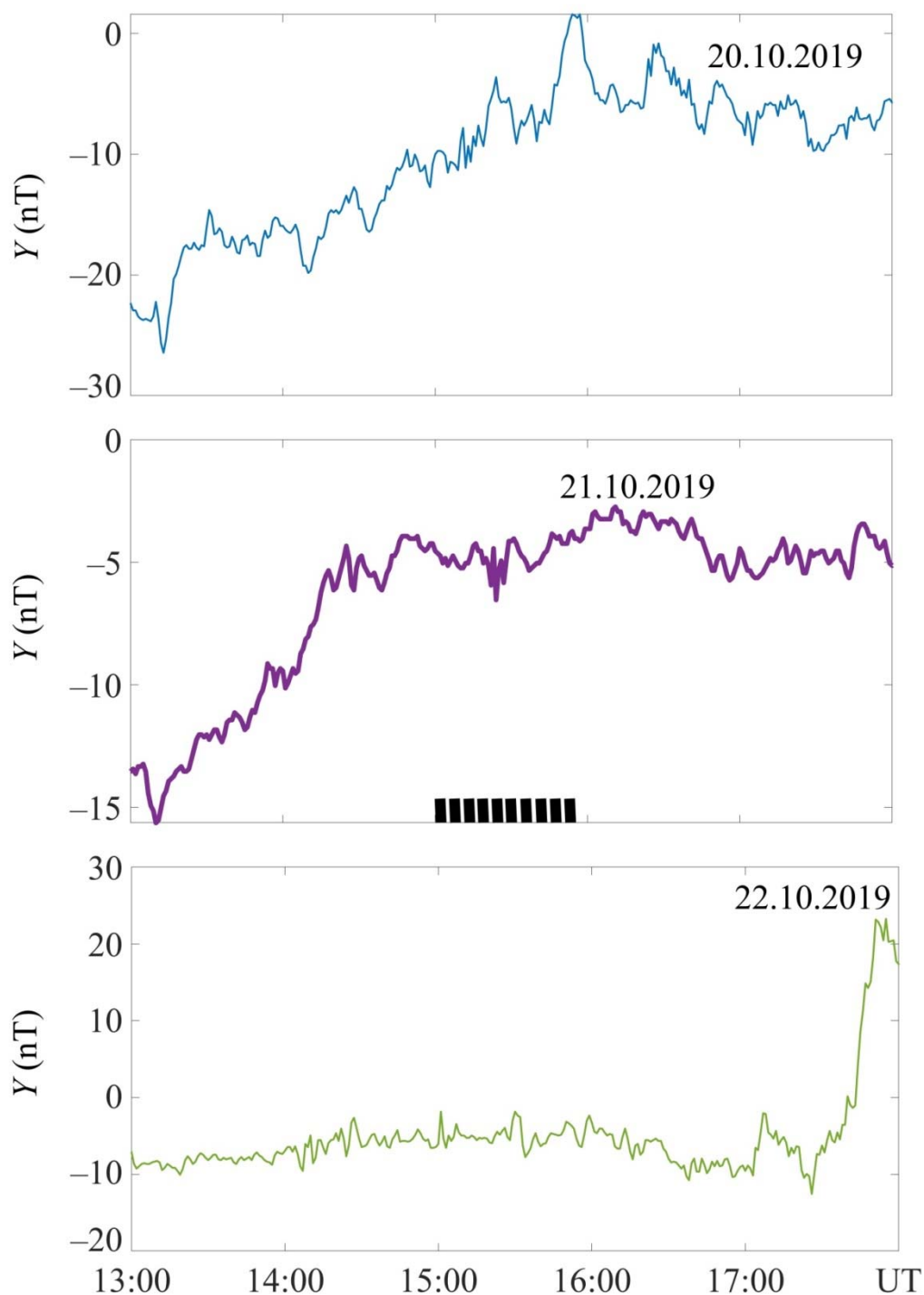
Така поведінка є типовою для повільної перебудови струмових систем іоносфери.

У період після  $\sim 16:00$  UT досягається максимум значення  $Y$ -компоненти, близький до  $0$  нТл, після чого спостерігається невелике зниження та стабілізація на рівні  $-10\dots-5$  нТл.

Флуктуації стають більш вираженими, але не імпульсними, що вказує на помірні геомагнітні збурення, без різких підсилень активності.

Протягом 22 жовтня 2019 року більшої частини часу з 13:00 до приблизно 17:10 UT, рівень флуктуацій залишається порівняно низьким і стабільним. Значення  $Y$ -компоненти коливається переважно у межах від  $-12$  до  $-5$  нТл, що відповідає типовим фоновим змінам іоносферно-магнітосферного середовища без значних збурень.

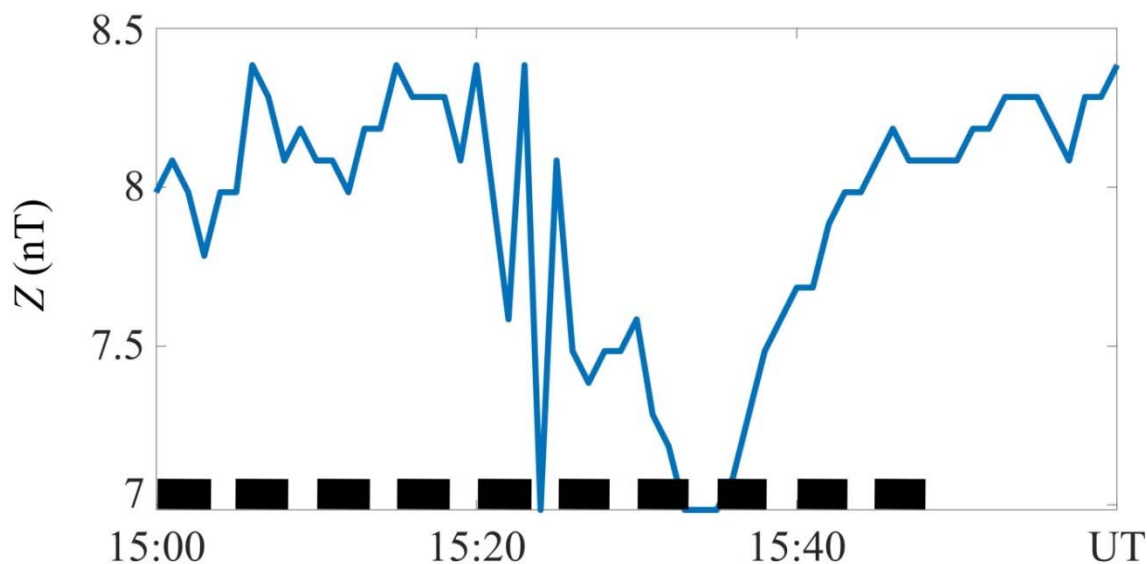
Після 17:10 UT ситуація різко змінюється, спостерігається різкий та стрімкий підйом рівня сигналу. Геомагнітна складова  $Y$ -компоненти зростає приблизно з  $-12$  нТл до значень  $+15\dots25$  нТл протягом дуже короткого часу. Такий різкий стрибок свідчить про раптове збурення струмових систем в іоносфері.



*Рис. 3.10.* Часові варіації  $Y$ -компонент геомагнітного поля флуктуацій, зареєстровані на станції АВК 21 жовтня 2019 року під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрівання здійснювалось серіями тривалістю 3 хвилини із 2-хвилинними паузами у період з 15:00 до 15:40 UT. Для порівняння наведено дані за 20 та 21 жовтня 2019 року, які використовуються як контрольні дні без впливу нагрівання

Отже, зафіксовані флуктуації свідчать про раптове надходження підвищеної енергії в магнітосферу, яке призвело до перебудови струмових систем в іоносфері.

Далі розглянемо часові варіації вертикальної компоненти геомагнітного поля  $Z$ -компоненти у діапазоні 15:00–16:00 UT (рис. 3.11).



*Рис. 3.11.* Часові варіації  $Z$ -компоненти геомагнітного поля на станції АВК під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрів здійснювався серіями по 3 хвилини із 2-хвилинними паузами у період з 15:00 до 15:40 UT 21 жовтня 2019 року

21 жовтня 2019 року, до моменту початку нагріву, тобто близько 15:00–15:20 UT, рівень  $Z$ -компоненти є відносно стабільним (близько 8 нТл) з незначними природними флуктуаціями, що відповідає спокійному стану іоносфери.

Після ввімкнення нагрівного комплексу спостерігається помітне підсилення флуктуацій. Приблизно у 15:20–15:30 UT відбуваються різкі імпульсні зміни  $Z$ -компоненти, амплітуда яких суттєво зростає, а значення  $Z$ -компоненти кілька разів падає до 7–7.5 нТл. Такі швидкі та глибокі коливання свідчать про штучно збуджені неоднорідності плазми та перерозподіл локальних іоносферних струмів, спричинений нагріванням.

Найбільше зниження рівня спостерігається близько 15:35 UT, де значення  $Z$ -компоненти досягає мінімуму (приблизно 7 нТл). Після цього протягом 15:40–15:55 UT зазначається поступове відновлення та стабілізація значень  $Z$ -компоненти до рівнів, близьких до початкових (приблизно 8.3–8.5 нТл), що вказує на ослаблення ефектів нагріву і повернення плазмових параметрів до фонових значень.

Таким чином, нагрів іоносфери спричинив тимчасові, але чітко виражені збурення геомагнітного поля, що підтверджує ефективність впливу нагрівного комплексу на локальний стан іоносфери.

Далі розглянемо контрольні дні та поведінку до та після нагріву атмосфери стендом для  $Z$ -компоненти (рис. 3.12).

На графіку показані зміни вертикальної компоненти геомагнітного поля  $Z$ -компоненти у проміжку від 13:00 до 18:00 UT. У цей день спостерігається виражена повільна хвилеподібна варіаційність, характерна для іоносферних струмових систем середніх та високих широт.

У 13:00–14:30 UT значення  $Z$ -компоненти поступово зростає від  $\sim 15$  нТл до  $\sim 20$  нТл. Це відповідає поступовому посиленню іоносферних струмів.

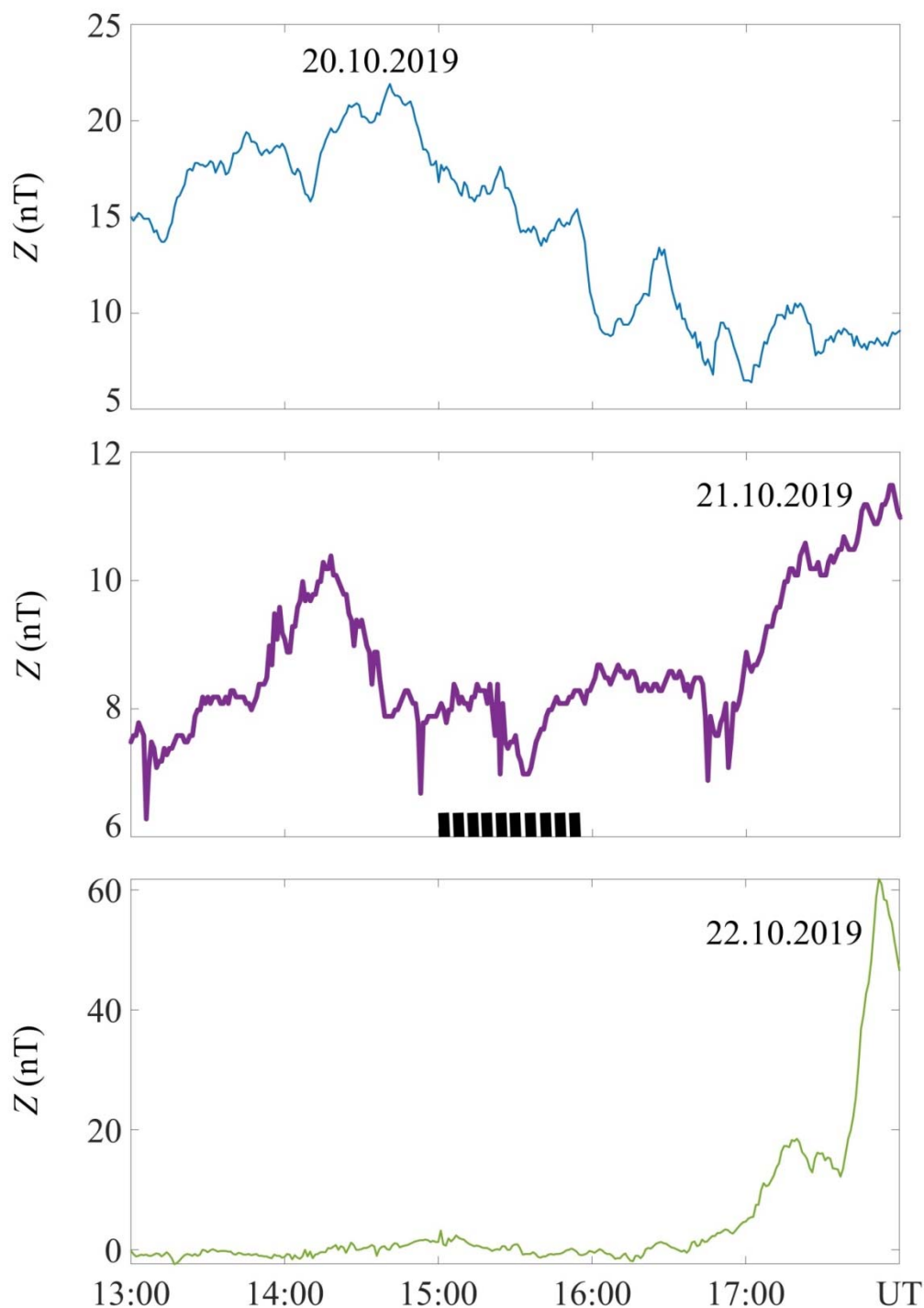
14:30–15:30 UT – спостерігається локальний максимум ( $\sim 21$ – $22$  нТл), після чого починається зниження. Це свідчить про пікову фазу збурення та подальше відновлення.

У 15:30–17:00 UT  $Z$ -компоненти зменшується до  $\sim 10$  нТл, а після 16:30 UT – навіть до  $\sim 7$  нТл. Такий спад характерний для затухання іоносферних струмів і переходу системи до більш стабільного стану.

Після 17:00 UT рівень флуктуацій невисокий, значення стабілізуються в межах 8–10 нТл, що відповідає спокійному геомагнітному фону.

22 жовтня 2019 року протягом більшої частини часу рівень флуктуацій був низьким і стабільним, однак ближче до 17:00 UT відбулося різке та значне зростання амплітуди, що свідчить про різке підсилення магнітної активності.

13:00 – 16:30 UT – Значення  $Z$ -компоненти залишаються на рівні 0–3 нТл, без помітних збурень.



*Рис. 3.12.* Часові варіації  $Z$ -компонент геомагнітного поля флуктуацій, зареєстровані на станції АВК 21 жовтня 2019 року під час експерименту з нагрівання іоносфери потужним радіовипромінюванням стенду Tromsø. Нагрівання здійснювалось серіями тривалістю 3 хвилини із 2-хвилинними паузами у період з 15:00 до 15:40 UT. Для порівняння наведено дані за 20 та 21 жовтня 2019 року, які використовуються як контрольні дні без впливу нагрівання

Флуктуації мають малу амплітуду, їхній характер майже рівномірний.

Це відповідає спокійному стану іоносфери та слабким електричним струмам у ній.

Після 16:30 UT – початок збурення починається поступове підвищення амплітуди. Значення досягають 10–15 нТл – це ознака активації іоносферних струмів у відповідь на зовнішній вплив.

Близько 17:30–17:50 UT – різкий пік, спостерігається стрибкоподібне зростання амплітуди до ~60 нТл.

Це імпульсне підсилення є характерним для раптом посиленого іоносферного струмового збурення.

Після 18:00 UT – починається повільне зниження амплітуди, проте рівень залишається підвищеним порівняно зі спокійним періодом.

Одже, це свідчить про ефективний вплив нагрівання на іоносферну провідність та локальні електромагнітні струмові системи, що є типовою реакцією іоносфери на штучне енергетичне збурення від нагрівного стенду у Тромсе.

### **3.2. Результати системного спектрального аналізу**

Для виявлення змін у хвильовій структурі геомагнітного поля, викликаних штучним нагріванням іоносфери, було проведено системний спектральний аналіз часових рядів  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ - компонент геомагнітного поля за 25 лютого 2013 року. Особливий інтерес становить часовий інтервал 08:30–09:15, протягом якого нагрівач Тромсе працював у періодичному режимі 10 хв увімкнення та 5 хв паузи. Такий режим створює умови для появи регулярно-модульованих коливань іоносферної плазми, які можуть передаватися в магнітне поле та реєструватися на наземній станції.

Аналіз проводився у діапазоні періодів 2–60 хв, що відповідає низькочастотним мікропульсаціям, чутливим до зміни іоносферної провідності та енергетики магнітосферо–іоносферної взаємодії.

Для комплексного виявлення часово-частотної структури коливань було застосовано три взаємодоповнюючі методи: віконне перетворення Фур'є (оцінка спектра в квазістаціонарних умовах), адаптивне перетворення Фур'є (виділення локально домінуючих частот), вейвлет-перетворення Морле (аналіз змін спектрального складу у часі) [1].

На спектрограмах усіх трьох компонент ( $X$ ,  $Y$  та  $Z$ ) простежується відчутне посилення енергетики коливань у моменти активної фази нагрівання. Найбільш виражені зміни спостерігаються у діапазоні періодів: 5–15 хв – характерні для іоносферних хвиль Альфвена та Pc3–Pc4 мікропульсацій, а також 20–40 хв, що відповідає низькочастотним взаємодіям в магнітосфері або, швидше за все, атмосферним гравітаційним хвилям.

У паузах між нагріванням (коли передавач вимкнено) рівень спектральної потужності помітно зменшується, що свідчить про безпосередній вплив енергетичного вкладу нагрівача на формування хвильових мод у іоносфері.

На рис. 3.13 видно, для  $X$ -компоненти, що інтенсивна спектральна активність з'являється приблизно після 08:30 UT і триває до близько 10:30 UT (результати віконного перетворення Фур'є).

Найбільша потужність (темна ділянка) спостерігається в інтервалі часу з 09:00 до 10:00 UT, де домінує компонент із періодом приблизно 20–30 хвилин.

Після 10:30 UT рівень потужності поступово зменшується, що свідчить про завершення активної фази сигналу.

З адаптивного перетворення Фур'є видно, що сигнал починає проявлятися близько 08:00 UT, поступово зростає за інтенсивністю, і досягає максимуму потужності у проміжку 09:00–10:00 UT, де найінтенсивніша ділянка відповідає періодам приблизно 25–35 хвилин. Після 10:30 UT спектральна потужність зменшується, що свідчить про завершення активної фази сигналу.

З вейвлет-перетворення видно, що помітна активність сигналу починається приблизно о 08:00 UT. Надалі енергія коливань поступово зростає, досягаючи максимуму у проміжку 09:00–10:00 UT, де спостерігаються виражені періодичні

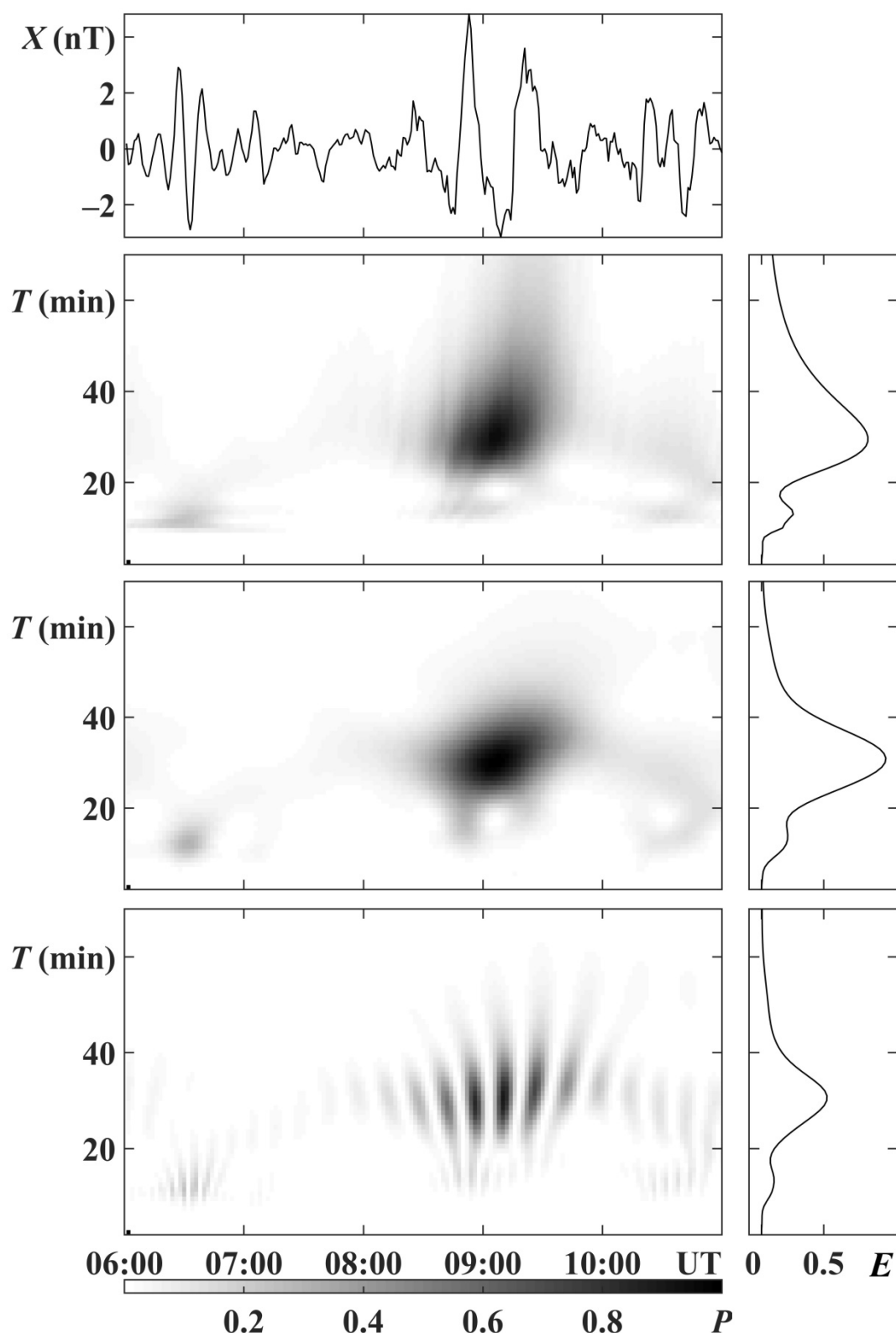


Рис. 3.13. Результати системного спектрального аналізу часових варіацій  $X$ -компоненти геомагнітного поля 25 лютого 2013 року у діапазоні періодів  $2 \div 60$  хв. Панелі зверху вниз: хвильова форма, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч наведено енергограми у відносних одиницях для відповідних перетворень

структури з періодами приблизно 20–40 хвилин. Після 10:30 UT потужність сигналу зменшується, і до 11:00 UT активність майже зникає.

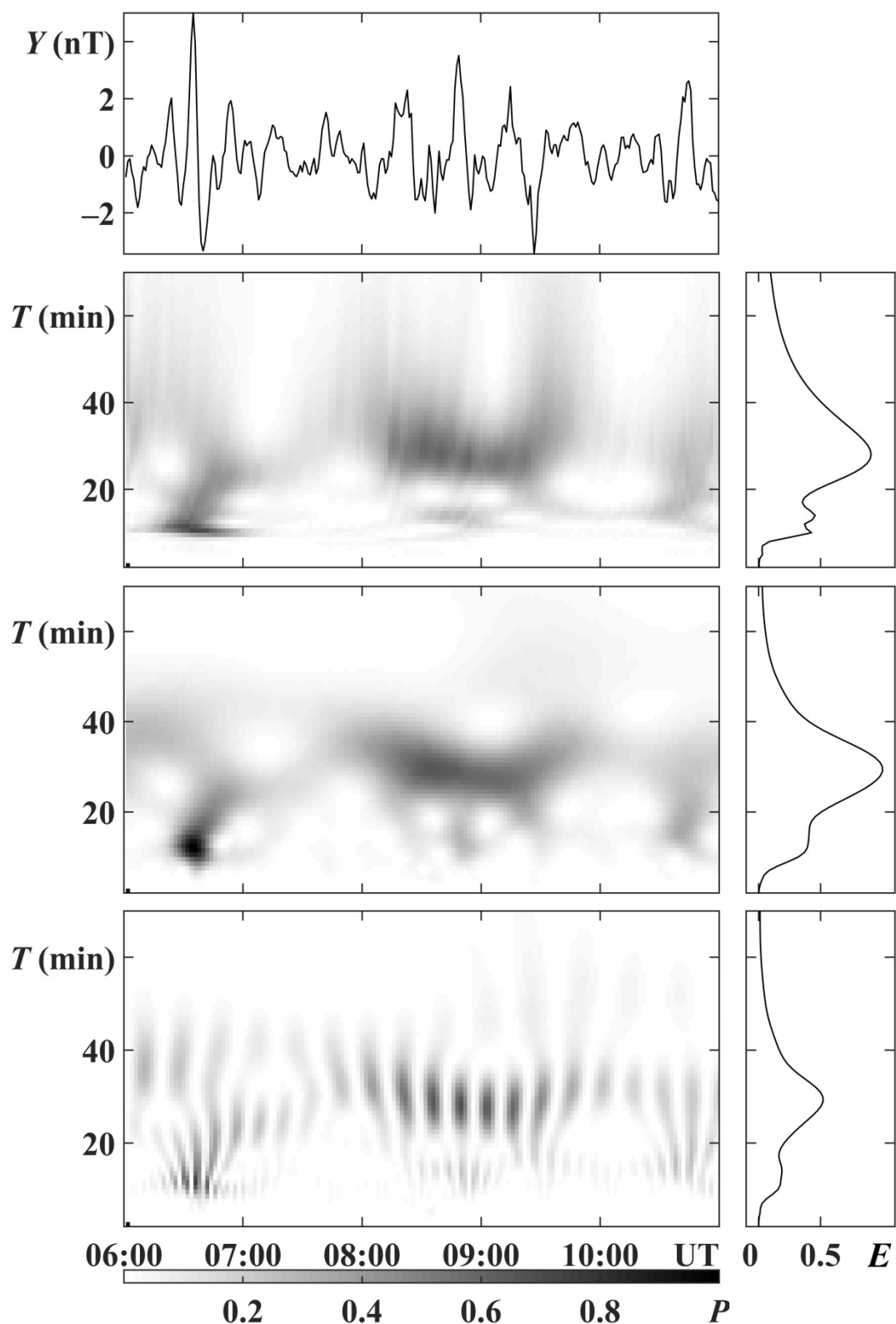
За результатами системного спектрального аналізу встановлено, що сигнал починається близько 08:00 UT, досягає максимуму інтенсивності між 09:00 та 10:00 UT і завершується після 10:30 UT. Основні коливання мають період 20–40 хв.

Класичний метод показав загальний спектральний склад сигналу, а вейвлет-перетворення дало змогу простежити зміну потужності у часі, що свідчить про нестационарність процесу.

На рис. 3.14 (для  $Y$ -компоненти), з віконного перетворення Фур'є, видно, що максимальні значення спектральної потужності (темні зони) спостерігаються для періодів 10–25 хв у проміжку приблизно від 06:20 до 07:40 UT, що свідчить про появу інтенсивного квазіперіодичного сигналу в цей час. Після 08:00 UT інтенсивність коливань поступово зменшується і до 10:30 UT сигнал майже повністю зникає. Праворуч наведено інтегральний спектр потужності  $E(T)$ , який показує домінування періодів близько 15–20 хв.

У адаптивному перетворенні Фур'є найбільш інтенсивні спектральні компоненти спостерігаються в діапазоні періодів 15–25 хв. Початок появи вираженого сигналу фіксується приблизно о 06:40 UT. Максимальна потужність сигналу припадає на проміжок 07:00–09:00 UT, де формується стійка область з високою інтенсивністю. Після 09:30 UT сигнал поступово слабшає і повністю зникає близько 10:40–11:00 UT. Інтегральний спектр праворуч (крива  $E(T)$ ) підтверджує домінування коливань з періодами близько 20 хв.

Вейвлет-перетворення показало, що поява виражених коливань фіксується приблизно о 06:30–06:40 UT, при цьому основний внесок у спектр припадає на періоди 15–25 хв. Найвищі значення спектральної потужності спостерігаються в інтервалі 07:00–09:30 UT, де формується стійка смуга підвищеної амплітуди. Після 09:30 UT інтенсивність сигналу зменшується, і до 10:50–11:00 UT сигнал практично зникає. Інтегральний спектр  $E(T)$  демонструє домінування періодів



*Рис. 3.14.* Результати системного спектрального аналізу часових варіацій  $Y$ -компоненти геомагнітного поля 25 лютого 2013 року у діапазоні періодів  $2 \div 60$  хв. Панелі зверху вниз: аналізована залежність, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч наведено енергограми у відносних одиницях для відповідних перетворень

близько 20 хв, що узгоджується з локальними максимумами спектральної потужності на основній панелі.

Аналіз отриманих спектрограм показує, що в усіх трьох випадках спостерігається наявність квазіперіодичних коливань у діапазоні періодів приблизно 15–30 хв, що підтверджується характерними смугами підвищеної спектральної потужності. Тож на віконному перетворенні Фур'є сигнал починається близько 06:20–06:40 UT, досягає максимальної інтенсивності у проміжку 07:00–09:00 UT та поступово згасає до 10:30–11:00 UT.

Адаптивне перетворення Фур'є показало, що структура сигналу більш розмита, однак домінування періодів близько 20 хв зберігається, а максимальна потужність спостерігається в інтервалі 07:00–09:00 UT з подальшим поступовим затуханням. Вейвлет-перетворення – сигнал проявляє більш виражену періодичність і регулярність у формі повторюваних смугових структур, що вказує на більш стабільний характер коливань у періодах 15–25 хв, з інтенсивним розвитком у 07:00–09:30 UT та згасанням після 10:00 UT.

Таким чином, усі спектрограми демонструють узгоджене існування хвильових процесів з характерним періодом близько 20 хв, які виникають після 06:30 UT, мають найбільшу енергію у період 07:00–09:30 UT, та затухають до 10:30–11:00 UT. Це вказує на спільну природу джерела коливань та стабільність їх спектральної структури протягом дослідженого часового інтервалу.

На рис. 3.15 для  $Z$ -компоненти, з віконного перетворення Фур'є, видно, що спектральний сигнал починає проявлятися близько 07:00 UT, поступово наростає і досягає найбільшої інтенсивності в інтервалі 09:00–10:00 UT. У цей період спостерігається максимум енергії для періодів приблизно 20–30 хв. Після 10:00 UT сигнал починає слабшати та практично зникає до 11:00 UT.

На адаптивному перетворенні Фур'є спостерігається, що сигнал починає проявлятися приблизно о 07:00 UT, поступово посилюючись у напрямку більших періодів. Максимальна інтенсивність зафіксована в інтервалі 09:00–10:00 UT, при домінуючих періодах близько 25–30 хв. Після 10:00 UT спектральна потужність зменшується, і сигнал практично зникає до 11:00 UT.

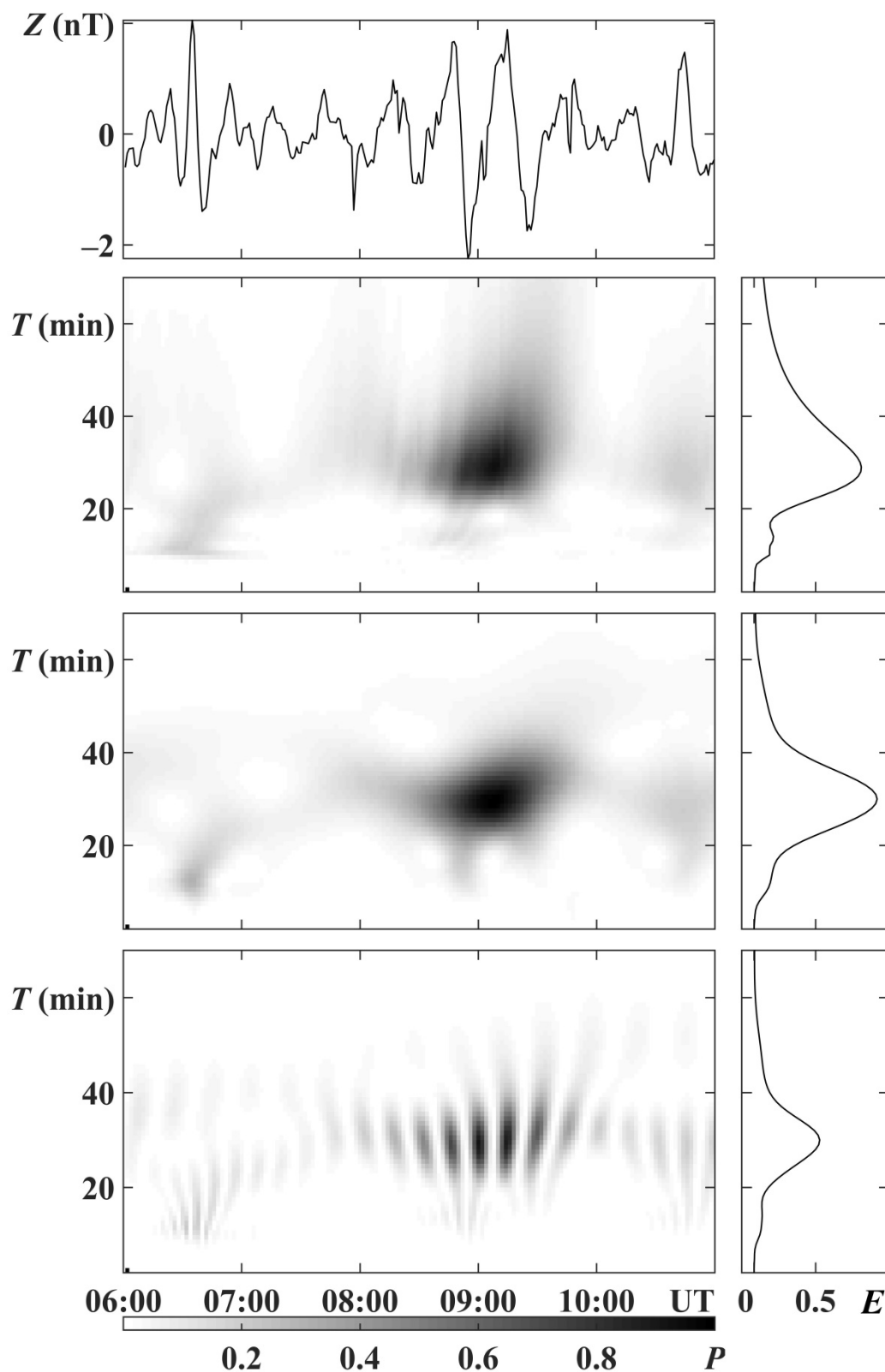


Рис. 3.15. Результати системного спектрального аналізу часових варіацій  $Z$ -компоненти геомагнітного поля 25 лютого 2013 року у діапазоні періодів  $2 \div 60$  хв. Панелі зверху вниз: аналізована залежність, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч наведено енергограми у відносних одиницях для відповідних перетворень

На Вейвлет-перетворенні – початок прояву сигналу спостерігається приблизно після 06:30 UT, однак у цей час потужність невисока. Далі, у проміжку 08:00–10:00 UT спостерігається найбільш інтенсивна активність, яка проявляється у вигляді системи хвильових пакетів з домінуючими періодами близько 20–30 хв. Саме в цей інтервал часів відмічено найбільш темні ділянки спектрограми, що свідчить про максимальну амплітуду коливань.

Після 10:00 UT у всіх спектрограм спостерігається згасання хвильової активності, що проявляється у зменшенні спектральної потужності та зникненні структурованих хвильових пакетів. Близько 11:00 UT сигнал практично повністю переходить у фон.

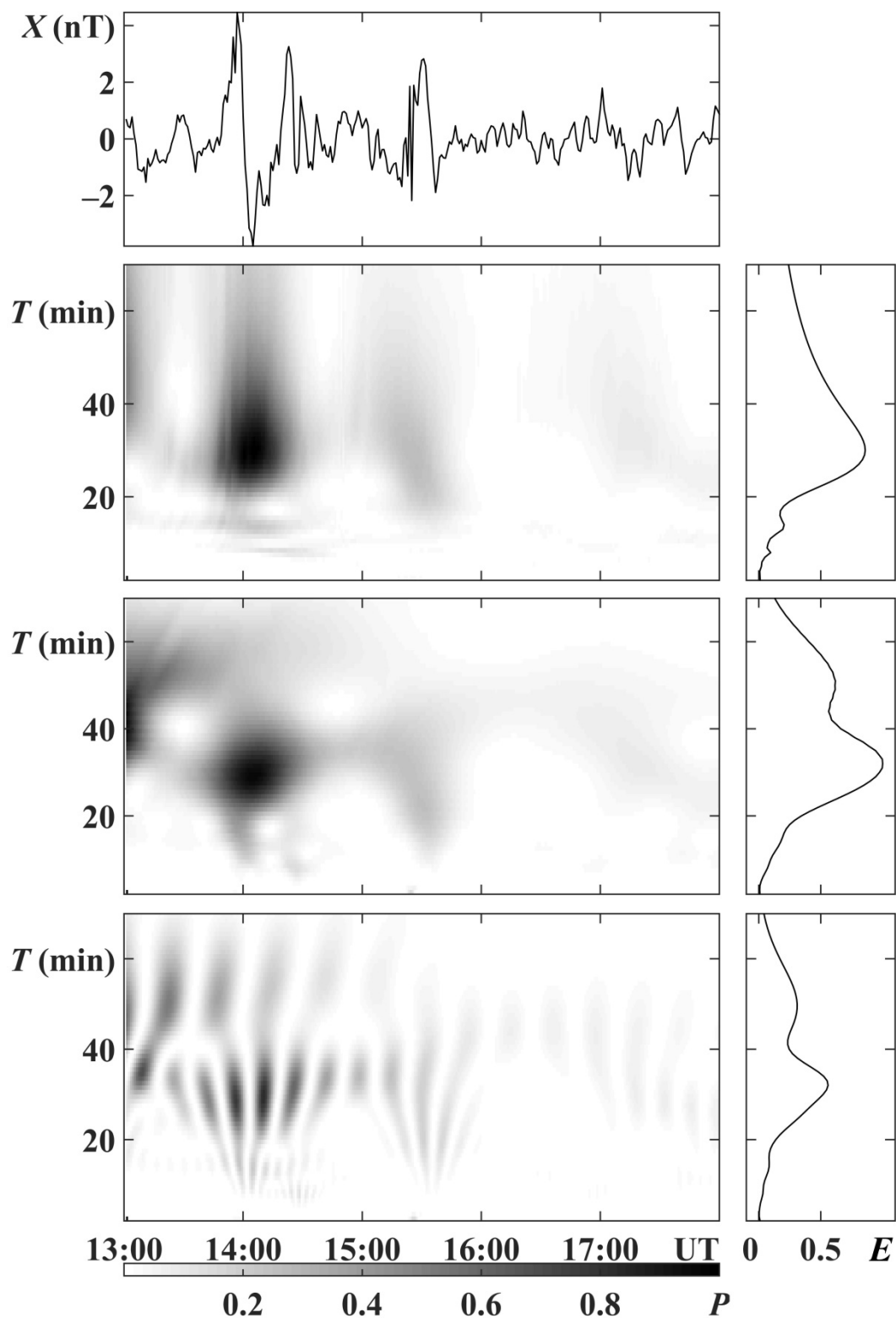
Таким чином, результати спектрального аналізу свідчать про існування стійких хвильових процесів із характерними періодами близько 25–30 хв, які розгортаються в ранковий часовий інтервал і мають добре виражену часову еволюцію – від зародження через максимальний розвиток до згасання.

Також для виявлення змін у спектральній структурі варіацій геомагнітного поля, пов'язаних з нагріванням іоносфери стендом Тромсе, було проведено системний спектральний аналіз часових рядів  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ - компонент магнітного поля, зареєстрованих 21 жовтня 2019 року. Особливу увагу приділено часовому інтервалу 15:00–15:40, протягом якого здійснювався режим періодичного нагрівання атмосфери (3 хвилини ввімкнення передавача та 2 хвилини паузи).

Така режимна робота дозволяє очікувати появу періодичних збурень плазми та зміни у спектральному розподілі коливань геомагнітного поля.

Аналіз виконано для діапазону таких самих періодів 2–60 хв.

На рис. 3.16 представлено часові варіації  $X$ -компоненти. У часовому інтервалі 15:05–15:15 спостерігається зростання спектральної потужності в діапазоні періодів 8–20 хв, що узгоджується з початком циклічного нагрівання атмосфери. Під час кожного наступного ввімкнення передавача спостерігається повторне підсилення коливань у цьому ж періодичному діапазоні, що вказує на модульований вплив зовнішнього джерела енергії (нагрітого стенду) на динаміку іоносферного плазмового середовища.



*Рис. 3.16.* Результати системного спектрального аналізу часових варіацій  $X$ -компоненти геомагнітного поля 21 жовтня 2019 року у діапазоні періодів  $2 \div 60$  хв. Панелі зверху вниз: аналізована залежність, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч наведено енергограми у відносних одиницях для відповідних перетворень

Енергограма показує стійке підвищення рівня енергії спектра саме у моменти активної фази нагріву, що свідчить про утворення або посилення хвильових коливань магнітного поля іоносферного походження.

Для  $Y$ -компоненти (рис. 3.17) також реєструється зростання спектральної інтенсивності у періодах 8–25 хв у моменти роботи нагрівного стенду. Проте амплітудні зміни є менш вираженими, що може бути пов'язано з орієнтацією вектору збурення відносно магнітного меридіану.

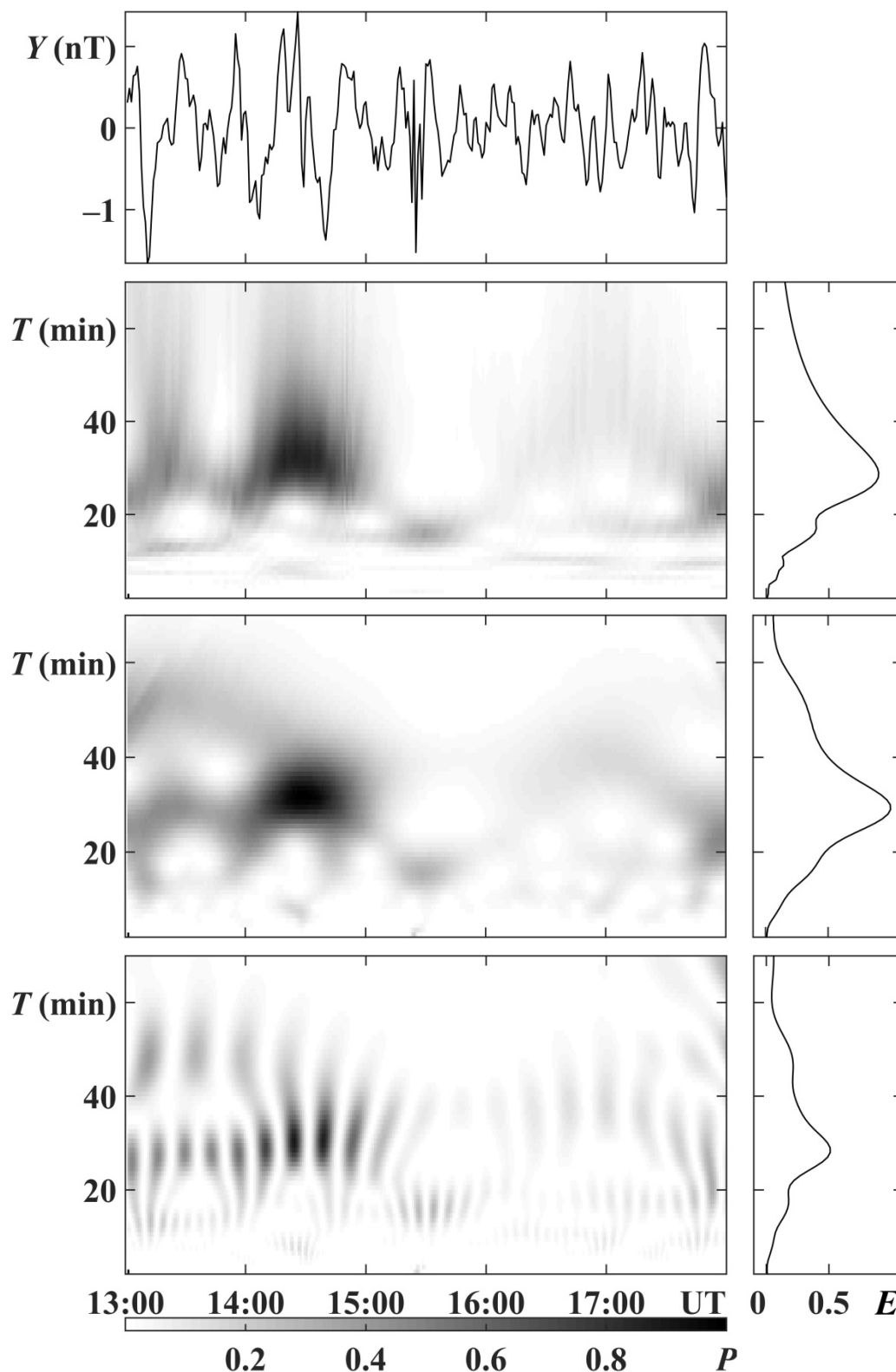
На всіх спектрограмах сигнал починає проявлятися після  $\sim 13:20$ – $13:30$  UT, спочатку зі слабкою інтенсивністю. Найбільш виражена хвильова активність спостерігається у проміжку  $14:00$ – $15:30$  UT, де спектр містить темні, локалізовані області, що свідчить про максимальну потужність коливань. Після  $15:30$ – $16:00$  UT інтенсивність хвильового сигналу поступово зменшується, кількість виразних спектральних структур скорочується, і до  $\sim 17:00$  UT спектральна потужність повертається до фонового рівня, тобто сигнал практично зникає.

$Z$ -компонента (рис. 3.18) демонструє найменшу реакцію, що узгоджується з загальною особливістю локальних іоносферних збурень, які переважно проявляються в горизонтальних проекціях поля.

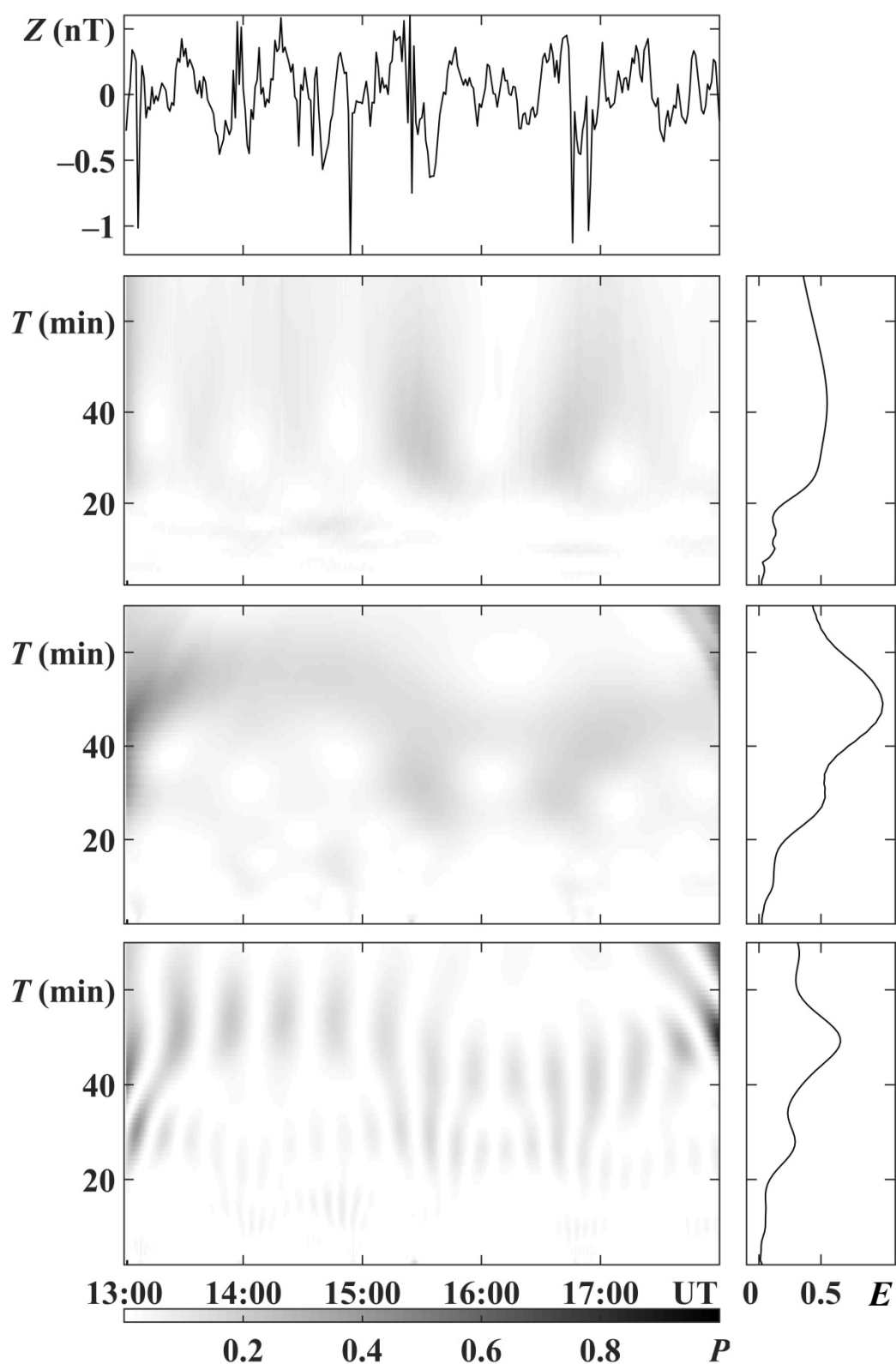
У віконного перетворення Фур'є – незначні коливання з періодами приблизно  $T \approx 20$ – $40$  хв фіксуються переважно у проміжку  $13:30$ – $14:40$  UT, однак їх рівень є низьким та не утворює стійкої хвильової структури. Після  $14:40$  UT енергія коливань продовжує знижуватися, і до  $15:00$ – $17:00$  UT спектр практично повністю згладжується. Сигнал має слабо виражений та нестационарний характер.

Можна вважати, що короткочасна хвильова активність починається близько  $13:30$  UT і закінчується близько  $15:00$  UT, після чого коливання стають фоновими і не суттєвими.

Адаптивного перетворення Фур'є – у спектрі відсутні чітко виражені та стійкі хвильові структури. Інтенсивність коливань протягом усього інтервалу залишається низькою. Слабка активність простежується для періодів приблизно  $T \approx 20$ – $40$  хв, однак вона не формує стійких максимумів і не локалізована в часі.



*Рис. 3.17.* Результати системного спектрального аналізу часових варіацій  $Y$ -компоненти геомагнітного поля 21 жовтня 2019 року у діапазоні періодів  $2 \div 60$  хв. Панелі зверху вниз: аналізована залежність, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч наведено енергограми у відносних одиницях для відповідних перетворень



*Рис. 3.18.* Результати системного спектрального аналізу часових варіацій  $Z$ -компоненти геомагнітного поля 21 жовтня 2019 року у діапазоні періодів  $2 \div 60$  хв. Панелі зверху вниз: аналізована залежність, результати віконного перетворення Фур'є, адаптивного перетворення Фур'є та вейвлет-перетворення. Праворуч наведено енергограми у відносних одиницях для відповідних перетворень

Слабке посилення енергії коливань спостерігається близько 13:00–14:00 UT, після чого потужність сигналу поступово зменшується. Після 14:30 UT спектр стає практично рівномірним, без помітних хвильових мод, і до 17:00 UT активність залишається низькою.

Вейвлет-перетворення – у спектрі чітко простежуються хвильові структури з періодами близько  $T \approx 25\text{--}45$  хв, які з'являються і змінюються з часом. Спостерігається характерне смугове «розшарування», що свідчить про нестаціонарність сигналу та зміну амплітудно-частотних характеристик у часі. Початок вираженого сигналу починається приблизно о 13:20–13:30 UT. У цей момент з'являються перші помітні згустки потужності для періодів  $T \approx 30\text{--}40$  хв.

Максимальна інтенсивність – між 14:00 та 16:30 UT, де хвильові моди стають найбільш чітко вираженими та стійкими. Після 17:00 UT потужність спектральних компонентів різко знижується, і структура спектра переходить у фоновий рівень.

### 3.3. Фізичне тлумачення отриманих результатів

На рисунках 3.1 – 3.6 показані часові варіації для  $X$ ,  $Y$  та  $Z$ -компонент геомагнітного поля у період від 06:00 до 11:00 UT для 25 лютого 2013 року. У часовому інтервалі 08:30–09:15 UT відбувалося штучне нагрівання іоносфери стендом Тромсе, що працював у циклічному режимі –10 хв увімкнення передавача, 5 хв пауза.

Штучне радіочастотне нагрівання призводить до підвищення електронної температури в області F; зміни іоносферної провідності уздовж та впоперек магнітних силових ліній; зміни режиму протікання іоносферних та індукованих магнітосферних струмів.

Таким чином, у часових рядах геомагнітного поля в момент роботи стенду можна очікувати появу підсилення мікропульсацій магнітного поля; зміни градієнтів  $X$ -,  $Y$ -,  $Z$ -компонент; періодичної модуляції амплітуди коливань, синхронної з циклом нагрівання.

*X*-компонента представляє горизонтальну проєкцію геомагнітного поля вздовж напрямку магнітного меридіану.

У першій половині доби (06:00–08:30) спостерігаються невеликі коливання амплітуди порядку 3–7 нТл. Після 08:30 UT, коли починається робота нагрівача, у часовому ряді *X*-компоненти спостерігається підсилення хвильових коливань, збільшення амплітудних флуктуацій, поява квазіперіодичних нерівномірних варіацій, синхронних з фазами нагріву.

*Y*-компонента відповідає за азимутальний напрямок, тобто поздовжні зміни у струмах іоносферних збурень. В інтервалі 08:30–09:15 UT видно помірне підсилення коливань, але менш виражене, ніж у *X*-компоненті, збільшення локальних флуктуацій, плавний спад поля після закінчення циклів нагрівання.

Це означає, що нагрів впливає на перерозподіл плазми та іоносферних струмів, але азимутальна структура збурень формується слабше, ніж меридіональна.

*Z*-компонента відображає вертикальну складову поля і є найменш чутливою до змін у горизонтальних іоносферних струмах. Під час нагрівання спостерігається поява короткочасних різких імпульсів, збільшення дисперсії сигналу у порівнянні з фоном.

Це свідчить про вертикальну перебудову струмової системи, але така реакція завжди слабкіша, ніж у горизонтальних компонентах.

На часових залежностях *X*-, *Y*- та *Z*-компонент геомагнітного поля за 21 жовтня 2019 року спостерігаються зміни, що корелюють із періодом роботи іоносферного нагрівного комплексу Тромсе, який у зазначений інтервал часу (15:00–15:40 UT) функціонував у режимі циклічної модуляції 3 хв нагрівання / 2 хв – пауза. Радіочастотне випромінювання стенду призводило до підвищення електронної температури та перебудови провідності іоносферного плазмового шару, що визначає умови взаємодії магнітного поля з іоносферними струмовими системами.

Внаслідок цього в часових рядах геомагнітного поля реєструється модуляція хвильових та квазістаціонарних компонент, що відображає зміну умов поширення

та відбиття альфвенівських і магнітогідродинамічних хвиль уздовж силових ліній геомагнітного поля.

$X$ -компонента характеризує меридіональну горизонтальну складову геомагнітного поля та є найбільш чутливою до поперечних альфвенівських коливань і змін ефективної провідності іоносферного шару. У часовому інтервалі, що відповідає роботі нагрівача (15:00–15:40 UT), фіксується підсилення амплітуди коливань, поява квазіперіодичних варіацій, узгоджених із циклічністю нагріву, короткочасні імпульсні зміни градієнтів сигналу.

$Y$ -компонента описує азимутальну горизонтальну складову геомагнітного поля та характеризує вихрові та зсувні плазмові течії на рівні іоносфери. У період нагрівання спостерігається плавне підвищення середнього рівня сигналу, поява нерівномірних коливань малої амплітуди, формування структур, узгоджених з перебудовою іоносферних електроджетів.

Менша вираженість реакції  $Y$ -компоненти порівняно з  $X$ -компонентою пояснюється анізотропією провідності іоносфери відносно напрямку силових ліній геомагнітного поля, а також домінуванням меридіонального переносу енергії під час нагріву.

$Z$ -компонента відображає вертикальну складову геомагнітного поля. У даному випадку вона демонструє обмежену реакцію на нагрівання, окремі імпульсні перебудови сигналу, відсутність значних змін середнього рівня.

Це узгоджується з тим, що переважна частина індукованих струмів та хвильових процесів у іоносфері має горизонтальний характер, тоді як вертикальна передача енергії є відносно слабкою.

### **Висновки до розділу 3**

Отримані часові ряди  $X$ -,  $Y$ -,  $Z$ -компонент для 25 лютого 2013 року показують, що під час роботи нагрівача Тромсьо відбувається активація хвильових та струмових процесів у іоносфері, підсилення мікропульсацій геомагнітного поля.

Найбільш виразна реакція спостерігається у  $X$ -компоненті, помірною — у  $Y$ -компоненті, і найслабша — у  $Z$ -компоненті, що узгоджується з горизонтальною орієнтацією основних іоносферних струмів та напрямом передачі енергії вздовж ліній геомагнітного поля.

Для 21 жовтня 2019 року, зміни часових варіацій компонент геомагнітного поля під час роботи іоносферного нагрівача Тромсе відображають штучно індуковану модуляцію хвильових процесів у іоносферно-магнітосферній системі. Найбільш виражена реакція спостерігається також у меридіональній  $X$ -компоненті, що вказує на підсилення альфвенівських та МГД-хвиль при змінених умовах провідності іоносфери. Відповідь  $Y$ -компоненти є помірною, а реакція  $Z$ -компоненти — мінімальною, що узгоджується з горизонтальною орієнтацією основних іоносферних струмів та напрямом передачі енергії уздовж силових ліній геомагнітного поля.

У паузах між нагріванням (коли передавач вимкнено) рівень спектральної потужності помітно зменшується, що свідчить про безпосередній вплив енергетичного вкладу нагрівача на формування хвильових мод у іоносфері.

Таким чином, зафіксовані зміни спектральної енергії є прямим підтвердженням штучної модуляції хвильових процесів у іоносферно-магнітосферній системі, синхронної з циклом роботи нагрівача.

Це є прямим доказом того, що збурення не є випадковими або сонячно-обумовленими, а керовано індуковані нагрівним стендом.

## ВИСНОВКИ

У проведеній роботі виконано аналіз варіацій геомагнітного поля під впливом потужного HF-радіовипромінювання нагрівного комплексу Тромсьо у періоди 25 лютого 2013 року (режим 10 хв нагріву / 5 хв пауза) та 21 жовтня 2019 року (режим 3 хв нагріву / 2 хв пауза). Результати обробки часових залежностей  $X$ -,  $Y$ - та  $Z$ - компонент показали, що у моменти активної роботи нагрівного стенда спостерігається зростання амплітуди низькочастотних флуктуацій, поява імпульсних збурень та зміна характеру коливань геомагнітного поля. Найбільш помітна реакція проявлялася у  $X$ -компоненті, що свідчить про перерозподіл горизонтальних іоносферних струмів та зміну просторової структури плазми в області нагрівання.

Проведення системного спектрального аналізу з використанням віконного та адаптивного перетворень Фур'є і вейвлет-аналізу дозволило виділити характерні періодичні компоненти збурень, що відповідають циклічності роботи стенда. Зокрема, у спектрі флуктуацій виявлено підсилення енергії у діапазоні 5–15 хв (для експерименту 2013 р.) та 4–7 хв (для експерименту 2019 р.), що є безпосереднім проявом штучної періодичної модуляції електропровідності іоносфери. Крім того, було зафіксовано збурення у діапазоні 10–40 хв, пов'язані з динамікою іоносферно-магнітосферної взаємодії на фоні слабкої геомагнітної активності.

Таким чином, отримані результати однозначно підтверджують можливість керованого впливу потужного HF-радіовипромінювання на електродинамічний стан полярної іоносфери. Встановлено, що нагрівний стенд Тромсе здатний ініціювати локальні збурення струмових систем, які проявляються у варіаціях геомагнітного поля, реєстрованих наземними магнітометричними станціями. Це демонструє принципову можливість штучного моделювання та керування геокосмічними процесами, а також підтверджує ефективність застосування магнітометричних спостережень та системного спектрального аналізу як інструментів діагностики штучних іоносферних збурень.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чорногор Л. Ф. (2008). *Про нелінійність у природі та науці: Монографія*. (Харків:ХНУ ім. Каразіна), 528 с.
2. Чорногор Л. Ф., Домнін І. Ф. (2014). *Фізика геокозмичних бур: монографія*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, Інститут іоносфери НАН та МОН України, 408 с.
3. Чорногор Л. Ф. (2014). *Фізика потужного радіовипромінювання в геокозмосі: Монографія*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 448 с.
4. Chapman S., Bartels J. *Geomagnetism*. (2010). Oxford: Clarendon Press.
5. Hargreaves J. K. (2018). *The Solar–Terrestrial Environment*. Cambridge University Press.
6. Parks G. 2019. *Physics of Space Plasmas*. Westview Press.
7. Liu M., Zhou C., Wang X., Ni B. B., Zhao Z. (2018). Numerical simulation of oblique ionospheric heating by powerful radio waves. *Annales Geophysicae*. 36, 855–866.
8. Wang X., Zhou C., Zhao Z., Ni B., Zeng G. (2012). HF waves heating ionosphere F-layer. *Chinese Science Bulletin*, 57, 4036–4042. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5408-4>
9. Blagoveshchenskaya N. F., Borisova T. D., Kornienko V. A., Thidé B., Rietveld M. T., Kosch M. J., Bösinger T. (2005). Phenomena in the ionosphere-magnetosphere system induced by injection of powerful HF radio waves into nightside auroral ionosphere. *Annales Geophysicae*, 23, (1), 87–101. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-87-2005>
10. Lysak R. L., Song Y. (2006) Magnetosphere–ionosphere coupling by Alfvén waves: Beyond current continuity. *Advances in Space Research*, 38, (8), 1713–1719. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.08.038>
11. Magnetosphere–Ionosphere Coupling in the Solar System. (2016). Eds. C. R. Chappell, R. W. Schunk, P. M. Banks, J. L. Burch, R. M. Thorne. *American*

*Geophysical Union, Geophysical Monograph Series*, 222. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 426 p. <https://doi.org/10.1002/9781119066880>

12. Laundal K. M., Skeidsvoll A. S., Popescu Braileanu B., Hatch S. M., Olsen N., Vanhamäki H. (2025). *Global Inductive Magnetosphere–Ionosphere–Thermosphere Coupling*. *EGUsphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2051>

13. Liléo S., Marklund G. T., Karlsson T., Johansson T., Lindqvist P.-A., Marchaudon A., Fazakerley A., Mouikis C., Kistler L. M. (2008). Magnetosphere–ionosphere coupling during periods of extended high auroral activity: a case study. *Annales Geophysicae*, 26, (3), 583–597. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-583-2008>

14. Milikh G., Vartanyan A. (2011). HAARP-Induced Ionospheric Ducts. *AIP Conference Proceedings*, 1320. <https://doi.org/10.1063/1.3544323>

15. INTERMAGNET Technical Reference Manual. (2023). INTERMAGNET Operations Committee, Version 5.3.2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tech-man.intermagnet.org>

16. Love J. J., Chulliat A. (2013). An international network of magnetic observatories. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94 (42), 373–374. <https://doi.org/10.1002/2013EO420001>

17. Kerridge D. J., Riddick J. (2010). INTERMAGNET: Worldwide near-real-time geomagnetic observatory data. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 1, (A01), 1–7.

18. Manda M., Korte M. (Eds.) *Geomagnetic Observations and Models*. – Dordrecht : Springer, 2011. (IAGA Special Sopron Book Series; 5), 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0>

19. Bloomfield P. (2013). *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*. Wiley, 288 p. [Электронный ресурс]. [https://books.google.com.ua/books/about/Fourier\\_Analysis\\_of\\_Time\\_Series.html](https://books.google.com.ua/books/about/Fourier_Analysis_of_Time_Series.html)

20. Gonzalez W. D., Joselyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W., Rostoker G., Tsurutani B. T., Vasyliūnas V. M. (1994). What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99, (A4), 5771–5792. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>

21. Percival D. B., & Walden, A. T. (2000.) *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 594 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841040>
22. Chatfield C. (2016). *The Analysis of Time Series: An Introduction*. 6th ed. – Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 352 p.
23. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. 3rd ed. – Amsterdam / Boston: Academic Press, 2009, 805 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374370-1.X0001-8>
24. Koskinen H. E. J. *Physics of Space Storms: From the Solar Surface to the Earth*. Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag, (2011). XVIII, 419 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00319-6>
25. Kivelson M. G., Russell C. T. (Eds.) *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, (1995), 586 p.
26. Schwenn R. (2006). *Solar Wind Sources and Interactions with the Heliosphere and Earth*. Springer, 2006.
27. Hargreaves, J. K. (1992). *The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace – the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere and Magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 420 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511628924>
28. NOAA / NWS Space Weather Prediction Center (SWPC). *Homepage*. Available from: <https://www.swpc.noaa.gov>