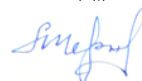


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної
електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра космічної радіофізики

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



підпис

Леонід ЧОРНОГОР

ініціали, прізвище

“___” _____ 20__ року

**Кваліфікаційна робота
магістра**

на тему: ЕФЕКТИ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 5 ЛИСТОПАДА 2023 Р.

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-66
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,
освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»



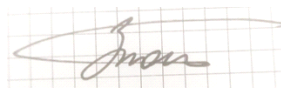
Михайло ФРОЛОВ.

Керівник
доктор фіз.-мат. наук,
професор



Леонід ЧОРНОГОР

Консультант
м.н.с.



Максим ТКАЧЕНКО

Харків 2024

Анотація

Фролов М.О. Ефекти геокозмичної бурі 5 листопада 2023 р.–Рукопис, стор. 39, рис. 16, табл. 0. Кваліфікаційна робота на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали, освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка». – Харків, 2024.

Кваліфікаційну роботу присвячено дослідженню ефектів потужної геокозмичної бурі, що сталася 5 листопада 2023 року. Із використанням глобальних іоносферних мап, а також за допомогою її похідних (мап абсолютних приростів та мап відсоткових приростів) досліджено процеси, що протікали протягом бурі в іоносфері Землі.

Ключові слова: іоносфера, іоносферні збурення, геокосмос, магнітна буря, геокозмична буря.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ІОНОСФЕРА ТА ПОВНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ВМІСТ.....	5
1.1 Геокосмічні бурі в системі СМСМІАЗ та їх характеристики	5
1.2 Геокосмічні бурі як складні динамічні нелінійні процеси.	7
1.3 Сонячно-земні зв'язки. Земна магнітосфера.....	8
1.4 Іоносфери як нижня частина магнітосфери Землі. Іоносферно-магнітосферні зв'язки..	11
1.5 Будова іоносфери.....	12
1.6 Повний електронний вміст як параметр для характеристики стану іоносфери.	16
1.7 Способи вимірювання ПЕВ	17
1.8 Глобальні іоносферні карти	18
1.9 Висновок до розділу	20
РОЗДІЛ 2. ЕФЕКТИ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 5 ЛИСТОПАДА 2023	22
2.1 Стан космічної погоди.....	22
2.2 Аналіз глобальних іоносферних карт.....	24
2.3 Аналіз карт відсоткових приростів повного електронного вмісту	27
2.4 Аналіз карт приростів ПЕВ.....	31
2.5 Висновок до розділу	35
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	37

ВСТУП

Дослідженнями сонячно-земних зв'язків людство зайнялося багато століть тому назад. Метою було покращення врожайності земель. В той час спостерігали рух сонця по небу та його інтенсивність. З відкриттям телескопа стали спостерігати сонячні плями. З розвитком теорії магнетизму у XVIII ст. було виявлено, що Земля має власне магнітне поле. Людство почало спостерігати кореляцію між кількістю сонячних плям та наявністю та інтенсивністю північних сяйв. З розвитком інженерної науки були створені лінії електропередач та телеграфні лінії зв'язку. І тоді людство вперше стикнулося з таким явищем як магнітна буря. Тоді в 1859 році стався потужний викид коронарної маси Сонця, що спричинило тяжкі наслідки для людства[1, 2, 3]. В лініях електропередач виникали потужні струми і нищили ці лінії, а телеграфні станції виходили з ладу. Цим подіям передували спалахи на сонці, який спостерігали астрономи. Зв'язавши ці всі події, наукова спільнота – астрономи та геофізики – дійшли висновку, що ці явища пов'язані між собою. Саме з того моменту починається довга та терниста дорога досліджень геокосмосу. З часом, виявивши, що земне магнітне поле (магнітосфера) має певну структуру, почалися дослідження реакції його підсистем на геокосмічні бурі. Однією з таких підсистем є іоносфера. Ця структура шарів іонізованого газу, а точніше її стан, має не аби-яке значення для стабільного функціонування пристроїв та систем зв'язку, як це показала магнітна буря 1859 року, та радіолокації, радіонавігації та супутникового зв'язку, а також систем глобального позиціонування, як показали сучасні дослідження.

Чим більш технологічно розвинутим стає людство, тим більш вразливим воно ї по відношенню до подібних явищ. Тому дослідження фізики іоносфера та її відгуку на дію потужних джерел енергії має надзвичайно велике значення для виживання всього людського роду. Досліджувати іоносферу можна багатьма способами. Це вертикальне радіозондування, похиле, когерентне та некогерентне розсіювання, доплерівське радіозондування і т.д[4 - 9]. В останній час надзвичайно потужним та розвиненим став метод так званого трансіоносферного радіозондування[10 - 17]. В основі цього методу лежить явище затримки електромагнітної хвилі електропровідним середовищем. Саме цей метод використовується в даній роботі.

Об'єктом досліджень, яким присвячено дану роботу, є глобальні іоносферні мапи, а *предметом* – значення величини повного електронного вмісту, величина його абсолютних та відсоткових приростів.

Метою роботи є вивчення особливостей ефектів геокосмічної бурі 5 листопада 2023 р. в іоносфері в повному електронному вмісті.

Задля досягнення сформульованої мети необхідно розв'язати наступну низку задач.

1. Стислий огляд теорії методу трансіоносферного зондування.
2. Стислий опис методу розрахунку повного електронного вмісту та побудови глобальних іоносферних мап.
3. Проведення аналізу глобальних іоносферних мап та мап абсолютних та відсоткових приростів повного електронного вмісту.
4. Визначення регіональних особливостей ефектів геокоосмічної бурі 5 листопада 2023 р.

Структура роботи тісно пов'язана зі сформульованими задачами.

Перший розділ присвячено стислому оглядові структури підсистем системи ЗАІМ, структурі магнітосфери та іоносфери. Наведено стислий опис методології визначення повного електронного вмісту та побудови глобальних іоносферних мап та їх похідних.

У другому розділі наведено оригінальні результати побудови глобальних іоносферних мап та їх похідних, а також проведено аналіз отриманих результатів, описано ефекти, що супроводжували досліджувану геокоосмічну бурю.

У Висновках стисло викладено основні результати роботи.

РОЗДІЛ 1. ІОНОСФЕРА ТА ПОВНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ВМІСТ

1.1 Геокосмічні бурі в системі СМСМІАЗ та їх характеристики

Геокосмічна буря представляє собою значні збурення в геомагнітному полі, динаміці радіаційних поясів, іоносфері та верхніх шарах атмосфери, а також в геоелектричному полі, що виникає з магнітосферно-іоносферних процесів. Крім того, вона може впливати на тропосферу і навіть на земні електричні струми. Ці бурі є комплексними явищами, що включають магнітні, іоносферні, атмосферні та електричні компоненти, які взаємодіють між собою, підсилюючи загальний ефект.

Космічна погода[18] визначає стан космічного середовища, що включає в себе Сонце, сонячний вітер і геокосмічні компоненти, такі як магнітосфера, іоносфера та термосфера. Зміни в космічній погоді можуть відбуватися в часовому діапазоні від кількох хвилин до декількох діб.

Геокосмічні бурі мають різні причини виникнення. Основним фактором їх виникнення є, зокрема, корональні масові викиди (КМВ) та сонячні спалахи. Підчас перебігу цих явищ в міжпланетний простір викидається значна кількість заряджених частинок, які, взаємодіючи з магнітосферою Землі, і призводять до виникнення геокосмічної бурі. Сонячний вітер, постійний потік заряджених часток, також є важливим чинником, адже під час активних сонячних періодів він може значно впливати на магнітосферу Землі.

Геокосмічні бурі класифікуються за рівнем інтенсивності, який визначається за допомогою магнітного індексу (Кр-індекс) або магнітосферного індексу (Dst-індекс). Інтенсивність бурі може варіюватися від легких збурень до сильних бурь, які здатні викликати полярні сйва і магнітні шторми. Індекс Кр- це глобальний показник геомагнітної активності, що розраховується на основі даних з кількох обсерваторій по всьому світу. Індекс варіюється від 0 до 9, де 0 означає відсутність геомагнітних збурень, а

9 — екстремально сильну бурю. Значення K_p вище 5 зазвичай свідчить про початок магнітної бурі. Індекс Dst- відображає зміну горизонтальної компоненти магнітного поля на екваторі і вимірюється в нанотеслах (нТл). Значення Dst нижче -50 нТл вказує на помірну бурю, а нижче -100 нТл — на сильну бурю[1].

Магнітні бурі розвиваються поступово. Спочатку настає початкова фаза, коли магнітне поле Землі зазнає незначних збурень. Це відбувається через те, що сонячний вітер починає впливати на магнітосферу, викликаючи слабкі зміни в її структурі. Потім настає основна фаза, де спостерігаються найбільш інтенсивні зміни в магнітному полі Землі. В цей період магнітосфера стискається до максимального рівня, а індекс Dst, що оцінює інтенсивність бурі, досягає найнижчих значень. Нарешті, під час фази відновлення магнітне поле починає повернутися до нормального стану. Цей процес може тривати від кількох годин до кількох днів, в залежності від потужності бурі.

На Землю ці бурі впливають у різний спосіб. По-перше, вони можуть спричиняти збої в роботі супутників, навігаційних систем та радіозв'язку. По-друге, геокоосмічні бурі можуть призводити до виникнення індукованих електричних струмів у лініях електропередачі, що може викликати перебої в електропостачанні. По-третє, підвищена радіаційна активність під час бурь може становити ризик для космонавтів і авіапасажирів, особливо на великих висотах.

Спостереження та прогнозування геокоосмічних бурь здійснюється за допомогою космічних обсерваторій і супутників, які вивчають сонячну активність і магнітні зміни на Землі. Для прогнозування бурь розробляються моделі, які базуються на даних про сонячні викиди та інші астрономічні явища.

Історія знає численні приклади геокоосмічних бурь, серед яких виділяються буря 1859 року, відома як буря Керрінгтона, геокоосмічна буря

1989 року, хеллоуїнська буря 203 року та буря Святого Патріка 2015 року що є одними з найсильніших в історії. Аналіз впливу таких історичних бурь дозволяє оцінити їхній вплив на наземні та космічні технологічні системи та енергетику.

З метою протидії та зменшення ризиків, пов'язаних з геокоосмічними бурями, розробляються різноманітні захисні заходи, такі як посилення захисту електроніки та навігаційних систем. Окрім того, важливою є профілактика та підготовка, яка включає рекомендації для компаній і організацій щодо підготовки до можливих бурь, навчання і розробку планів аварійного реагування.

1.2 Геокоосмічні бурі як складні динамічні нелінійні процеси.

Геокоосмічні бурі, що виникають в результаті взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі, є прикладом складних динамічних нелінійних процесів. Ці бурі представляють собою систему подій, в якій елементарні компоненти взаємодіють один з одним у складний і часто непередбачуваний спосіб, що призводить до виникнення широкого спектра явищ і змін у магнітному полі Землі.

На базовому рівні геокоосмічні бурі можна розглядати як результат сплесків енергії, що надходять в систему Сонце — міжпланетне середовище — магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (СМСМІАЗ) [20] від Сонця у вигляді сонячного вітру. Цей вітер, взаємодіючи з магнітосферою, викликає її збурення, які потім розповсюджуються по всій планетарній системі. Важливо зазначити, що ці збурення не є лінійними, тобто їхня інтенсивність і вплив не пропорційні до початкових умов або до сили сонячного вітру.

Процеси, що відбуваються під час геокоосмічних бур, характеризуються нелінійною динамікою. Це означає, що невеликі зміни в сонячному вітрі

можуть викликати значні і непередбачувані зміни в магнітному полі Землі. Нелінійність проявляється в тому, що реакція магнітосфери на зовнішні впливи не є пропорційною до цих впливів; замість цього, система може демонструвати різкі зміни у поведінці або перехід в нові стани.

Динаміка геокосмічних бур також пов'язана з множинними зворотними зв'язками і взаємодіями між різними компонентами магнітосфери. Наприклад, коли сонячний вітер посилюється, це може викликати збільшення струмів в іоносфері, що, у свою чергу, може посилити збурення магнітного поля і призвести до виникнення нових хвиль магнітних і електричних полів. Такі зворотні зв'язки роблять систему ще більш складною і непередбачуваною.

Дослідження геокосмічних бур як складних динамічних нелінійних процесів вимагає використання чисельних моделей і симуляцій для передбачення їхньої поведінки. Ці моделі повинні враховувати широкий спектр факторів і процесів, таких як сонячний вітер, магнітосферні струми, іоносферні реакції, і взаємодії між різними шарами магнітосфери. Адекватне моделювання цих процесів є критично важливим для розуміння і прогнозування геокосмічних бур, що має значні наслідки для технологій і інфраструктури на Землі.

1.3 Сонячно-земні зв'язки. Земна магнітосфера.

При вивченні впливу процесів, що відбуваються на Сонці, в міжпланетному середовищі та далекому космосі на Землю, доцільно розглядати комплексну систему, що охоплює взаємодії між різними компонентами. Цю систему можна умовно позначити як СМСМІАЗ.

Важливо враховувати також біосферу та людину як складові частини цієї системи, що дозволяє більш повно оцінити вплив космічних процесів на всі аспекти життя на нашій планеті. Отже, повна система, що включає всі ці елементи, може бути позначена як СМСМІАЗБ.

Розглядаючи цю комплексну систему, можна зрозуміти, як різні рівні — від космічних явищ до впливу на біосферу та людське суспільство — взаємодіють один з одним. Наприклад, активність на Сонці, така як сонячні спалахи і корональні викиди маси, може впливати на міжпланетне середовище, що в свою чергу змінює стан магнітосфери Землі. Це може викликати збурення в іоносфері, які далі можуть впливати на атмосферу і кліматичні умови. В кінцевому підсумку ці зміни можуть мати прямий або непрямий вплив на біосферу і людське здоров'я.

Магнітосфера — це область навколо Землі, де домінує магнітне поле планети і яке взаємодіє з сонячним вітром. Вона є важливою частиною космічного середовища, що забезпечує захист нашої планети від небезпечного впливу заряджених частинок сонячного вітру[21, 22, 23].

Схема взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі, яку можна побачити на Рис. 1. є важливою для розуміння космічної погоди і її впливу на нашу планету.

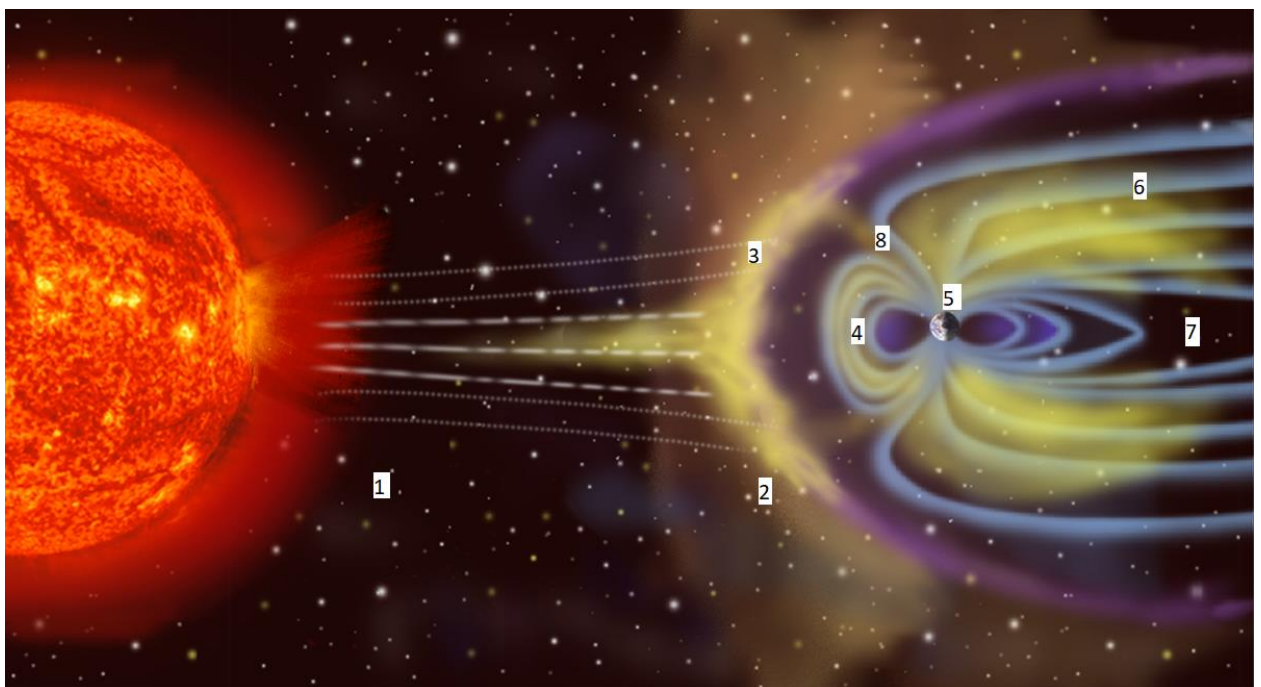


Рис. 1.3.1: Схема взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі: 1 — сонячний вітер; 2 — магнітопауза; 3 — головна ударна хвиля; 4 — області

захопленої радіації; 5 — зона полярних сьайв; 6 — хвіст магнітосфери; 7 — нейтральний шар; 8 — касп

Сонце є основним джерелом енергії в Сонячній системі і визначає багато процесів у геокосмічному середовищі. Воно постачає Землі енергію через різні типи випромінювання, включаючи електромагнітне та корпускулярне. Додатково, сонячний вітер, який є потоком плазми, що несе з собою магнітні поля, також сприяє цьому енергетичному обміну. Вплив електромагнітного та корпускулярного випромінювання Сонця, а також сонячного вітру, спричиняє взаємодію між різними підсистемами Землі і запускає широкий спектр процесів на нашій планеті.

Сонячний вітер — це постійний потік заряджених частинок, які викидаються з Сонця в космос. Цей потік, що складається переважно з протонів і електронів, утворює плазму, яка розширюється від сонячної корони і розноситься по всій Сонячній системі. Швидкість сонячного вітру може варіюватися від 300 до 800 км/с, залежно від сонячної активності. Вона також може змінюватися під час сонячних спалахів або корональних викидів маси, коли швидкість і густина частинок значно зростають.

Коли сонячний вітер досягає Землі, він взаємодіє з магнітосферою нашої планети. Магнітосфера, яка є захисним магнітним полем навколо Землі, відхиляє більшість частинок сонячного вітру. Однак частина цих частинок все ж проникає всередину неї і спричиняє магнітні бурі. Взаємодія сонячного вітру з магнітосферою також формує магнітний хвіст, що простягається в протилежний від Сонця бік.

Магнітні, іоносферні, атмосферні та електричні бурі є різними проявами одного комплексного явища — геокосмічної бурі. Інакше кажучи, геокосмічна буря — це бурі у магнітному полі, іоносфері, атмосфері і електричному полі магнітосферно-іоносферноатмосферного походження. Ці бурі взаємодіють

між собою синергетично, утворюючи єдину інтегровану систему збурень, де кожен елемент впливає на інші, підсилюючи загальний ефект.

1.4 Іоносфери як нижня частина магнітосфери Землі. Іоносферно-магнітосферні зв'язки.

Іоносфера є важливим шаром атмосфери Землі, розташованим на висотах від приблизно 60 до 1 000 км над поверхнею планети. Вона відіграє ключову роль у взаємодії між сонячним вітром і магнітосферою Землі, а також у формуванні численних космічних явищ, що впливають на наші технології та навколишнє середовище.

Іоносфера є нижньою частиною магнітосфери Землі і складається з іонізованих частинок, включаючи електрони, протони та іони, які утворюються внаслідок сонячного ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання. Це випромінювання викликає іонізацію атомів і молекул в атмосфері.

Взаємодія іоносфери з магнітосферою є складним і багатограним процесом, що визначає багато аспектів космічної погоди та геофізичних явищ. Іоносфера, що складається з іонізованих частинок, активно взаємодіє з магнітосферою через електромагнітні та заряджені частинки, які потрапляють з сонячного вітру. Коли ці частинки досягають іоносфери, вони можуть спричиняти різноманітні електромагнітні ефекти, включаючи магнітні бурі та полярні сяйва, що виникають унаслідок їхнього впливу на атмосферу.

Зміни в стані іоносфери також мають відгук у магнітосфері, адже, наприклад, варіації в електронній концентрації можуть впливати на магнітне поле Землі і його структуру. Це призводить до коливань у магнітному полі, які можуть викликати зміни в усіх частинах магнітосфери.

Взаємодія між іоносферою і магнітосферою не лише впливає на електричні та магнітні поля, а й має важливе значення для глобальних комунікацій. Концентрація електронів в іоносфері впливає на проходження радіохвиль, що

може призводити до змін у якості сигналів, які передаються через атмосферу. Це особливо актуально для навігаційних систем і систем зв'язку, оскільки збурення в іоносфері можуть викликати втрату сигналів і неточності у вимірюваннях.

Будь-які просторові зміни магнітного поля пов'язані з наявністю струмів. Коли сонячний вітер обтікає магнітосферу Землі, він створює різницю потенціалів між її ранковим і вечірнім краями, які пов'язані з відповідними краями полярної шапки через силові лінії. Це призводить до утворення поздовжніх струмів, які з'єднують краї полярної шапки з магнітосферою, причому вранці струми входять в іоносферу, а ввечері виходять з неї. Ці струми вносять заряди в полярну шапку, утворюючи в ній рівномірне електричне поле, яке має протилежний знак по відношенню до полюсів магнітного поля. Зміна знаку електричного поля свідчить про те, що саме тут потенціал є екстремальним, і тут розташовані основні джерела електричного поля. Далі, у напрямку до середніх широт, потенціал швидко знижується до нуля.

Таким чином, іоносфера та магнітосфера постійно взаємодіють, створюючи складну мережу процесів, що впливають на космічну погоду і технологічні системи на Землі. Розуміння цих взаємозв'язків допомагає краще передбачати і управляти наслідками космічної погоди, що є критично важливим для забезпечення надійності комунікацій і навігаційних технологій.

1.5 Будова іоносфери.

Нейтральна атмосфера Землі — це частина атмосфери, яка складається з молекул і атомів, що не мають електричного заряду. Вона охоплює більшу частину атмосфери, яка знаходиться нижче іоносфери і є основною частиною, що забезпечує умови для життя на Землі [24].

Нейтральна атмосфера Землі охоплює різні висотні області, кожна з яких має свої особливості та функції. Основні висотні області нейтральної атмосфери включають тропосферу, стратосферу, мезосферу і термосферу.

Тропосфера є найнижчим шаром атмосфери і простягається від поверхні Землі до висоти приблизно 5-10 км, залежно від географічного положення (вища в тропіках і нижча на полюсах). У тропосфері відбуваються всі основні метеорологічні процеси, такі як утворення хмар, опади і вітри. Це також область, де спостерігається більшість повітряних мас та погодних явищ. Температура в тропосфері зазвичай знижується з висотою, і цей шар є домом для основної частини водяної пари в атмосфері.

Стратосфера розташована вище тропосфери, приблизно від 10 км до 50 км над поверхнею Землі. Вона характеризується зростанням температури з висотою, що пояснюється присутністю озонового шару, який поглинає ультрафіолетове випромінювання Сонця і нагріває атмосферу. Озоновий шар є важливим для захисту життя на Землі від шкідливого ультрафіолетового випромінювання. В стратосфері також спостерігаються стійкі повітряні маси та відсутність значної турбулентності.

Мезосфера розташована від 50 км до приблизно 85 км над поверхнею Землі. В цьому шарі температура знову зменшується з висотою і досягає найнижчих значень в атмосфері. Мезосфера є зоною, де більшість метеорних частинок згорають, створюючи метеорні сліди. Цей шар менш стабільний порівняно зі стратосферою і має значну турбулентність.

Термосфера простягається від 85 км до приблизно 500 км над поверхнею Землі. У цьому шарі температура різко підвищується з висотою, досягаючи тисяч градусів Цельсія, через поглинання ультрафіолетового і рентгенівського випромінювання Сонця. Термосфера є зоною розташування іоносфери, де відбувається іонізація частин атмосфери. Це також зона, де спостерігаються

полярні сійва. Вона має дуже низьку щільність газу, але висока температура робить молекули дуже енергійними.

Екзосфера є зовнішньою частиною атмосфери, яка починається приблизно з 400-800 км і розтягується до декількох тисяч кілометрів над поверхнею Землі. Це область, де атмосфера поступово переходить у космічний простір. Щільність газів тут дуже низька, і молекули можуть легко покинути атмосферу, перетворюючись на частинки, що рухаються в космосі. У екзосфері спостерігаються траєкторії супутників і космічних апаратів.

Нейтральна атмосфера взаємодіє з іоносферою, яка розташована вище, через різні фізичні процеси. Наприклад, іонізація в іоносфері може впливати на температуру і щільність нейтральних газів в термосфері.

Іоносфера ділиться на кілька шарів, які відрізняються за щільністю іонів та електронів, а також за властивостями, що визначають їх взаємодію з електромагнітними хвилями.

- D-шар: висота приблизно 60-90 км над поверхнею Землі. Це найнижчий шар іоносфери, де концентрація іонів та електронів є відносно невеликою. Він зазвичай зникає вночі, коли сонячне випромінювання не досягає цієї висоти.
- E-шар: висота приблизно 90-150 км. E-шар має вищу концентрацію іонів та електронів порівняно з D-шаром. Цей шар також зазнає змін у залежності від сонячної активності та часу доби.
- F-шар: висота від 150 до 1 000 км і більше. F-шар ділиться на F1 і F2, з яких F2 є найвищим і найінтенсивнішим. Це найбільш іонізований і активний шар іоносфери, що має суттєвий вплив на радіохвилі і комунікації.

Іоносфера формується внаслідок іонізації газів атмосфери під впливом сонячного випромінювання. Ультрафіолетові (УФ) та рентгенівські промені від Сонця розщеплюють молекули газів, таких як кисень і азот, на іони та

вільні електрони. Концентрація іонів та електронів в іоносфері змінюється в залежності від рівня сонячної активності, часу доби та пори року.

Іоносфера зазнає змін протягом доби та року. Вдень, під впливом прямого сонячного випромінювання, концентрація іонів і електронів зростає, тоді як вночі вона зменшується. Сезонні варіації також пов'язані з нахилом осі Землі та змінами в інтенсивності сонячного випромінювання.

Іоносферна буря - це явище, яке відзначається значними збуреннями в іоносфері Землі, викликаними підвищеною сонячною активністю. Основною причиною таких бур є взаємодія сонячного вітру з магнітосферою нашої планети. Коли сонячний вітер досягає Землі, він може спричиняти магнітні бурі, які, в свою чергу, призводять до збурення параметрів іоносфери. Ці явища можуть тривати від кількох годин до кількох днів і зазвичай слідують за основною фазою магнітної бурі.

Іоносферні бурі діляться на два основних типи:

1. Позитивні бурі характеризуються збільшенням щільності електронів в іоносфері, що призводить до посилення відбиття радіохвиль. Це може покращити якість радіозв'язку на деяких частотах, але водночас викликати значні спотворення і відбиття на інших частотах.
2. Негативні бурі, навпаки, супроводжуються зменшенням щільності електронів, що ослаблює відбиття радіохвиль і призводить до погіршення якості радіозв'язку. Цей тип бурі може повністю блокувати радіосигнали, особливо на високих частотах.

Магнітні бурі мають суттєвий вплив на стан іоносфери, змінюючи її структуру та властивості. Ці зміни можуть істотно вплинути на радіозв'язок, навігаційні системи та інші технологічні процеси, що залежать від іоносфери. Розуміння цих процесів та здатність прогнозувати зміни в іоносфері є

критично важливими для зменшення негативних наслідків магнітних бур на сучасне суспільство.

1.6 Повний електронний вміст як параметр для характеристики стану іоносфери.

Одним з основних параметрів, що визначають стан іоносфери, є повний електронний вміст (ПЕВ). ПЕВ – це міра кількості електронів, що знаходяться на трасі передатчик-приймач. ПЕВ є інтегральним параметром, адже є мірою загальної кількості електронів на трасі передатчик-приймач, і не враховує тонкої структури іоносфери, проте знання про розподіл ПЕВ земною кулею може надати інформацію про різні процеси, що відбуваються в іоносфері – про підвищення чи зменшення рівня іонізації в на різних широтах, про збуреність іоносфери в тому чи іншому регіоні (через обчислення коефіцієнту збуреності, який чисельно дорівнює відсотковому приросту ПЕВ за одиницю часу в тій чи іншій області), про перелаштування струмової системи Землі.

Варіації ПЕВ в іоносфері відбуваються разом зі зміною екстремального ультрафіолетового випромінювання Сонця, в результаті процесів, що супроводжують геомагнітні бурі та атмосферними хвилями, які поширюються вгору з нижніх шарів атмосфери. Тому ПЕВ залежить від місцевого часу, широти, довготи, сезону, геомагнітних умов, сонячного циклу та активності, а також умов тропосфери.

На поширення радіохвиль іоносфера може впливати наступним чином. Швидкість радіохвиль змінюється, коли сигнал проходить через електрони в іоносфері. Загальна затримка радіохвилі, що поширюється через іоносферу, залежить як від частоти радіохвилі, так і від ПЕВ між передавачем і приймачем. На деяких частотах радіохвилі проходять через іоносферу. На інших частотах хвилі відбиваються іоносферою.

Зміна шляху та швидкості радіохвиль в іоносфері має великий вплив на точність супутникових навігаційних систем, таких як GPS/GNSS. Нехтування

змінами в ПЕВ іоносфери може внести десятки метрів похибки в обчислення позиції. Глобальна система позиціонування (GPS), американська частина GNSS, використовує емпіричну модель іоносфери, модель Клобучара, щоб обчислити та видалити частину помилки позиціонування, спричиненої іоносферою, коли використовуються одночастотні GPS-приймачі. Коли умови відрізняються від передбачених моделлю Клобучара, системи GPS/GNSS матимуть більші похибки позиціонування [25].

1.7 Способи вимірювання ПЕВ

Основним методом вимірювання ПЕВ є метод трансіоносферного зондирования. Метод трансіоносферного зондирования полягає у взаємодії супутникових систем навігації та наземних приймальних станцій GNSS. Суть методу полягає в наступному: супутник посилає зашифроване навігаційне повідомлення приймальній станції, яка в даний момент знаходиться в межах його радіовидимості. Сигнал, проходячи через іоносферу та різні шари атмосфери, доходить до поверхні Землі з певною затримкою, яка виражається формулою:

$$TEC = 40.3 \frac{N_L}{f^2} \quad (1)$$

$$[TEC] = \text{TECU}: 1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ electrons/m}^2$$

де N_L – ПЕВ на похилій траєкторії супутник – приймач, м^{-2} , а f – несущая частота, Гц.

Ця формула є залежністю для одночастотних вимірювань. В більшості випадків для підвищення точності вимірювань застосовується двочастотний метод, тобто навігаційне повідомлення надсилається приймальній станції одразу на двох різних частотах.

Вимірювання повного електронного змісту можливе двома методами: по фазі та по коду. З урахуванням того, що в нашому випадку використовувався

двочастотний метод вимірювання, ПЕВ по фазі та по коду будуть виражатися, відповідно, формулами:

$$N_V = \frac{\lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2 - \overline{\delta\alpha}}{40.35(f_2^{-2} - f_1^{-2})} \cos \psi, \quad (2)$$

$$N_V^p = \frac{P_2 - P_1 + c(DCB^R + DCB^T)}{40.35(f_2^{-2} - f_1^{-2})} \cos \psi, \quad (3)$$

де N_V^p - вертикальне ТЕК для вимірювань по коду, N_V - вертикальний ТЕК для вимірювань по фазі; f, f_1, f_2 - базові частоти; P_1, P_2 - псевдовідстані (код); L_1, L_2 - псевдовідстані (фаза); DCB^R, DCB^T - Диференційні кодові зсуви для приймача та передавача; $\overline{\delta\alpha}$ - корекція фазового зсуву; ψ - кут підйому (кут між напрямками супутник – приймач і нормаллю до F2-сфери в точці вимірювання, див. Рис. 2); c – швидкість світла.

Нижче приведена пояснювальна схема проведення вимірювання ПЕВ методом трансіоносферного зондування:

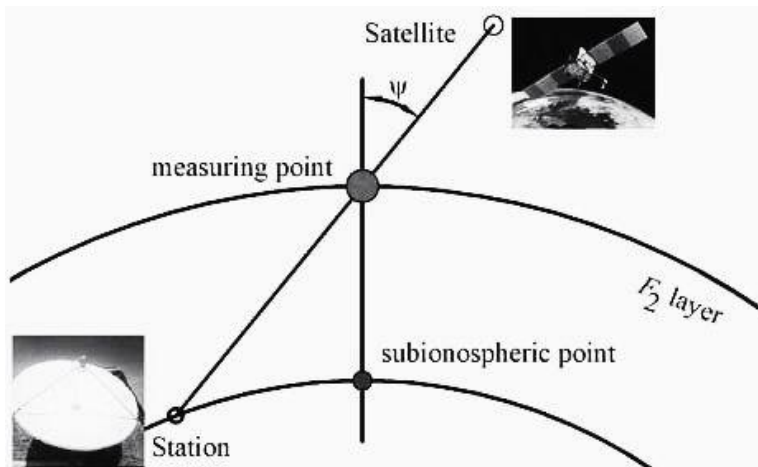


Рис. 1.6.1: Схема проведення вимірювання ПЕЗ методом трансіоносферного зондирования.

1.8 Глобальні іоносферні мапи

За допомогою обширної системи прийомних GNSS-станцій є можливим створення так званих глобальних іоносферних мап (global ionospheric map, GIM). Нижче приведена мапа розташування прийомних станцій по всій земній кулі.

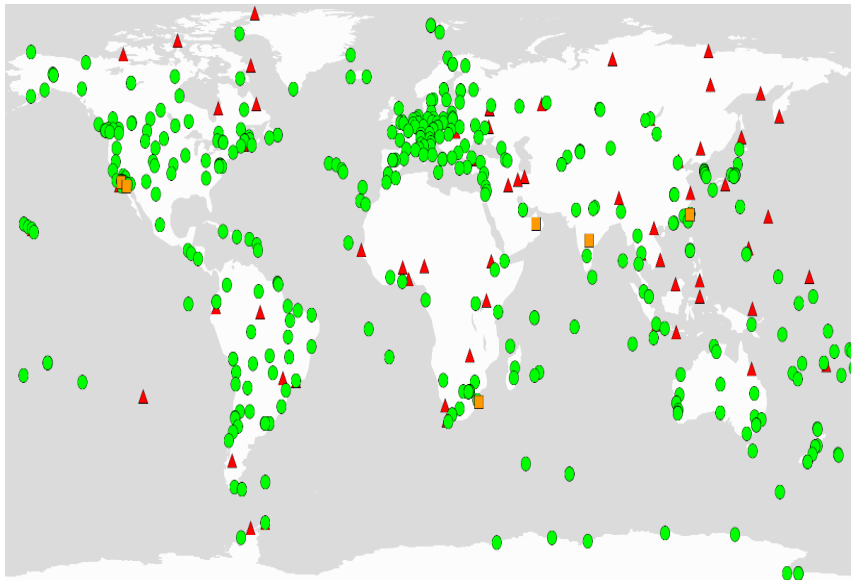


Рис. 1.6.2: Розташування приймальних станцій GNSS по світу [IGS service].

Глобальні іоносферні мапи представляють з себе результат триангуляції з подальшою інтерполяцією вимірювань ПЕВ мережею прийомних станцій GNSS з застосуванням результатів моделювання стану іоносфери. Це дозволяє візуалізовувати розподіл ПЕВ навколо земного шару та створювати погодинні знімки або анімації цього розподілу, що дозволяє аналізувати процеси, що відбуваються в іоносфері, в динаміці.

Місій та установ, які займаються складанням глобальних іоносферних карт, досить багато, однак у цій роботі були використані глобальні іоносферні карти, що містяться в відкритому доступі на сайтах. Center for Orbit Determination in Europe [26] і The Crustal Dynamic Data Information System [27] представлено Technical University of Catalonia [28] з роздільною здатністю 15 хвилин, а дані з CODE — з роздільною здатністю одну годину.

Крім звичайних іоносферних мап в роботі запропоновано до аналізу мапи скалярних прирощень ПЕВ, що представляють з себе різниці значень ПЕВ між двома послідовними моментами часу для кожної комірки глобальної іоносферної мапи:

$$dTEC = TEC(t_2) - TEC(t_1) \quad (4)$$

та мапи відсоткових прирощень значень ПЕВ, які можна інтерпретувати як коефіцієнт збурення іоносфери:

$$VTEC_{vpd} = \frac{VTEC - VTEC_{average}}{VTEC_{average}} \cdot 100\% \quad (5),$$

де $VTEC$ – значення ПЕВ в певній елементарній комірці глобальної іоносферної мапи, $VTEC_{average}$ – середнє значення ПЕВ за певний магнітоспокійний проміжок часу (в нашому випадку це попередні 30 днів до 3 листопада 2023).

1.9 Висновок до розділу

Взаємодія між Сонцем, іоносферою та магнітосферою є критично важливою для розуміння геокоsmічного середовища Землі, адже ці процеси впливають не лише на природні явища, а й на технологічні системи, які забезпечують сучасне життя. Сонце, як основне джерело енергії, постачає електромагнітне та корпускулярне випромінювання, яке запускає процеси іонізації в іоносфері. Ця іонізована область атмосфери не лише впливає на радіохвилі, а й формує умови для виникнення таких явищ, як полярні сяйва та магнітні бурі.

Важливим показником стану іоносфери є повний електронний вміст (ПЕВ), який допомагає оцінити щільність електронів у іоносфері та її змінність в залежності від сонячної активності, геомагнітних умов та інших факторів. Знання про ПЕВ дозволяє розуміти та прогнозувати вплив іоносфери на радіозв'язок і навігаційні системи, що має велике значення для безпеки авіаційних, морських та космічних перевезень.

Глобальні іоносферні мапи, що створюються за допомогою мереж GNSS-станцій, надають можливість візуалізувати розподіл ПЕВ в реальному часі. Це дозволяє вченим і фахівцям отримувати цінну інформацію про процеси, що відбуваються в іоносфері, та оцінювати їхній вплив на Землю. Використання таких мап у дослідженнях допомагає виявити закономірності в змінах іоносферних умов, а також спостерігати за їхніми варіаціями під час сонячних спалахів та геомагнітних бурь.

Сучасні технології та моделі, такі як модель Клобучара, допомагають мінімізувати вплив іоносферних збурень на системи позиціонування GPS/GNSS. Однак, з огляду на постійні зміни в сонячній активності та природних умовах, важливо продовжувати дослідження цих взаємозв'язків.

Таким чином, розуміння процесів, що відбуваються в іоносфері, є важливим не лише для наукової спільноти, а й для широкого спектра галузей, включаючи телекомунікації, навігацію, метеорологію та навіть екологію. Впровадження нових методів моніторингу та прогнозування космічної погоди допоможе зменшити ризики, пов'язані з негативними наслідками, і сприятиме більш стійкому розвитку технологій у нашому повсякденному житті.

РОЗДІЛ 2. ЕФЕКТИ ГЕОКОСМІЧНОЇ БУРІ 5 ЛИСТОПАДА 2023

2.1 Стан космічної погоди.

На Рис. 2.1. представлені графіки різних параметрів, що характеризують стан космічної погоди в період з 2 по 8 листопада 2023 року:

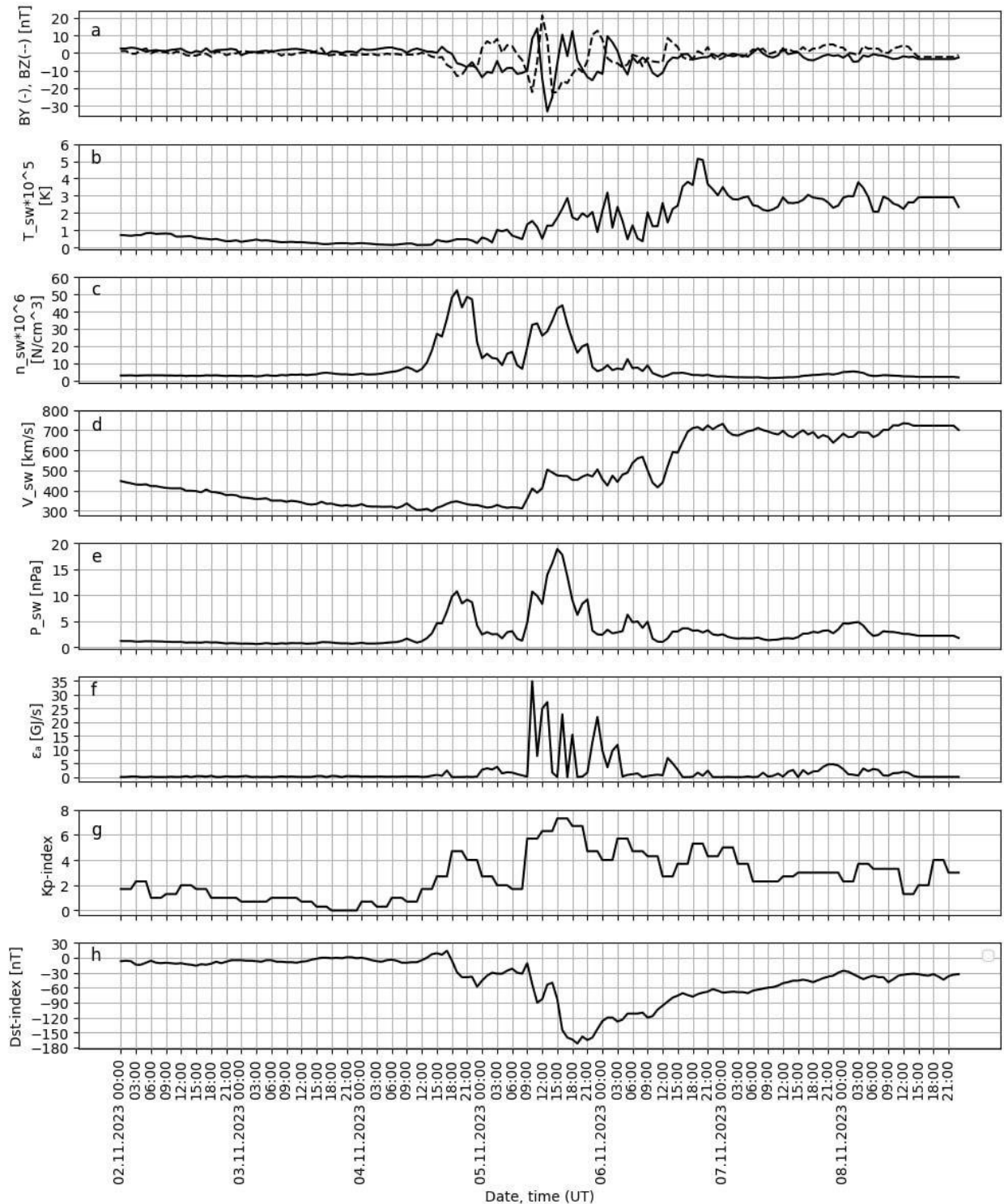


Рис. 2.1: Стан космічної погоди в період з 2 листопада 2023 р. по 8 листопада 2023 р. : B_Y , B_Z – азимутальна та вертикальні складові міжпланетного

магнітного поля; T_{sw} – температура частинок сонячного вітру; n_{sw} – концентрація частинок сонячного вітру; V_{sw} – швидкість частинок сонячного вітру; P_{sw} – динамічний тиск частинок сонячного вітру; ϵ_a – величина параметра Акасофу; Кр-індекс; Dst-індекс.

До середини доби 4 листопада концентрація часток сонячного вітру не перевищувала $5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. У другій половині доби 4 та 5 листопада це число зросло до 50 і $42 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ відповідно.

Швидкість часток сонячного вітру 4 листопада флукутувала біля 400 км/с. Після 8:00 UT вона почала зростати, досягнувши 735 км/с, і це тривало до кінця доби 8 листопада.

Температура часток сонячного вітру до початку доби 5 листопада становила близько 10^5 К . З 5 по 8 листопада вона сильно флукутувала, збільшуючись до $3 \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ К}$, з максимальним значенням 6 листопада – $5.1 \cdot 10^6 \text{ К}$.

Розрахункові значення тиску сонячного вітру в спокійних умовах становили приблизно 1 нПа. Поряд із зростанням концентрації часток сонячного вітру тиск зріс до 11 і 16 нПа 4 і 5 листопада відповідно. З 6 по 8 листопада значення не перевищували 5 нПа.

З 2 по початок доби 4 листопада значення проекції міжпланетного магнітного поля не перевищували одиницю нТл. Найбільші їх варіації спостерігалися 5 листопада – B_y - -31,8 нТл, B_z - -23,5 нТл.

Значення параметра Акасофу в спокійних умовах флукутували біля 1 ГДж/с, а 4 і 5 листопада максимумами становили 3 і 23 ГДж/с відповідно.

До другої половини доби 4 листопада значення Кр-індексу не перевищували 2,2. О 18:00 (далі UT) цього дня значення індексу досягло 5. Після цього відбулося зменшення значень до 09:00 5 листопада з наступним підвищенням до максимуму в 15:00 до 7,5 одиниць. Далі до 06:00 7 листопада значення індексу коливались навколо 4,5, після чого почали знижуватися до значень 3-4 одиниць 8 листопада.

До першої половини доби 4 листопада значення Dst-індексу флукутували в межах $\pm(11-15) \text{ нТл}$. Після незначного збільшення (до 14 нТл) з 12:00 до 16:00 4 листопада спостерігалось різке падіння величини Dst-індексу до -62 нТл.

Після значних флуктуацій з 14:00 до 16:00 спостерігалися різкі і більш значні зниження величини індексу – від -50 нТл до -172 нТл. Після 22:00 5 листопада розпочалася фаза відновлення, яка тривала до 8 листопада.

2.2 Аналіз глобальних іоносферних мап

На Рис. 2.2 – 2.5 будуть представлені глобальні іоносферні карти для проміжку часу з 00:00 3 листопада 2023 року по 00:00 7 листопада 2023 року. Максимальне значення ПЕВ становить 141 TECU і спостерігалося о 02:00 3 листопада 2023 року. Вдень значення ПЕВ знижуються, а потім підвищуються в нічний і вечірній час до значення 125-134 TECU.

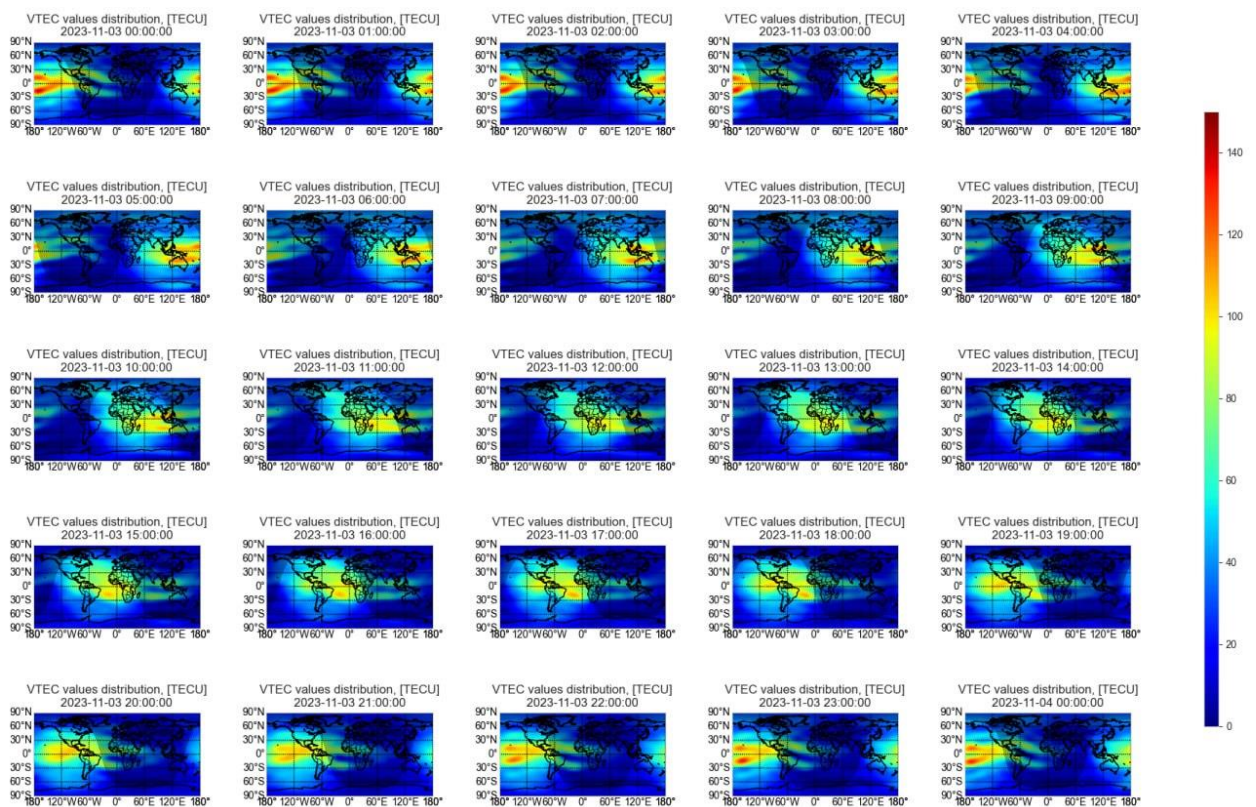


Рис. 2.2.1: Динаміка ПЕВ з 00:00 3 листопада по 00:00 4 листопада 2023 року (фоновий день).

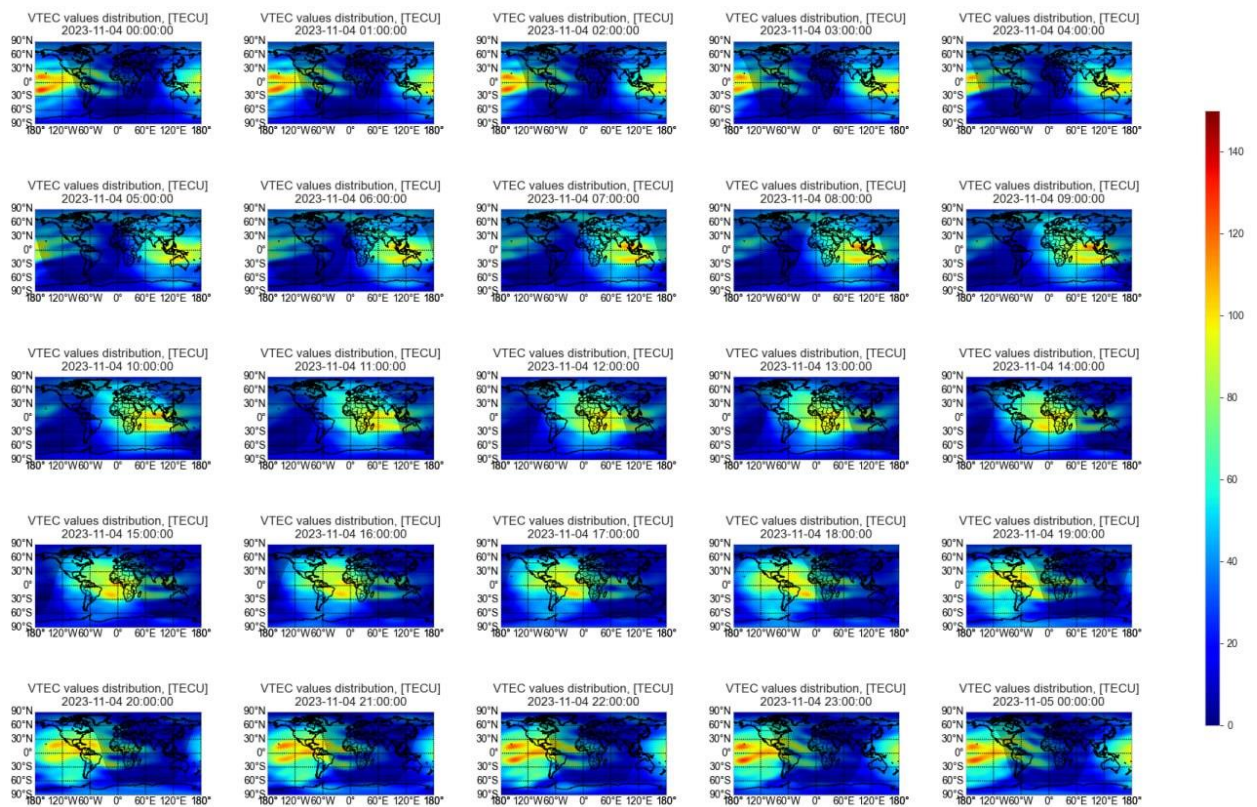


Рис. 2.2.2: Динаміка ПЕВ з 00:00 4 листопада по 00:00 5 листопада 2023 року.

4 листопада, під час початку магнітної бурі, максимальне значення ПЕВ склало 132,8 TECU, що на 6% менше, ніж за попередній день, і спостерігалось о 23:00. Знову спостерігається тенденція до зменшення значень ПЕВ вдень і їх збільшення ввечері та вночі.

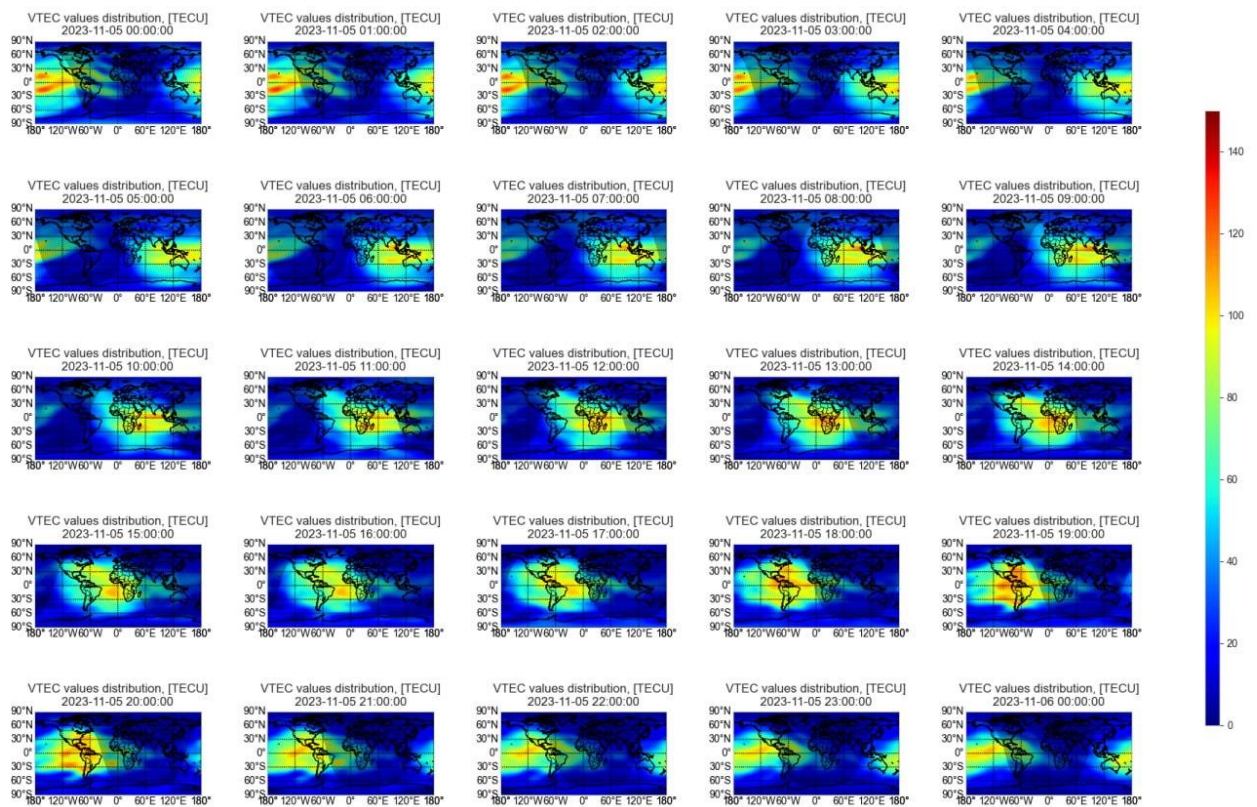


Рис. 2.2.3 Динаміка ПЕВ з 00:00 5 листопада по 00:00 6 листопада 2023 року.

5 листопада максимальне значення ПЕВ склало 130,8 TECU, що на 7% менше, ніж 3 листопада, і спостерігалось о 02:00. В решту часу 5 листопада значення повного електронного вмісту не перевищували 100-110 TECU.

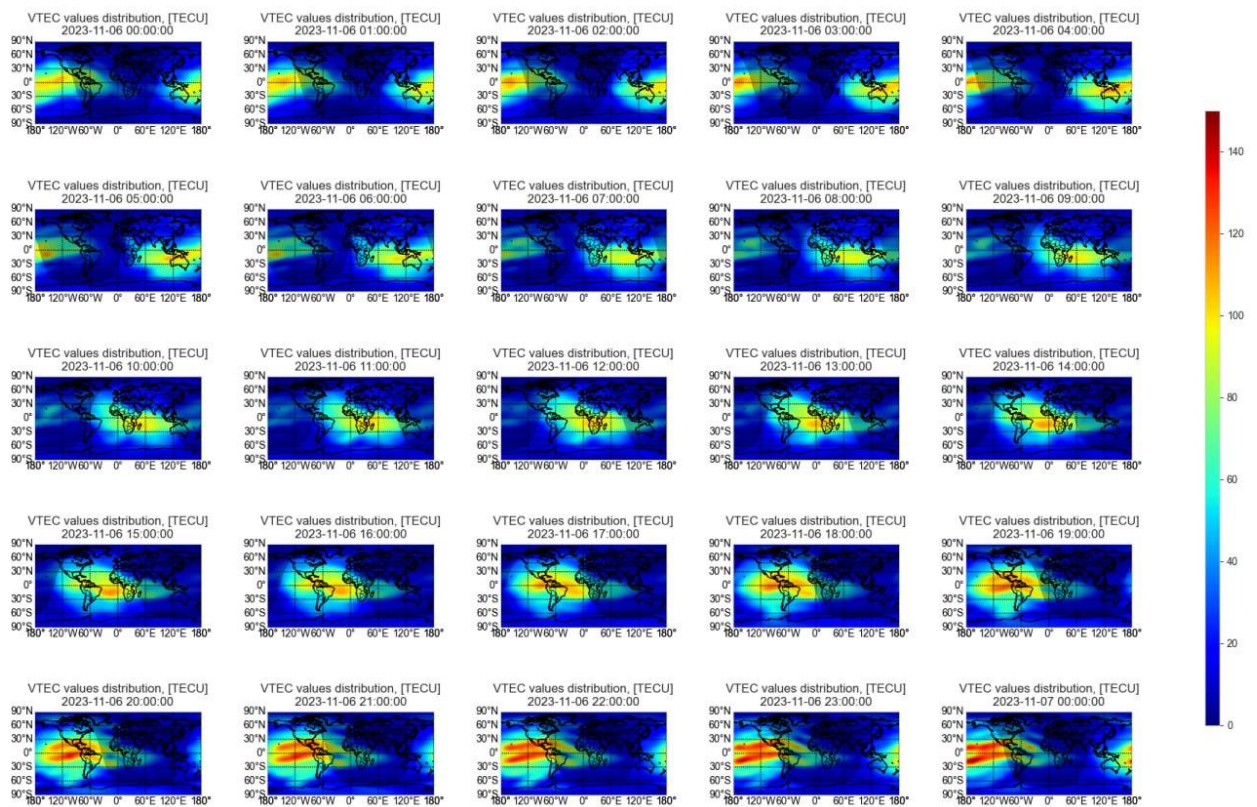


Рис. 2.2.4: Динаміка ПЕВ з 00:00 6 листопада по 00:00 7 листопада 2023 року.

6 листопада ввечері в період з 23:00 по 24:00 максимальні значення ПЕВ досягли 149,9 TECU, що на 13% більше, ніж у фоновий день 3 листопада. Спостерігається тенденція до збільшення значень повного електронного вмісту вдень до півночі, починаючи з 09:00.

2.3 Аналіз мап відсоткових приростів повного електронного вмісту

Далі на Рис. 2.6-2.9 представлені прирости ПЕВ у відсотках відносно медіанних значень ПЕВ для осередків GIM за попередні 30 днів.

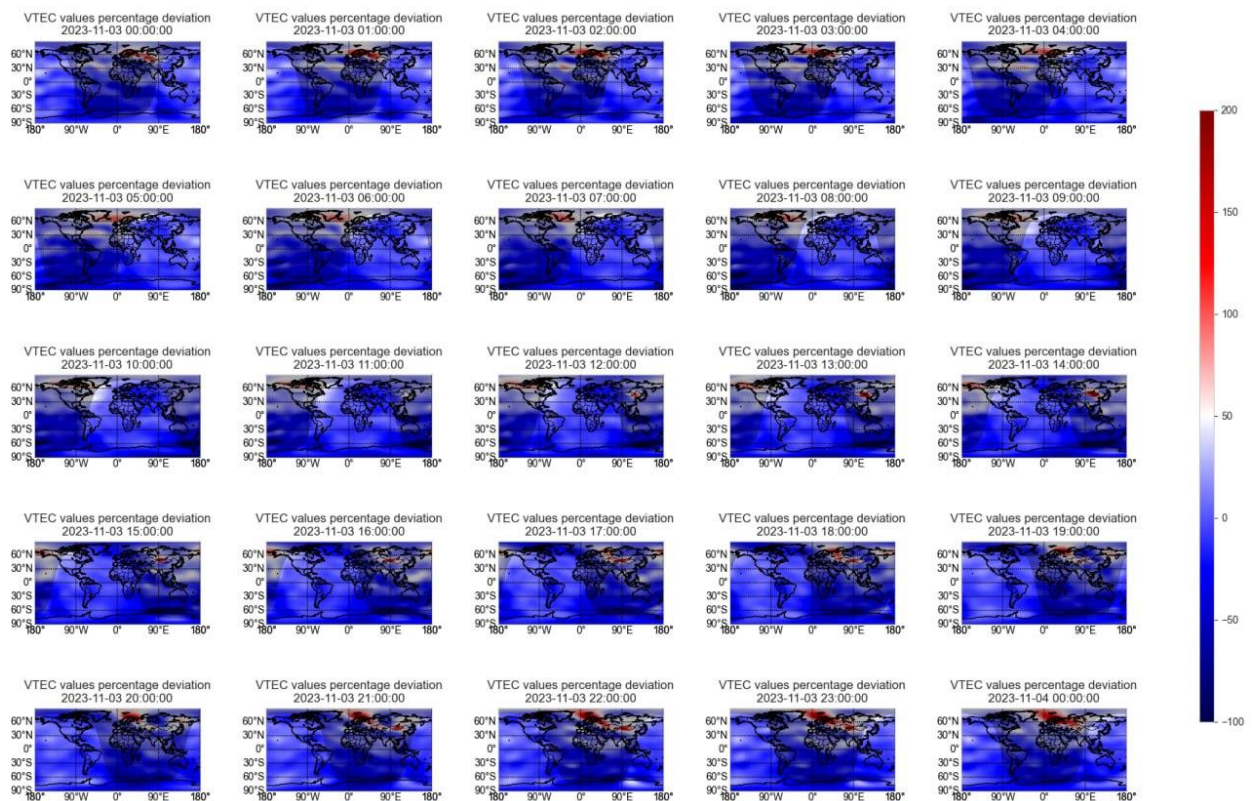


Рис. 2.3.1: Відсоткові відхилення мап ТЕС за період з 00:00 3 листопада 2023 року до 00:00 4 листопада 2023 року.

Для магнітоспокійного, фонового дня 3 листопада 2023 року були характерні такі показники: процентні прирости ПЕВ відносно медіанних значень за попередні тридцять днів не перевищували 100% для європейського та середньоазійського секторів.

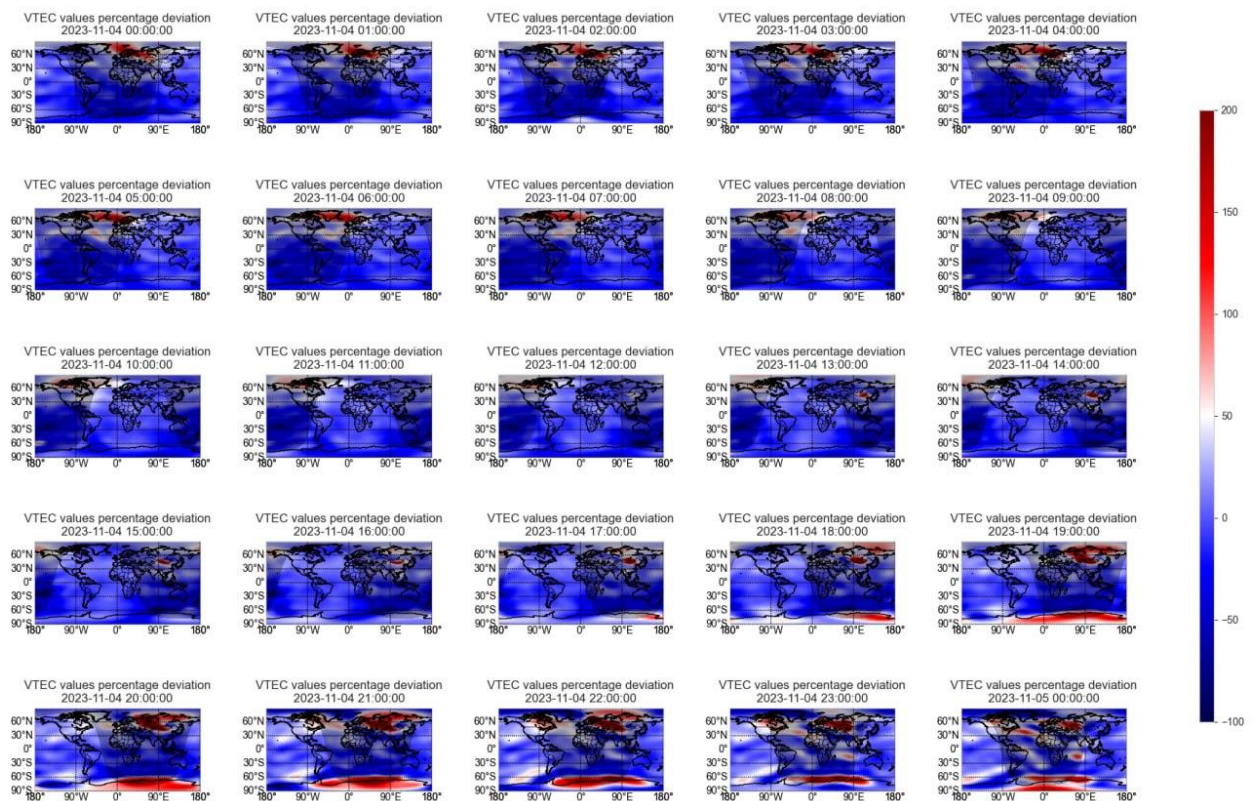


Рис. 2.3.2: Відсоткові відхилення мап ТЕС за період з 00:00 4 листопада 2023 року до 00:00 5 листопада 2023 року.

У перший день бурі, 4 листопада 2023 року, до моменту настання SSC1 о 18:00 UT значення процентних приростів не перевищували 70% для європейського та північноатлантичного регіону. Після 18:00 спостерігався значний ріст приростів ПЕВ для східноазійського та північно-східного регіонів Азії, а також Антарктики в межах широт від 90°S до 60°S і в межах довгот від 90°W до 180°E о 19:00. З 19:00 до 24:00 порушення в південній півкулі залишалися, мовби, замороженими в високоширотному регіоні, тоді як порушення в північній півкулі переміщалися з сходу на захід, з подальшим поділом на групу більш дрібномасштабних порушень.

Пікові значення процентних приростів ПЕВ спостерігалися для проміжку часу з 18:00 до 23:00 для Антарктики та для східноазійського, середньоазійського і європейського регіонів з піковими значеннями в 180% о 22:00 для Антарктики.

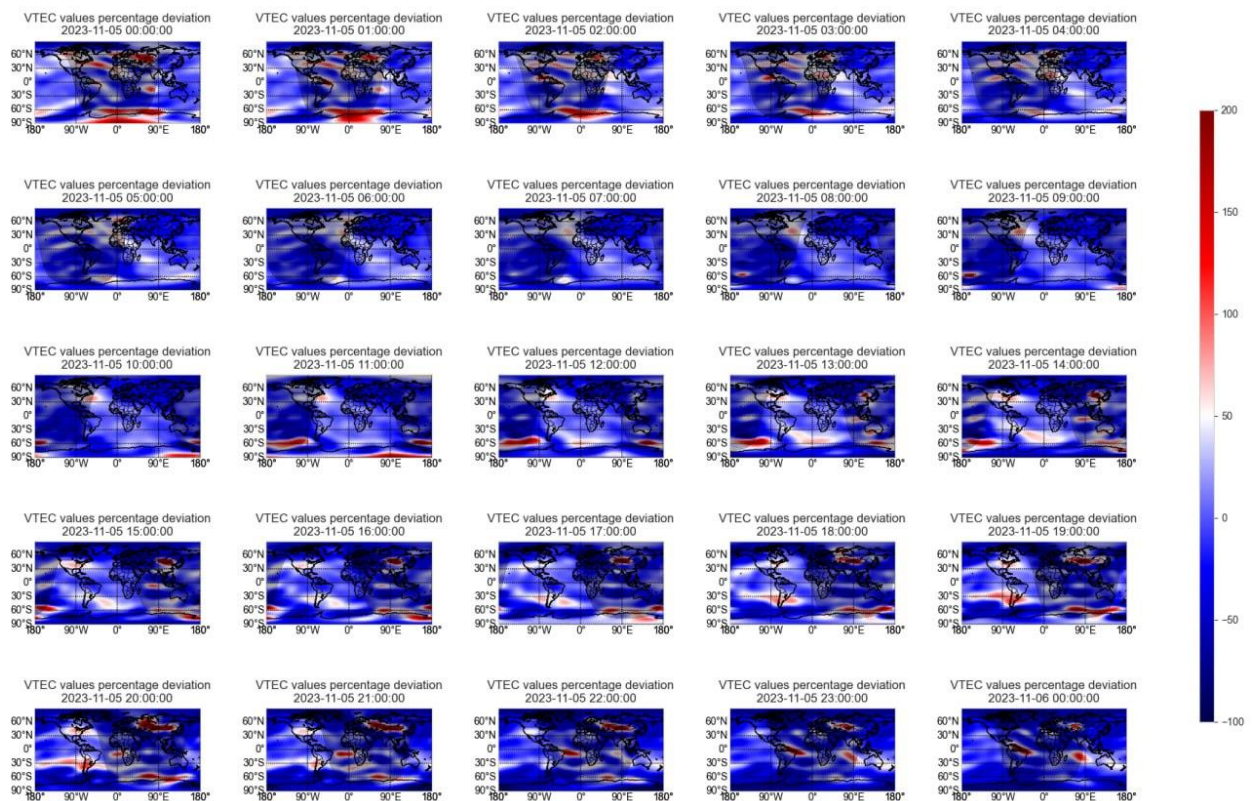


Рис. 2.3.3: Відсоткові відхилення мап ТЕС за період з 00:00 5 листопада 2023 року до 00:00 6 листопада 2023 року.

5 листопада 2023 року до 03:00 UT спостерігалися сильні порушення зі значеннями процентних приростів ПЕВ близько 140% для європейського, північноамериканського регіону та Антарктики в межах широт 90°S - 60°S і в інтервалі довгот 90°W - 90°E . У період з 04:00 до 10:00 спостерігалися незначні прирости ПЕВ на різних широтах, після чого о 10:00 активізувалися порушення в південній півкулі. Потім о 13:00 також виникають порушення в північній півкулі. Значення процентних приростів не перевищували 150%.

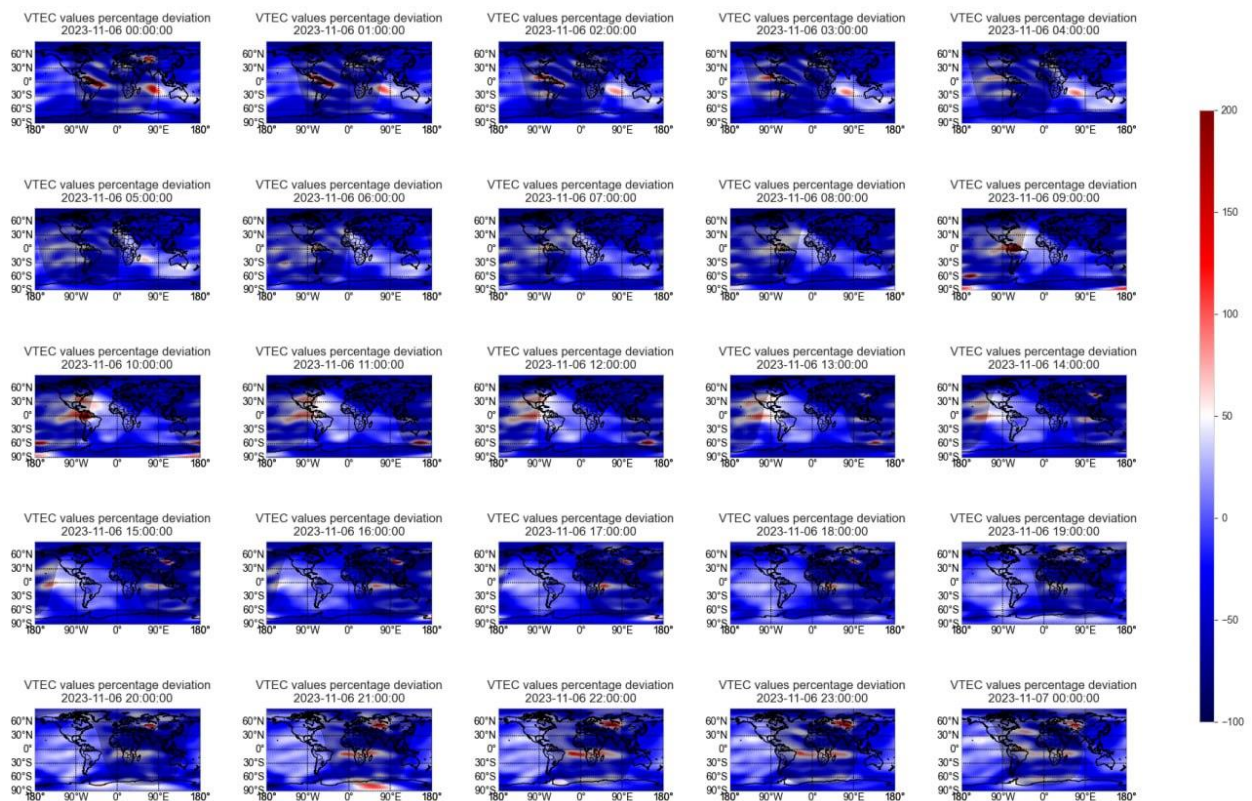


Рис. 2.3.4: Відсоткові відхилення мап ТЕС за період з 00:00 6 листопада 2023 року до 00:00 7 листопада 2023 року.

Для дня настання фази відновлення були характерні порушення на середніх та екваторіальних широтах, що не перевищували 80% у піку о 22:00 для екваторіальних широт.

2.4 Аналіз мап приростів ПЕВ

Далі на Рис. 2.10 – 2.13 представлені карти абсолютних приростів ПЕВ для осередків глобальних іоносферних карт, зображених на Рис. 4-7, для проміжку часу з 00:00 3 листопада 2023 року по 00:00 7 листопада 2023 року.

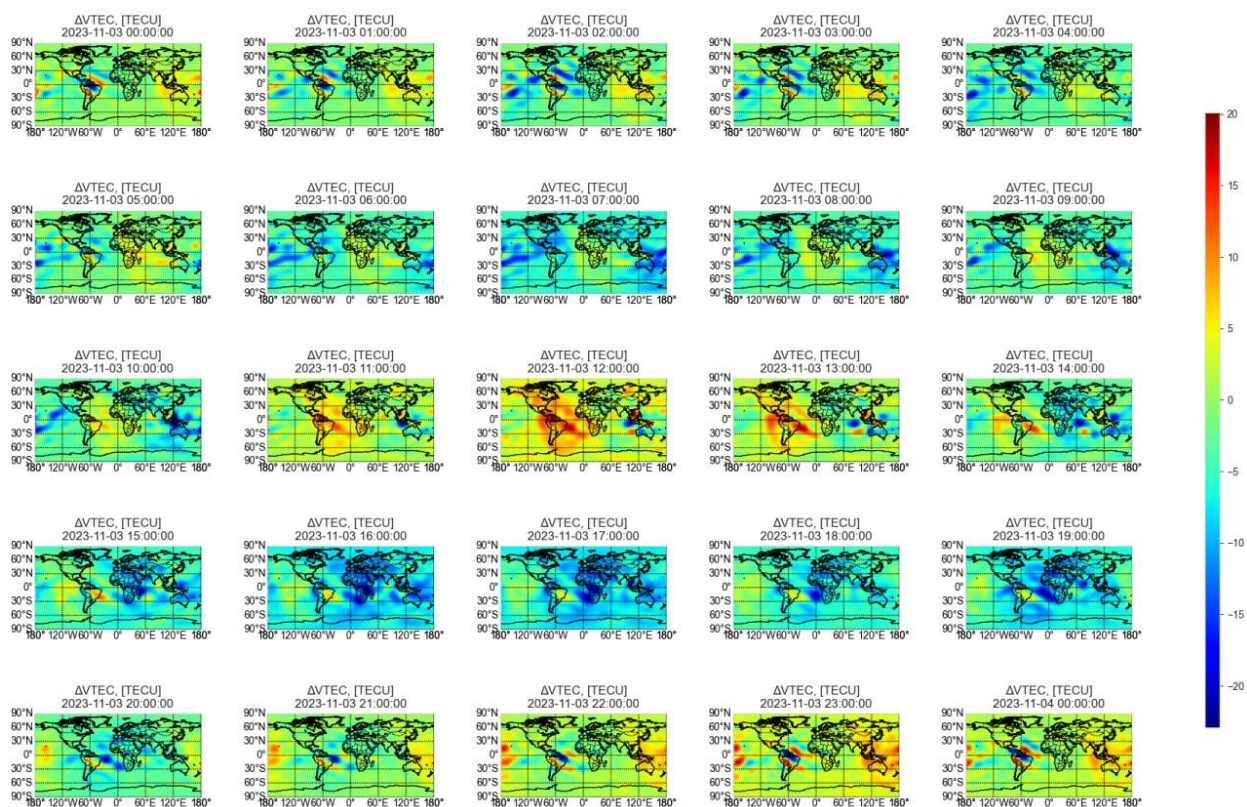


Рис. 2.4.1: Мапа відхилень за період з 00:00 3 листопада 2023 року до 00:00 4 листопада 2023 року.

На панелі для 3 листопада 2023 року можна побачити абсолютні різниці значень ПЕВ у порівнянні з попередніми моментами часу. Відзначається, що 3 листопада максимальні прирости спостерігалися в низьких і середніх широтах в середині доби. Максимальні та мінімальні значення різниць становлять відповідно -22,9 і 20,1 TECU.

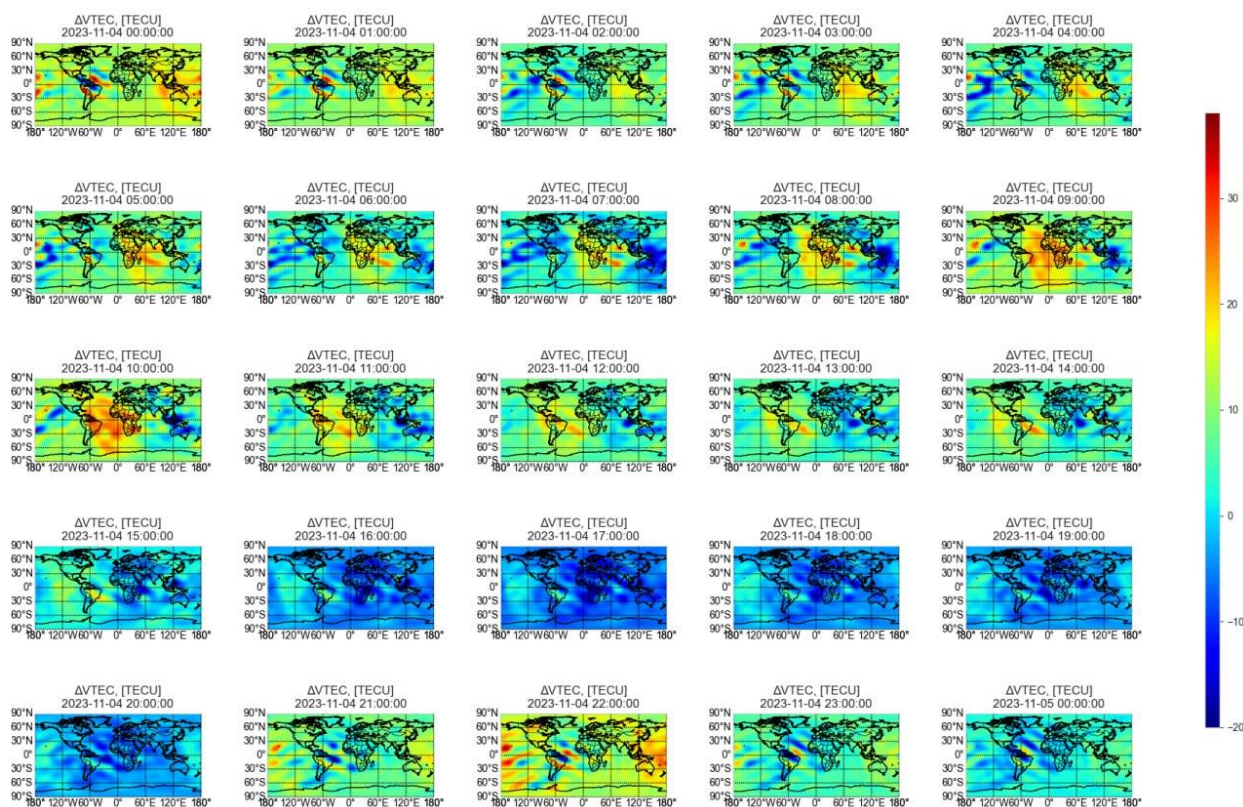


Рис. 2.4.2: Мапа відхилень за період з 00:00 4 листопада 2023 року до 00:00 5 листопада 2023 року.

4 листопада максимальні прирости ПЕВ спостерігалися в нічний час доби. Зменшення ПЕВ відбувалися з 16:00 до 20:00 UT на всіх широтах. Максимальні прирости відзначалися на низьких і середніх широтах. Максимальні та мінімальні значення різниць становили відповідно 38,1 і -20,0 TECU.

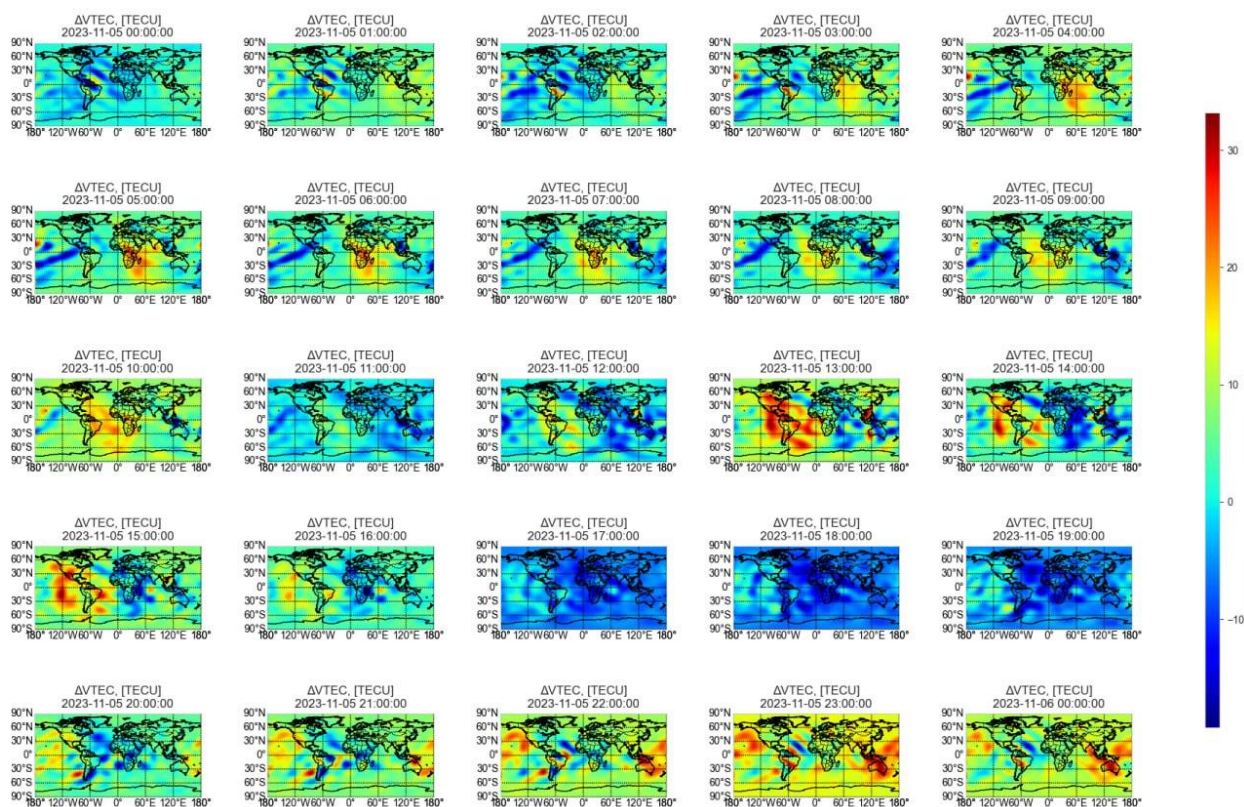


Рис. 2.4.3: Мапа відхилень за період з 00:00 5 листопада 2023 року до 00:00 6 листопада 2023 року.

5 листопада зберігалася тенденція до значного приросту значень ПЕВ вранці та ввечері, а також у період з 13:00 до 15:00. Максимальні та мінімальні значення приросту ПЕВ становили 33,2 TECU і -19,2 TECU. Зменшення значень ПЕВ спостерігалось в період з 17:00 до 19:00.

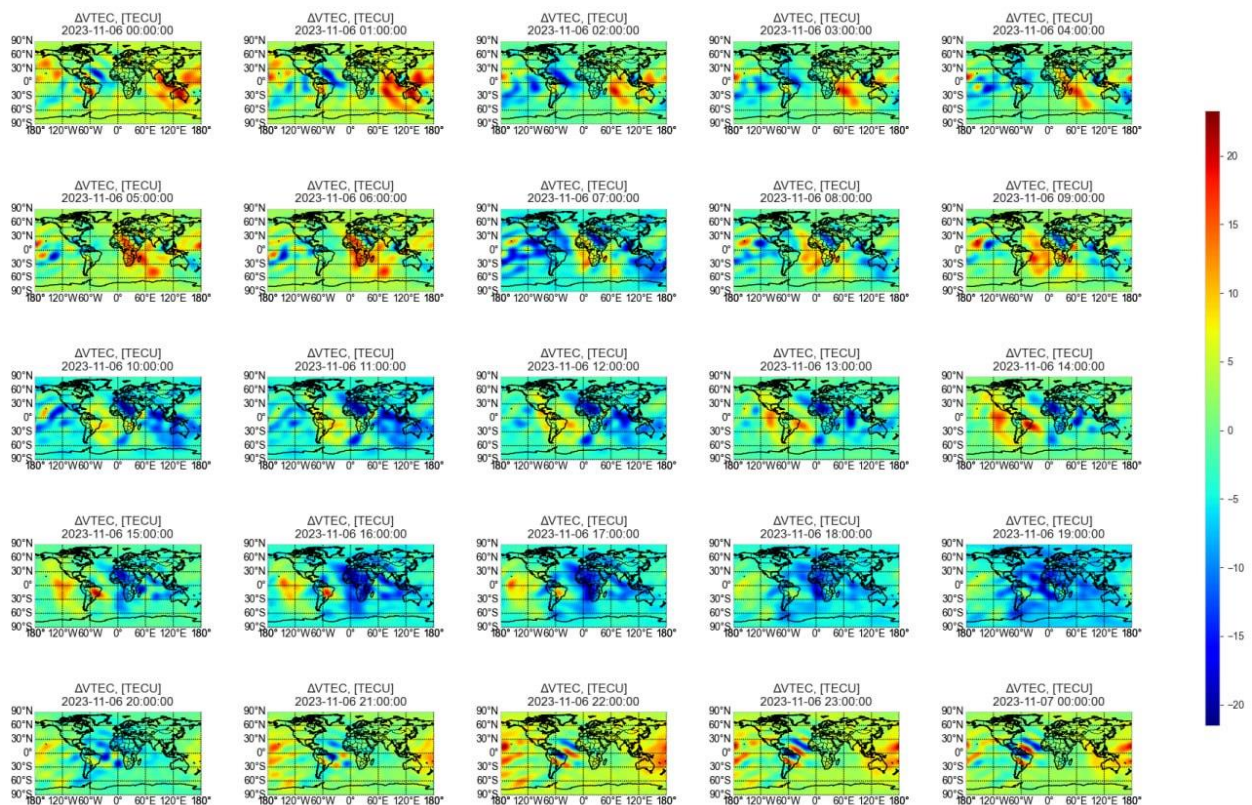


Рис. 2.4.4: Мапа відхилень за період з 00:00 6 листопада 2023 року до 00:00 7 листопада 2023 року.

6 листопада також спостерігалася тенденція до приросту значень ПЕВ в нічний та ранковий час, а також у період з 13:00 до 15:00. Зменшення відзначалося в період з 17:00 до 19:00. Максимальні та мінімальні значення приросту становили 23,3 TECU і -21,5 TECU.

2.5 Висновок до розділу

Виходячи з результатів, отриманих при аналізі глобальних іоносферних мап, мап відсоткових приростів повного електронного вмісту і мап приростів ПЕВ, можна сказати, що в цілому на Землі в період з 4 по 5 листопада 2023 року спостерігалася негативна іоносферна буря, про що свідчать зменшені максимальні значення ПЕВ під час основної фази геокозмичної бурі 4-5 листопада 2023 року. Основна активність спостерігалася в авроральних районах, що видно з карт процентних приростів ПЕВ. Порушення протягом

практично всього періоду спостережень залишалися, як би, зафіксованими в високоширотних областях.

Згідно графіку космічної погоди за 4 листопада, можна спостерігати зростання швидкості частинок сонячного вітру, а також збільшення їх кількості і температура, така поведінка характерна для геокоосмічних бурь.

ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд геокоосмічних бурь в системі CMCMIA3 та названо їх основні характеристики. Представлено схему взаємодії сонячного вітру з магнітосферою Землі.
2. Підготовлено стислий опис іоносферно-магнітосферних зв'язків. А також представлено опис будови іоносфери, типи іоносфери і стисла інформація про шари іоносфери.
3. Вивчені матеріали про повний електронний вміст, а також способи його вимірювання.
4. Представлений опис глобальних іоносферних мап.
5. Проведено аналіз цих мап для бурі, яка була 5 листопада 2023 року.
6. Проведено аналіз графіку космічної погоди для цієї бурі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Thomas D., Robert W., Antti P., Peter S., Daniel W., Chigomezoy N. What Drove the Carrington Event? An Analysis of Currents and Geospace Regions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, т. 129, №7, 2024.
2. Sahba E., Avner B., Sarah B., Andrea C., Guillem O., Sarah W., Qingchao X. A Future Carrington Event: Impact on International Telecommunications. 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020.
3. Craig R., Pekka V., Mark C., Annika S., Esa T. Atmospheric impact of the Carrington event solar protons. *Journal of Geophysical Research*, т. 113, 2008.
4. Liu J, Lou W, Zhang X, Shen X. A Comparison Study of f_oF_2 Derived from Oblique Sounding Network and Vertical Ionosonde in Northern China. *Terr. Atmos. Ocean. Sci*, т.27, №6, с.933–941, 2016.
5. Tereshchenko E, Cherniakov S, Yurik R, Rietveld M, Häggström I. Total Electron Content Measurements in the Ionosphere Disturbed by High-Power High-Frequency Waves by the Methods of Incoherent Scattering of Radio Waves and Radio Sounding by Glonass Satellite Signal. *Radiophysics and Quantum Electronics*, т. 62, с.667–676, 2020.
6. Hu G, Ma B, Chang H. The velocity distribution function and incoherent scattering spectra of ion in high-latitude ionosphere. *Fangzhi Gaoxiao Jichukexue Xuebao*, т. 26, с.397–402, 2013.
7. Li J, Sheng Z, Fan Z, Zhou S, Shi W. Data Analysis of Upper Atmosphere Temperature Detected by Sounding Rockets in China. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, т. 34, №3, с.555–565, 2017.
8. Wang C, Wang, L, Zhao H, Xiao P, Chen L, Cao L. Ionospheric Electron Density Reconstruction Based on Space-Borne SAR in Alaska Regions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, т. 21, с.1–5, 2024.
9. Zalizovski A, Koloskov O, Kashcheyev A, Kashcheyev S, Yampolsky Yu, Charkina O. Doppler vertical sounding of the ionosphere at the Akademik Vernadsky station. *Ukrainian Antarctic Journal*. №1, с.56–68, 2020.
10. Cooper C, Mitchell N, Wright J, Jackson R, Witvliet A. Measurement of ionospheric total electron content using single-frequency geostationary satellite observations. *Radio Science*, т. 54, с.10–19, 2019.

11. Thanapon K., Prasert K. The Study of Total Electron Content on Ionosphere by Using Single Frequency GPS Receiver. *Advances in Space Research*. 2024, 10.1016/j.asr.2024.08.019.
12. Sergey K., Irina S., Aliaksandr S. Processing of retransmitted GPS signals in the problem of measuring the total electron content in the ionosphere. *Informatics*, т. 20, с.21-36, 2023.
13. Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*, т. 44, №4, 44 pp., 2006.
14. Leonid C., Yuri M. Global Variations of the Total Electron Content in the Equatorial Ionosphere during the Annular Solar Eclipse of June 21, 2020. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, т. 39, с.181-203, 2023.
15. Chernogor L. Ionospheric total electron content variations caused by the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Kosmična nauka i tehnologija*, т. 29, с.67-87, 2023.
16. Chernogor L., Mylovanov Y., Zhdanko Y. Response of total electron content to the October 25, 2022 partial solar eclipse from high to low latitudes in the Euro-Asian region. *Advances in Space Research*, т. 74, 2023.
17. Gautam S. Total Electron Content Estimation and Comparison Using GPS Data. 2022.
18. Moldwin M.. *An Introduction to Space Weather* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. 2008. 134 p.
19. Черногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 1 (128). С. 3—77.
20. *Earth's Magnetosphere Formed by the Low-Latitude Boundary Layer*. Second Edition. WAYNE KEITH WALTER HEIKKILA. ELSEVIER. 617 p. 2021.
21. William L., Masaki F. *The Dynamic Magnetosphere*. 2011.
22. Kamide Y., Baumjohann W. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling*. 1993.

23. Schunk, R. W.. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry (Cambridge Atmospheric and Space Science Series). 2000.
24. Сайт NOAA. URL: <https://www.noaa.gov/>
25. Сайт Center for Orbit Determination in Europe. URL: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>
26. Сайт The Crustal Dynamic Data Information System. URL: <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex/>.
27. Сайт Technical University of Catalonia. URL: <http://ionsat6.upc.edu/ionsat/>