

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем
Кафедра космічної радіофізики

Завідувач кафедри



Леонід ЧОРНОГОР

“ 30 ” листопада 2025 року

Кваліфікаційна робота
здобувача другого (магістерського) рівня вищої освіти
«Вплив магнітних бур на глобальний електронний вміст»

Спеціальність (спеціалізація) 105 Прикладна фізики та наноматеріали
Освітня програма Радіофізика та електроніка

Виконавець



Аделіна Гула

Науковий керівник

Анатолій Цимбал

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Гула Аделіна. Вплив магнітних бур на глобальний електронний вміст. Харків. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка», 2025, 58 стор., 31 рис., 7 посилань.

У роботі досліджено вплив геомагнітних бур на глобальний електронний вміст (ГЕВ) іоносфери, що є інтегральним параметром, чутливим до змін космічної погоди та сонячної активності. Наведено огляд фізичних процесів у магнітосфері та іоносфері, джерел формування магнітних бур і основних індексів магнітної активності. Представлено методику визначення повного електронного вмісту за даними глобальних навігаційних супутникових систем і побудови глобальних карт ГЕВ. За результатами аналізу карт повного електронного вмісту для періодів магнітних бур 2015 року встановлено часову залежність ГЕВ від характеристик магнітного поля та оцінено інерційність реакції іоносфери на збурення. Отримані результати підтверджують, що магнітні бурі спричиняють суттєві просторово-часові зміни глобального електронного вмісту, що необхідно враховувати при функціонуванні сучасних радіонавігаційних та супутникових систем.

Ключові слова: магнітна буря, іоносфера, глобальний електронний вміст, GNSS, TEC, Dst-індекс, космічна погода.

ABSTRACT

Hula Adelina. Influence of geomagnetic storms on the global electron content. Kharkiv. V. N. Karazin Kharkiv National University, educational and professional program Radiophysics and Electronics, 2025, 58 pages, 31 figures, 7 references.

The work investigates the influence of geomagnetic storms on the global electron content (GEC) of the ionosphere, which is an integral parameter sensitive to space weather variations and solar activity. An overview of physical processes in the magnetosphere and ionosphere, the sources of geomagnetic storms, and the main geomagnetic activity indices is presented. A methodology for determining the total electron content using data from global navigation satellite systems and constructing global GEC maps is described. Based on the analysis of ionospheric maps during geomagnetic storms in 2015, the temporal dependence of GEC on geomagnetic field characteristics has been established, and the ionospheric response delay to magnetic disturbances has been evaluated. The obtained results demonstrate that geomagnetic storms lead to significant spatio-temporal variations in the global electron content, which should be taken into account in the operation of modern satellite navigation and communication systems.

Keywords: geomagnetic storm, ionosphere, global electron content, GNSS, TEC, Dst index, space weather.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ABSTRACT.....	3
ВСТУП.....	5
1. Геомагнітні збурення.....	7
1.1. Вплив геомагнітних полів на навколишнє середовище та здоров'я людини	7
1.2. Індекси магнітної активності. Бурі та суббурі.....	10
1.3 Висновки.....	22
2. Глобальні навігаційні супутникові системи. Їх використання для одержання іоносферних даних.	23
2.1 Характеристики систем.....	23
2.2. Методи визначення повного вертикального вмісту електронів	24
2.3. Глобальні мапи повного вертикального вмісту іоносфери. Глобальний електронний вміст.	28
2.4. Висновки.....	40
3. Розрахунок глобального електронного вмісту іоносфери та вмісту електронів у півкулях у періоди магнітних бур 2015 р. Аналіз результатів. ..	41
3.1. Аналіз магнітної обстановки у період 2010-2022 рр. Вибір періодів для розрахунків глобального вмісту електронів і вмісту електронів у північній та південній півкулях.....	41
3.2. Методика та результати розрахунків глобального вмісту електронів та вмісту електронів у півкулях	
3.3. Аналіз результатів	53
Висновки.....	Ошибка! Закладка не определена.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Освоєння космосу у військових, дослідницьких і широких цивільних цілях, процеси глобалізації в енергетиці, телекомунікаціях, зв'язку висувають сьогодні нові підвищені вимоги до якості інформації про стан навколоземного космічного простору (НКП)

Динамічний режим іоносфери є одним з найважливіших факторів космічної погоди, впливу якої піддаються сучасні технологічні системи.

Стан НКП впливає на роботу супутникових систем, що надають інформацію про погоду, забезпечують телебачення, зв'язок, навігацію, спостереження за земною поверхнею, розвідку, систему стеження і рятування, дослідження і національну оборону. Шкода від аварій на супутникових системах стає все більш небезпечною. Сучасні енергетичні системи дуже складні і розгалужені. Магістральні лінії дуже чутливі до електричних струмів, індукованих в іоносферній струмовій системі. Перевантаження в лініях електропередач, що виникають як наслідок індукованих струмів, можуть викликати масові аварії електромереж і вихід з ладу дорогого обладнання на електростанціях. Великі надії покладаються на передачу електричної енергії супутникових сонячних батарей з геостаціонарної орбіти на Землю як екологічно чистий спосіб виробництва електроенергії. Оскільки передача енергії потужного електромагнітного пучка передбачається в сантиметровому діапазоні, він буде зазнавати таких самих впливів, як і інші супутникові системи.

Точність системи морської навігації, що використовує сигнали дуже низьких частот, залежить від точності визначення висоти нижньої іоносфери. Швидкі вертикальні рухи цієї межі під час сонячних спалахів і геомагнітних бур можуть вносити помилки у визначення положення об'єкта в кілька кілометрів.

Середньоорбітальні супутникові системи навігації працюють на основі прийому високочастотних сигналів, випромінюваних з ШСЗ. Рефракція цих

сигналів при перетині великомасштабних іоносферних збурень вносить значні помилки у визначення координат, а розсіювання на дрібномасштабних неоднорідностях електронної концентрації може призводити до повної втрати сигналу. Врахування впливу іоносферних збурень необхідне і при експлуатації супутникової телефонної системи. Вплив космічної погоди відчувають і наземні радіотраси, особливо у високочастотному діапазоні.

Таким чином, точний прогноз збурень в НКП і розробка моделей цих збурень дасть можливість підвищити надійність і точність роботи різних радіотехнічних систем цивільного і військового призначення.

Для цих цілей використовуються різні методи, серед яких останнім часом великого поширення набули дистанційні радіофізичні методи, зокрема, метод супутникового зондування з використанням ШСЗ середньоорбітних радіонавігаційних систем. Велика кількість таких супутників, порівняна простота приймального обладнання, і в зв'язку з цим велика кількість пунктів спостереження на Землі, дають можливість здійснювати практично безперервний глобальний моніторинг стану іоносфери.

У даній роботі розглянуто вплив на іоносферу магнітних бур. Коротко наведено інформацію про походження магнітних бур, величини, що описують їх інтенсивність, а також зроблено огляд даних про вплив магнітних бур на глобальний електронний вміст іоносфери (ГЕВ, ГЕС) – параметр, який найбільшою мірою характеризує вплив геомагнітних збурень на іоносферу Землі в цілому. За даними мап глобального розподілу повного електронного вмісту іоносфери N_0 для періодів магнітних бур у 2015 р. одержані часові залежності ГЕВ від характеристик магнітного поля (індексів магнітної активності). Оцінена інерційність реагування ГЕВ на зміни магнітного поля.

1. Геомагнітні збурення

1.1. Вплив геомагнітних полів на навколишнє середовище та здоров'я людини

Активне освоєння космічного простору в інтересах вирішення завдань зв'язку, навігації, дистанційного зондування Землі в останні десятиліття актуалізує вивчення впливу Сонця на Землю і вимагає створення ефективних моделей для прогнозу космічної погоди.

Найбільш сильним проявом космічної погоди є магнітні бурі, що породжують збурення в іоносфері та атмосфері.

Геомагнітні поля впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей. Так, під час магнітних бур спостерігається безпосереднє вторгнення в магнітосферу частинок сонячного вітру, відбувається нагрівання і посилення іонізації верхніх шарів атмосфери, прискорення заряджених частинок, збільшення яскравості полярних сяйв, виникнення електромагнітних шумів тощо. Під час магнітних бур може порушуватися радіозв'язок, відзначається вплив на різні технічні об'єкти. З іншого боку, спостереження геомагнітних варіацій служать одним із джерел відомостей про верхні шари атмосфери.

Магнітні збурення, пов'язані, наприклад, з магнітною бурєю, настають на кілька годин раніше, ніж під її впливом відбуваються зміни в іоносфері, що порушують радіозв'язок. Це дозволяє робити магнітні прогнози, необхідні для забезпечення безперебійного радіозв'язку (прогнози радіопогоди). Сильні збурення магнітосфери супроводжуються появою у верхній атмосфері Землі полярних сяйв, іоносферних збурень, рентгенівського та низькочастотного випромінювань. Тому геомагнітні дані служать і для прогнозу радіаційної обстановки в навколосемному просторі під час космічних польотів.

Вплив магнітних бур на технічні об'єкти, іноді катастрофічний, викликаний індукційним електричним полем, що виникає при швидкій зміні напруженості магнітного поля на Землі.

Так, 13 березня 1989 року потужна буря [1] дозволила мільйонам людей милуватися полярними сьйвами не тільки на Алясці або в Скандинавії, але і на узбережжі Середземного моря і в Японії. Але ця ж «буря року» зруйнувала трансформатор на атомній станції в Салемі (Нью-Джерсі, США). Вона ж заблокувала роботу високовольтної мережі в Квебеку і на 9 годин залишила 6 млн людей без електрики. Після аварії в Салемі з'ясувалося, що навіть невелике збільшення сили постійного струму може вивести з ладу трансформатор, призначений для перетворення змінного струму. Ця добавка вводить його в режим роботи з надлишковим магнітним насиченням сердечника, що призводить до перегріву обмоток і в кінцевому підсумку до аварії всієї системи. Вплив викликається електрорушійною силою (ЕРС), індукованою короткоперіодичними варіаціями геомагнітного поля. Наведена різниця потенціалів невелика і становить приблизно кілька вольт на кілометр (максимальне значення було зареєстровано в 1940 році в Норвегії і склало близько 50 В/км), але в протяжних провідниках з низьким опором – лініях зв'язку та електропередач, трубопроводах, рейках залізниць – повна сила індукованих струмів може досягати десятків і сотень ампер. Найбільший вплив відчувають електричні лінії, простягнуті зі сходу на захід у полярних районах.

Світові магнітні бурі викликаються «стисканням» магнітосфери потужним потоком швидкісного сонячного вітру і призводять до утворення кільцевого струму навколо Землі і, як наслідок, до зниження напруженості магнітного поля в приекваторіальних районах. Полярні бурі, або суббурі, набагато численніші. Це наслідки вибухового вивільнення накопиченої в магнітосфері енергії, вони також викликають зниження напруженості магнітного поля переважно в приполярних районах. Наведене індукційне поле пропорційне величині і швидкості зміни напруженості магнітного поля. При сильній магнітній бурі викликане кільцевим струмом зниження напруженості магнітного поля на Землі становить 250-400 нТл. При цьому падіння напруженості триває від декількох годин до доби. У той же час при середній за потужністю суббурі магнітні бухтоподібні збурення магнітудою в 300-600 нТл

розвиваються за час від 1 до 10 хвилин. В результаті наведена суббурею EPC на два порядки вище, ніж викликана кільцевим струмом сильної магнітної бурі. Відомо, наприклад, що в серпні 1972 року магнітна буря була слабкою (50 нТл), а авроральна активність — високою, в результаті чого зруйнувався мережевий трансформатор у Британській Колумбії (авроральна зона Канади).

Магнітні бурі призводять до сильних збурень в іоносфері, які, в свою чергу, негативно позначаються на стані радіозв'язку. У приполярних районах і зонах аврорального овалу іоносфера пов'язана з найбільш динамічними областями магнітосфери і тому найбільш чутлива до таких впливів. Магнітні бурі у високих широтах можуть практично повністю блокувати радіоефір на кілька діб. При цьому страждають і інші сфери діяльності, наприклад, авіасполучення. Спостерігаються збої в роботі глобальних навігаційних систем. Іншим негативним ефектом, пов'язаним з геомагнітними бурями, є втрата орієнтації ШСЗ, навігація яких здійснюється за геомагнітним полем, що під час бурі зазнає сильних збурень. Природно, що під час геомагнітних збурень виникають проблеми і з радіолокацією.

Геомагнітне поле (ГМП) впливає і на живі організми, рослинний світ і на людину. Достовірно встановлено, що фактор ризику для людей, схильних до серцево-судинних захворювань, зазнає змін, пов'язаних зі зміною сонячної активності. Згідно з відомою статистикою, фактор ризику мінімальний у роки мінімуму сонячної активності і досягає максимуму в періоди підйому і спаду сонячної активності. Найбільш сильні магнітні бурі і магнітосферні збурення припадають на період зростання і спаду сонячної активності. Проведені дослідження показали, що під час магнітних бур у людей, які страждають, наприклад, гіпертонією, висока ймовірність розвитку кризу. У ці ж періоди зростає ризик розвитку інфарктів міокарда (ІМ), а перебіг хвороби набагато важчий, ніж у пацієнтів, у яких ІМ розвинувся у відносно спокійній геофізичній обстановці. Значною мірою магнітні бурі сприяють розвитку порушень мозкового кровообігу, ускладнюють наслідки захворювання. Смертність при серцево-судинній патології в перші 24 години після розвитку магнітної бурі

досягає максимуму, що пояснюється своєрідною стресовою реакцією хворого організму на зміну магнітної обстановки, пов'язаної зі зміною сонячної активності.

Ймовірні типи впливу сонячних і магнітних збурень ілюструються [2] Європейським космічним агентством – рис.1.

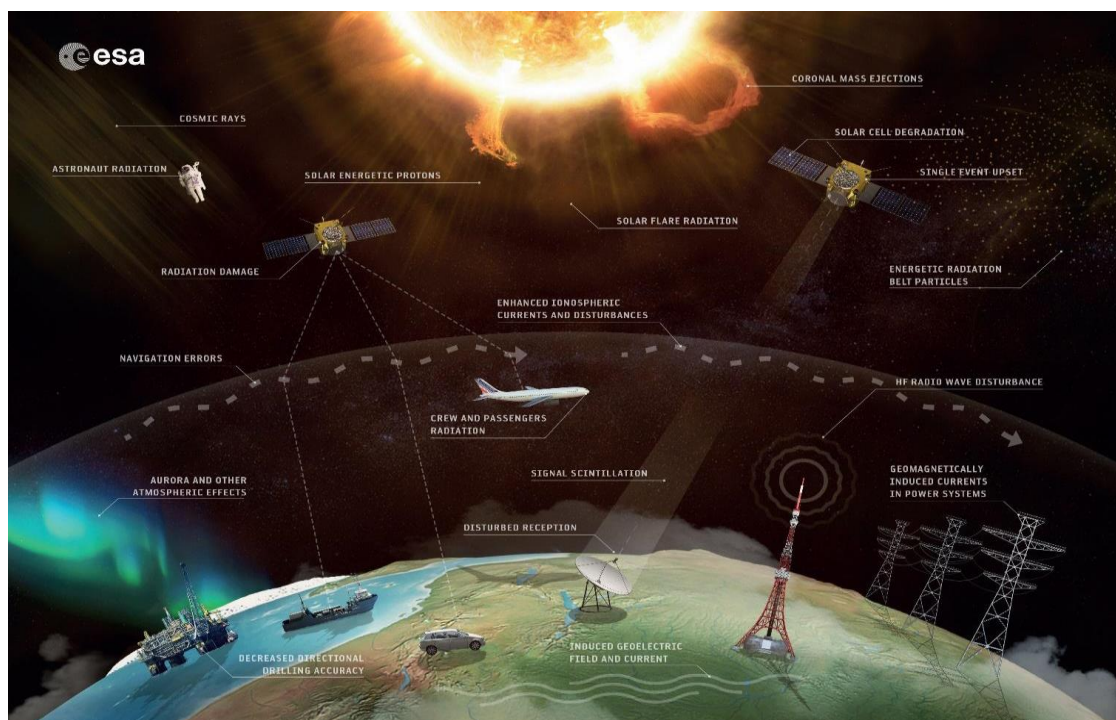


Рис.1. Ймовірні типи впливу сонячних і магнітних збурень

Можна бачити, що такі збурення впливають на нашу планету та наші технології різними способами. Електромагнітне випромінювання у вигляді радіохвиль, рентгенівських променів та ультрафіолетового світла, наприклад, може порушувати радіозв'язок на денній стороні Землі. Існують також високоенергетичні частинки, які можуть проникати крізь матеріали космічних апаратів і потенційно пошкоджувати їх. Високошвидкісні корональні викиди маси взаємодіють з нашим магнітним середовищем, що призводить до таких явищ, як індуковані струми в довгих лініях електропередач та полярне сяйво тощо.

1.2. Індeksi магнітної активності. Бурі та суббурі.

В даний час стає все більш очевидною велика роль, яку відіграють процеси на Сонці в різноманітних явищах на Землі: в її магнітосфері, іоносфері,

тропосфері і навіть біосфері. У зв'язку з цим дані про явища на Сонці та про зміни в магнітному полі Землі стали широко використовуватися в різних галузях науки і техніки та при вирішенні багатьох прикладних завдань. Зручно характеризувати магнітосферну динаміку в цілому за рівнем цих геомагнітних варіацій, зокрема, геомагнітними індексами .

Кожен з індексів обчислюється за результатами вимірювань і характеризує тільки частину складної картини сонячної або геомагнітної активності, так що вибір конкретного індексу при зіставленні з деяким певним явищем є нелегким завданням і часом вимагає попереднього дослідження. Іноді таке зіставлення краще проводити відразу з декількома індексами і подальшим вибором найбільш підходящого з них. Це допоможе скласти уявлення про механізм впливу сонячної активності. У різні часи пропонувалося до використання великої кількості індексів сонячної та геомагнітної активності. Всього розроблено понад 20 різних геомагнітних індексів. Є індекси локальні, обчислені за даними однієї обсерваторії, і планетарні, що характеризують планетарні збурення магнітного поля Землі в цілому або тільки в північній чи південній півкулях. Такі індекси обчислюються з використанням даних багатьох магнітних обсерваторій, розташованих на різних довготах в межах певного широтного поясу. Найбільш вживаними в даний час є деякі з індексів, про які йтиметься нижче.

Геомагнітні індекси.

Регулярні добові варіації магнітного поля створюються, в основному, змінами струмів в іоносфері Землі через зміну освітленості іоносфери Сонцем протягом доби. Нерегулярні варіації магнітного поля створюються внаслідок впливу потоку сонячної плазми (сонячного вітру) на магнітосферу Землі, змінами всередині магнітосфери та взаємодією магнітосфери й іоносфери.

Індекси геомагнітної активності призначені для опису варіацій магнітного поля Землі, викликаних цими нерегулярними причинами. [3]

К-індекс - це квазілогарифмічний індекс (збільшується на одиницю при збільшенні збурення приблизно в два рази), що обчислюється за даними

конкретної обсерваторії за тригодинний інтервал часу. Індекс був введений Дж. Бартельсом в 1938 р. і являє собою значення від 0 до 9 для кожного тригодинного інтервалу (0-3, 3-6, 6-9 і т.д.) світового часу. Для обчислення індексу береться зміна магнітного поля за тригодинний інтервал, з нього віднімається регулярна частина, що визначається за спокійними днями, і отримана величина за спеціальною таблицею переводиться в К-індекс.

Межі амплітуд (в нанотеслах, нТл), що відповідають певному балу К-індексу, індивідуальні для кожної станції і залежать від її геомагнітної широти. Це пов'язано з тим, що збурення магнітного поля носять локальний характер і їх інтенсивність може сильно відрізнятись в різних регіонах.

Оскільки магнітні збурення проявляються по-різному в різних місцях на Земній кулі, то для кожної обсерваторії існує своя таблиця, побудована так, щоб різні обсерваторії в середньому за великий інтервал часу давали однакові індекси.

Планетарний Кр-індекс обчислюється як середнє значення К-індексів, визначених на 13-ти геомагнітних обсерваторіях, розташованих між 44 і 60 градусами північної і південної геомагнітних широт. Його діапазон також лежить в межах від 0 до 9, але Кр-індекс визначається з точністю до 1/3: 4- означає 3 і 2/3, 4o - 4 рівно, 4+ означає 4 і 1/3...

Останнім часом замість Кр-індексу часто вживається Ар-індекс.

Ар-індекс визначається в одиницях магнітного поля (нанотеслах) і представляє середнє значення варіації магнітного поля, що відповідає даному Кр-індексу:

Dst (Disturbance Storm Time) – це кільцевий індекс, який характеризує силу кільцевих струмів у магнітосфері під час магнітних бур. Він вимірює усереднене значення збурення в годинному інтервалі, розраховане за даними низькоширотних станцій.

Індекс Dst важливий для вивчення фаз магнітної бурі, особливо головної фази, яка характеризується сильним розвитком кільцевого струму.

Dst-індекс – це міра геомагнітної активності, яка характеризує інтенсивність і силу геомагнітних бур. Він вимірює глобальну усереднену зміну горизонтальної складової магнітного поля Землі поблизу магнітного екватора і безпосередньо пов'язаний з інтенсивністю кільцевого струму (поток заряджених частинок) у магнітосфері Землі. Одиниці вимірювання: індекс вимірюється в нанотеслах (нТл).

Негативні значення вказують на ослаблення магнітного поля Землі та наявність магнітної бурі, що свідчить про посилення кільцевого струму.

Чим нижче негативне значення, тим сильніша магнітна буря (наприклад, значення нижче -50 нТл вважаються ознакою сильної активності).

Індекс Dst обчислюється щогодини на основі даних, зібраних мережею низькоширотних магнітних обсерваторій по всьому світу, і публікується Світовим центром даних з геомагнетизму в Кіото (World Data Center for Geomagnetism, Kyoto).

Шкала сили бур за індексом Dst: слабкі: $Dst > -50$ нТл; помірні: від -50 до -100 нТл; сильні: від -100 до -200 нТл; екстремальні: $Dst < -200$ нТл.

Національним управлінням океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA) для класифікації магнітних бур за їх силою використовується шкала, яку представлено у Табл. 1

Таблиця. 1 Класифікація магнітних бур за шкалою NOAA

Шкала/ Рівень	Наслідки магнітних бур	Фізична міра	Середня частота
G5 Екстремальний	Енергетичні системи: Можуть виникнути широко поширені проблеми з контролем напруги та проблеми із захисною системою, деякі електромережі можуть зазнати повного збою або відключення	$Kp = 9$	4 за цикл (4 дні на цикл)

	<p>електроенергії.</p> <p>Трансформатори можуть бути пошкоджені.</p> <p>Експлуатація космічних апаратів: Сильний поверхневий заряд, проблеми з орієнтацією, висхідною/низхідною лінією зв'язку та відстеженням супутників.</p> <p>Інші системи: Струм у трубопроводі може сягати сотень ампер, розповсюдження ВЧ (високочастотного) радіовипромінювання може бути неможливим у багатьох областях протягом одного-двох днів, супутникова навігація може погіршуватися протягом кількох днів, низькочастотна радіонавігація може бути відключена годинами.</p>		
<p>G4</p> <p>Дуже сильний</p>	<p>Енергетичні системи: Можливі широко поширені проблеми з контролем напруги та деякі захисні системи помилково вимкнуть основні активи з мережі.</p> <p>Експлуатація космічних апаратів: Можуть виникнути</p>	<p>Кр = 8</p>	<p>100 за цикл (60 днів на цикл)</p>

	<p>проблеми з поверхневим зарядженням і відстеженням, можуть знадобитися виправлення проблем з орієнтацією.</p> <p>Інші системи: Індуковані струми в трубопроводах впливають на запобіжні заходи, спорадичне розповсюдження ВЧ-радіо, супутникова навігація погіршується на години, низькочастотна радіонавігація порушується.</p>		
<p>G3 Сильний</p>	<p>Енергетичні системи: Може знадобитися корекція напруги, спрацьовування помилкових тривог на деяких захисних пристроях.</p> <p>Експлуатація космічних апаратів: На компонентах супутника може виникати поверхневий заряд, на супутниках на низькій орбіті може збільшуватися опір, і можуть знадобитися корекції через проблеми з орієнтацією.</p> <p>Інші системи: Можуть виникнути проблеми з супутниковою навігацією та</p>	<p>Кр = 7</p>	<p>200 за цикл (130 днів на цикл)</p>

	<p>низькочастотною навігацією, ВЧ-радіо може бути з перебоями.</p>		
<p>G2 Помірний</p>	<p>Енергетичні системи: У системах живлення у високих широтах можуть виникнути сигнали тривоги напруги, тривалі шторми можуть спричинити пошкодження трансформатора.</p> <p>Експлуатація космічних апаратів: Наземний контроль може вимагати коригування орієнтації; можливі зміни опору впливають на прогнози орбіти.</p> <p>Інші системи: Поширення ВЧ-радіо може загасати на вищих широтах.</p>	<p>Кр = 6</p>	<p>600 за цикл (360 днів на цикл)</p>
<p>G1 Незначний</p>	<p>Енергетичні системи: Можуть виникнути слабкі коливання в електромережі.</p> <p>Експлуатація космічних апаратів: Можливий незначний вплив на роботу супутника.</p> <p>Інші системи: Мігруючі тварини страждають на цьому та більш високому рівнях.</p>	<p>Кр = 5</p>	<p>1700 за цикл (900 днів на цикл)</p>

Бурі та суббурі.

Магнітні бурі починаються на Сонці. Причиною служать потужні процеси, такі як сонячні спалахи і корональні викиди маси (КВМ). Ці явища викидають у космічний простір щільні, прискорені потоки заряджених частинок (плазми). Ці потоки заряджених частинок рухаються від Сонця до Землі зі швидкістю, що значно перевищує звичайний сонячний вітер. Шлях до Землі займає від декількох годин до декількох діб. Коли цей збурений потік досягає Землі, він стикається з її магнітосферою. Відбувається ефективний обмін енергією сонячного вітру з навколосезним космічним простором. В результаті взаємодії відбуваються великомасштабні перебудови в магнітосфері, включаючи посилення магнітосферних струмових систем і струмів в іоносфері та земній корі. Це викликає коливання і зниження геомагнітного поля, вимірюваного на поверхні Землі, що і називається магнітною бурею.

За змінами магнітного поля буря починається з різкого збільшення Н-компоненти геомагнітного поля на всіх широтах. Протягом декількох годин величина поля перевищує його значення перед раптовим початком, до настання раптового зменшення поля. Часовий інтервал між раптовим початком бурі і моментом зменшення поля називається початковою фазою (IP) .

Зменшення поля дуже чітко спостерігається в середніх і низьких широтах. Однак на екваторіальних станціях накладаються великі збурення в районі електроструменя. Зменшення поля може тривати кілька годин, а іноді і днів і називається головною фазою (MP).

Під час геомагнітних збурень інтервал між раптовим початком бурі та початком зменшення Н-компоненти поля в головній фазі визначається як початкова фаза (IP) (геомагнітної бурі). Тривалість початкової фази є важливим параметром з теоретичної точки зору, оскільки раптовий початок бурі означає прихід ударної хвилі з міжпланетного простору до Землі, а протягом початкової фази Земля занурюється в плазму і магнітне поле за фронтом ударної хвилі.

Статистичні дослідження показують, що початкова фаза може тривати від 30 хв до декількох годин.

Бурі добре виділяються в середніх широтах, але в зоні полярних сьйв варіації, пов'язані з бурею, мають зовсім інший характер через наявність аврорального електроструменя. Варіації поля в ще більш високих широтах, ніж зона полярних сьйв (в полярній шапці), також істотно відрізняються, оскільки міжпланетне поле може през'єднуватися з геомагнітним полем і таким чином безпосередньо впливати на магнітні варіації.

Фізичними проявами магнітної бурі є полярні сьйва (викликані вторгненням заряджених частинок у верхні шари атмосфери в області полюсів), збільшення радіаційного рівня у внутрішній магнітосфері та порушення в роботі технічних систем, таких як радіозв'язок та електромережі.

Інтенсивність і частота магнітних бур залежать від 11-річного циклу сонячної активності: у періоди максимуму сонячної активності бурі відбуваються частіше і бувають сильнішими.

Типова магнітна буря складається з трьох фаз [4-8]. Вона починається у момент часу, коли міжпланетна ударна хвиля досягає магнітосфери і впливає на неї. Результатом взаємодії є модифікація ударних хвиль, зміна параметрів потоку на фронті хвилі, збурення системи електричних струмів, що течуть по магнітопаузі, і стиснення (компресія) магнітосфери. Ефект компресії проявляється у зсуві положення головної ударної хвилі у бік Землі на кілька планетних радіусів і, як результат, — у різкому збільшенні напруженості магнітного поля на поверхні Землі і у магнітосфері. Описані ефекти належать до початкової фази магнітосферної бурі. Після раптового початку бурі, як правило, наступає досить спокійний період тривалістю від кількох хвилин до кількох годин.

Головна фаза бурі починається тоді, коли магнітосфери досягають збурення, згенеровані сонячною бурею, що призводить до початку розпаду кільцевого струму. Відповідний інтервал часу визначається по інтервалу часу, де індекс $Dst > 0$. Головна фаза характеризується послідовністю

вибухоподібних процесів, які називаються магнітосферними суббурями. Вони пов'язані з турбулентністю плазмової хмари та іррегулярністю північно-південної складової перенесеного нею міжпланетного магнітного поля (ММП) з індукцією B . При південній орієнтації вектора B відбувається перез'єднання силових ліній ММП і земного магнітного поля, що призводить до появи електричного поля E , спрямованого поперек хвоста магнітосфери з ранкового її боку до вечірнього.

Електричне поле E викликає інтенсивний, спрямований до Сонця конвективний рух плазми у хвості і плазмосфері. У хвості відбувається перерозподіл плазми, магнітного поля і струмів. Струми, спрямовані з хвоста магнітосфери, призводять до посилення полярного електроструменя і електричного струму, який тече уздовж овалу полярних сьайв. Конвекція магнітосферної плазми до Землі і струми вздовж силових ліній призводять до прискорення заряджених частинок. Виникає надзвичайно гаряча плазма з температурою близько 10^7 К чи більше. Частина її вторгається у верхню атмосферу високих широт. Інша частина проникає у плазмовий шар, частково інжектуються в область захоплення і заповнює під час бурі радіаційні пояси: протонний пояс (так званий кільцевий струм) і зовнішній радіаційний пояс (електронний). Захоплені частинки (протони й електрони) у поясах мають великі енергії. Послідовність кількох суббур призводить до генерації інтенсивного кільцевого струму, магнітне поле якого відповідальне за зниження горизонтальної H -складової геомагнітного поля і формування головної фази бурі.

Гаряча плазма, інжектвана у високоширотні області, збурює полярну іоносферу і викликає полярні суббурі. Вторгнення в атмосферу енергійних частинок супроводжується полярними сьайвами — світінням іоносфери на висотах 100...150 км. Область, зайнята полярними сьайвами, оточує геомагнітний полюс у вигляді полярного овалу (геомагнітна широта 68° ... 78°). Висипання з магнітосфери електронів з енергіями $E_e \sim 20$ кеВ викликає додаткову іонізацію в області і так зване авроральне поглинання радіохвиль.

Область аврорального поглинання зміщена у бік середніх широт у порівнянні з зоною полярних сяйв. Як і всі авроральні явища, з ростом магнітної активності вона зміщується до екватора. Збурення з високих широт поширюються в середні і низькі широти. Розширення високоширотної області іоносфери, охопленої конвекцією, веде до зменшення розміру плазмосфери і до зміщення головного іоносферного провалу на нижчі геомагнітні широти. Посилення і наближення до Землі кільцевого струму в головну фазу бурі супроводжується збільшенням потоків тепла в іоносферу з периферійної «гарячої зони» плазмосфери, де температура плазми становить кілька десятків тисяч кельвін. Її наявність зумовлена взаємодією енергійних протонів кільцевого струму з холодною фоновою плазмою за допомогою збудження і дисипації іонно-циклотронних хвиль. Приплив тепла до електронного газу області F іоносфери витрачається на збільшення його температури, а також на збудження електронних станів атомів кисню з подальшим їхнім висвічуванням (червоні дуги) і на збудження коливальних рівнів молекул азоту. Останній процес прискорює хімічну реакцію, відповідальну за втрату іонів кисню, що домінують в області F, і призводить до зменшення електронної концентрації у ній. Посилення електричних полів і підвищення провідності за рахунок висипань енергійних частинок під час магнітних бур зумовлюють зростання струмів у високоширотній іоносфері і джоулівське нагрівання заряджених і нейтральних складових атмосфери. Просторова неоднорідність і нестационарність нагріву нейтрального газу ведуть до генерації рухів різних масштабів (вітрів і внутрішніх гравітаційних хвиль). Вони викликають перебудову глобальної термосферної циркуляції і змінюють нейтральний склад, підвищуючи відносний вміст молекулярних складових термосфери в середніх широтах. Ця обставина разом зі збільшенням іонної температури і температури нейтрального газу прискорює втрати іонів кисню, що призводить до значного зменшення електронної концентрації в області F і розвитку негативної іоносферної бурі. Крім того, під час збурень магнітосферні електричні поля можуть проникати з полярних широт у середні і низькі широти, порушуючи

процеси вертикального перенесення плазми і викликаючи її перерозподіл. Так процеси у високоширотній іоносфері впливають на поведінку плазми на значній відстані від неї.

Після головної фази бурі настає фаза відновлення. У міру ослаблення припливу енергійних частинок в область захоплення кільцевий струм поступово зменшується. Протягом одного-двох днів частинки можуть як прискорюватися, так і виходити з радіаційних поясів. Геомагнітне поле поступово повертається до свого звичайного значення. Характер протікання геомагнітних бур дуже різноманітний. Окремі фази бурі можуть мати різну тривалість або взагалі бути відсутніми.

Основні фази розвитку бурі представлені на рис. 2 (на прикладі бурі 7 квітня 2000 р.) : раптовий початок (SSC – sudden storm commencement) – 1, головна фаза – 2, і фаза відновлення – 3. Раптовий початок пов'язаний з безпосереднім впливом прискореної плазми сонячного вітру на магнітосферу: стиснення магнітосфери при посиленні динамічного тиску сонячного вітру призводить до посилення струмів Чепмена-Ферраро на магнітопаузі. Ці струми виробляють позитивну варіацію північно-південної компоненти магнітного поля в магнітосфері, що проявляється в короткочасному позитивному стрибку Dst на фазі раптового початку бурі. Розвиток кільцевого струму та інтенсифікація струмів хвоста магнітосфери призводять до різкого падіння Dst на головній фазі, а зміна знаку ММП – до розпаду кільцевого струму і до подальшого відновлення спокійного рівня геомагнітного поля.

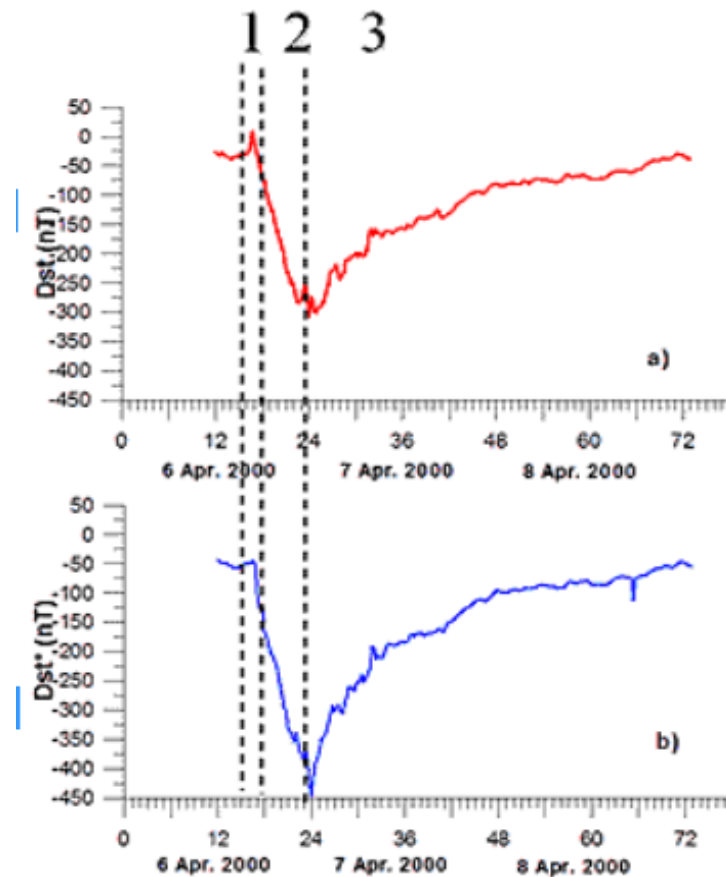


Рис.2. Основні фази розвитку бурі

1.3 Висновки

Магнітні бурі поділяються на наступні характерні часові інтервали: початкову фазу, головну фазу та фазу відновлення. Буря починається з різкого збільшення Н-компонентів на всіх широтах. Протягом кількох годин величина поля перевищує значення перед раптовим початком, до настання раптового зменшення поля. Часовий інтервал між раптовим початком бурі та моментом зменшення поля називається початковою фазою (IP). Зменшення поля дуже чітко спостерігається у середніх та низьких широтах. Однак на екваторіальних станціях накладаються великі збурення в районі електроструму. Зменшення поля може тривати кілька годин, іноді днів, і називається головною фазою (MP). Потім починається повільне відновлення, і Н-компонента повертається до рівня, який був перед бурею або в багатьох випадках до рівня трохи нижче за

вихідний. Ця фаза бурі, звана фазою відновлення (RP), може тривати від кількох годин за кілька днів. Зауважимо, що бурі добре виділяються в середніх широтах, але в зоні полярних сьйв варіації, пов'язані з бурею, мають зовсім інший характер через наявність аврорального електроструму. Варіації поля на ще більш високих широтах, ніж зона полярних сьйв (в полярної шапці), також істотно відрізняються, оскільки міжпланетне поле може переєднуватися з геомагнітним полем і таким чином безпосередньо впливати на магнітні варіації. Слід зазначити, що зменшення поля іноді може спостерігатися без раптового початку бурі, і навіть протікати у різних ірегулярних формах. Проте останніми роками термін " магнітна буря " вживається у разі, якщо є всі характерні фази: раптове початок, початкова фаза, головна фаза, фаза відновлення. Геомагнітні бурі також пов'язані з іоносферними збуреннями, які, як відомо, викликають порушення радіозв'язку, впливають на здоров'я людини та на технічні засоби різного призначення (ШСЗ, лінії електропередач, трансформатори та ін.).

2. Глобальні навігаційні супутникові системи. Їх використання для одержання іоносферних даних.

2.1 Характеристики систем

Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) складається з супутників, що обертаються навколо Землі по дуже специфічних траєкторіях. Для глобального покриття, за оцінками, супутникова система потребує від 18 до 30 супутників. Навігаційні супутники надають інформацію про орбіту та точний час (а також інші послуги) радіоприймачам, спеціально розробленим для прийому цих супутникових сигналів та декодування вмісту сигнальних повідомлень. За допомогою вмісту повідомлень щонайменше від чотирьох «видимих» супутників можна обчислити положення на більшій частині поверхні Землі або поблизу неї за допомогою математичного процесу, відомого як трилатерація. Існує кілька супутникових груп GNSS, що надаються урядами різних країн світу, зокрема: GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo. Крім того,

існують інші системи, які призначені для обслуговування лише певних регіонів, а не для надання глобальних послуг. Вони відомі як RNSS (регіональні навігаційні супутникові системи), зокрема: IRNSS, QZSS.

Деякі характеристики систем наведені у табл. 2 [9]

Таблиця 2 Характеристики супутникових систем

GNSS	Покриття	Висота (км)	Кількість супутників
GPS	Глобальне	20 180	31
GLONASS	Глобальне	19 130	24
Galileo	Глобальне	23 222	26
BeiDou	Глобальне	21,528 35,786	48
QZSS	Регіональне	32000 (perigee) 40 000 (apogee)	4
IRNSS/NavIC	Регіональне		8

Основною функцією GNSS є надання послуг споживачам у визначенні їх координат на Землі. Але в останні роки всесвітня мережа приймачів, що відстежують передачі супутників різних глобальних навігаційних систем, стала новим джерелом іоносферних даних.

2.2. Методи визначення повного вертикального вмісту електронів

Основним параметром іоносфери, який визначається, є повний вертикальний вміст електронів (N_0 , TEC) в іоносфері. Методики визначення TEC за вимірюваннями за допомогою двочастотних приймачів глобальної системи позиціонування, що реєструють дані P-коду (коду точного дальноміра) та фази несучої хвилі, описані, наприклад, у [10-13]. Одиниці виміру TEC – в TECu, де $1 \text{ TECu} = 10^{16}$ електронів/м².

Загальна ідея цих методик така:

Приймачі радіосигналів ШСЗ систем ГЛОНАСС або NAVSTAR реєструють час t поширення сигналів від ШСЗ на двох частотах і відповідні фази. На виході приймача зазвичай видається так звана псевдодальність: $P=c \cdot t$ (c -швидкість світла). Цю величину можна записати у вигляді:

$$P = R + \Delta R_{mp} + \Delta R_{iон} + \delta R ,$$

де R – відстань від ШСЗ до приймача, ΔR_{mp} , $\Delta R_{iон}$ – поправки на тропосферу та іоносферу, δR – помилки вимірювань.

Далі розглядається зв'язок між $P_{1,2}$ (значення P на одній та другій частотах), електронною концентрацією N та повним похилим (по променю від ШСЗ до приймача) вмістом електронів N_L

$$p = c\Delta t = c \int \frac{ds}{v_{zp}}$$

$$v_{zp} = cn = c \sqrt{1 - 8.07N/f^2} \approx c(1 - 4.035N/f^2) \quad (1)$$

$$P = \int ds(1 + 4.035N/f^2) = R + \frac{4.035}{f^2} N_L \quad (2)$$

$$P_1 = \int ds(1 + 4.035N/f_1^2) = R + \frac{4.035}{f_1^2} N_L \quad (3)$$

$$P_2 = \int ds(1 + 4.035N/f_2^2) = R + \frac{4.035}{f_2^2} N_L \quad (4)$$

де n – коефіцієнт заломлення іоносфери.

За вимірюваннями $P_{1,2}$ з (3-4) можна знайти N_L :

$$N_L = \frac{(P_2 - P_1) \cdot f_2^2}{40.35(1 - f_2^2 / f_1^2)}, M^{-2} \quad (5)$$

де $f_{1,2}$ – частоти сигналів в Гц , $P_{1,2}$ –виміряні (в м) на цих частотах псевдодальності.

Приклад залежності N_L від часу прольота одного з супутників навігаційної системи GPS наведено на рис.3

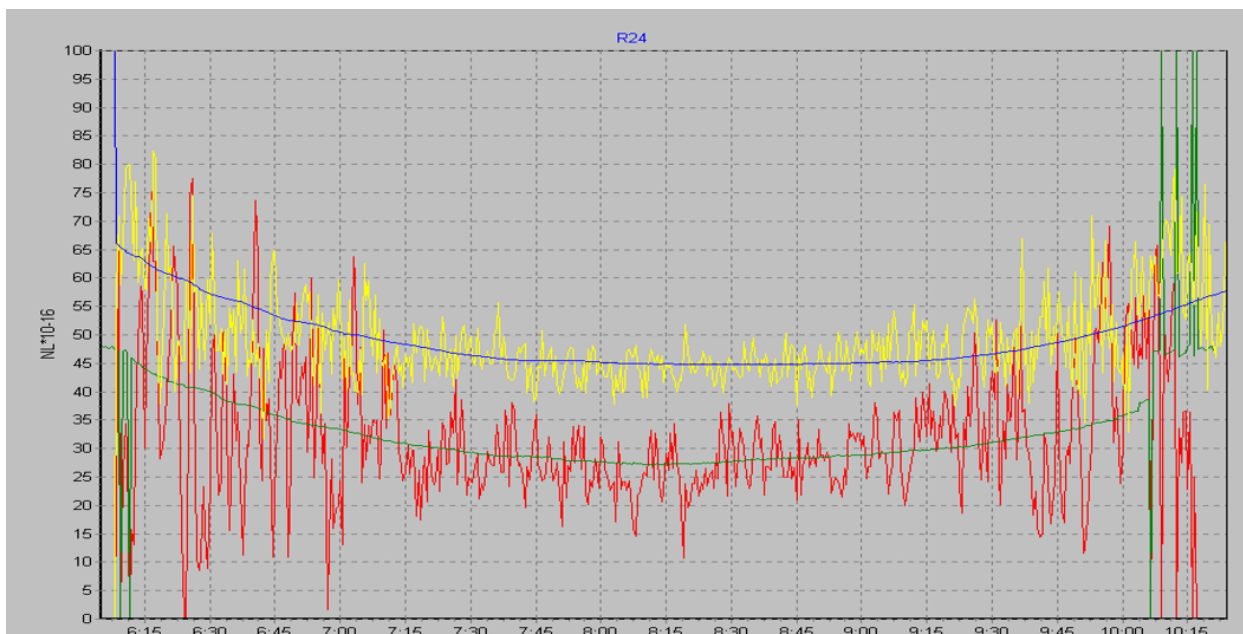


Рис. 3. Часова залежність N_L

Можна бачити значні варіації N_L , і це викликано досить великими похибками у вимірюваннях часу t поширення сигналів від ШСЗ.

Слід зазначити, що значно менше схильні до випадкових похибок фазові вимірювання. Але при цьому виникає проблема неоднозначності фазових вимірювань (абсолютно вимірюються лише зміни фази сигналу від точки до точки при переміщенні ШСЗ).

У будь-який момент часу для фази сигналу можна записати вираз:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_{екс} ,$$

де Φ_0 — набіг фази сигналу на всьому шляху приймач-ШСЗ в будь-який момент часу (невідомо константа), $\Phi_{екс}$ — вимірювання фази, починаючи з цього моменту.

Для отримання складової набігу фази за рахунок іоносфери в приймальному пристрої значення фази множаться на величину довжини хвилі для відповідної частоти.

Фазу сигналу можна визначити таким чином:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^R n dR = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^R (1 - 4,035N / f^2) dR = \frac{2\pi}{\lambda} (R - \frac{4,035}{\lambda} N_L) \quad (6)$$

де n -коефіцієнт заломлення іоносфери, λ - довжина хвилі, f -частота.

З урахуванням цього можна записати вираз:

$$\frac{\Phi_{01}\lambda_1 - \Phi_{02}\lambda_2}{2\pi} + \frac{\Phi_{1екс}\lambda_1 - \Phi_{2екс}\lambda_2}{2\pi} = 40,35N_L \frac{(1 - f_2^2 / f_1^2)}{f_2^2}, \quad (7)$$

де $\Phi_{01,02}$ - невідомі константи, індекси 1,2 відносяться до відповідних величин на частотах $f_{1,2}$.

Використовується наступна методика для їх знаходження.

Перепишемо вираз у вигляді:

$$A = \frac{\Phi_{01}\lambda_1 - \Phi_{02}\lambda_2}{2\pi} = 40,35N_L \frac{(1 - f_2^2 / f_1^2)}{f_2^2} - \frac{\Phi_{1екс}\lambda_1 - \Phi_{2екс}\lambda_2}{2\pi}. \quad (8)$$

У ліву частину (4) входять невідомі константи $\Phi_{01,02}$. У праву частину - експериментальні значення фази і величина N_L .

Визначаємо величину A для кожного моменту часу реєстрації (A_i), підставляючи в якості N_L його значення, отримані за вимірами псевдодальностей. Далі усереднюємо отримані значення A_i і вважаємо невідомою узагальненою константою величину

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i, \quad (9)$$

де N - кількість точок вимірювань.

Остаточно для визначення N_L маємо вираз:

$$N_L = \frac{(L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2 + A)f_2^2}{40,35(1 - f_2^2 / f_1^2)}, \quad (10)$$

де

$$L_{1,2} = \frac{\Phi_{1екс,2екс}}{2\pi}$$

Далі електронний вміст у вертикальному стовпі іоносфери – N_0 – визначається із співвідношення:

$$N_0 = N_l \cos\left[\arcsin \frac{R_a}{R_a + 450} \cos \beta\right], \quad (11)$$

де R_a – радіус Землі (км), β – кут, під яким спостерігається ШСЗ.

Величина N_0 відноситься до точки (званої підіоносферною) на поверхні Землі з координатами, які визначаються проекцією точки перетину променя до ШСЗ зі сферичною поверхнею радіусом 450 км (центр поверхні збігається з центром Землі).

2.3. Глобальні мапи повного вертикального вмісту іоносфери. Глобальний електронний вміст.

Дані, зібрані з безперервно працюючої глобальної мережі приймачів глобальних систем позиціонування зараз використовуються для створення глобальних карт загального вмісту електронів (ГЕС) в іоносфері з інтервалом \sim 1 години і менше [14, 15, 16, 17]. Ці карти використовуються для калібрування затримки радіосигналів, спричиненої іоносферою, або для досліджень загального вмісту електронів – залежності від широти, довготи, сезону, рівня сонячної та магнітної активності тощо – тобто, для дослідження космічної погоди.

У 2006-2008 роках був запропонований новий підхід до вивчення та кращого розуміння зв'язків між Сонцем і Землею – це визначення глобального вмісту електронів [18]. Глобальний вміст електронів (англійська аббревіатура ГЕС – global electron content), що визначається з використанням глобальних карт повного електронного вмісту, отриманих за реєстраціями сигналів середньоорбітних навігаційних супутників, дорівнює загальній кількості електронів у навколосемному просторі до висот \sim 20 тис. км. Перевагою цього параметра є те, що нівелюються локальні характеристики іоносфери (зокрема добові, широтні та довготні залежності електронного вмісту) і на передній

план виходять процеси, зумовлені зовнішнім впливом на іоносферу – сонячна активність, магнітні бурі.

Глобальний вміст електронів $GEC(t)$ обчислюється шляхом підсумовування абсолютних значень вертикальних ТЕС ($N_{0i,j}$), помножених на площу комірки $S_{i,j}$, для всіх комірок мап глобального розподілу N_0 :

$$GEC = \sum_{i,j} N_{0,i,j} S_{i,j}$$

На практиці використовується одиниця вимірювання 1 GECU= 10^{32} електронів.

Точність визначення N_0 у одній коморці мап складає від 5% до 20% [Manucci, 1998 –дивись вище 14]. Оскільки усереднення незалежних значень N_0 здійснюється по всій земній кулі і кількість комірок велика (5184), точність оцінки G на один-два порядки вища.

Результати розрахунків GEC та досліджень його поведінки у різних умовах представлені у роботах [18-24].

Метою роботи [18] було вивчення динаміки глобального вмісту електронів GEC протягом 23-го циклу сонячної активності та порівняння її зі змінами сонячного EUV-випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,1–50 нм, Підкреслено, що головною перевагою розглядання саме GEC є те, що при цьому зникають локальні особливості параметрів іоносфери та визначається динаміка глобальних характеристик.

На рис. 4 представлені варіації GEC протягом 23 циклу та відповідні зміни сонячної активності.

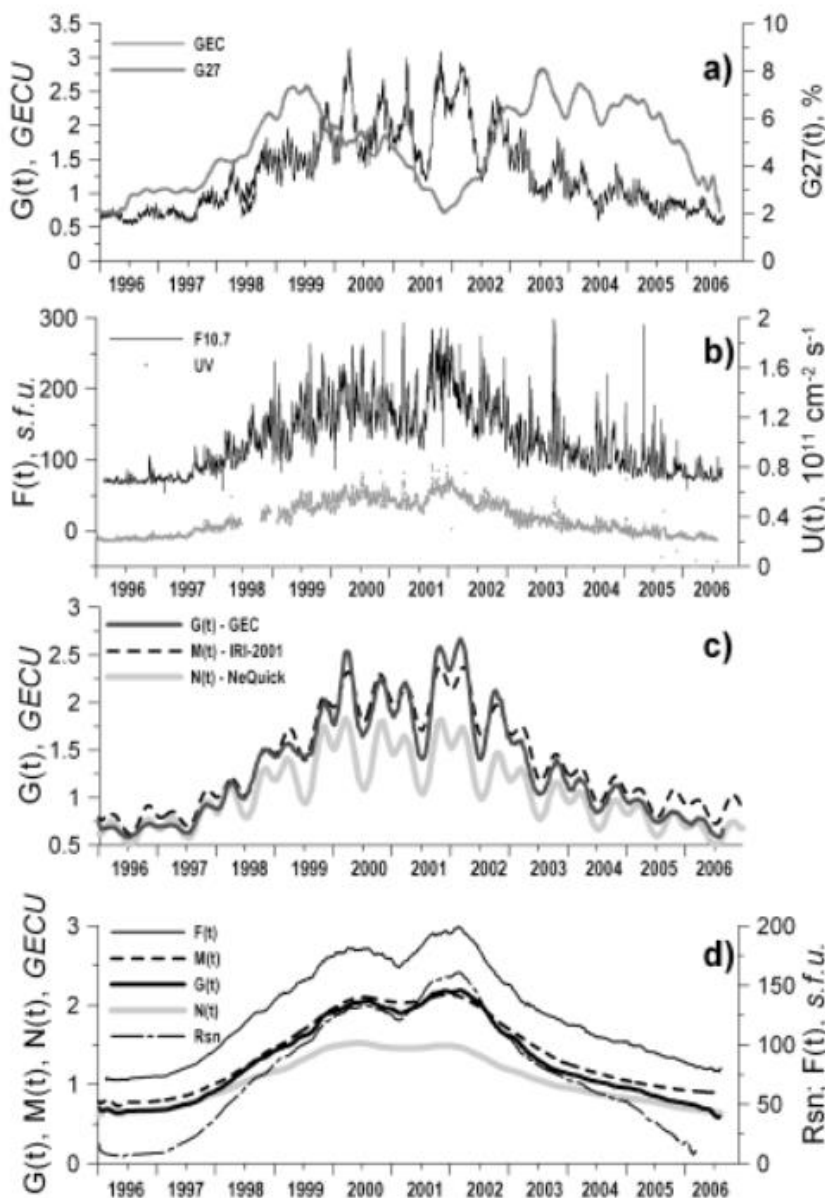


Рис. 4. (а) Варіації GEC (G) для всієї земної кулі (чорна товста крива), відносна амплітуда (%) 27-денних варіацій $G(t)$, відфільтрованих у діапазоні часу 20–40 днів (сіра крива); (б) 10,7-см сонячне радіовипромінювання $F(t)$ (чорний) і сонячні EUV-потоки $U(t)$ в діапазоні довжин хвиль 0,1–50 нм (сірий); (с) експериментальний GEC $G(t)$ та модельований GEC з використанням моделей іоносфери IRI-2001 $M(t)$ та NeQuick $N(t)$, згладжений з 81-денним часовим вікном; (д) згладжені з 365-денним часовим вікном залежності $F(t)$, $M(t)$, $G(t)$, $N(t)$ та щоденні кількісні показники сонячних плям R_{sn} .

Під час 23-го циклу сонячної активності значення GEC варіювалося від $0,8 \cdot 10^{32}$ до $3,2 \cdot 10^{32}$ електронів, слідуючи за змінами екстремального

ультрафіолетового (EUV) випромінювання Сонця та сонячного радіовипромінювання на довжині хвилі 10,7 см. Виявлено: сильну подібність цих варіацій, з помітними 11-річними та 27-денною періодичністю; ефект насичення GEC спостерігається, коли F10.7 збільшується; GEC характеризується сильними сезонними (піврічними) коливаннями з максимальною відносною амплітудою близько 10% під час зростання та спаду сонячної активності та до 30% під час періоду максимуму.

Стаття [19] присвячена іоносферним ефектам сонячних затемнень, сонячних спалахів, сонячного термінатора, землетрусів, тропічних циклонів, великомасштабних іоносферних збурень аврорального походження, запусків ракет. Також представлено аналіз динаміки глобального вмісту електронів.

Підкреслено, що перевага використання GEC полягає в тому, що локальні особливості іоносферних параметрів згладжуються. В результаті можна виявити закономірності, що описують стан і динамічний режим іоносфери в цілому.

Розглянуто динаміку GEC протягом 23-го сонячного циклу (1998–2011).

Порівняння динаміки GEC і часових змін сонячного радіопотоку на довжині хвилі 10,7 см - F10.7- підтверджує факт, що GEC адекватно відображає вплив сонячної активності на іоносферу. GEC характеризується значними сезонними коливаннями (до 30%). Максимальні сезонні коливання спостерігаються під час рівнодення.

Значення та варіації GEC визначаються трьома основними факторами: сонячною активністю, магнітосферними процесами та процесами в нейтральній атмосфері. Цей узагальнений іоносферний параметр можна використовувати як індекс, що відображає стан іоносфери. Крім того, дані GEC можуть бути використані для вирішення обернених задач (для отримання кількісних характеристик потоку сонячного УФ-випромінювання тощо).

У роботі [20] розглядалися середньодобові значення глобального середнього вертикального TEC - N_{0gl} .

Підкреслено, що глобальне середнє значення ТЕС можна перетворити на глобальний вміст електронів (GEC) шляхом множення на розмір поверхні S іоносферного шару: $S = 4\pi R^2$, де $R = 6371 + 450$ км.

Були виявлені флуктуації - N_{0gl} з періодами 11 років, 1 рік, 0,5 року та 27 днів. Досліджені реакція середнього глобального ТЕС на сонячні спалахи та кореляція між спектральними компонентами варіацій N_{0gl} і рівнем сонячної активності.

У роботі [21] розраховані глобальні середні ТЕС з використанням глобальних мап-JPL GIM. Вказано, що цю величину можна легко перетворити на GEC, помноживши на площу сфери ($4\pi R^2$) з радіусом від центра Землі до іоносферних висот (350-450 км) .

Тобто, середній ТЕС можна розуміти як параметр ідеалізованої іоносфери, в якій ТЕС розподілений рівномірно, і в цілому ця іоносфера має такий самий вміст електронів, як і реальна іоносфера, тому глобальний середній ТЕС повинен відображати глобальні характеристики іоносфери.

Проаналізовано дані ТЕС за 11 років (1998–2008), отримані в JPL (Jet Propulsion Laboratory), з метою дослідження кліматології іоносфери та вивчення здатності середнього ТЕС відстежувати мінливість сонячної активності та фіксувати загальні річні/піврічні коливання іоносфери в певних діапазонах широт. Узагальнюючи, основні результати можна описати таким чином. Середнє значення ТЕС, усереднене в глобальному масштабі та за трьома широтними поясами (низькі, середні та високі широти) в одній (південній або північній) півкулі та обох півкулях, демонструє сильні модуляції від сонячного циклу та сонячної ротації, а також річні/піврічні коливання. Процес усереднення може значно зменшити шуми, які частково виникають від гравітаційних хвиль та інших процесів. Річна складова середнього ТЕС має більшу амплітуду в південній півкулі, ніж у північній. Річні фази відносно стабільні в південній півкулі і зміщуються в бік весняного рівнодення, а в деяких випадках навіть до грудня сонцестояння в північній півкулі. Щорічна

асиметрія та півкульова різниця більш виражені при збільшенні сонячної активності.

У [22] порівняно досліджуються реакції іоносфери на сонячний цикл та варіації сонячної ротації екстремального ультрафіолетового (EUV) випромінювання з використанням середньодобового глобального вмісту електронів (GEC) та 0,1–50 нм щоденного потоку EUV. GEC добре корелює з EUV як за сонячним циклом, так і за сонячною ротацією; проте, реакції GEC на сонячний цикл і зміни сонячної ротації EUV значно відрізняються за такими двома аспектами: (1) Існує значний часовий лаг між варіаціями GEC та EUV, пов'язаними з обертанням Сонця; цей лаг переважно становить 1 день і, як правило, має тенденцію до зменшення зі зниженням сонячної активності. Однак для варіацій GEC та EUV, пов'язаних із сонячним циклом, очевидних часових лагів не спостерігається. (2) Нахили залежностей GEC від EUV є різними для сонячного циклу та варіацій сонячної ротації GEC та EUV; нахил GEC та EUV сонячного циклу є вищим, ніж нахил GEC та EUV сонячної ротації, і ця різниця спостерігається в різних сезонах та широтах.

У роботі [23] було досліджено часові зміни вмісту електронів в іоносфері, проаналізувавши дані глобальних мап N_0 GIMs за період з 1998 по 2020 рік.

Розраховувались глобальний вміст електронів (GEC), вміст електронів в півкулі (HEC) та регіональний вміст електронів (REC).

Тут GEC, HEC та REC відповідно означають кількість електронів у всій іоносфері, півкулі та в конкретних широтних регіонах. Всі ці параметри вимірюються в одиницях GECU, таких як $1\text{GECU} = 10^{32}$ електрони.

На рис.5 представлені дані про поведінку кількості електронів у всій іоносфері, та окремо у півкулях.

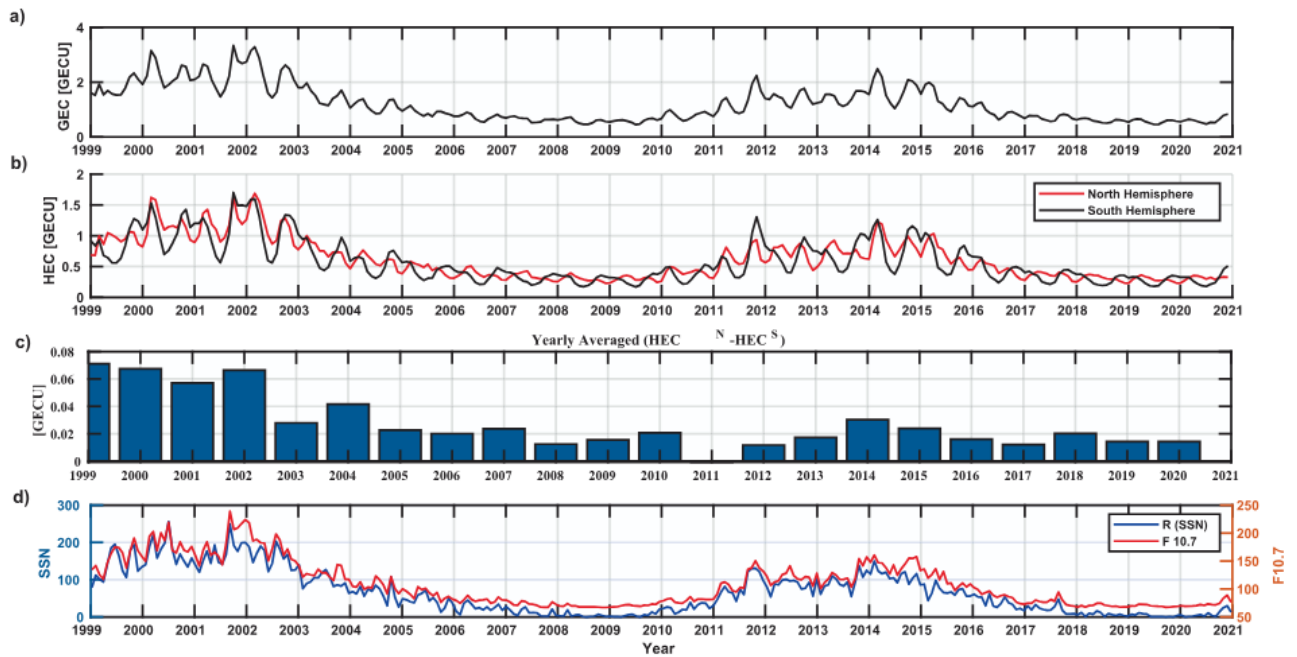


Рис. 5. а) глобальний вміст електронів у GECU з січня 1999 року по грудень 2020 року; Рис. 5. б) вміст електронів у північній півкулі (червоний) та південній півкулі (чорний) з 1999 по 2020 рік; в) різниця в середньорічному вмісті електронів у півкулях; г) сонячний радіопотік F10.7 (червоний) та число сонячних плям, R (синім кольором), з 1999 по 2020 рік.

Регіональні особливості передає рис. 6.

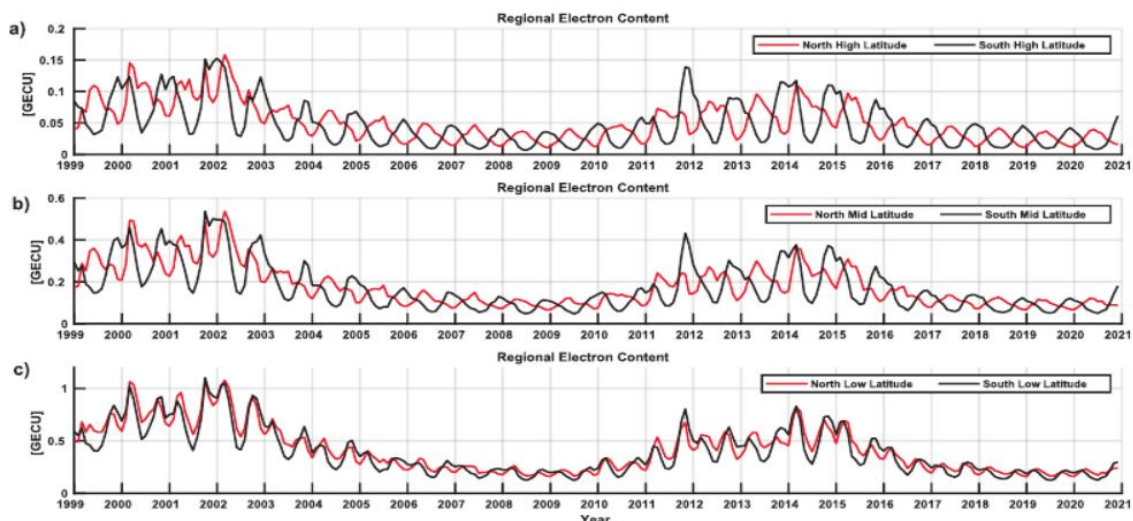


Рис. 6. Регіональні особливості електронного вмісту

На рис. 6(а) представлено REC у високих широтах (60:87,5) з 1999 по 2020 рік в обох півкулях. Видно два піки, що відповідають максимуму сонячного циклу. Значення REC у високих широтах значно менші, ніж у

середніх і низьких широтах. Крім того, півкульові відмінності є більшими під час максимальної фази сонячного циклу, ніж під час мінімальної фази. Протягом грудня 2011 року REC у південних високих широтах приблизно на 334% вищий, ніж у північних широтах.

Рис. 6(b) показує поведінку REC для середніх широт.

На рис. 6(c) представлено регіональний вміст електронів у низьких широтах (0:30) у північній (червоний) та південній півкулі (синій) з 1999 по 2020 рік.

Можна помітити, що REC показує два піки, що відповідають сонячному максимуму з максимумом 1,085 GECU (1.102 GECU) і 0,8301 GECU (0,8160 GECU) у північній (південній) півкулі протягом жовтня 2001 і березня 2014 року відповідно.

Вейвлет перетворення було застосовано до глобального та півсферного вмісту електронів; його спектр потужності відображається на рис. 7: зверху вниз представляється GEC, HEC_N та HEC_S відповідно. (HEC_N - вміст електронів у північній півкулі; HEC_S - вміст електронів у південній півкулі).

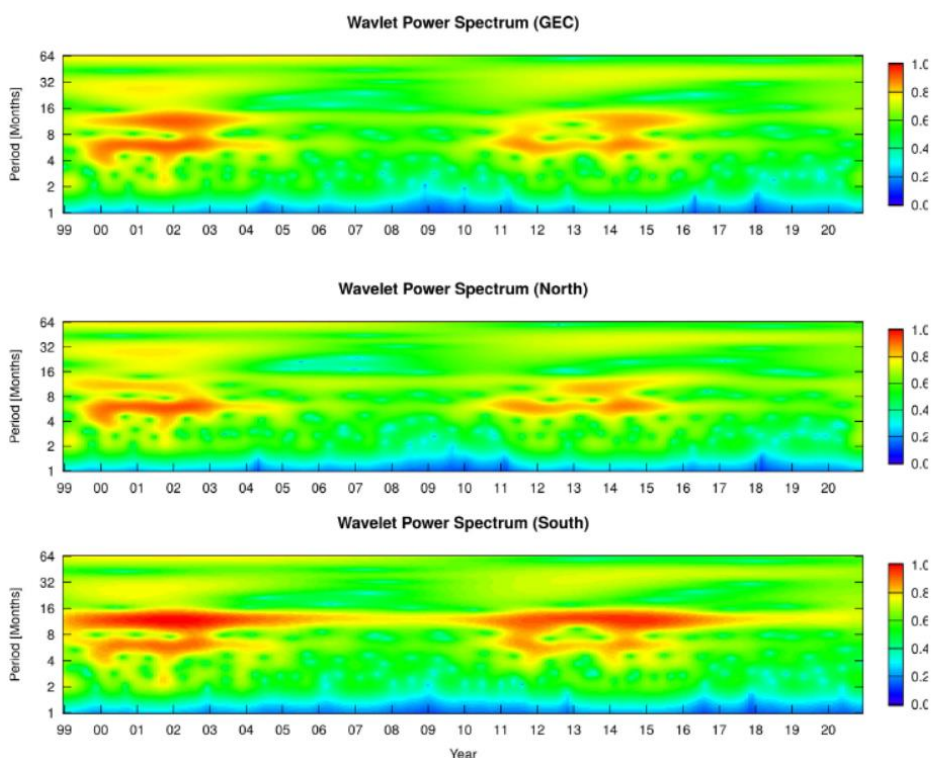


Рис. 7. Вейвлет перетворення для GEC, HEC_N та HEC_S

Спектр потужності показує спільні особливості протягом розглянутого інтервалу. Першою характеристикою є збільшення вкладу періодів від 5 до 7 місяців, що відповідає піврічним коливанням. Другою характеристикою є очевидне збільшення потужності періодів між 11 і 13 місяцями, що відповідає річним коливанням навколо максимальної фази сонячних циклів 23 і 24. Також спостерігаються коливання з періодичністю 32 місяці, потужність яких посилюється навколо сонячного максимуму. Спектр потужності GEC показує, що річна та піврічна компоненти під час максимальної фази сонячного циклу 23 є сильнішими, ніж відповідна фаза для 24 циклу. Іншою цікавою особливістю, яку виявляє спектр потужності, є те, що піврічні коливання є найбільш домінуючою компонентною в північній півкулі, тоді як річні коливання домінують у південній півкулі.

В цілому у цій роботі показано:

1. Глобальний та регіональний вміст електронів змінюється лінійно з F10.7 та EUV за низької сонячної активності. Однак під час високої сонячної активності спостерігається нелінійний ефект у REC на всіх широтах з максимальним ефектом у регіоні низьких широт. Ступінь нелінійності ефекту є більш вираженим для індексу F10.7 у порівнянні з потоком EUV.

2. Під час піку сонячного циклу 23, GEC є приблизно на 34% вищим, ніж для піку сонячного циклу 24, що відповідає високому EUV для попереднього циклу.

3. 32-місячні коливання спостерігаються навколо максимальної фази сонячного циклу і можуть бути пов'язані з QBO стратосфери (QBO – квазидворічна осциляція – регулярне, періодичне коливання вітрів у стратосфері над екватором, що триває в середньому 28–29 місяців).
4. Річні коливання вмісту електронів набагато сильніші в південній півкулі і змінюються відповідно до фази сонячного циклу. Північна півкуля демонструє відносно слабкі річні коливання і слабо змінюється відповідно до сонячного циклу. Зимові аномалії та річна асиметрія зменшують амплітуду регулярних річних коливань з максимальним ефектом у низьких широтах.

5. Асиметрія півкуль в амплітуді напіврічних коливань є максимальною для низьких широт, за ними слідує середні та високі широти відповідно.

Важливим питанням є дослідження впливу магнітних бур на іоносферу, зокрема на електронний вміст іоносфери. Однак слід зазначити, що звичайно розглядалися варіації N_0 в окремих районах Землі, а не варіації глобального чи півкульового вмісту електронів. З робіт, де розглядався вплив магнітних бур на GEC, можна відзначити [25, 26].

У [25] при аналізі змін глобального вмісту електронів (GEC) під час геомагнітних бур, було виявлено, що відношення «GEC/GECQT» тісно корелює з геомагнітним індексом K_p та індексом Dst, зваженим за часом, де GECQT є еталонним значенням у спокійний час. Спокійний день визначається за геомагнітним індексом K_p з умовою $0 = < K_p < 3,0$. Показано, що GEC/GECQT буде зменшуватися із збільшенням індексу сонячного потоку F10.7. Крім того, побудовано лінійну модель для реакції GEC під час бурі. Для розрахунку коефіцієнтів моделі було використано 82 бурі, що відбулися в 1999-2011 роках, а ефективність моделі була перевірена за допомогою даних про 8 бурі в 2012 році шляхом порівняння результатів моделі з спостережуваними значеннями GEC.

У роботі [26] аналізувались середні по всій Землі та по півкулях значення повного електронного вмісту N_0 . Відповідні часові залежності наведені на рис.8. Тут же наводяться дані про сонячну та геомагнітну активність.

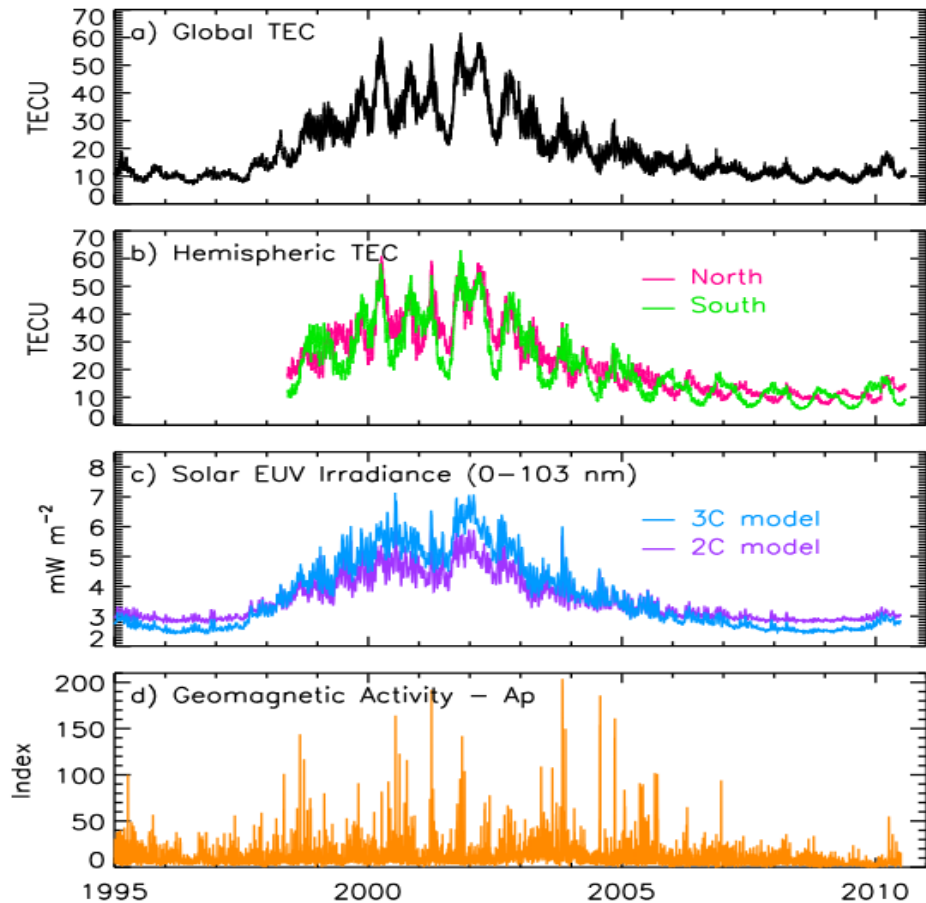


Рис.8. (а) Часовий ряд середньодобового глобального загального вмісту електронів (TEC), отриманого за допомогою GPS, за період з 1995 по 2010 рік. (b) Середньодобовий TEC з бази даних IGS у північній (червона крива) та південній (зелена крива) географічних півкулях за період з 1998 по 2010 рік. (c) Відповідні коливання загальної інтенсивності EUV (сонячне екстремальне ультрафіолетове випромінювання). (d) Коливання геомагнітної активності, що відображаються щоденним індексом A_p .

В цілому за результатами роботи побудована лінійна модель кліматології середнього загального вмісту електронів в іоносфері (TEC), яка одночасно враховує вплив сонячної та геомагнітної активності, коливання на чотирьох частотах (з періодичністю півроку, року, трьох років та двох років - чотири коливання з періодами $p = 182,6, 365,25, 121,7$ і $730,5$ днів) та довгострокову тенденцію. Наявність періодичності ілюструє рис.9.

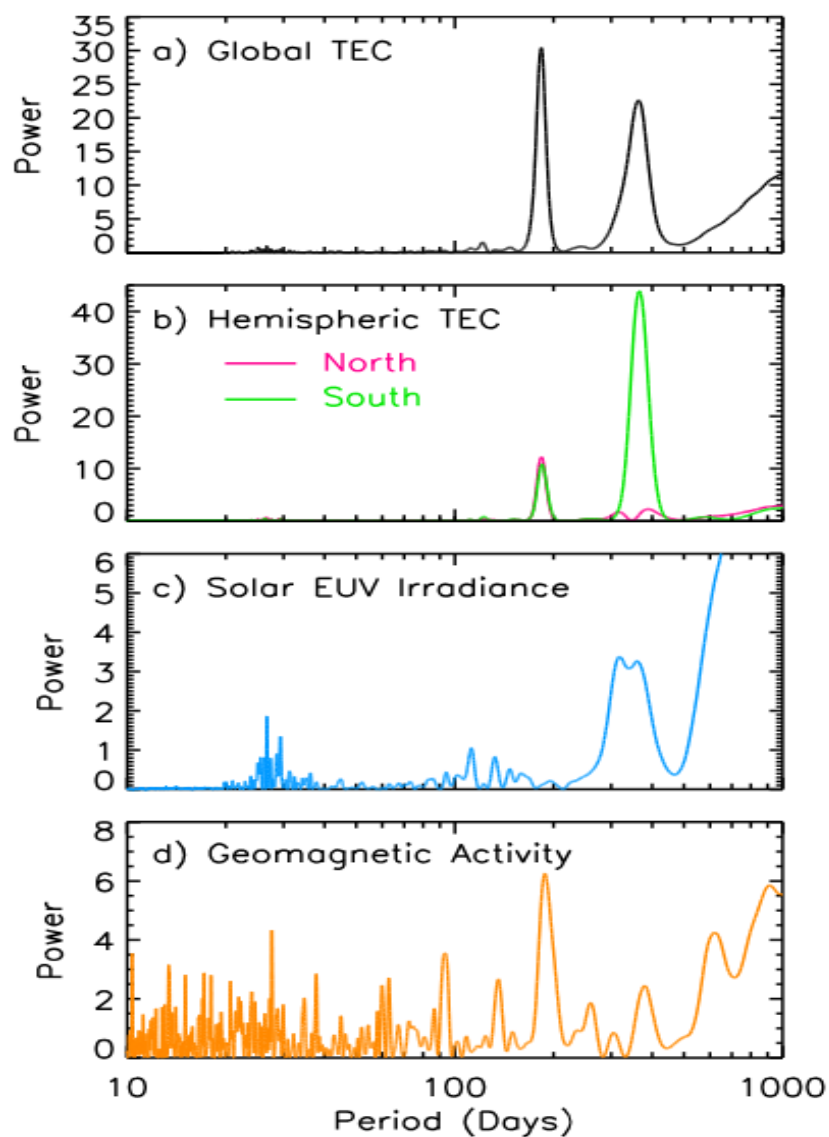


Рис. 9. Порівняння періодограм часових рядів на рисунку 1 за періодами від 10 до 1000 днів для (а) глобального ТЕС, (б) ТЕС у північній (червона крива) та південній (зелена крива) географічних півкулях, (в) сонячної EUV-інтенсивності випромінювання та (г) геомагнітної активності.

В цілому розроблена модель відображає понад 98% варіацій у середньодобовому глобальному ТЕС, отриманому з спостережень GPS протягом 16 років з 1995 по 2010 рік, і дозволяє оцінити загальний внесок у глобальний ТЕС від геомагнітної активності та сонячної активності.

Встановлено, що геомагнітна активність є порівняно незначною складовою середньодобової глобальної та півкульової кліматології ТЕС, яка має значення лише в часових масштабах декількох днів у розробленій моделі.

Чистий геомагнітний вплив полягає у зменшенні глобального ТЕС, що означає, що загалом виснаження іоносферного вмісту електронів під час негативної фази геомагнітної бурі перевищує збільшення в початковій позитивній фазі. З 1995 по 2010 рік чисте зменшення перевищувало 5 TECU лише 11 (з 5844) днів. Геомагнітні впливи були більшими в сонячному циклі 19, ніж у наступних циклах; з 1954 по 1965 рік, ймовірно, було 16 епізодів геомагнітно-індукованих глобальних зменшень ТЕС, що перевищували 5 TECU.

2.4. Висновки

З огляду літератури можна зробити такі висновки:

1. Для глобального моніторингу космічної погоди одним з основних методів є реєстрації (за допомогою існуючої широкої мережі приймачів) радіосигналів супутників різних навігаційних систем, за якими будуються мапи глобального розподілу повного електронного вмісту іоносфери.

2. Для досліджень зовнішнього впливу (сонячна активність, магнітні бурі) на іоносферу Землі в цілому важливим параметром є глобальний вміст електронів (GEC), що визначається з використанням глобальних карт повного електронного вмісту і дорівнює загальній кількості електронів у навколосемному просторі до висот ~ 20 тис. км. Перевагою цього параметра є те, що нівелюються локальні характеристики іоносфери (зокрема добові, широтні та довготні залежності електронного вмісту) і можна дослідити процеси, зумовлені зовнішнім впливом на всю іоносферу – сонячна активність, магнітні бурі.

3. Поки що бракує даних для побудови детальної моделі поведінки GEC в періоди магнітних бур, тим паче, беручи до уваги, що кожна буря має свої особливості.

3. Розрахунок глобального електронного вмісту іоносфери та вмісту електронів у півкулях у період магнітних бур 2015 р. Аналіз результатів.

3.1. Аналіз магнітної обстановки у період 2010-2022 рр. Вибір періодів для розрахунків глобального вмісту електронів і вмісту електронів у північній та південній півкулях

Навесні та влітку 2015 року на Сонці відбулися потужні корональні викиди маси (КВМ) у бік Землі. Корональні викиди плазми, що досягли магнітосфери Землі в періоди з 17 по 18 березня і з 22 по 23 червня 2015 року, спровокували дві сильні магнітні бурі класу G4, в яких максимальні значення Kp-індексу дорівнювали 8.

По часових залежностях погодинних значень Dst-індексу [27] було проаналізовано рівень магнітної активності у період 2010-2022 рр. Графік, що ілюструє поведінку Dst-індексу у цей період, наведено на рис. 10.

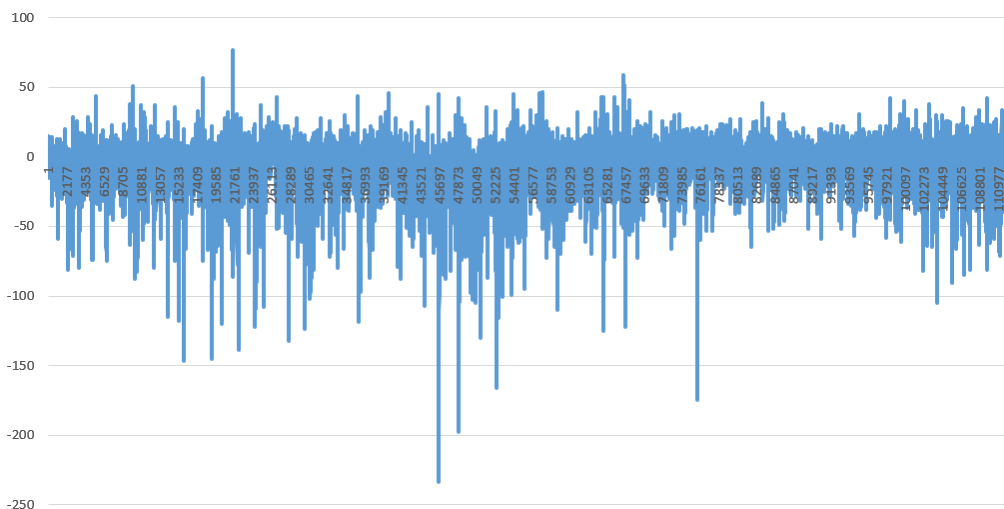


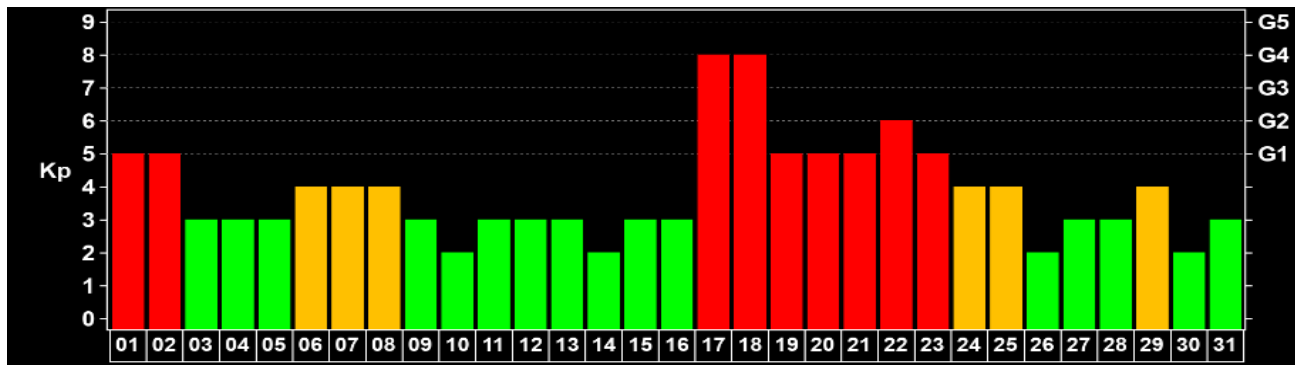
Рис. 10. Часові залежності Dst

Для подальших розрахунків відповідних іоносферних параметрів (GEC - глобальний вміст електронів, NEC_N - вміст електронів у північній півкулі; NEC_S - вміст електронів у південній півкулі) були вибрані березень, червень та грудень 2015 року, коли спостерігались сильні магнітні бурі. Це також є періодами рівнодення та сонцестояння, які вважаються особливими при розгляданні питань космічної погоди.

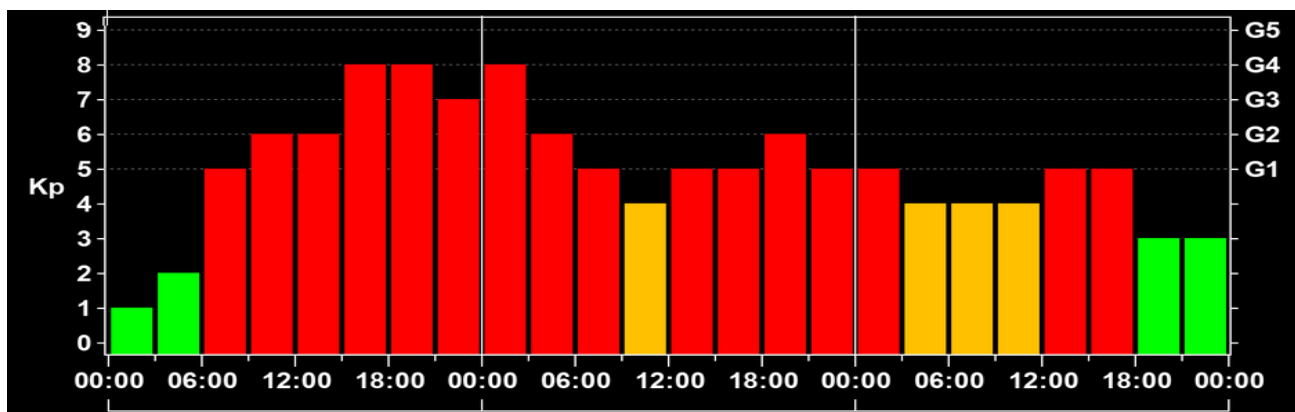
Індекси магнітної активності (Dst-погодинні значення, Кр-тригодинні значення) для цих періодів наведені на рис.11. [28]

а) буря 17 березня 2015

Кр



Внизу показані дні місяця

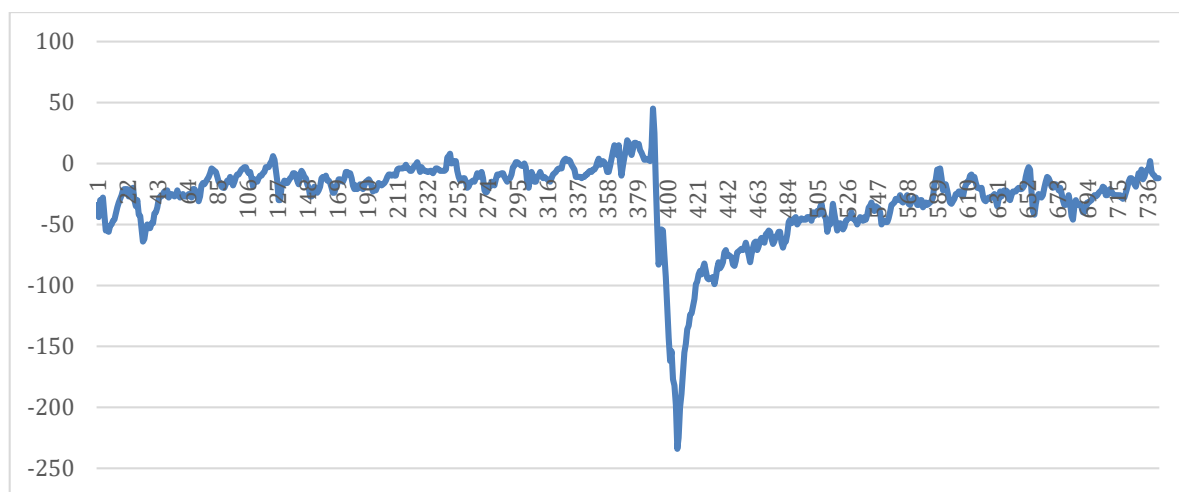


17 березня

18 березня

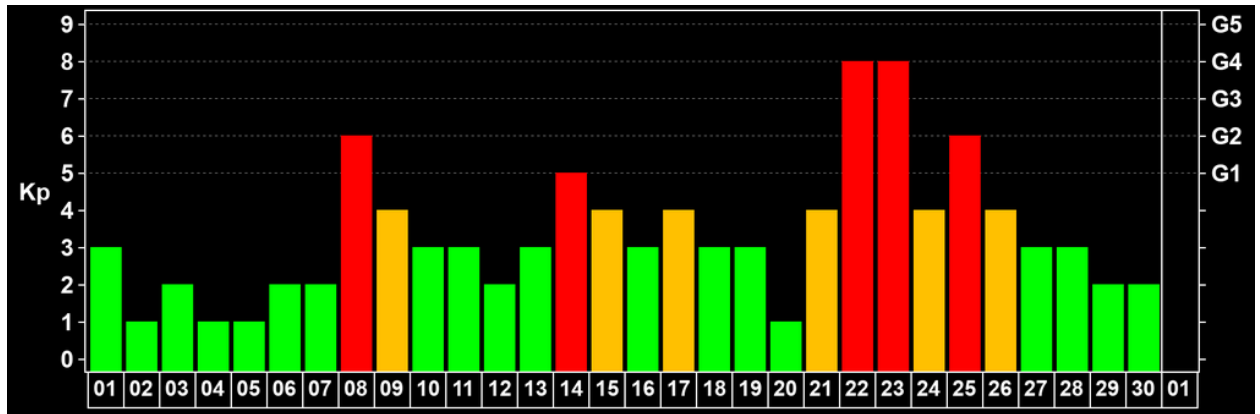
19 березня

Dst

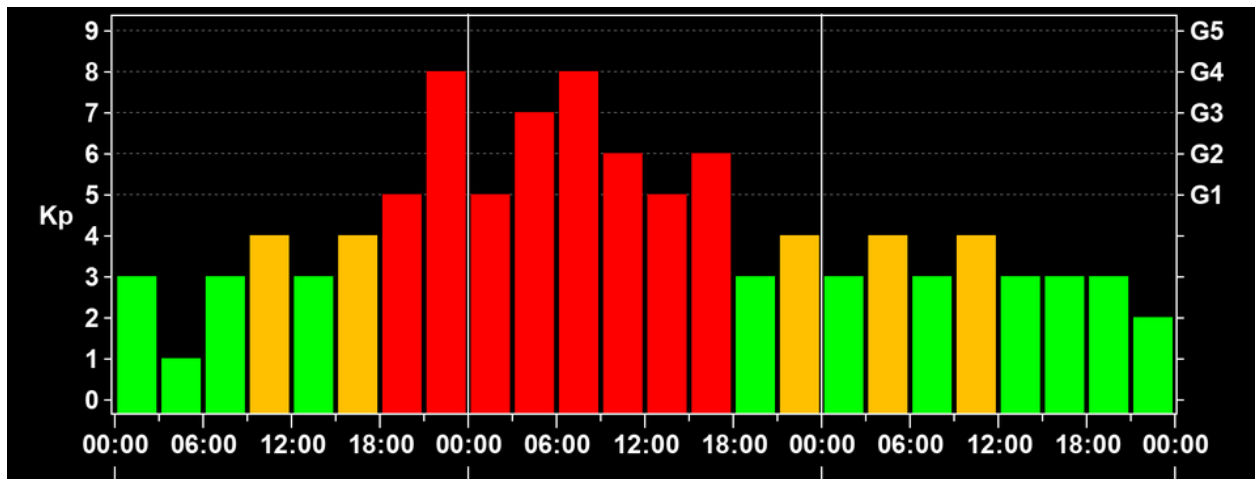


б) буря 22 червня 2015

Кр



Внизу показані дні місяця

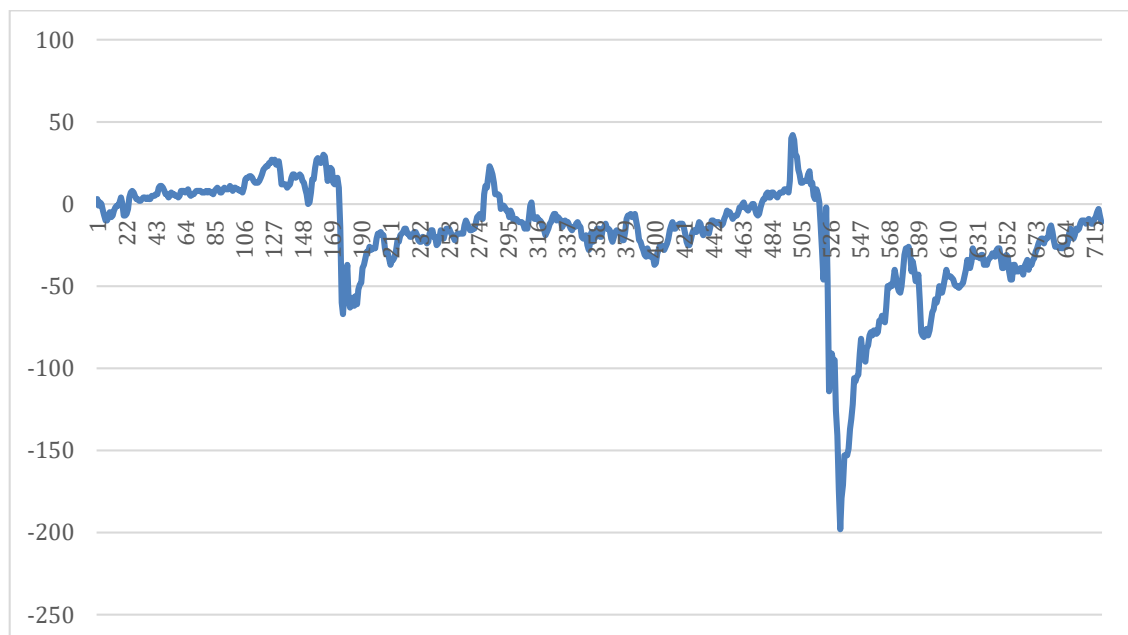


22 червня

23 червня

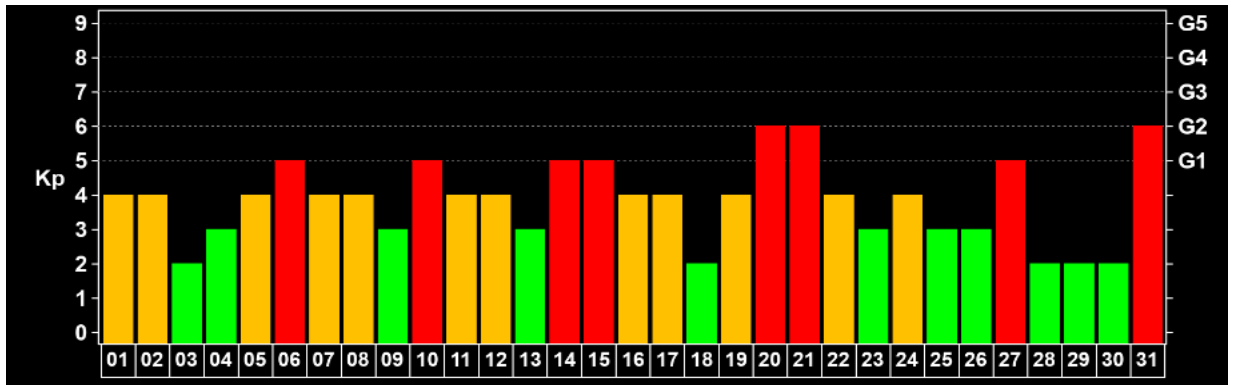
24 червня

Dst

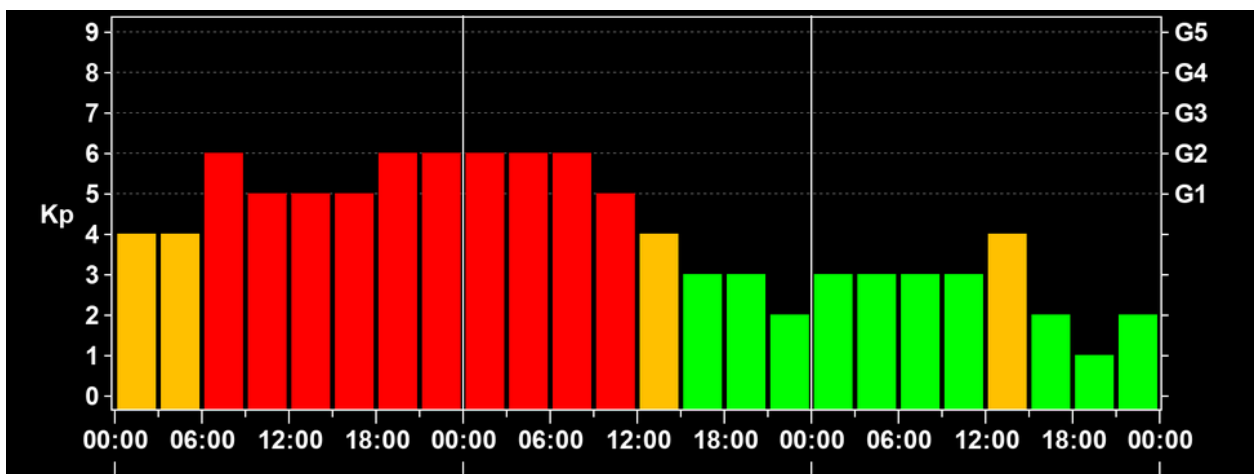


в) буря 20 грудня 2015

Кр



Внизу показані дні місяця



20 грудня

21 грудня

22 грудня

Dst

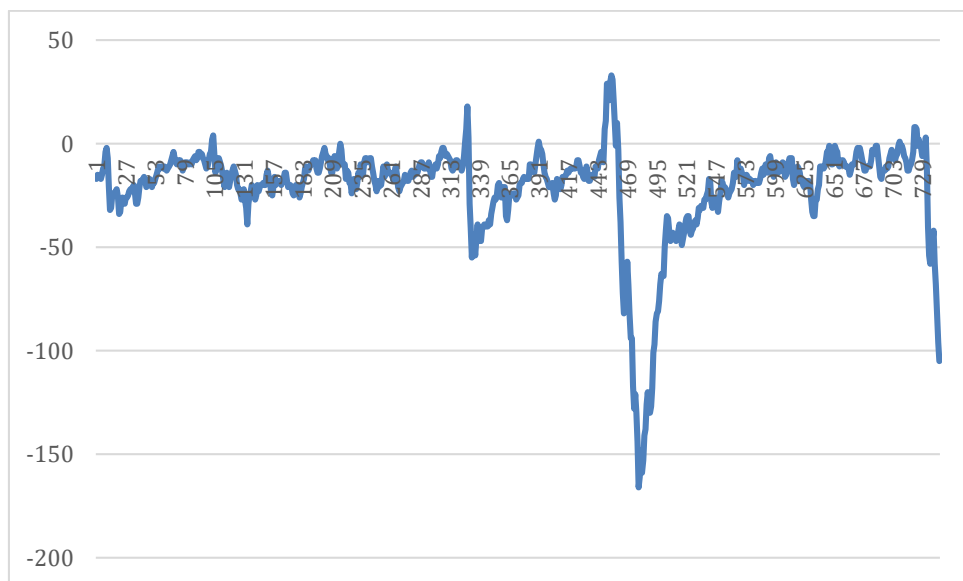


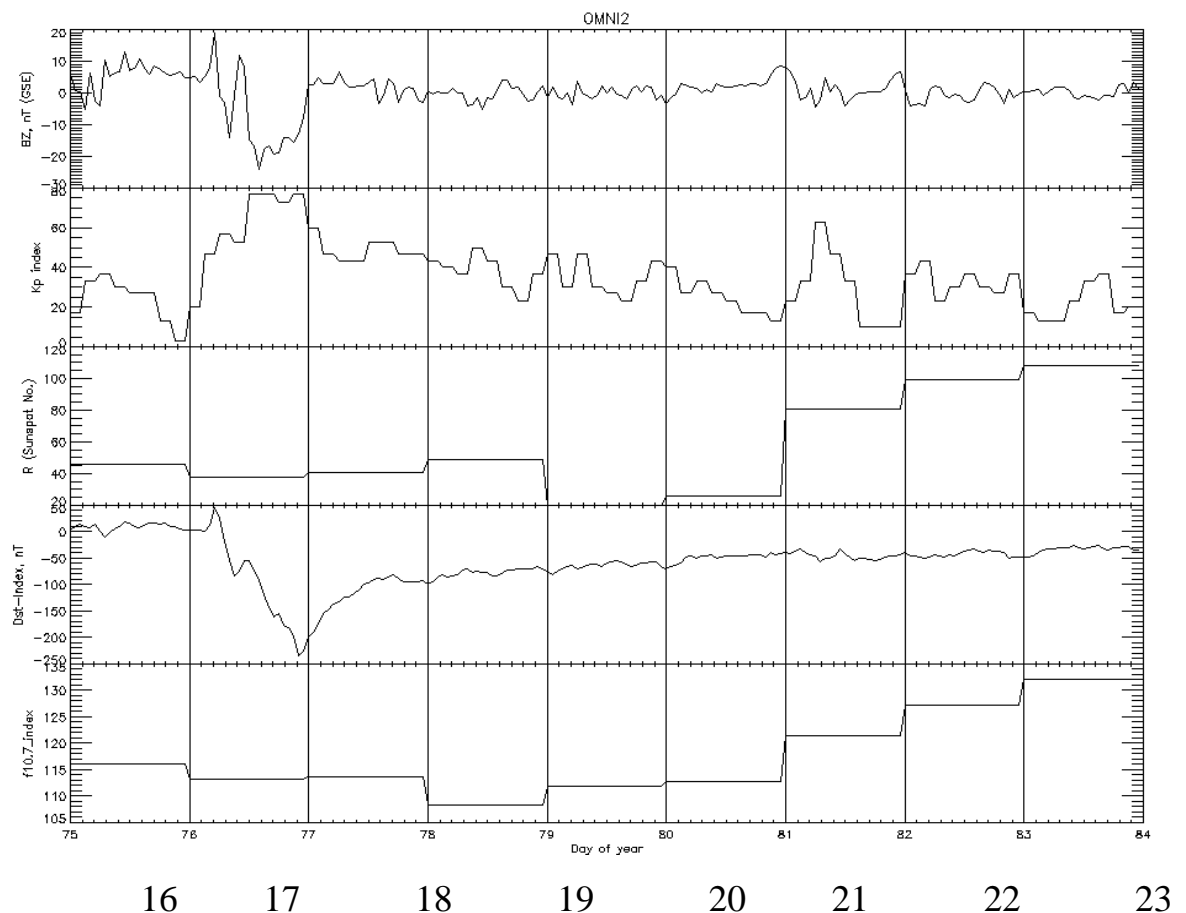
Рис. 12. Индексы Dst, Kp: а) березень 2015; б) червень 2015; в) грудень 2015

Більш детально сонячно-магнітні умови [29] для цих періодів наведені на рис.11-12.

Крім індексів Kp та Dst тут є і такі характеристики:

Vz-компонента – це позначення для вертикальної (північ-південь) складової міжпланетного магнітного поля. Коли південний напрямок Vz негативний: Vz-компонента спрямована на південь, вона ефективно з'єднується з північним напрямком магнітного поля Землі. Це призводить до посилення геомагнітної активності, виникнення магнітних бур та інтенсивного полярного сяйва (авроральної активності).

R (відносна кількість сонячних плям) та f10,7 (середньодобовий потік радіовипромінювання Сонця на довжині хвилі 10,7 см) визначають рівень сонячної активності.



24

Рис. 13. Сонячно-магнітні умови під час бурі 17 березня 2015

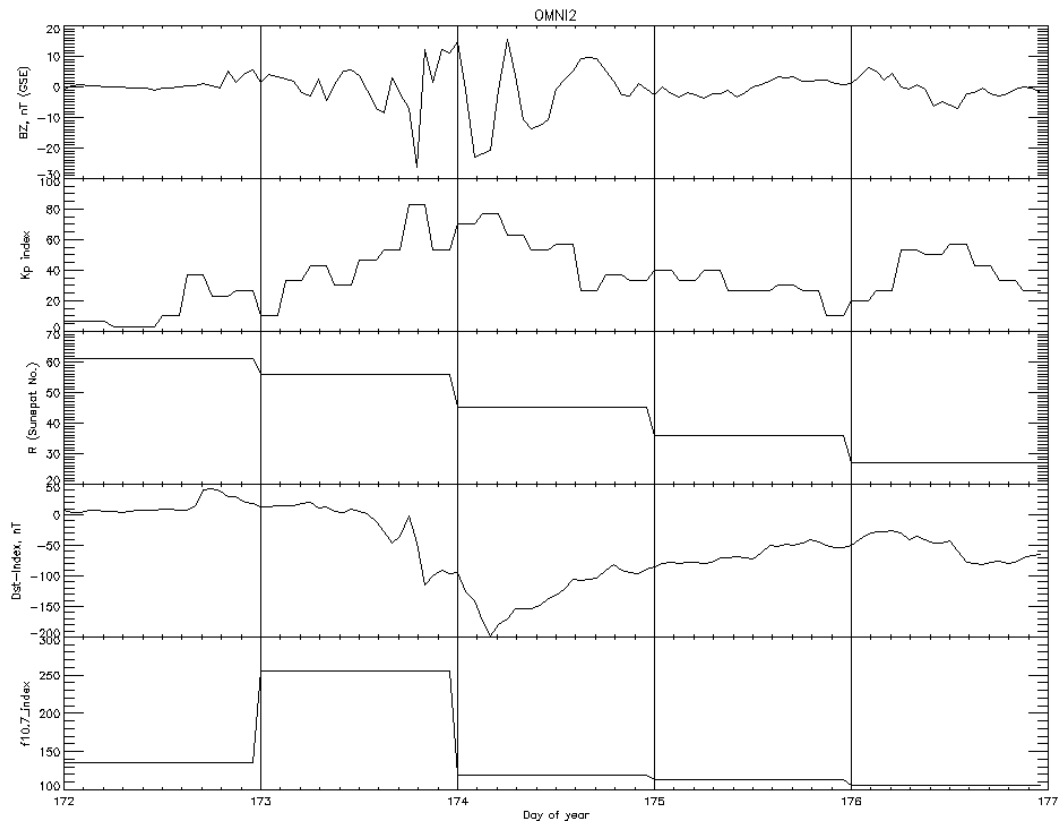


Рис. 14. Сонячно-магнітні умови під час бурі 22 червня 2015

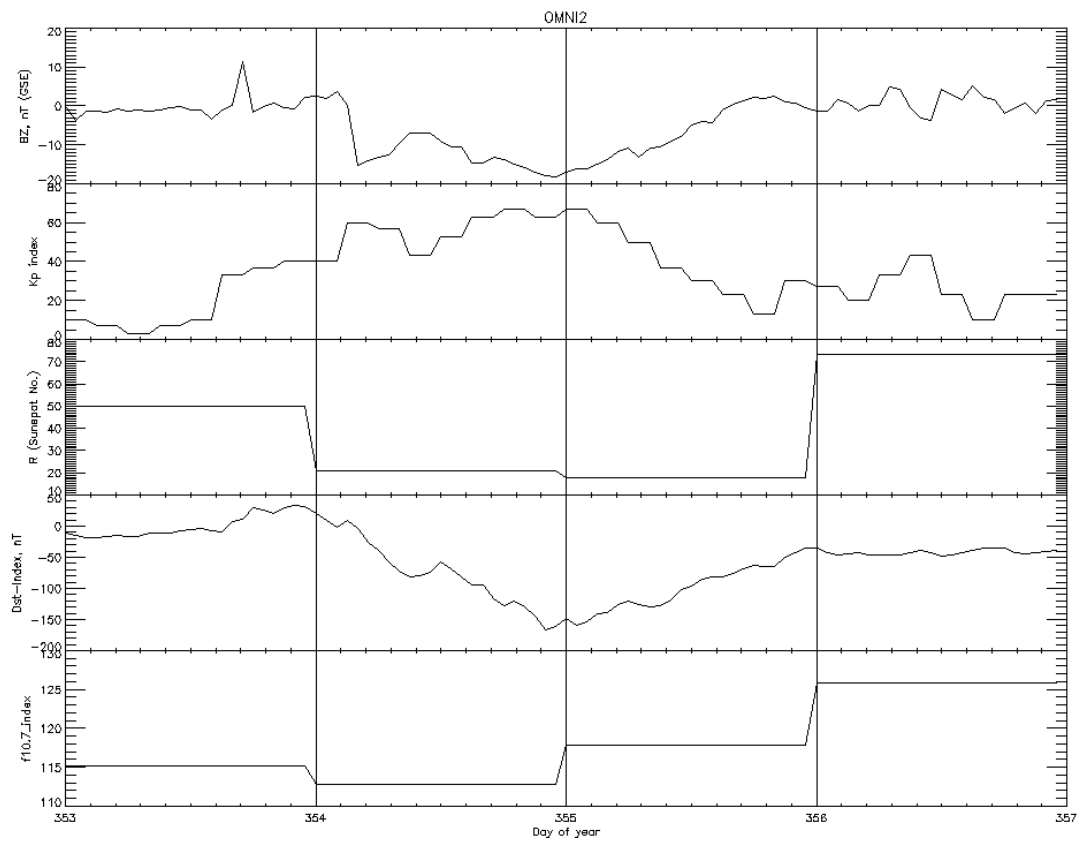


Рис. 15. Сонячно-магнітні умови під час бурі 19 грудня 2015

Згідно з класифікацією за індексом Dst буря у березні та червні відносяться до екстремальних (Dst досягав - 234, -204 відповідно), буря у грудні – до сильних (Dst досягав – 166).

Розглянемо як проходили ці бурь.

Буря 17 березня 2015 року (дуже сильна класу G4).

О 4:45 UT 17 березня стався раптовий початок бурі (SSC). Буря мала початкову фазу тривалістю 1,5 години, двоступеневу основну фазу тривалістю 16,5 години. Під час основної фази індекс Dst немонотонно знижувався і досяг мінімуму -234 нТ о 22:47 UT (~22-23 UT) того ж дня. Рання фаза відновлення почалася о 23:06 UT; пізня фаза почалася о 00:16 UT 18 березня і тривала до 14:00 UT 25 березня. Під час основної та ранньої фаз відновлення планетарний індекс Kp зріс до 8 [30, 31].

Буря 22 червня 2015 року (дуже сильна класу G4).

Початок шторму 22 червня 2015 року припадає на ~18.36 UT. Мінімум Dst-індексу (-204 нТл) спостерігався в ~04.30 UT 23 червня 2015 року [32]. Фаза відновлення почалася приблизно о 4:30 UT; однак відновлення було досить повільним і поступовим.

Буря 19 грудня 2015 року (сильна за індексом Dst, класу G2) [33].

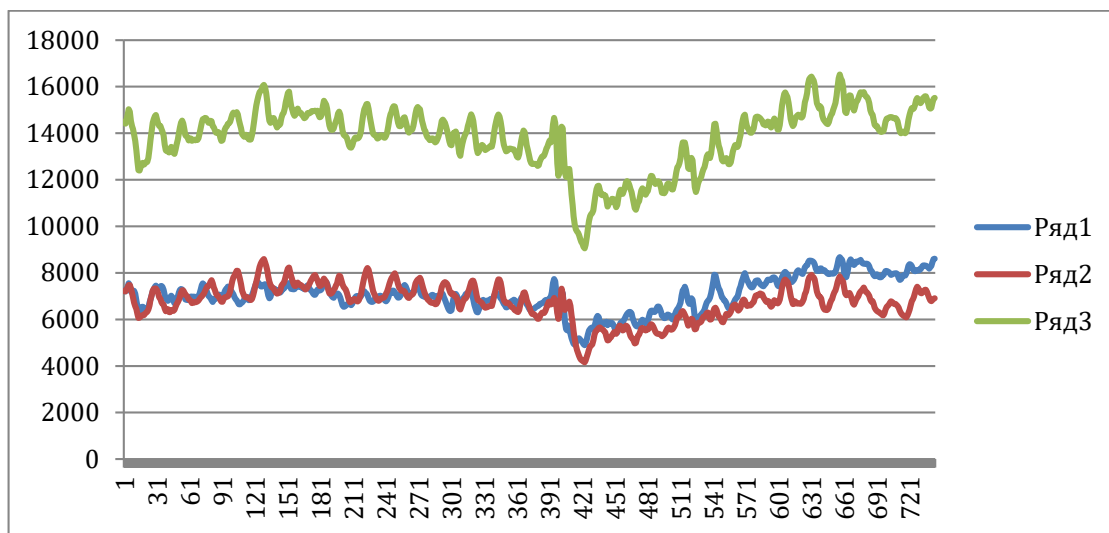
Буря почалась (SSC) в 16:18 19 грудня. Головна фаза бурі тривала ~19 годин (3:42-22:52 20 грудня, min Dst=-166), а фаза відновлення 86,4 години (22:52 20 грудня – 13:22 24 грудня).

3.2. Методика та результати розрахунків глобального вмісту електронів та вмісту електронів у півкулях

Розрахунки глобального вмісту електронів (GEC), вмісту електронів у північній півкулі (NEC_N) та вмісту електронів у південній півкулі (NEC_S) проводились з використанням даних [34] про розподіл вертикального вмісту електронів N₀ по Землі з часовою роздільністю 1 година та просторовою роздільністю 5⁰ по довготі та 2,5⁰ по широті. Далі розраховувались середні значення N₀ по півкулях, а далі множенням на площу полусфери (2πR², де R-

радіус Землі) отримані значення вмісту електронів (кількості електронів) у півкулях NEC_N та NEC_S . Глобальний вміст GEC визначався як $GEC = NEC_N + NEC_S$. Результати розрахунків за березень, червень та грудень 2015 року представлені на рис. 16-18 (значення тут і далі представлені в одиницях 10^{28} електронів)

а)



б)

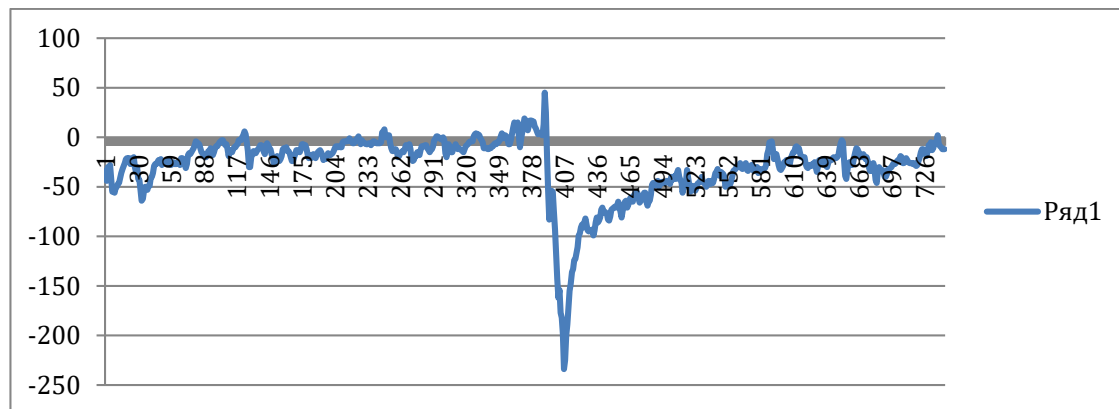
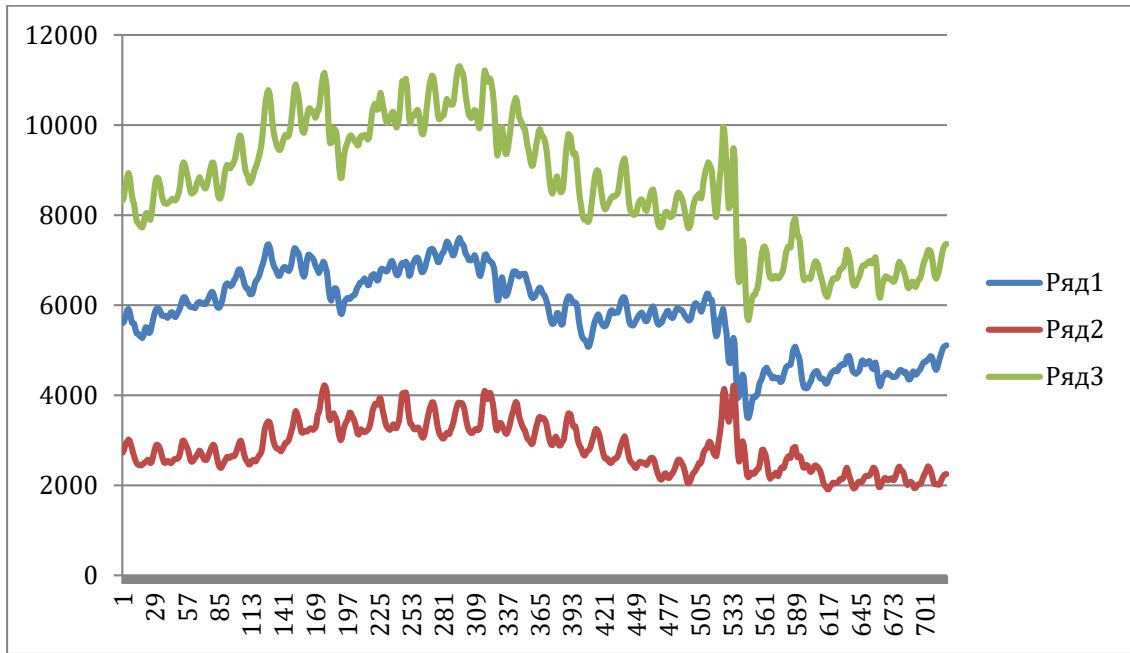


Рис.16. Погодинні часові залежності за березень 2015 року: а) кількості електронів у північній та південній півкулях (ряди 1 і 2, відповідно) та глобальної кількості електронів (ряд 3); б) індекса магнітної активності Dst

а)



б)

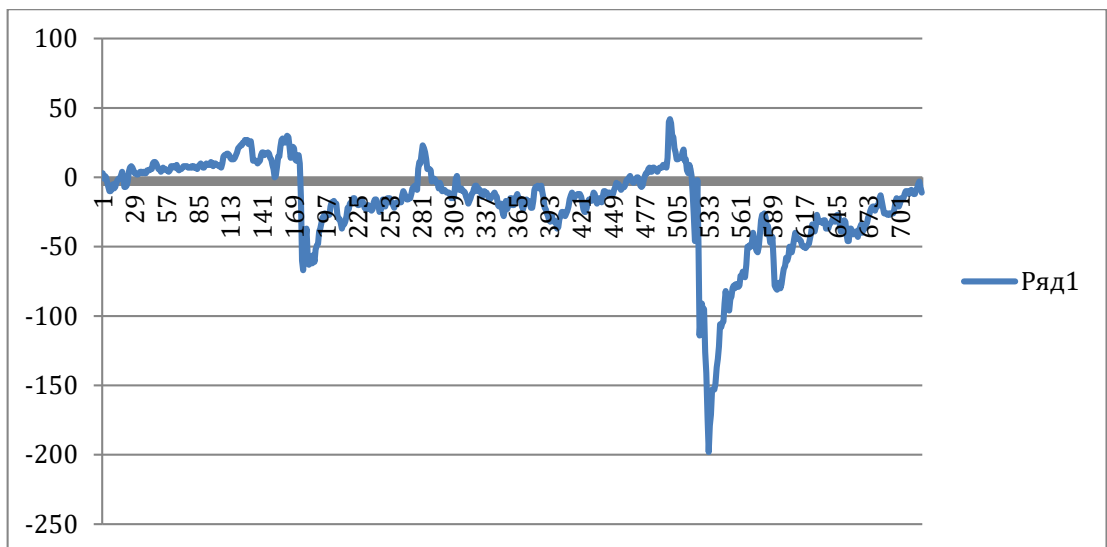


Рис.17. Погодинні часові залежності за червень 2015 року: а) кількості електронів у північній та південній півкулях (ряди 1 і 2, відповідно) та глобальної кількості електронів (ряд 3); б) індекса магнітної активності Dst

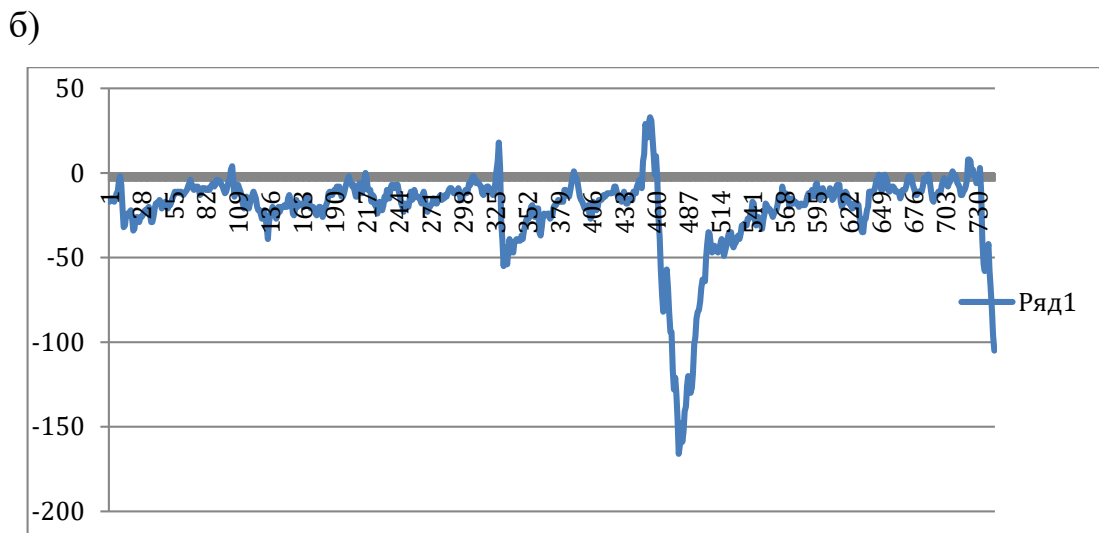
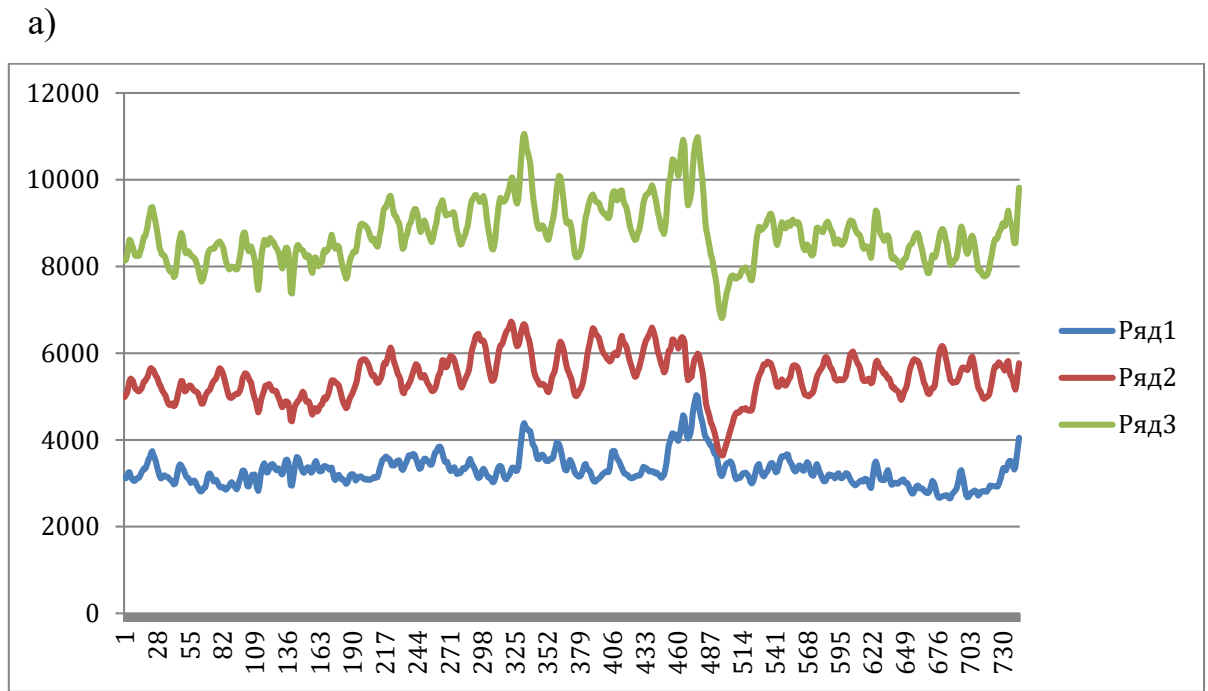


Рис.18. Погодинні часові залежності за грудень 2015 року: а) кількості електронів у північній та південній півкулях (ряди 1 і 2, відповідно) та глобальної кількості електронів (ряд 3); б) індекса магнітної активності Dst

З використанням цих даних були одержані характеристики відгуку (GEC), (HEC_N) та (HEC_S) на магнітні бурі. Розраховувались такі величини: час запізнення мінімуму (GEC), (HEC_N) та (HEC_S) відповідно до мінімуму Dst – ΔT_{\min} , ступінь зменшення кількості електронів – відношення δ їх максимальних

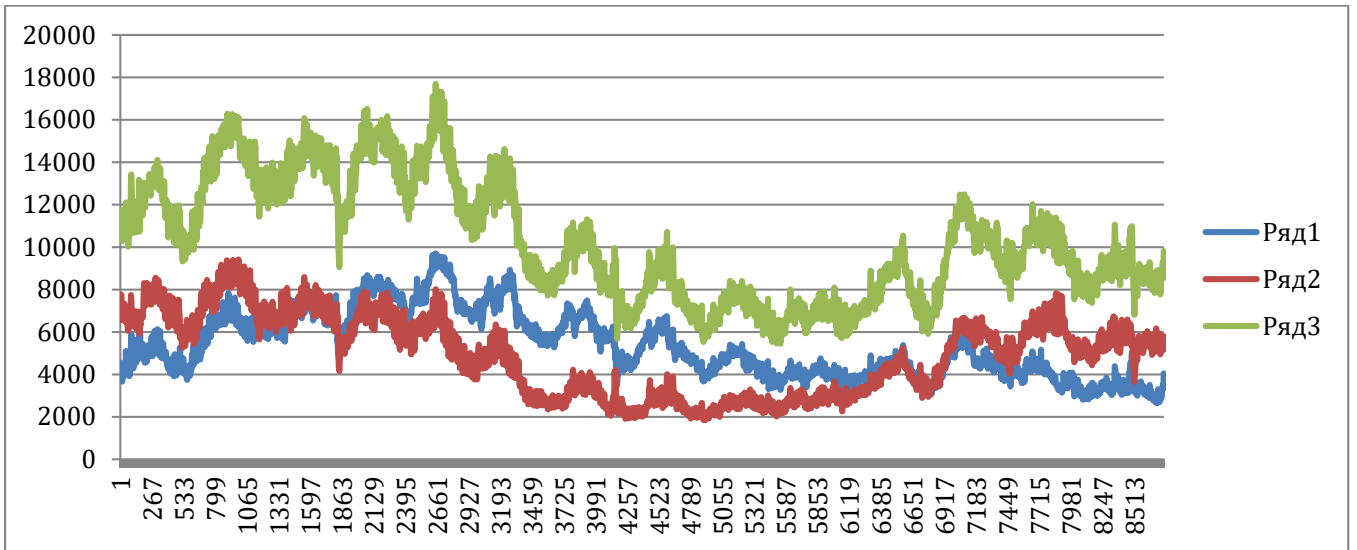
величин після початку бурі до мінімальних (через ΔT_{\min} після мінімуму Dst), а також швидкості V_N зменшення від максимальних до мінімальних значень. Ці величини наведені у табл. 3.

Таблиця 3. Характеристики відгуку вмісту електронів на магнітні бурі

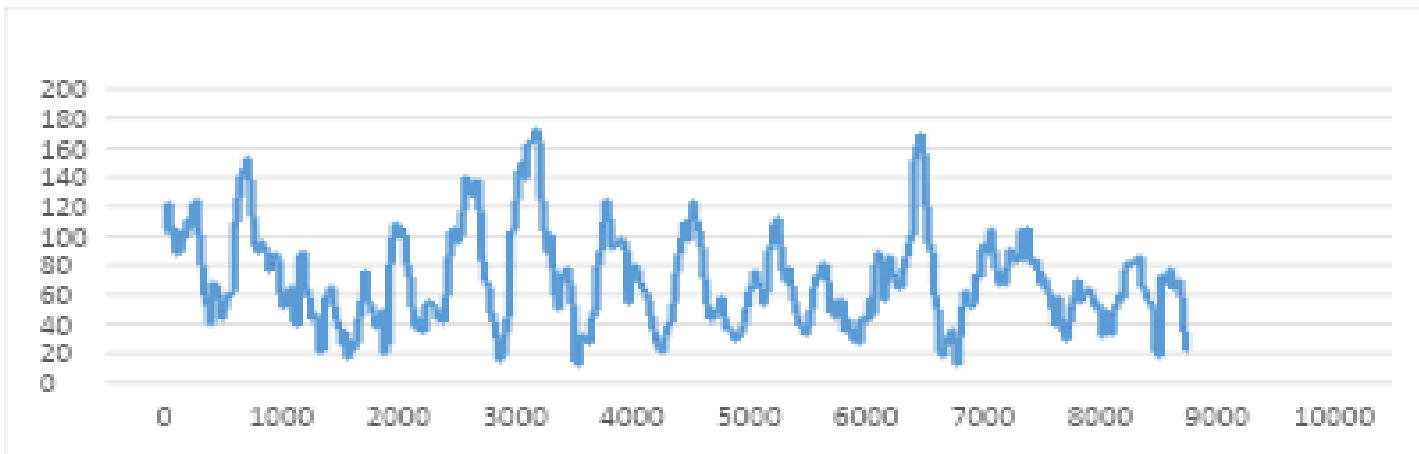
Дата \ Величина	17-19 березня	22-23 червня	20-24 грудня
ГЕС	$\Delta T_{\min}=16$ год $\delta \approx 1,62$; $V_N \approx 0,02 \cdot 10^{32}$ ел/го д	$\Delta T_{\min}=21$ год $\delta \approx 1,75$ $V_N \approx 0,02 \cdot 10^{32}$ ел/го д	$\Delta T_{\min}=20$ год $\delta \approx 1,61$; $V_N \approx 0,02 \cdot 10^{32}$ ел/го д
НЕС _N	$\Delta T_{\min}=16$ год $\delta \approx 1,58$ $V_N \approx 0,01 \cdot 10^{32}$ ел/го д	$\Delta T_{\min}=21$ год $\delta \approx 1,68$ $V_N \approx 0,01 \cdot 10^{32}$ ел/го д	$\Delta T_{\min}=20$ год $\delta \approx 1,59$; $V_N \approx 0,09 \cdot 10^{32}$ ел/го д
НЕС _S	$\Delta T_{\min}=16$ год $\delta \approx 1,66$ $V_N \approx 0,01 \cdot 10^{32}$ ел/го д	$\Delta T_{\min}=21$ год $\delta \approx 1,9$ $V_N \approx 0,09 \cdot 10^{32}$ ел/го д	$\Delta T_{\min}=20$ год $\delta \approx 1,64$ $V_N \approx 0,011 \cdot 10^{32}$ ел/г од

Для аналізу космічної погоди, зокрема сезонної залежності, у 2015 році в цілому розраховувались також кількості електронів ГЕС, НЕС_N, НЕС_S за весь рік. Ці дані, поряд з даними про рівень сонячної та магнітної активності, наведені на рис.18.

a)



б)



в)

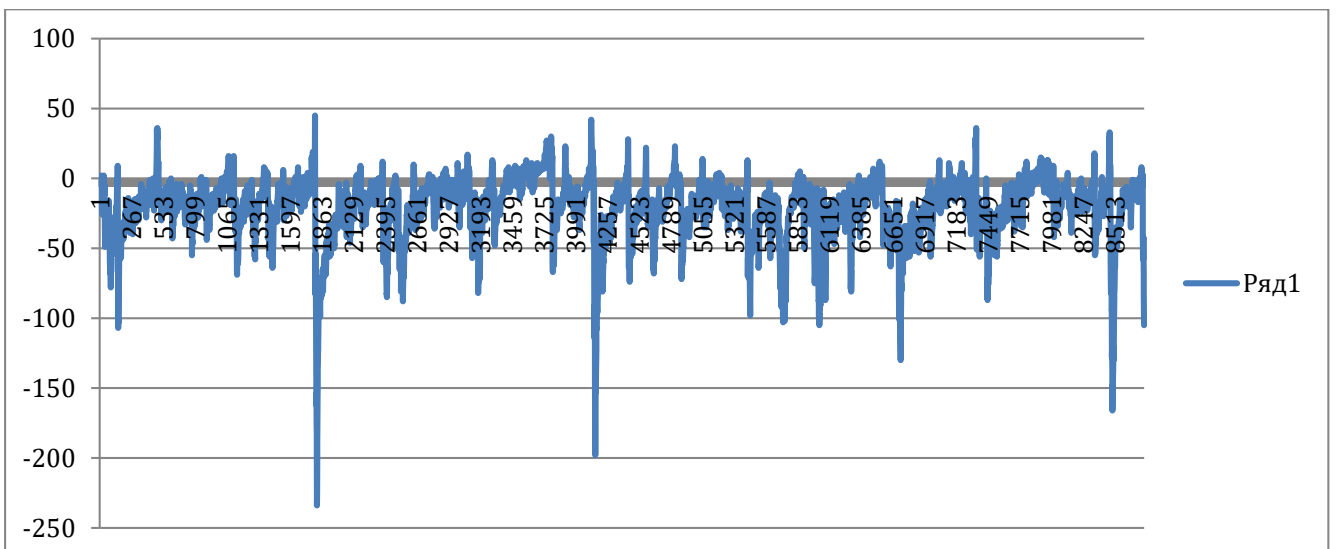


Рис. 18. Погодинні часові залежності: а) кількості електронів у північній та південній півкулях (ряди 1 і 2, відповідно) та глобальної кількості електронів (ряд 3); б) індексу сонячної активності Rz; в) індексу магнітної активності Dst

3.3. Аналіз результатів

Для аналізу впливу магнітних бур на глобальну кількість електронів та кількості електронів у півкулях Землі було вибрано 2015 рік, коли у березні спостерігалась найсильніша магнітна буря за 24 цикл сонячної активності (2009-2019 роки). У цьому році також спостерігались сильні бурі у червні та грудні. Таким чином, можна було простежити сезонні особливості впливу магнітних бур, а також і сезонні зміни відповідних кількостей електронів. Одержані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. З початком бур кількості електронів (GEC , HEC_N та HEC_S) дещо збільшувались, а потім різко спадали до свого мінімуму. Час запізнення (визначає інерційні характеристики відгуку вмісту електронів) мінімуму GEC , HEC_N та HEC_S відповідно до мінімуму індексу магнітної активності Dst складав 16 годин для найсильнішої бурі (березень), 21 годину і 20 годин для менш потужних бур у червні та грудні.

2. Зменшення у період бур кількості електронів (відношення максимальних значень до мінімальних) було різним для GEC , HEC_N і HEC_S та складало у період рівнодення, літнього (відносно північної півкулі) та зимового сонцестояння (відповідно у березні, червні та грудні): для GEC – 1,62; 1,75 і 1,61, для HEC_N – 1,58; 1,68; 1,59, для HEC_S – 1,66; 1,9; 1,64. Таким чином, можна побачити асиметрію реакції півкуль на магнітні бурі та різні ступені зменшення кількостей електронів для різних по інтенсивності бур.

3. Швидкість зменшення кількостей електронів від максимальних значень до мінімальних виявилася майже однаковою для всіх трьох бур і склала $\sim 0,02 \cdot 10^{32}$ ел/год для GEC та $\sim 0,01 \cdot 10^{32}$ ел/год для HEC_N і HEC_S .

4. Спостерігалась сезонна залежність кількостей електронів – найбільші значення кількостей для всіх трьох величин (GEC , HEC_N і HEC_S) були у

рівнодення, у березні. Значення для $NECN$ і $NECS$ у березні були майже однаковими, для червня (літнє сонцестояння – відносно північної півкулі) $NECN$ більше $NECS$ в ~ 2 рази, для грудня (зимове сонцестояння – відносно північної півкулі) – навпаки (приблизно в 1,7 разів менше), тобто в літній півкулі кількість електронів більше, ніж у зимовій.

ВИСНОВКИ

Дослідження глобального вмісту електронів (GEC) та вмісту електронів у півкулях, як чутливих індикаторів космічної погоди, тісно пов'язаних із сонячною та геомагнітною активністю, мають важливе наукове та практичне значення, надаючи інформацію про глобальну реакцію навколоземного простору на варіації космічної погоди, морфологію, структуру та мінливість іоносфери. Це дозволяє краще контролювати та прогнозувати космічні погодні явища та їх вплив на поширення радіохвиль у глобальному масштабі. Дані про варіації цих величин використовуються для перевірки та вдосконалення існуючих емпіричних і фізичних моделей іоносфери, що підвищує загальну надійність моделювання космічної погоди та прогнозування. Аналіз довгострокових даних GEC допомагає вивчати потенційні довгострокові тенденції в іоносфері і термосфері, які можуть бути пов'язані з процесами в атмосфері і зміною клімату.

Варіації GEC суттєво впливають на точність і надійність роботи систем супутникової навігації, зв'язку, дистанційного зондування та радіоастрономії. Розуміння мінливості GEC допомагає адаптувати та оптимізувати характеристики відповідних систем до умов космічної погоди.

Як впливає з результатів огляду літератури, зробленого в даній роботі, ще недостатньо даних про вплив на GEC магнітних бур, особливо вважаючи на специфічні особливості кожної бурі. Тому у роботі за даними про глобальний розподіл електронного вмісту іоносфери розраховані глобальна кількість електронів та кількості електронів у півкулях Землі (відповідно, GEC, $NECN$ та $NECS$) для періодів сильних магнітних бур 2015 року (березень-найсильніша

буря за весь 24 цикл сонячної активності, червень та грудень). Також проаналізовано сезонні варіації цих величин.

Одержані нові дані про вплив магнітних бур на ці величини. Так вперше оцінена інерційність їх змін (час запізнення мінімумів GEC , HEC_N та HEC_S відносно мінімуму індексу магнітної активності Dst) відповідно до зміни рівня магнітної активності бурі. Розраховані швидкості спаду глобальної кількості електронів та кількостей електронів у півкулях під час головної фази бур.

Відзначена асиметрія реакції півкуль на магнітні бурі та різні ступені зменшення кількостей електронів для різних по інтенсивності бур.

Проаналізована сезонна залежність GEC , HEC_N і HEC_S у 2015 році. Показано, що найбільші значення кількостей для всіх трьох величин були у рівнодення, у березні. Значення для HEC_N і HEC_S у березні були майже однаковими, для червня (літнє сонцестояння – відносно північної півкулі) HEC_N більше HEC_S в ~ 2 рази, для грудня (зимове сонцестояння – відносно північної півкулі) – навпаки (приблизно в 1,7 разів менше), тобто в літній півкулі кількість електронів більше, ніж у зимовій.

Одержані дані можуть бути використані при коригуванні існуючих емпіричних (наприклад, IRI-2020) та теоретичних моделей іоносфери і для створення нових. Також вони будуть корисними для прогнозування варіацій космічної погоди та їх впливу на роботу радіотехнічних систем різного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Joselyn J. A. Case study of the great geomagnetic storm of 13 March 1989 // *Astrodynamics 1989: Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference*, Stowe, VT, Aug. 7–10, 1989. Part 2. San Diego: Univelt, Inc., 1990. P. 745–762.
- [2] The May 2024 solar storm. European Space Agency.
URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_weather/The_May_2024_solar_storm
- [3] Geomagnetic indices. International Service of Geomagnetic Indices.
URL: https://isgi.unistra.fr/geomagnetic_indices.php
- [4] Benestad R. E. *Solar activity and Earth's climate*. London: Springer-Praxis, 2002. 287 p.
- [5] Kivelson M. G., Russell C. T. *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 568 p.
- [6] Чорногор Л. Ф. Фізика геокоосмічних бур // *Космічна наука і технологія*. 2021. Т. 27, № 1 (128). С. 3–77. DOI: 10.15407/knit2021.01.003.
- [7] Geomagnetic Storms. CENTRA Technology, Inc. Office of Risk Management and Analysis, U.S. Department of Homeland Security, 14 January 2011.
- [8] Koskinen H. *Physics of Space Storms: From the Solar Surface to the Earth*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 437 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00319-6_8.
- [9] What are Global Navigation Satellite Systems (GNSS). NovAtel.
URL: <https://novatel.com/tech-talk/an-introduction-to-gnss/what-are-global-navigation-satellite-systems-gnss>
- [10] Lanyi G. E., Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations // *Radio Science*. 1988. Vol. 23, № 4. P. 483–492.
- [11] Hein W. Z., Goto Y., Kasahara Y. Estimation Method of Ionospheric TEC Distribution using Single Frequency Measurements of GPS Signals // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2016. Vol. 7, № 12. P. 1–6.
- [12] Zhang D.-H., Xiao Z. The Method to Calculate TEC using GPS and its Application to the Study of Ionospheric Disturbances // *Chinese Journal of Geophysics*. 2000. Vol. 43, Issue 4. P. 483–490.
- [13] Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrouski M. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations // *Engineering Applications*. 2023. Vol. 2, № 3. P. 243–253.

- [14] Mannucci A. J., Ho C. M., Lindqwister U. J. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Science*. 1998. Vol. 33, № 8. P. 565–582.
- [15] Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1 // *Proc. IGS AC Workshop*. Darmstadt, 9–11 Feb. 1998. P. 233–247.
- [16] Schmölder E., Tagargouste Y., Wilken V. et al. Improving the global Total Electron Content maps provided by the Ionosphere Monitoring and Prediction Center – preliminary results // *Space Weather and Space Climate*. 2025. Vol. 15, 44. P. 1–17.
- [17] Koroglu M., Koroglu O., Arikan F., Arikan O. Ionospheric slant total electron content mapping algorithm: IONOLAB-SMAP // *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, Issue 1. P. 908–917.
- [18] Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Oinats A. V. et al. Global Electron Content: A New Conception to Track Solar Activity // *Annales Geophysicae*. 2008. Vol. 26. P. 335–344.
- [19] Afraimovich E. L. et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2013. Vol. 3, A27. DOI: 10.1051/swsc/2013049.
- [20] Hocke K. Oscillations of global mean TEC // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113, A04302. DOI: 10.1029/2007JA012798.
- [21] Liu L., Wan W., Ning B., Zhang M.-L. Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps // *Journal of Geophysical Research*. 2009. Vol. 114, A06308. DOI: 10.1029/2009JA014244.
- [22] Chen Y., Liu L., Le H., Zhang H. Discrepant responses of the global electron content to the solar cycle and solar rotation variations of EUV irradiance // *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, 80. DOI: 10.1186/s40623-015-0251-x.
- [23] Younas W., Amory-Mazaudier C., Khan M., Amaechi P. O. Climatology of global, hemispheric and regional electron content variations during the solar cycles 23 and 24 // *Advances in Space Research*. 2023. Vol. 71, Issue 1. P. 16–28. DOI: 10.1016/j.asr.2022.07.029.
- [24] Lean J. L., Meier R. R., Picone J. M., Emmert J. T. Ionospheric total electron content: Global and hemispheric climatology // *Journal of Geophysical Research*. 2011. Vol. 116, A10318. DOI: 10.1029/2011JA016567.
- [25] Li S., Galas R., Ewert D., Peng J. An Empirical Model for the Ionospheric Global Electron Content Storm-Time Response // *Acta Geophysica*. 2016. Vol. 64, № 1. P. 253–269. DOI: 10.1515/acgeo-2015-0067.

[26] Lean J. L., Meier R. R., Picone J. M., Emmert J. T. Ionospheric total electron content: Global and hemispheric climatology // *Journal of Geophysical Research*. 2011. Vol. 116, A10318. DOI: 10.1029/2011JA016567.

[27] Kyoto University. World Data Center for Geomagnetism.
URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

[28] NOAA Space Weather Prediction Center. Planetary K-Index.
URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>

[29] OMNIWeb Data Explorer. NASA.
URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>

[30] Polekh N. et al. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia // *Advances in Space Research*. 2017. Vol. 60, Issue 11. P. 2464–2476.

[31] Wu Ch.-Ch. et al. The first super geomagnetic storm of solar cycle 24: “The St. Patrick’s day event (17 March 2015)” // *Earth, Planets and Space*. 2016. Vol. 68, 151. DOI: 10.1186/s40623-016-0525-y.

[32] Maurya A. K. et al. Effects of St. Patrick’s Day geomagnetic storm of March 2015 and of June 2015 on low-equatorial D region ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2018. Vol. 123. DOI: 10.1029/2018JA025536.

[33] Balasis G. et al. Observation of intermittency-induced critical dynamics in geomagnetic field time series... // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2018. Vol. 123. P. 4475–5283.

[34] AIUB. CODE products. URL: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/> (