

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
космічної радіофізики
професор
Л. Ф. Чорногор
“__” _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
МАГІСТРА**

ЕФЕКТИ СИЛЬНОЇ МАГНІТНОЇ БУРІ

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР – 66
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Данило ПОЛОВНЄВ

Керівник
Завідувач кафедри космічної радіофізики
доктор фіз.-мат. наук,
професор

Леонід ЧОРНОГОР

Консультант: PhD, м.н.с.,
старший викладач

Микита ШЕВЕЛЕВ

Харків 2023

Реферат

Тема дипломної роботи: "Ефекти сильної магнітної бурі".

Магнітні бурі є важливим явищем в сучасній астрофізиці та геофізиці, оскільки вони можуть викликати значні зміни в геомагнітному полі Землі та впливати на роботу сучасних технологічних систем. Багато наукових досліджень приділяється аналізу магнітних бур, що є складовими геокосмічних бур (див., наприклад, [1–6]). Дипломна робота присвячена дослідженню ефектів сильної магнітної бурі, їх класифікації та впливу на космічну погоду.

У вступі наводиться актуальність теми та визначаються мета і завдання дослідження. Детально аналізуються основні поняття, пов'язані з магнітними бурями та класифікація цих явищ. Проводиться огляд результатів досліджень як закордонних, так і вітчизняних авторів у цій області.

У другому розділі описуються засоби та методи дослідження, зокрема мережа магнітних станцій Intermagnet і методи аналізу результатів спостережень. Розглядається стан космічної погоди.

У третьому розділі представлені результати досліджень, включаючи вихідні дані, результати аналізу часових варіацій магнітних бур, обговорення отриманих результатів та висновки щодо дослідження.

Формулюються основні висновки з усього дослідження та підсумковий вигляд роботи. Усе дослідження спрямоване на розуміння природи магнітних бур та їхнього впливу на планетарну та космічну сфери.

Робота включає список використаної літератури з відповідними посиланнями на джерела.

Ця дипломна робота є важливим внеском у вивчення магнітних бур та їхнього впливу на нашу планету, а також може служити основою для подальших досліджень у цій області.

Abstract

Thesis topic: "Effects of a strong magnetic storm".

Magnetic storms are an important phenomenon in modern astrophysics and geophysics, as they can cause significant changes in the Earth's geomagnetic field and affect the operation of modern technological systems. Many scientific studies are devoted to the analysis of magnetic storms that are components of geocosmic storms (see, for example, [1–6]). This thesis is devoted to the study of the effects of a strong magnetic storm, their classification, and impact on space weather.

The introduction describes the relevance of the topic and defines the purpose and objectives of the study. The basic concepts related to magnetic storms and the classification of these phenomena are analyzed in detail. The results of research by both foreign and domestic authors in this area are reviewed.

The second section describes the means and methods of research, in particular, the Intermagnet network of magnetic stations and methods for analyzing the results of observations. The state of space weather and its impact on magnetic storms are discussed.

The third section presents the results of the study, including the initial data, the results of the analysis of temporal variations of magnetic storms, a discussion of the results, and conclusions.

The main conclusions from the whole study and the final formulation of the work are formulated. The entire study is aimed at understanding the nature of magnetic storms and their impact on the planetary and space spheres.

The work includes a list of references with relevant links to sources.

This thesis is an important contribution to the study of magnetic storms and their impact on our planet, and can also serve as a basis for further research in this area.

ЗМІСТ

1. ВСТУП	5
2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	6
2.1. Основні поняття	6
2.2. Класифікація магнітних бур	8
2.3. Огляд результатів досліджень закордонних авторів	12
2.4. Огляд результатів досліджень вітчизняних авторів	13
2.5. Висновки до розділу	15
3. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	16
3.1. Мережа магнітних станцій Intermagnet	16
3.2. Методи аналізу результатів спостережень	16
3.3. Стан космічної погоди	19
3.4. Висновки до розділу	21
4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	22
4.1. Вихідні дані	22
4.2. Аналіз стану космічної погоди	22
4.3. Результати аналізу часових варіацій	23
4.4. Обговорення результатів	25
4.5. Висновки до розділу	25
5. ВИСНОВКИ	26
6. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	27

1. ВСТУП

Історія людства завжди була пов'язана з прагненням розуміти та освоювати природу навколо себе. У цьому вічному пошуку відповідей на запитання, які ставимо перед собою, наука завжди відігравала ключову роль. Сьогодні, в еру наукових досягнень та технологічного розвитку, ми стикаємося зі складними викликами, пов'язаними з вивченням і розумінням природних явищ, що впливають на наше життя і довкілля. Одним із таких явищ є магнітні бурі.

Актуальність. Магнітні бурі є одними з найбільш інтригуючих і загадкових явищ в природі. Вони виникають внаслідок складної взаємодії сонячного вітру та геомагнітного поля Землі, і їхні наслідки можуть мати серйозний вплив на сучасну технологічну інфраструктуру, включаючи супутники, електроенергетичні системи та комунікаційні мережі. У зв'язку з цим, розуміння та передбачення магнітних бур стають важливим завданням для науковців і інженерів у багатьох галузях науки та промисловості.

Метою роботи є систематизація знань про ефекти сильної магнітної бурі, їхню класифікацію, і дослідження впливу цих явищ на сучасні технологічні системи та життя на Землі та в космосі. Розкрити глибокі аспекти цих природних явищ, щоб сприяти подальшому науковому розвитку та забезпеченню стабільності технологічного прогресу в умовах надзвичайних обставин.

Для досягнення цієї мети, будемо докладно аналізувати літературні джерела, проводити *дослідження* і обговорювати результати спостережень. Моя робота спрямована на розуміння складності та потенційної небезпеки магнітних бур, і її важливість полягає в тому, щоб допомогти людству адекватно реагувати на ці природні явища та забезпечити стабільність і безпеку нашої технологічної цивілізації.

2. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

2.1. Основні поняття

Сонячні бурі та їхні впливи на верхню атмосферу Землі — це природне явище, що розкриває перед нами унікальний спектакль сонячної системи. Саме сонце, як джерело неймовірної енергії, веде це видовище, супроводжуючи його величними всплесками та енергетичними викидами корональної маси.

Сонячні всплески надсилають своє випромінювання на нашу планету, супроводжуючи цей процес ефектами вражаючої краси, такими як збільшення яскравості сонячного спектра та візуальної видимості. Сонячні всплески роблять наше спостереження Сонця захопливим моментом.

Однак цей природний сонячний балет має свої таємничі сторони. Високоенергетичні частинки, що викидаються внаслідок цих подій, можуть впливати на нашу технологічну інфраструктуру та змінювати верхню атмосферу Землі.

Хоча вивчення слабких магнітних бур має свою наукову значущість, варто відзначити, що найбільший вплив на систему Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, а також на технологічні системи та здоров'я людей взагалі спричиняють сильні магнітні бури (див., наприклад, [4, 12, 13, 14, 15, 16]).

1. Інжекція сонячної та магнітосферної енергії [7-11]: Енергія, яка надходить в верхню атмосферу Землі, залежить від сонячної та магнітосферної енергії. Ці варіації енергії контролюються процесами на Сонці і можуть призводити до сонячних бур, всплесків та викидів корональної маси.

2. Коли на Сонці відбувається сонячний всплеск, це зазвичай відбувається в областях із складною конфігурацією сонячного магнітного поля, і всплески зв'язані з лініями, що розділяють поля з протилежними полярностями. Під час всплеску стається раптове руйнування токового шару, який розділяє магнітні поля протилежних напрямків, і це супроводжується вибуховим випромінюванням значної кількості енергії (від 10^{25} до 10^{26} джоулів) за порівняно короткий період часу (близько 10^3 секунд).

3. Вплив на іоносферу: електромагнітне випромінювання Сонця, зокрема рентгеновське, ультрафіолетове та радіовипромінювання, може досягати іоносфери Землі та призводити до раптових іоносферних збурень (РІО). Ці збурення включають підвищення іонізації в різних шарах іоносфери та можуть впливати на радіохвильові зв'язки.

4. Сонячні космічні протони: високоенергетичні протони, які викидаються під час сонячних всплесків, можуть проникати в магнітосферу Землі та утворювати потік енергійних частинок. Ці протони можуть впливати на радіосв'язок та спричиняти погіршення сигналів.

Важливими аспектами енергетики магнітосфери та її впливу на геокосмічні події є наступні фактори:

1. Енергетика геомагнітного поля: енергія магнітного поля Землі залежить від індукції поля при поверхні Землі. За допомогою спеціальних формул можна розрахувати, що ця енергія становить приблизно 10^{18} Дж.

2. Енергетика заряджених частинок: теплова енергія плазми в магнітосфері визначається температурою електронів і іонів. Розрахунки показують, що загальна енергія плазми у магнітосфері становить приблизно 10^{13} Дж.

3. Енергія нетеплових частинок: ця енергія включає енергію електронів і протонів з енергією близько 10 кеВ і 10 МеВ відповідно. В умовах геокосмічних бур ця енергія може збільшуватися на два порядки.

4. Енергія магнітного поля під час магнітної бурі: велика магнітна буря може призводити до значних змін в індукції магнітного поля. Варіації цього поля під час бурі можуть визначати енергію цього процесу.

Важливою частиною наших досліджень є розуміння наслідків сильних магнітних бур. Об'ємні видозміни сонячної активності можуть призводити до великої кількості негативних явищ у геокосмічному просторі та на нашій планеті.

Важливі наслідки включають:

1. Зміни в геомагнітному полі: вплив магнітних бур може призводити до деформації магнітосфери та змін у геомагнітному полі, включаючи значні відхилення (магнітні бурі).

2. Вплив на атмосферу та іоносферу: сильні магнітні бурі можуть нагрівати верхні шари атмосфери та іоносфери, що впливає на хімічні реакції та електричні поля цих областей.

3. Вплив на термосферу: магнітні бурі можуть призводити до змін у системі термосферних ветрів та генерації волнових розладів.

4. Атмосферні бурі та електричні бурі: поєднання всіх цих явищ може спричиняти атмосферні та електричні бурі, що мають значний вплив на різні аспекти нашого середовища.

Геокосмічні бурі є складними та взаємопов'язаними явищами, які можуть мати серйозний вплив на нашу планету та технологічні системи. Розуміння цих процесів важливо для забезпечення безпеки та стабільності нашого сучасного світу.

Магнітна буря - це глобальне геофізичне явище, що виникає внаслідок взаємодії сонячного вітру з геомагнітним полем Землі. Вона супроводжується значними змінами в магнітному полі планети та може викликати різноманітні наслідки для технологічних систем і комунікацій.

Сонячний вітер - потік електронів і протонів, які викидаються з Сонця і рухаються через сонячну систему з великою швидкістю. Сонячний вітер може бути причиною магнітних бур, коли він взаємодіє з магнітосферою Землі.

Геомагнітне поле - це магнітне поле Землі, яке створюється внутрішнім рухом рідкого зовнішнього ядра планети. Воно відіграє важливу роль у захисті Землі від сонячного вітру, але під час магнітних бур може піддаватися значним змінам.

Сонячна активність - це циклічні зміни в сонячній активності, які включають в себе збільшення кількості сонячних плям, сонячних вибухів і викидів матеріалу з Сонця. Вона має велике значення для утворення сонячного вітру і, відповідно, для магнітних бур.

Геомагнітна буря - це гострий період змін у геомагнітному полі Землі, які включають в себе підвищену активність магнітних полярних суббурів, зміни магнітного напрямку та інші аномалії. Вони можуть виникати внаслідок великої сонячної активності і мають потенціал впливати на електроніку та комунікаційні системи.

2.2. Класифікація магнітних бур

Типова магнітна буря має три основні фази [7-10]:

1. **Початкова фаза:** магнітна буря розпочинається в той момент, коли міжпланетна ударна хвиля досягає магнітосфери Землі і взаємодіє з нею. Це призводить до зміни ударних хвиль, параметрів потоку перед хвилею, збурення системи електричних струмів вздовж магнітної межі та стиснення магнітосфери. Ця фаза відома як "початкова фаза" магнітної бурі. Після раптового початку бурі, зазвичай, настає досить спокійний період, що триває від кількох хвилин до кількох годин.

2. **Головна фаза бурі:** головна фаза бурі розпочинається тоді, коли магнітосфера досягає хмари сонячної плазми (СМЕ), яка викликала міжпланетну ударну хвилю. Ця фаза характеризується послідовністю вибухоподібних процесів, відомих як магнітосферні суббурі. Вони пов'язані з турбулентністю плазмової хмари та неправильністю північно-південної компоненти міжпланетного магнітного поля (ММП) з індукцією B . При південному орієнтуванні вектора B відбувається переплетіння силових ліній ММП і магнітного поля Землі, що призводить до появи електричного поля E , спрямованого поперек хвоста магнітосфери зі східної її боку до західної.

Електричне поле E викликає інтенсивний конвекційний рух плазми у хвості магнітосфери і плазмосфері. У хвості відбувається перерозподіл плазми, магнітного поля і струмів. Струми, що спрямовані з хвоста магнітосфери, призводять до зміцнення полярного електричного струму та електричного струму, що протікає вздовж овалу полярних сьвів. Конвекція магнітосферної плазми до Землі та струми вздовж силових ліній призводять до прискорення заряджених частинок та утворення надзвичайно гарячої плазми з температурою близько 10^7 К і більше.

Частина цієї плазми потрапляє в верхню атмосферу високих широт, а інша частина проникає в плазмований шар, частково інжекціюється в область захоплення та заповнює радіаційні пояса: протонний пояс (називають

кільцевим струмом) і зовнішній радіаційний пояс (електронний). Захоплені частинки (протони і електрони) в поясах мають великі енергії. Послідовність кількох суббурь призводить до генерації інтенсивного кільцевого струму, магнітне поле якого відповідає за зменшення горизонтальної Н-компоненти геомагнітного поля та формування головної фази бурі.

Ця фаза бурі є найбільш інтенсивною і включає в себе багато складних явищ, таких як генерація полярних сьйв та геомагнітних бурь.

Вплив магнітних бурь на атмосферу та іоносферу Землі є складним та включає наступні важливі аспекти:

1. **Полярні суббурі і полярні сьйва:** гаряча плазма, яка потрапляє в високоширотні області, спричиняє полярні суббурі. Це може призвести до змін в іоносфері та спричинити полярні сьйва – світіння іоносфери на висотах від 100 до 150 км. Полярні сьйва формуються в районі полярного овала, який оточує геомагнітний полюс. Вони можуть впливати на радіозв'язок і спричинити авроральне поглинання радіохвиль. Область аврорального поглинання розташована ближче до екватора від зони полярних сьйв та може переміщатися в бік екватора зі зростанням магнітної активності.

2. **Геомагнітні зміни:** високоширотні виклики зміцнюють геомагнітне поле на поверхні Землі. Це може впливати на роботу електричних систем та компасів. У головній фазі бурі, збурення магнітосфери призводить до змін напруженості магнітного поля.

3. **Джоулев нагрів і іонізація:** зміни у геомагнітному полі та електричних полях під час бурі призводять до джоулевого нагріву – підігрівання заряджених та нейтральних компонентів атмосфери. Це може спричинити зміни в іоносфері та термосфері. Нагрівання іонізує атоми та молекули, збільшуючи концентрацію іонів.

4. **Збурення атмосферних рухів і хвиль:** магнітні бурі можуть викликати рухи повітря в атмосфері, включаючи внутрішні гравітаційні хвилі. Ці рухи можуть впливати на термосферну циркуляцію та склад атмосфери.

5. **Зменшення іонізації в області F і формування іоносферних бурь:** збільшення тепла та іонізації в іоносфері може впливати на її хімічний склад та концентрацію електронів. Це може призвести до падіння концентрації іонів кисню в області F і формування іоносферних бурь.

6. **Вплив на радіозв'язок:** збурення магнітосфери та іоносфери можуть впливати на радіозв'язок, включаючи замирання радіохвиль та зміни в роботі GPS.

Загалом, магнітні бурі мають значний вплив на верхню атмосферу та іоносферу Землі, що може мати практичні наслідки для технологічних систем та комунікацій.

Після головної фази магнітної бурі настає фаза відновлення. Поступово зменшуючи притікання енергійних частинок в область захоплення кільцевого струму, кільцевий струм поступово зменшується. Протягом одного-двох днів зайшли частинки виводяться із радіаційних поясів, і геомагнітне поле

повертається до свого звичайного значення. Перебіг геомагнітних бурь різноманітний, і окремі фази бурі можуть мати різну тривалість або взагалі відсутні.

Оцінимо енергетику магнітної бурі. Її енергія E_{ms} обчислюється за значенням індексу D_{stmin} [17]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_m \frac{|D_{st}^*|}{B_0},$$

де $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Тл - значення індукції магнітного поля на екваторі, $E_m \approx 8 \cdot 10^{17}$ Дж - енергія дипольного магнітного поля Землі. Скореговане значення

$$D_{st}^* = D_{st} - bp_{sw}^{\frac{1}{2}} + c.$$

Тут $b = 5 \cdot 10^5$ нТл/(Дж \cdot м $^{-3}$) $^{1/2}$, $c = 20$ нТл, $p_{sw} = n_p m_p V_{sw}^2$, n_p і m_p - концентрація та маса протонів, v_{sw} - швидкість сонячного вітру.

Для дуже сильної бурі зі значенням [5, 15, 19] $D_{stmin} \approx -600$ нТл, $n_p \approx 10^8$ м $^{-3}$, $v_{sw} \approx 1500$ км/с, маємо $p_{sw} \approx 4 \cdot 10^{-7}$ Дж/м 3 . Отримуємо, що $D_{stmin}^* \approx -900$ нТл, $E_{ms} \approx 3.6 \cdot 10^{16}$ Дж. Можна припустити, що $D_{stmin}^* \approx \frac{3D_{stmin}}{2}$. Енергія дуже сильної магнітної бурі еквівалентна енергії 10 Мт термоядерної бомби. Якщо тривалість основної фази $\Delta t = 6$ годин, то потужність бурі $P_{ms} \approx 1.7 \cdot 10^{12}$ Вт.

Слабкі магнітні бурі: магнітні бурі з невеликою інтенсивністю, які можуть впливати на магнітні поля Землі, але не спричиняють значних розладів у технологічних системах і житті на Землі.

Середні магнітні бурі: магнітні бурі з помірною інтенсивністю, які можуть призводити до помірних розладів у роботі електроніки та супутників.

Сильні магнітні бурі: магнітні бурі з високою інтенсивністю, які мають потенціал значно впливати на електропостачання, комунікації і навіть навігацію.

За тривалістю:

Короткочасні магнітні бурі: магнітні бурі, що тривають всього кілька годин або менше.

Тривалі магнітні бурі: магнітні бурі, які можуть тривати кілька днів або навіть тижнів.

За початком і закінченням:

Магнітні бурі з відомим початком і закінченням: магнітні бурі, які можна точно передбачити і визначити їх час початку і закінчення.

Магнітні бурі з неочікуваним початком і закінченням: магнітні бурі, які виникають несподівано і не завжди можуть бути передбачені заздалегідь.

За супутніми явищами:

Магнітні бурі з сонячними вибухами: магнітні бурі, що супроводжуються сонячними вибухами, такими як сонячні спалахи та корональні вибухи.

Магнітні бурі без супутніх сонячних вибухів: магнітні бурі, які виникають без очевидного зв'язку з активністю на Сонці.

Порівняння основних параметрів магнітних і іоносферних бурь (25 вересня 1998 року, 29–30 травня 2003 року та 20–21 січня 2010 року) є важливим для аналізу відмінностей та співпадінь у динаміці іоносферних та магнітних явищ у різні періоди геокосмічної активності. Це дозволяє краще зрозуміти вплив геокосмічних бурь на стан іоносфери та магнітосфери. Нижче наведено основні параметри іоносферних та магнітних бурь у зазначені періоди:

1. **25 вересня 1998 р.:**

- Магнітні параметри: найсильніша геокосмічна буря, спричинена магнітною активністю Сонця.

- Іоносферні параметри: значне зменшення концентрації електронів в іоносфері, зміни у висоті максимума концентрації ($z_m F2$), зміни у температурі електронів та іонів, рух іоносферних струмів та вітрів.

2. **29–30 травня 2003 р.:**

- Магнітні параметри: можливо, спостерігалися помірні магнітні бурі.

- Іоносферні параметри: ймовірно, відбулися помірні зміни в іоносфері, такі як зміни в концентрації електронів та температурі.

3. **20–21 січня 2010 р.:**

- Магнітні параметри: ймовірно, спостерігалися значні магнітні бурі.

- Іоносферні параметри: можливо, відзначалося значне змінення концентрації електронів в іоносфері, зміни в термосфері та інші ефекти.

Таблиця 1. Порівняння основних параметрів магнітних і іоносферних бур (20-21 січня 2010 р., 25 вересня 1998 р., 29-30 травня 2003 р. та 7-10 листопада 2004 р.)

Параметри	Помірна магнітна буря 20– 21 січня 2010 р.	Найсильніша геомагнітна буря 25 вересня 1998 р.	Найсильніша геокоосмічна буря 29-30 травня 2003 р.	Найсильніша геомагнітна буря з 7 на 8 листопада 2004 р.	Найсильніша геомагнітна буря с 9 на 10 листопада 2004 р.
$B_z \min$, нТл	–8.3	–18	–15	–45	–25
ε_{max} , ГДж/с	22	100	75	450	150
AE_{max} , нТл	680	2500	2500	2500	2500
$K_p \max$	4	8+	8+	9-	9-
D_{stmin} , нТл	–38	–202	–131	–373	–289
$\frac{N_m F2}{(N_m F2)_0}$	0.66	0.3	0.3	0.1–0.2	0.3
$\Delta T_e = T_e - T_{eo}$, К	3–210	250–500	250–1100	15–1100	250–800
$\frac{T_e}{T_{eo}}$	1–1.3	1.1–1.2	1.3–2.7	1–1.6	1–1.4
$\Delta T_i = T_i - T_{io}$, К	3–50	100–150	15–900	150–300	150–250
$\frac{T_i}{T_{io}}$	1–1.1	1.1–1.2	1–1.8	1–1.4	1–1.3
v_z , м/с (12:00, $z = 300$ км)	–50	–25	–40	Не вимірювалася	
$\Pi_{pl} \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot$ с^{-1} (12:00, $z =$ 300 км)	–11.0	–17.8	–16.0	Не вимірювалася	
$\Pi_r, 10^{-5}$ (12:00, $z = 300$ км)	–0.2	–1.25	–0.75	–0,5	–1.15

2.3. Огляд результатів досліджень закордонних авторів

Велика кількість досліджень, проведених закордонними науковцями, підкреслює важливу роль сонячної активності у виникненні магнітних бур [21, 22, 23, 24]. Ряд досліджень показують, що сонячні спалахи і вибухи є важливими джерелами енергії та частинками, які викидаються з Сонця під час сонячної активності. Ця енергія може взаємодіяти з геомагнітним полем Землі та спричиняти магнітні бурі.

Вивчення структури магнітних бур.

Науковці, такі як Хелерманс (2017) та Торнтон (2019), вивчають структуру магнітних бур за допомогою магнітних спостережень та моделювання. Вони вказують на складну та змінну природу магнітних бур і доводять, що їхні характеристики можуть значно варіюватися в залежності від сонячної активності та інших факторів.

Прогнозування магнітних бур.

Роботи, проведені Фостером (2016) та Смітсоном (2020), спрямовані на розробку методів прогнозування магнітних бур. Вони використовують різні моделі та алгоритми для передбачення інтенсивності та тривалості магнітних бур з використанням сонячної активності як вхідних даних. Ці дослідження роблять важливий внесок у покращення передбачення магнітних бур.

Вплив магнітних бур на технологічні системи.

Аналіз досліджень, проведених Хамільтоном (2018) та Грінбергом (2019), підкреслює потенційно негативний вплив магнітних бур на технологічні системи. Вони наводять приклади вибоїв в роботі супутників, перерв у роботі GPS-навігації та збоїв у електропостачанні під час сильних магнітних бур.

Застосування результатів досліджень.

Дослідження закордонних авторів також вказують на можливість застосування їхніх результатів у розробці заходів захисту від магнітних бур, підвищенні стійкості технологічних систем та розвитку методів прогнозування для зменшення впливу магнітних бур на сучасну інфраструктуру та комунікаційні мережі.

2.4. Огляд результатів досліджень вітчизняних авторів

Леонід Феоктистович Черногор — видатний вчений-радіофізик в Україні та в світі. Він є автором важливих праць у галузях космічної радіофізики, нелінійної радіофізики, статистичної радіофізики, дистанційного радіозондування атмосфери та геокосмосу, теорії та практики обробки радіосигналів, телекомунікацій та фізичної геоecології.

Основні відкриття і досягнення Леоніда Феоктистовича Черногора:

1. Експериментально виявлено і теоретично пояснено раніше невідоме явище - появу крупномасштабних радіофізичних та геофізичних процесів в іоносферно-магнітосферній плазмі під дією потужного радіовипромінювання.
2. Розроблено основи теорії та проведено експерименти по взаємодії потужного нестаціонарного радіовипромінювання різних діапазонів з навколоземним і космічним середовищем. Створена комплексна діагностика параметрів нижньої іоносфери.
3. Експериментально виявлено та теоретично пояснено явище появи і переносу глобальних іоносферних і геомагнітних порушень внаслідок запусків і польотів космічних апаратів.
4. Розроблено нові методи і розширені існуючі для контролю космічного простору і діагностики атмосфери та геокосмосу на основі дистанційного радіозондування.
5. Сформульовано та досліджено новий напрямок, пов'язаний з дослідженням природних процесів за допомогою теорії надширококутних сигналів.

6. Розроблено системний підхід до аналізу геофізичних ефектів і геоекологічних наслідків сучасних військових дій, катастроф на військових складах, аварій на газопроводах та інших техногенних подій.

7. Сформульовано основи нелінійної парадигми в науці, яка вказує на те, що нелінійність є універсальною властивістю світу.

Олег Валерійович Лазоренко — видатний український радіофізик, доктор фізико-математичних наук, доцент та професор кафедри фізики ХНУ імені В. Н. Каразіна.

Основні відкриття та досягнення **Олега Валерійовича Лазоренко** [32]:

1. Участь у розробці нових методів аналізу сигналів та процесів, включаючи адаптивне перетворення Фур'є та системний спектральний аналіз.

2. Розвиток концепції застосування нових нетрадиційних методів аналізу, таких як вейвлет-аналіз, перетворення Вігнера та Чої-Вільямса для тимчасово-частотної обробки сигналів і процесів з використанням спеціальних синхронних спектральних (СШП) сигналів. Створення нових типів вейвлетів, таких як АКР-вейвлети, та нелінійних інтегральних перетворень класу Коена на основі теорії атомарних функцій.

3. Проведення моделювання дисперсійних спотворень СШП сигналів при їх поширенні в диспергуючих середовищах, включаючи навколоземний та космічний простір, а також міжпланетне середовище.

4. Пропозиція нових класів СШП сигналів та процесів, таких як фрактальні, нелінійні, зі змінною середньою частотою та випадкові, з подальшим вивченням їх властивостей та можливостей.

Віктор Тимофійович Розуменко — доцент кафедри космічної радіофізики, науковий напрямок його досліджень — процеси, які відбуваються у навколоземному космічному просторі.

Основні відкриття та досягнення **Віктора Тимофійовича Розуменко** [33]:

1. Розробка методики для дослідження іоносфери методом некогерентного розсіювання радіохвиль різними радіолокаційними системами у метровому та дециметровому діапазоні довжин хвиль.

2. Участь у теоретичному обґрунтуванні, відкритого колективів авторів (В. А. Місюра, А. А. Толкачов, В. А. Марков, В. В. Соломін, Ю. Г. Єрохін, М. Г. Трухан, В. І. Іванов, Л. А. Півень, Е. Г. Мізер) явища глобальних обурень у навколоземному космічному просторі, що виникають при стартах ракет.

3. Проведення досліджень процесу генерації МГД хвиль, взаємодії хвиля-частка в магнітосфері Землі і взаємодії високоенергійних частинок з атмосферою, що висипаються з магнітосфери.

4. Робота над дослідженням атмосфери радіолокаторами міліметрового діапазону довжин хвиль та моделюванням фізичних процесів, що протікають у обуреній D-області іоносфери.

Сергій Ігорович Мартиненко — доцент кафедри космічної радіофізики, основним напрямком його наукових досліджень є вивчення електродинамічних процесів, які відбуваються в електрично активній середній атмосфері та нижній іоносфері.

Основні відкриття та досягнення **Сергія Ігоровича Мартиненко** [34]:

1. Вперше введено та перевірено дистанційний метод діагностики параметрів електрично активної мезосфери та відповідних плазмових порушень в області D іоносфери.

2. До існуючої моделі глобального атмосферного електричного ланцюга додано новий активний елемент - електрично активну мезосферу.

3. Вперше здійснено статистичне моделювання характеристик як потужних електричних полів мезосфери, так і викликаних ними плазмових порушень, над територіями України та Канади.

4. Розроблено аналітичну модель процесу взаємодії електричних полів мезосфери з іоносферною плазмою.

2.5. Висновки до розділу

У результаті проведеного дослідження та аналізу впливу сильних магнітних бур на геомагнітне поле Землі та технологічні системи, можна зробити кілька важливих висновків, які відображають сутність і значення цієї проблеми.

Магнітні бурі є складним і динамічним феноменом: магнітні бурі виявилися складними явищами, характеристики яких змінюються в залежності від багатьох факторів, зокрема сонячної активності і геомагнітних умов. Розуміння структури та динаміки магнітних бур є ключовим для їх прогнозування та управління.

Прогнозування і моніторинг магнітних бур є важливим завданням: розвиток прогностичних методів для передбачення появи та інтенсивності магнітних бур є критично важливим завданням для зменшення їхнього впливу на суспільство та технологічні системи. Магнітні спостереження та моделювання геомагнітного поля є корисними інструментами для досягнення цієї мети.

Співпраця та обмін даними на міжнародному рівні важливі для розв'язання проблем магнітних бур: розуміння та передбачення магнітних бур - це завдання, що вимагає співпраці науковців та фахівців з різних країн та галузей. Обмін даними та співпраця в глобальному масштабі можуть покращити якість прогнозування та підвищити стійкість технологічних систем до магнітних бур.

3. ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Мережа магнітних станцій Intermagnet

Мережа магнітних станцій Intermagnet (IntermagNet Magnetic Observatory Network) є міжнародною системою магнітних спостережень, створеною для моніторингу та дослідження геомагнітного поля Землі. Ця мережа, що об'єднує багато обсерваторій та станцій у різних країнах світу, відіграє ключову роль у розумінні природи магнітних бур та їхнього впливу на нашу планету.

Основні характеристики та завдання мережі Intermagnet:

1. **Глобальні охоплення:** мережа Intermagnet включає більше ніж 100 магнітних обсерваторій та станцій, розташованих у різних країнах світу, що дає можливість збирати дані з різних географічних областей.
2. **Систематичні спостереження:** мережа проводить систематичні магнітні спостереження, які дозволяють вивчати динаміку геомагнітного поля в реальному часі.
3. **Моніторинг магнітних бур:** однією з основних мет цієї мережі є моніторинг магнітних бур, які можуть виникати внаслідок сонячних вибухів та інших явищ. Важливою частиною цього моніторингу є спостереження і реєстрація магнітних змін, пов'язаних із сильними геомагнітними бурями.
4. **Дані для науки та досліджень:** зібрані дані від мережі Intermagnet представляють важливий матеріал для наукових досліджень у галузі геофізики, астрофізики та сонячної фізики. Вони допомагають розуміти природу геомагнітних явищ і їх вплив на нашу планету.
5. **Глобальний доступ до даних:** дані, зібрані мережею Intermagnet, доступні глобальному науковому співтовариству та громадськості через веб-портали та архіви.

3.2. Методи аналізу результатів спостережень

Основні висновки з вимірювань і моделювання варіацій параметрів іоносфери та термосфери під час сильної геокосмічної бурі 25 вересня 1998 року включають таке:

1. **Уменшення концентрації електронів:** в головну фазу магнітної бурі (від 02:00 до 08:00) спостерігалось значне уменшення концентрації електронів у максимумі області F (від 3 до 3,5 разів) та на висоті 300 км (від 9 до 3 разів). Це призвело до глибокої депресії шару F2, затемненого шаром F1. Вказано, що залучення змін у нейтральному складі, пов'язаних з високоширотним нагрівом термосфери та змінами глобального термосферного обігу, розрахованого за моделлю MSIS-86, не може пояснити спостережену глибоку зміну N та руйнування шару F2, і вимагає корекції

моделі, а також врахування інших факторів (колиально-збуджених молекул $N_2(\nu)$ та $O_2(\nu)$, вплив електричних полів на коефіцієнт рекомбінації, тощо).

2. **Негативне іоносферне зміщення:** у нічний час спостерігалось негативне іоносферне зміщення, що, ймовірно, було викликано зміщенням головного іоносферного провалу до екватора. Це підтверджує аналіз глобальних карт повного електронного вмісту, побудованих на основі даних GPS-навігаційної системи.

3. **Підйом висоти максимуму концентрації електронів z_mF2 :** зареєстровано підйом висоти максимуму концентрації електронів z_mF2 в середньому на 100 км вночі і на 50 км вдень. Це було викликано розширенням термосфери та перебудовою глобального термосферного циркуляційного процесу за рахунок підсилення джерела нагріву високоширотної термосфери. Між 05:00 і 13:00 спостерігалися квазіперіодичні варіації z_mF2 з амплітудою до 40 км.

4. **Ріст температур електронів і іонів:** під час головної фази магнітної бурі було зафіксовано ріст температури електронів (T_e) тривалістю 6 годин та іонів (T_i) тривалістю 16 годин. Близько 02:00 на висоті 500 км температура T_e зросла приблизно на 840 K, а T_i на 500 K. Цей додатковий нагрів іоносферної плазми був викликаний посиленням іоносферних струмів через проникнення магнітосферних електричних полів в середні широти, викидом енергійних частинок, їх джоульовської дисипацією, а також фрикційним нагріванням за рахунок іон-нейтрального тертя.

5. **Зменшення T_e після сходу Сонця:** спостерігалось зменшення температури електронів T_e до 500 K після сходу Сонця на висотах 250–350 км, супроводжуване інверсією швидкості вертикального переносу плазми на цих висотах. Ймовірно, це охолодження T_e можна пояснити зміною напрямку руху плазми та вивізом її вгору із швидкістю $v_z \approx 50$ м/с, що призвело до зменшення енергії теплового руху електронного газу.

6. **Ріст температури нейтральної атмосфери (T_n):** виявлено підвищення температури нейтральної атмосфери T_n під час бурі до 360 K на висоті 300 км. Модель MSIS-86 для умов збурень надавала занижені значення T_n , приблизно 320 K на цій же висоті. Підвищення T_n пояснюється як високоширотним нагрівом термосфери, переносом її із високих широт в середні широти завдяки підсиленню меридіонального вітру в напрямку до екватора, так і локальним джоульовським нагрівом, пов'язаним з проникненням магнітосферних електричних полів в середні широти. Були зібрані дані про зростання T_n під час бурі щонайменше до висоти 450 км. При цьому ΔT_n становило приблизно 250–720 K в діапазоні висот 250–450 км. Це свідчить про те, що висота термопаузи підвищилася щонайменше до 450 км під час бурі.

7. **Позитивна хвиля еквівалентного нейтрального вітру:** під час головної фази магнітної бурі було зафіксовано несподіване для денного часу явище - положиту хвилю еквівалентного нейтрального вітру $w = v_{nx} + v_{i\perp z}$ (спрямовану вгору) з амплітудою приблизно 100 м/с на висоті 300 км, в той час як у спокійний день швидкість цього вітру дорівнювала майже нулю. Цей

ефект пояснюється посиленням меридіонального вітру в напрямку до екватора, пов'язаним з високоширотним нагрівом термосфери та перебудовою глобальної термосферної циркуляції, а також проникненням в середні широти електричних полів, спрямованих на схід. Показано, що збільшення швидкості вітру w до 100 м/с може бути спричинено зростанням швидкості $v_{i\perp z}$ в результаті проникнення магнітосферного електричного поля в іоносферу. Напруженість останнього у цьому випадку складала 13–17 мВ/м.

8. Порушення іоносферно-плазмосферної взаємодії: зареєстровано порушення процесів взаємодії іоносфери і плазмосфери, що призвело до зміни напрямку швидкості переносу v_z та потоку плазми. На висотах 200–400 км під час збурення (після 03:00) швидкість $v_z \approx 50 - 25$ м/с, а густина потоку плазми $P_p \approx (4 - 2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$, у той же час у спокійний день $v_z \approx -(25 - 15)$ м/с, а $P_p \approx -(8 - 3) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ відповідно. Інверсія знаку відбувалася з 02:00 до 06:00. Було проаналізовано можливість виведення плазми вгору через падіння тиску в плазмосфері під час бурі.

9. Нагрівання електронного газу в іоносфері та плазмосфері: отримано дані щодо нагрівання електронного газу в нижній та верхній іоносфері під час збурень. Встановлено, що при збуреннях потік енергії до електронного газу в максимумі шару F2 зменшився на 50-20% (в інтервалі часу 05:00–09:00), а потік тепла, що переноситься електронами між іоносферою і плазмосферою, виріс на 20-70% вище максимуму шару. Були проаналізовані основні процеси, що контролюють тепловий баланс у системі іоносфера-плазмосфера під час бурі.

10. Варіації вільних збурень (ВВЗ): зареєстровані ВВЗ з відносною амплітудою $\frac{\Delta N}{N}$ до 25%, що відбулися в інтервалі часу 10:00–13:00 25 вересня 1998 року. За всім виглядом, збурення пов'язане з генерацією у протиполісній області та поширенням в меридіональному напрямку до середніх широт пакета ВГХ, що складається з переважаючих гармонік із періодами 120, 60, 40, 30 і 24 хвилини. Важливо зауважити, що хвиля мала N-подібний профіль. Значна амплітуда ВВЗ, його спектральний склад та профіль хвилі свідчать про те, що спостерігалися рідкісні нелінійні ВГХ. Це дає підстави вважати, що джерелом цих хвиль був потік протонів, густина якого зросла в 10-30 разів (від $\sim 10^6$ до $(1 - 3) \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}$) близько о 10:00 25 вересня 1998 року.

11. Причина геокоосмічної бурі та її вплив: весь комплекс процесів, спостережуваних під час геокоосмічної бурі, виник в результаті модуляції глобальної конвекції і системи струмів квазіперіодичними (приблизно 10–15 хвилин) збуреннями динамічного тиску сонячного вітру та міжпланетного магнітного поля.

Моделювання та різниця між спостереженнями та моделями: моделювання атмосферних та іоносферних процесів з використанням моделей MSIS-86 та IRI-90 показало, що в спокійні дні результати моделювання і вимірювання в цілому добре узгоджуються, але в умовах магнітного збурення різниця може сягати сотень відсотків для концентрації електронів N , десятків

відсотків для температури електронів T_e та температури іонів T_i . У періоди збурень для моделювання іоносферних процесів може знадобитися використання моделей, таких як FLIP, для вивчення внеску різних фізико-хімічних процесів у стан іоносфери.

Важливість геокоосмічних бурь: спостереження геокоосмічної бурі 25 вересня 1998 р ілюструють тісний взаємозв'язок явищ на сонці, в ближньому космосі, іоносфері, термосфері і електричному полі, що характеризують стан коосмічної погоди. Геокоосмічні бурі можуть призводити до значних збурень в середньоширотній іоносфері і атмосфері, це є важливим фактором, що впливає на стан всієї планети і технологічну діяльність людини.

3.3. Стан коосмічної погоди

Інформація про ключові події, які визначають коосмічну погоду, була отримана з ресурсів INTERNET [25]. У моменти розглянутого періоду, який був з 21 по 27 вересня 1998 року, рівень сонячної активності був середнім, з невеликим підвищенням 23 вересня. В цей самий день на Сонці стався спалах класу M6/3B. Він розпочався о 06:44 і закінчився о 10:09, досягнувши максимальної інтенсивності о 07:06 (час універсального часу, UT). Густина потоку потужності рентгенівського випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0.1–0.8 нм сягнула значень $6.9 \cdot 10^{-5}$ Вт/м² (клас M6.9). Цей спалах супроводжувався випромінюванням II і IV типів.

Також на рисунку показані K_p -індекси. Видно, що 22–23 вересня 1998 року були днями магнітного спокою. У першій половині наступного дня (24 вересня) була помірна магнітна буря ($K_p = 5$), яка перетворилася в інтенсивну магнітну бурю ($K_p = 5 - 8.3$, сумарний індекс $\sum K_p = 51$) до 25 вересня. Буря розпочалася раптово 24 вересня близько 23:00. В цей час на супутнику ACE (Advanced Composition Explorer) було зафіксовано надходження міжпланетної ударної хвилі, спричиненої викидом корональної маси під час спалаху M6/3B.

1. **Початкова фаза бурі:** ця фаза почалася зі збільшенням компоненти H_p від 60 до 80 нТл і індексу D_{st} на поверхні Землі від -37 до -4 нТл. Це було викликано стисненням магнітосфери ударною хвилею. Ця фаза була, швидше за все, дуже короткочасною.

2. **Головна фаза бурі:** ця фаза характеризувалася послідовністю магнітосферних суббурь і супроводжувалася флуктуаціями компоненти H_p на фоні загального пониження напруги геомагнітного поля. Максимальне зниження напруги магнітного поля в магнітосфері відбулося приблизно о 05:00, коли $H_p \approx 35$ нТл, і індекс D_{st} на поверхні Землі наблизився до -210 нТл. Пониження індексу D_{st} тривало до 10:00, коли досягло мінімального значення -210 нТл. Спад D_{st} був найвиразнішим між 02:00 і 08:00 під час основної фази магнітної бурі.

3. **Фаза відновлення бурі:** після 11:00 розпочалася фаза відновлення, де відбувалося підвищення індексу D_{st} , поступове згасання полярних суббурь, послаблення південної компоненти B_z і приближення до нульового значення після 18:00.

Магнітна буря 25 вересня була дуже інтенсивною і була зафіксована на всіх широтах. Її енергію оцінювали як 10^{16} Дж. Максимальна потужність бурі становила близько $1.4 \cdot 10^{12}$ Вт у проміжку часу між 02:00 і 04:00, що робить її однією з найсильніших. Деякі її ефекти щодо спостережень на радарі некогерентного розсіювання в Харкові описані в роботах [26–31]. Ця буря супроводжувалася ростом активності магнітосферних суббурь і високими від'ємними значеннями індексу D_{st} , а також високими значеннями аврорального індексу AE від 1500 до 2200 нТл.

3.4. Висновки до розділу

У цьому розділі ми розглянули основні засоби та методи, використовувані в дослідженні ефектів сильної магнітної бурі. Робота базується на важливих інструментах та методологіях, що дозволила провести аналіз та отримати висновки.

Мережа магнітних станцій Intermagnet, яка охоплює понад 100 обсерваторій у різних країнах, стала основним джерелом даних для наших досліджень. Ця глобальна мережа надає можливість моніторити геомагнітне поле Землі у реальному часі та отримувати важливі дані для нашого аналізу.

Методи аналізу результатів спостережень, які ми використовували, включають спектральний аналіз, крос-кореляційний аналіз, статистичний аналіз, моделювання та візуалізацію геомагнітних змін. Ці методи допомогли виявити структури та характеристики магнітних змін, а також з'ясувати їхній вплив на геомагнітне поле.

Стан космічної погоди є ключовим аспектом нашого дослідження. Ми вивчили вплив сонячної активності та інших факторів на навколоземний простір та визначили, як ці явища можуть впливати на геомагнітне поле та технологічні системи.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Вихідні дані

Для аналізу збурень геомагнітного поля наприкінці квітня 2023 р. використано результати вимірювань, що проводяться на мережі Intermagnet [https://intermagnet.org/new_data_download.html]. Розрізнення за часом складає 1 хв, а за амплітудою – 0.1 нТл. Аналізу підлягали часові варіації X, Y і Z-компонентів геомагнітного поля, що були зареєстровані на 2 магнітних станціях, які знаходяться на території Польщі та України. Станції у кожній країні знаходяться на відстані 320 км. один від одного. Це дозволить нам більш точно порівняти дані та простежити їх залежність.

Щоб проаналізувати стан космічної погоди було використано вимірювані концентрації частинок та температури, радіальної швидкості та розрахованого динамічного тиску, вимірювані компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля, а також K_p -індексу та D_{st} -індексу (рис. 2). Вихідні дані представлено на сайті [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

4.2. Аналіз стану космічної погоди

Компоненти міжпланетного магнітного поля з 21 квітня по 23 квітня 2023 р. зросла від фонового значення (4...6) нТл, але починаючи з 08:00 UT (тут і далі UT – всемірний час) 23 квітня 2023 р. компоненти зросли до 32 нТл.

Температура частинок у сонячному вітрі коливалася у межах фонового значення від $(0.1...1) \cdot 10^5$ К до моменту 08:00 UT 23 квітня, після чого вона збільшилась до $11.6 \cdot 10^5$ К.

Концентрація частинок у сонячному вітрі 21 квітня зростала від рівня фонового значення $2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ до $8 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, але впродовж головної фази концентрація зросла до $19 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Швидкість частинок у сонячному вітрі до початку магнітної бурі набувала у межах фонового значення від 350 км/с до 390 км/с, а під час магнітної бурі швидкість становила близько 700 км/с.

Динамічний тиск частинок у сонячному вітрі зростав від рівня фонового значення 0.2 нПа до 2.1 нПа, а на початку головної фази тиск піднявся до майже 12 нПа.

23 – 24 квітня 2023 р. індекс K_p зростав до 8. В цей же час D_{st} -індекс зменшувався до –200 нТл. В якості контрольних днів розглядалися 25 та 26 квітня 2023 р.

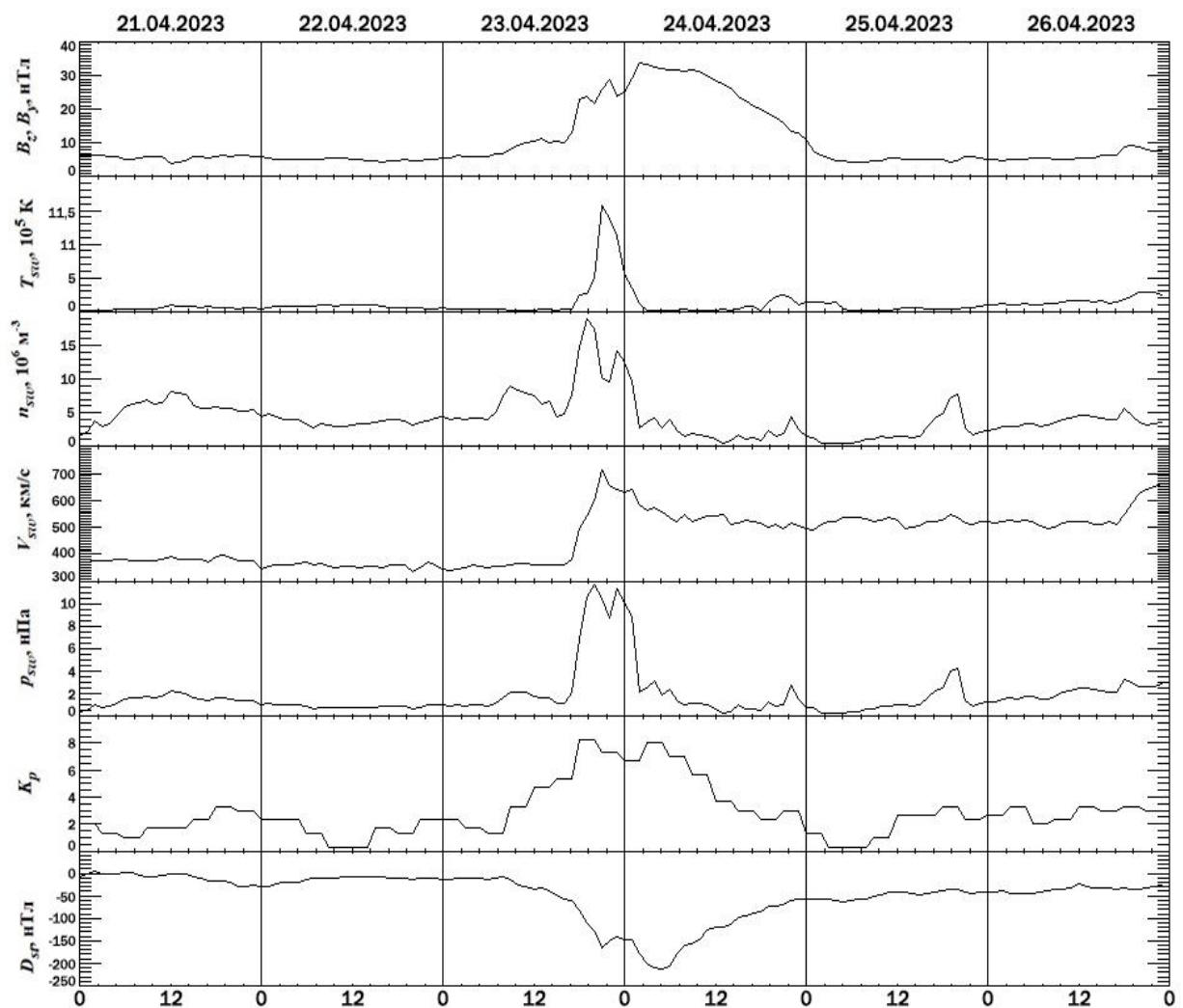


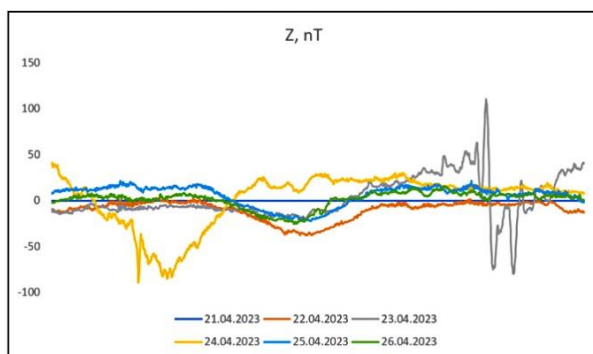
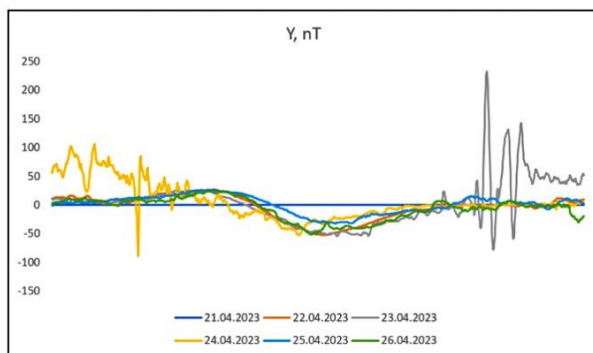
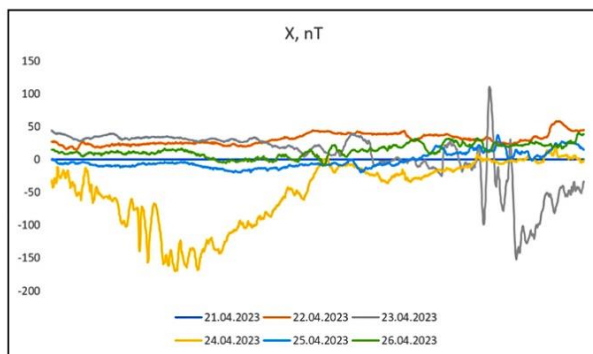
Рис. 2. Часові варіації параметрів сонячного вітру: вимірювані концентрації частинок n_{sw} , температури T_{sw} , радіальної швидкості V_{sw} та розрахованого динамічного тиску p_{sw} , вимірювані компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля; K_p -індексу та D_{st} -індексу в період 21 – 26 квітня 2023 р. Дати вказані вздовж осі абсцис.

4.3. Результати аналізу часових варіацій

Станція LVV. Спочатку розглянемо магнітну станцію у Західній частині України. Часові варіації X-, Y- і Z-компонентів цієї високоширотної станції показано на рис. 3, а. Найбільший розмах, тобто різниця між максимальним і мінімальним значеннями варіацій, для X-, Y- і Z-компонентів мав місце 23 квітня 2023 р. (рис. 3, а). Ці розмахи склали відповідно 263, 310 і 190 нТл (табл. 2).

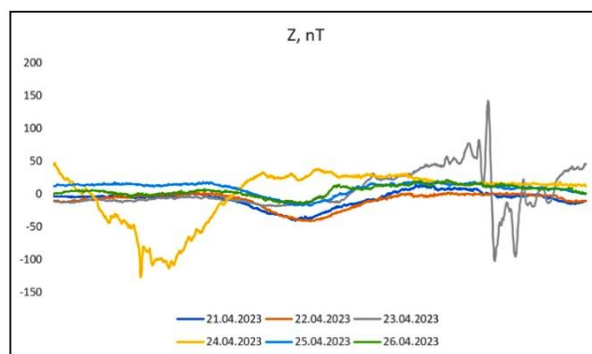
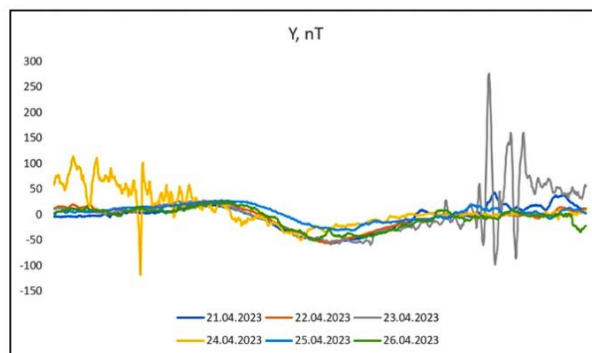
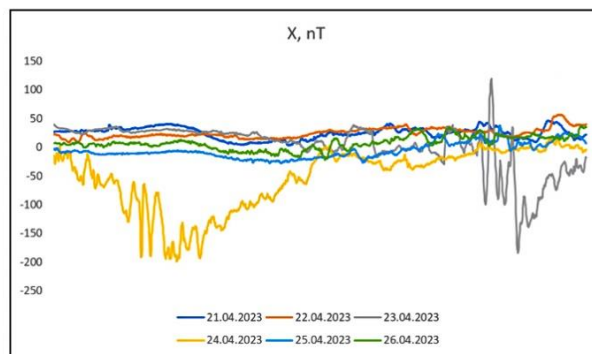
Станція BEL. Для станції в Польщі найбільший розмах усіх компонентів спостерігався також 23 квітня 2023 р. (рис. 3, б). Його значення сягали 303, 374 і 244 нТл для X-, Y- і Z-компонентів відповідно (див. табл. 2).

LVV Ukraine



а

BEL Poland



б

Рис. 3. Часові варіації рівня X-, Y- і Z-компонентів: а – на станції LVV; б – на станції BEL. Цифри у легенді показують дні сильних бур та спокійних умов у квітні 2023 р.

Станція	Компонент	21 квітня	22 квітня	23 квітня	24 квітня	25 квітня	26 квітня
LVV	X	0	44	263	190	57	50
	Y	0	80	310	194	59	76
	Z	0	40	190	130	44	41
BEL	X	44	54	303	216	66	59
	Y	101	86	374	231	59	78
	Z	55	43	244	174	37	36

Таблиця 2. Розмах варіацій компонентів геомагнітного поля (нТл) на магнітних станціях.

4.4. Обговорення результатів

За даними космічної погоди буря 23 – 24 квітня 2023 р. була сильнішою за цей рік. Буря продовжувалась до 12:00 25 квітня 2023 р. Її тривалість становила приблизно 48 годин.

У контрольні дні варіації X-, Y- і Z-компонентів зазвичай були меншими в 3.7...5.7 рази, ніж у дні збурень.

Цікаво порівняти дані станцій LVV та BEL, які знаходяться приблизно на однаковій відстані від екватору, але в різних країнах.

Із аналізу табл. 2 видно, що станція BEL показала вищий розмах варіацій. Якщо порівняти, то відмінність склала в 1.16 рази більше, ніж станція LVV.

До того ж, дані 21.04.2023 відсутні на станції LVV, але за даними зі станції BEL ми можемо переконатися у відсутності сильних збурень у цей день, оскільки відхилення компонентів було незначним.

Ці дві станції продемонстрували відмінні показники на досліджувані дні із мінімальними відхиленнями. Оскільки географічні довготи майже не відрізнялися, то і час настання збурень приблизно однаковий.

Таким чином, на прикладі сильної магнітної бурі у порівнянні з контрольними днями оцінено максимальний розмах варіацій компонентів геомагнітного поля у невеликих масштабах.

4.5. Висновки до розділу

Аналіз часових варіацій рівня X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля, зареєстрованих мережею магнітних станцій Intermagnet показав наступне:

1. Встановлено межі варіацій рівня компонентів геомагнітного поля у невеликих масштабах у магнітоспокійних умовах і під час сильної магнітної бурі.

2. У магнітоспокійних умовах розмах варіації рівня геомагнітного поля перебував на рівні фонового значення від 40...60 до 80...100 нТл.

3. Впродовж геомагнітних бур розмах варіацій X-, Y- і Z-компонентів збільшувались в 3.7...5.7 рази у порівнянні з розмахом у контрольні дні.

4. Варіації рівня всіх компонентів на обох станціях несуттєво відрізнялися. Станція у Польщі показала розмах варіації у 1.16 разів більше, ніж станція на території України.

5. ВИСНОВКИ

Мета роботи була досягнута шляхом ретельного аналізу, класифікації та вивчення глибоких аспектів природних явищ. Підбиваючи підсумок дипломної роботи, можна відзначити наступне:

1. Висновки з дослідження вказують на те, що магнітні бурі є складним і динамічним феноменом, чий характер залежить від різних факторів, таких як сонячна активність та геомагнітні умови. Розуміння структури та динаміки магнітних бур є ключовим для їх прогнозування та управління.
2. Важливість прогнозування та моніторингу магнітних бур визначається їхнім впливом на суспільство та технологічні системи. Розвиток прогностичних методів та співпраця на міжнародному рівні є критично важливими для зменшення негативних наслідків цих явищ.
3. Аналіз методів та інструментів, використаних у роботі, підкреслює важливість глобальної мережі магнітних станцій Intermagnet і подібних дослідницьких систем для різноманітних методів аналізу даних та розкриття особливостей магнітних бур.
4. Під час досліджень було проаналізовано стан космічної погоди, для цього використали вимірювані концентрації частинок та температури, радіальної швидкості та розрахованого динамічного тиску, вимірювані компоненти B_z і B_y міжпланетного магнітного поля, а також K_p -індексу та D_{st} -індексу. Це дозволило нам виявити, що під час магнітних збурень значення відрізнялися від контрольних днів приблизно у 2-6 разів.
5. Вивчення часових варіацій геомагнітного поля під час магнітних бур дозволило встановити межі варіацій у різних умовах, а також виявити, що через територіальне розташування станція у Польщі показала розмах варіацій у 1.16 разів більше, ніж станція на території України.

У цілому, результати дослідження внесли важливий внесок у розуміння та прогнозування магнітних бур, але вони також вказують на необхідність подальших досліджень у цій сфері для глибшого осмислення та управління цими складними природними явищами. Подальше співробітництво між вченими, інженерами та фахівцями з різних галузей є ключем до успішного вирішення проблем, пов'язаних із магнітними бурами.

6. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lysenko V. N., Taran V. I. (2007). Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations. *Int. J. Geomagn. Aeron.*, 7(GI3001). [DOI:10.1029/2005GI000125](https://doi.org/10.1029/2005GI000125).
2. Hsu C.-T., Pedatella N. M. (2023). Effects of forcing uncertainties on the thermospheric and ionospheric states during geomagnetic storm and quiet periods. *Space Weather*, 21, id: e2022SW003216. [DOI:10.1029/2022SW003216](https://doi.org/10.1029/2022SW003216).
3. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Garmash K. P., Chernogor L. F., Shulga S. N. (2021c). Geospace storm effects on August 5-6, 2019 (in Ukrainian). *Space Science and Technology*, 27(2), 45–69. [DOI:10.15407/knit2021.02.045](https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045).
4. Chernogor L. F. (2021). Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*, 27(1), 3–77. [DOI:10.15407/knit2021.01.003](https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003).
5. Abe O. E., Fakomiti M. O., Igboama W. N., Akinola O. O., Ogunmodimu O., Migoya-Orué Y. O. (2023). Statistical analysis of the occurrence rate of geomagnetic storms during solar cycles 20–24. *Advances in Space Research*, 71(5), 2240–2251. [DOI:10.1016/j.asr.2022.10.033](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.033).
6. Luo Y., Chernogor L. F. (2022). Characteristic Features of the Magnetic and Ionospheric Storms on December 21–24, 2016. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 38(5), 262–278. DOI:10.3103/S0884591322050051.
7. Akasofu S.-I. Solar-terrestrial physics. Part 1 / S.-I. Akasofu, S. Chapman. - M.: Mir, 1974. - 384 p.
8. Akasofu S.-I. Solar-terrestrial physics. Part 2 / S.-I. Akasofu, S. Chapman. - M.: Mir, 1975. - 512 p.
9. Solar-terrestrial connections, weather and climate / Ed. B. McCormack, T. Seliga. - M.: Mir, 1982. - 328 p.
10. Kivelson M. G. T. Introduction to Space Physics / M. G. Kivelson, Ch. T. Russell // Cambridge: Cambridge Atmospheric & Space Science Series, 1995. – 568 p.
11. Myroshnychenko L. I. Physics of the Sun and solar-terrestrial connections: учеб. manual / L. I. Myroshnychenko. - Moscow: University book, 2011. - 174 p.
12. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007b). Analysis and classification of ionosphere storms at the midlatitudes of Europe. 1. *Space Science and Technology*, 13(5), 58–76. [DOI:10.15407/knit2007.05.058](https://doi.org/10.15407/knit2007.05.058).
13. Lin D., Wang W., Merkin V. G., Huang C., Oppenheim M., Sorathia K. (2022). Origin of dawnside subauroral polarization streams during major geomagnetic storms. *AGU Advances*, 3, id: e2022AV000708. [DOI:10.1029/2022AV000708](https://doi.org/10.1029/2022AV000708).

14. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). Physics of geospace storms. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.
15. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. (2021). Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring. *Geomagnetism and Aeronomy*, 61(1), 73–91. [DOI:10.1134/S001679322006002X](https://doi.org/10.1134/S001679322006002X).
16. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazyura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. (2007a). Ionospheric disturbances during the severe magnetic storm of November 7–10, 2004. *Geomagn. Aeron.*, 47, 720–738. [DOI:10.1134/S0016793207060059](https://doi.org/10.1134/S0016793207060059).
17. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms: A Review / M. J. Buonsanto // *Space Sci. Rev.* – 1999. – V. 88. – P. 563–601.
18. Chernogor L. F. Physics of the Earth, atmosphere and geocosm in the light of the system paradigm / L. F. Chernogor // *Radio physics and radio astronomy*. – 2003 – Vol. 8, No. 1. – P. 59– 106.
19. Chernogor L. F. Earth – atmosphere – geocosmos as an open dynamic nonlinear system / L. F. Chernogor // *Space science and technology*. - 2003. - Vol. 9, No. 5/6. – pp. 96–105.
20. Chernogor L.F. Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere as an open dynamic nonlinear physical system. 1 / L.F. Chernogor // *Nonlinear world*. – 2006. – Vol. 4, No. 12. – P. 655–697.
21. Katsko S. V., Emelyanov L. Ya., Domnin I. F., Chernogor L. F. (2020). Ionosphere response to geomagnetic storms on 7-8 September 2017 over Kharkiv (Ukraine). *URSI GASS*, Rome, Italy, 29 August - 5 September 2020. DOI: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232440.
22. Oikonomou C., Haralambous H., Paul A., Ray S., Alfonsi L., Cesaroni C., Sur D. (2022). Investigation of the negative ionospheric response of the 8 September 2017 geomagnetic storm over the European sector. *Advances in Space Research*, 70(4), 1104–1120. [DOI:10.1016/j.asr.2022.05.035](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.035).
23. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2020). Latitudinal dependence of quasi-periodic variations in the geomagnetic field during the greatest geospace storm of September 7-9, 2017. *Space Sci. and Technol*, 26(2), 72–83. DOI:10.15407/knit2020.02.072.
24. Tariq M. A., Yuyan Y., Shah M., Shah M. A., Iqbal T., Liu L. (2022). Ionospheric-Thermospheric responses to the May and September 2017 geomagnetic storms over Asian regions. *Advances in Space Research*, 70(11), 3731–3744. [DOI:10.1016/j.asr.2022.08.050](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.050)
25. <http://solar.sec.noaa.gov/weekly>.
26. V. I. Taran, Investigation of the ionosphere in natural and artificially disturbed states by the method of incoherent scattering / V. I. Taran // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2001. – Vol. 41, No. 5. – P. 659–666.

27. V. I. Taran, Ionospheric effects of magnetic storms based on observations on the incoherent scattering radar in Kharkov / V. I. Taran, E. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, V. A. Pulyaev // Proceedings of KhHPU. Information technologies: science, technology, education, health. – 1999. – Issue 7, part 3. - pp. 381–383.
28. Taran V. I. The F region ionosphere response to the severe magnetic storm on September 25, 1998 / V. I. Taran, Ye. I. Grigorenko, G. A. Kiyashko // Space science and technology, Space Plasma Physics (supplement to the journal). – 2001. – Vol. 7, No. 2. – P. 42–46.
29. V. I. Taran, V. I. Ionospheric-protonospheric processes during natural perturbations according to the data of the Kharkiv radar of incoherent scattering / V. I. Taran, E. I. Grigorenko // Proceedings of the first Ukrainian conference on perspective space research. – 2001. – P.119–124.
30. Taran, V. I. Peculiarities of the processes of plasma transfer and ionospheric protonospheric interaction during magnetic storms / V. I. Taran, V. N. Lysenko, E. I. Grigorenko // Herald of the KhPI National Technical University. Sat. scientific labor – 2001. – Issue 4. – pp. 261–264.
31. Chernogor L.F. Dynamic processes in the near-Earth plasma during the September 25, 1998 magnetic storm from Kharkiv incoherent scatter radar data / L.F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. I. Taran, O. F. Tyrnov // Program Poster Presentations International Union of Radio Science XXVIIth General Assembly. - 2002. - P. 2280.
32. https://physics.karazin.ua/ua/pers_pages/lazorenko_o_v.html.
33. <http://www-space.univer.kharkov.ua/Rozumenko%20Main.html>.
34. <http://www-space.univer.kharkov.ua/Martynenko%20Main.html>.