

АНОТАЦІЯ

Жданко Є. Г. Динамічні процеси в іоносферному радіоканалі: результати дистанційного радіозондування іоносфери. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної задачі – експериментальному та теоретичному дослідженню впливу високоенергетичних джерел енерговиділення природного та штучного походження на параметри радіохвиль і каналів їхнього поширення, що використовуються для телекомунікації, радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, дистанційного радіозондування, радіоастрономії тощо.

Метою дисертаційної роботи є експериментальні дослідження характеристик радіосигналів і параметрів динамічних процесів в іоносферному радіоканалі, викликаних природними та техногенними джерелами.

Перший розділ присвячено історії відкриття та дослідження земної іоносфери, сучасним уявленням про її морфологію, опису космічної погоди за допомогою цілої низки індексів, а також впливу на іонізовану частину атмосфери нашої планети різноманітних високоенергетичних джерел. Останнє є важливим для розробки практичних рекомендацій, спрямованих на послаблення впливу таких джерел на іоносферний радіоканал і функціонування засобів, що використовують радіозв'язок.

У зв'язку з цим у другому розділі розвинуто теоретичні основи доплерівського радіозондування іоносфери на похилих радіотрасах і отримано прості аналітичні співвідношення для доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ). Для цього використовувалася сферично-шарувата модель

незбуреної іоносфери, періодична та аперіодична моделі збурень в іоносфері. Було отримано скоригований закон секанса, що описує умову відбиття ВЧ радіохвилі від ізотропної іоносфери без втрат. Встановлено просте аналітичне співвідношення для оцінки максимальної застосовної частоти на похилих ВЧ радіотрасах за відомим значенням максимальної плазмової частоти. Для умов похилого ВЧ зондування іоносфери отримано прості аналітичні співвідношення для оцінки відносної амплітуди квазіперіодичних збурень і величини аперіодичних збурень концентрації електронів у іоносфері. Продемонстрована застосовність отриманих співвідношень при використанні на практиці.

У третьому розділі розглядається вплив на іоносферу та характеристики радіохвиль сонячних затемнень (СЗ). Встановлено, що варіації ДЗЧ на вертикальних і похилих радіотрасах були подібними. На похилих радіотрасах помітніше позначалася багатомодовість. СЗ 10 червня 2021 р. супроводжувалося посиленням хвильової активності в іоносфері. Період $T \approx 5\text{--}12$ хв і відносні амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів $\delta_N \approx 0.3\text{--}0.6\%$ свідчили про генерацію хвильових збурень атмосферними гравітаційними хвилями (АГХ). Також вперше за допомогою ГНСС-технологій досліджено реакцію повного електронного вмісту (ПЕВ) на СЗ, що мало місце перед проходженням та в період проходження вечірнього термінатора. Встановлено, що СЗ запускає фізико-хімічні та динамічні процеси в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ), які забезпечують продовження реакції іоносфери і після закінчення затемнення та після заходу Сонця на поверхні Землі. Тривалість реакції сягала 120–180 хв. Величина дефіциту в цілому відстежувала зменшення фази СЗ та $A_{\max}$. Таким чином, є підстави вважати, що мала місце синергетична взаємодія сонячного затемнення та термінатора.

У четвертому розділі наведено результати іоносферних спостережень за стартами та польотами важких ракет (СР) з космодрому Байконур за 2009–2021 рр., що приблизно збігається з періодом 24-го циклу сонячної активності.

Виконано статистичний аналіз 134 випадків СР (81 старт ракети *Союз* та 53 старту ракети *Протон*). Підтверджено існування декількох груп часів запізнювання можливої реакції іоносфери на старт і політ ракет. Значення цих часів змінювалися в межах від ~ 10 до ~ 300 хв. Цим групам відповідають наступні групи удаваних горизонтальних швидкостей поширення збурень: $\sim 100\text{--}200$ м/с; 390 ± 23 м/с; 0.97 ± 0.10 км/с; 1.28 ± 0.13 км/с; 1.68 ± 0.13 км/с; 2.07 ± 0.13 км/с, а також ~ 8 км/с. Такі швидкості мають повільні АГХ, АГХ техногенного походження, ударні хвилі густини, повільні та звичайні МГД хвилі. Виникаючі збурення (крім ударно-хвильових), як правило, були квазіперіодичними з періодом від ~ 5 до ~ 20 хв та амплітудою ДЗЧ від 0.1 до 0.3 Гц. Відносна амплітуда δ_N зазвичай становила $\sim 1\text{--}10\%$, рідше досягала $\sim 20\%$. Також досліджено реакцію іоносфери на СР під час геокозмічних бур різної інтенсивності. Виявлення цієї реакції на віддалений на ~ 2000 км старт і політ важкої ракети на фоні бурі доплерівським методом зазвичай можливе за індексу $K_{p\max} \leq 5$, а за більших його значень дуже ускладнено або взагалі неможливе. У ряді випадків навіть за індексу $K_{p\max} = 4$ визначення реакції ускладнено. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети доплерівський радар повинен одночасно працювати на низькій частоті у діапазоні від 1.5–2 до 4–6 МГц. Підтверджено існування декількох груп горизонтальних удаваних швидкостей поширення збурень: 1.7–3 км/с і більше, 700–1000, 300–700, 150–260 м/с.

П'ятий розділ присвячено взаємодії потужного імпульсного та періодичного радіовипромінювання з іоносферною плазмою. Спостереження велися за 960 км від нагрівного стенда. В результаті вперше було показано, що в період мінімуму сонячної активності реєстровані збурення в іоносфері на даній відстані можуть виникати при ефективній потужності, рівній 25 МВт. За моноімпульсного випромінювання тривалість реакції іоносфери співпадала з тривалістю моноімпульсу. При цьому квазіперіодичні варіації ДЗЧ тільки починали генеруватися. Встановлено вдавану горизонтальну швидкість поширення збурень (від ~ 300 до ~ 420 м/с). Тут є важливим те, що зі

збільшенням висоти ця швидкість збільшувалася. Періодичний режим випромінювання нагрівного стенда супроводжувався генерацією квазіперіодичних збурень концентрації електронів з відносною амплітудою $\sim 1\%$ і періодом, близьким до періоду Брента–Вяйсяля.

У шостому розділі досліджуються часові варіації характеристик ВЧ радіохвиль та іоносферних збурень протягом однієї з найсильніших бур у 25-му сонячному циклі – геокосмічної бурі 23–24 квітня 2023 р. У збурені дні 23 та 24 квітня 2023 р. виявлено суттєве (до ± 1.5 Гц) уширення ДС, посилення багатопроменевості та розсіяння радіохвиль. Значно збільшилася хвильова активність в іоносфері. ДЗЧ зазнавало коливань у широкому діапазоні періодів (від ~ 8 – 10 хв до 100 – 120 хв) з амплітудою від 0.04 Гц до 0.3 – 0.4 Гц. Іоносферна буря супроводжувалася тривалими (до 10 годин) квазіперіодичними варіаціями висоти відбиття радіохвиль, амплітуда яких в залежності від радіотраси досягала 30 – 130 км для періоду 100 – 120 хв. Середня вертикальна швидкість руху області відбиття радіохвилі змінювалася від ~ 10 м/с до ~ 60 м/с. Короткочасні (~ 10 – 25 хв) аперіодичні варіації цієї висоти становили 30 – 70 км. При цьому швидкість дорівнює 50 – 100 м/с. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів становила 1.6 – 3.5% для періоду 8 – 15 хв. Якщо період був близький до 40 хв, то ця величина наближалася до 29 – 39% .

Ключові слова: іоносфера, атмосферно-іоносферний радіоканал, високоенергетичне джерело, атмосферна гравітаційна хвиля, іоносферне збурення, сонячне затемнення, старту ракет, геокосмічна буря, характеристики радіохвилі, доплерівське зміщення частоти, концентрація електронів, аперіодичні та квазіперіодичні збурення, похиле радіозондування, удавана швидкість, час запізнювання.