

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

“ДО ЗАХИСТУ”
Завідувач кафедри
космічної радіофізики
професор
О. Ф. Тирнов
“ ___ ” _____ 2019 р.

Кваліфікаційна робота магістра

на тему: **СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНИХ
МЕЗОСФЕРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ**

Виконала: студентка II курсу магістратури, групи РР-66
Спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,
освітньо-професійна програма «Радіофізика і
електроніка»

Зінченко В.В.

Керівник :
канд.фіз.-мат.наук,
доцент

Мартиненко С.І.

Рецензент :
доктор фіз-мат.наук,
професор

Батраков Д.О.

2019 рік

УДК: 550.388.2; 551.510.535

Реферат

Зінченко В. В. Статистичні характеристики потужних мезосферних електричних полів. Кваліфікаційна робота магістра. Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2019, 12 рис., 2 таблиці, 57 с., 45 посилань.

Розглянуто основні результати досліджень потужних мезосферних електричних полів, які були отримані різними групами науковців у світі. Наведені статистичні характеристики потужних мезосферних полів, які одержані за допомогою реєстрацій частково відбитих сигналів.

Ключові слова: іоносфера, потужні мезосферні електричні поля.

УДК: 550.388.2; 551.510.535

Реферат

Зинченко В. В. Статистические характеристики мощных мезосферных электрических полей. Квалификационная работа магистра. Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, факультет радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем, кафедра космической радиофизики, 2019, 12 рис., 2 таблицы, 57 с., 45 библиографических ссылок.

Рассмотрены основные результаты исследований мощных мезосферных электрических полей, которые были получены различными группами ученых в мире. Представлены статистические характеристики мощных мезосферных полей, полученные с помощью регистраций частично отраженных сигналов.

Ключевые слова: ионосфера, мощные мезосферные электрические поля.

UDK: 550.388.2; 551.510.535

Abstract

Zinchenko V. V., Statistical Characteristics of Powerful Mesospheric Electric Fields, BS Thesis, Department of Space Radio Physics, School of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Systems, Kharkiv V. Karazin National University, Kharkiv, 2019, 57 Pages, 12 Figures, 2 Tab., 45 References.

The main results of the study of powerful mesospheric electric fields that were received by various groups of scientists in the world are considered. The statistical characteristics of the powerful mesospheric fields obtained by means of partially reflected signals are derived.

Key words: Ionosphere, Large Mesospheric Electric Fields.

Key words: Ionosphere, Large Mesospheric Electric Fields.

ЗМІСТ

1. ВСТУП.....	6
2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В МЕЗОСФЕРІ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	8
2.1. Коротка історична довідка	8
2.2. Класична модель глобального атмосферного електричного ланцюга.....	11
2.3. Розрядні явища в мезосфері.....	17
2.4. Власні потужні електричні поля в мезосфері.....	19
3. МЕТОД ДИСТАНЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНОЇ МЕЗОСФЕРИ.....	27
4. СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНИХ МЕЗОСФЕРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ.....	33
5. ВИСНОВКИ.....	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	52

1. ВСТУП

Однією з найбільш важливих областей сучасної науки є фізика земної атмосфери і навколоземного космічного простору. Це обумовлено усвідомленням визначального впливу атмосферних процесів не тільки на життєдіяльність людства, але і на умови існування всієї природи Землі. У класичній моделі глобальної електричної системи мезосфера була важливою пасивною ланкою між поверхнею Землі з приповерхневим середовищем і верхньою атмосферою, іоносферою, магнітосферою.

Зараз від сучасних аерокосмічних спостережень постійно надходять експериментальні дані, які показують, що мезосферне середовище є чутливим не тільки до впливу з космосу, але і до того, що відбувається в земній корі і нижній атмосфері. Все це призводить до зміни характеристик радіохвиль, що поширюються в мезосфері.

Відкриття існування в мезосфері власних потужних електричних полів викликало необхідність коригування існуючої до цього часу моделі глобального атмосферного електричного ланцюга, а також розвитку досліджень впливу на електрично активну мезосферу різних потужних джерел атмосферних збурень. Але без знання характеристик потужної мезосферної електрики побудова відповідних адекватних електродинамічних моделей є неможливою.

Дана магістрська робота присвячена актуальному питанню, що має велике наукове і практичне значення, – виявленню статистичних характеристик потужних мезосферних електричних полів.

Об'єктом досліджень у цій роботі є мезосферні електродинамічні процеси, а предметом досліджень – статистичні характеристики власних потужних мезосферних електричних полів.

Робота складається з вступу, основної частини і висновків. В аналітичному оляді коротко розглянуто розвиток знань людства про мезосферні процеси, а також обговорено основні результати досліджень потужних мезосферних електричних полів, отримані різними групами науковців у світі. У наступному розділі наводяться основні положення метода дистанційної діагностики параметрів електрично активної мезосфери, за допомогою якого було одержано експериментальні відомості, що у подальшому використовувались в цій роботі. Далі наводяться результати статистичного аналізу как відомих з літератури експериментальних даних, так і оновленого масиву значень напруженостей потужних мезосферних електричних полів. У висновках надані основні результати магістрської роботи.

2. ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В МЕЗОСФЕРІ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Проведені за останній час наукові дослідження показали, що електродинамічні процеси у навколоземному середовищі є невід'ємною складовою динаміки та енергетичного балансу атмосфери, іоносфери та космічної плазми (див., напр., [1]). Це обумовлено тим, що електричний стан атмосфери характеризується регулярним розподілом електричного поля, провідності та густини електричного струму, а також наявністю нерегулярних електродинамічних структур глобальних, регіональних та локальних масштабів (див., напр., [1–5]).

2.1. Коротка історична довідка

Вважається, що першою науковою роботою з фізики атмосфери була книга грецького філософа Арістотеля "Метеорологіка" (IV ст. до н. е.), в якій він описував, наприклад, полярні сьйва, що відбуваються у верхній атмосфері [6]. Назва цієї книги і визначило назву сучасної метеорології (метеорологію часто подають як частину загальної фізики атмосфери).

Надалі дослідження середньої атмосфери фактично поновилися в кінці XVI ст. і отримали свій розвиток в XVII – XVIII ст. Спочатку основна увага приділялася вивченню полярних сьйв, що відбуваються, як було показано пізніше, на висотах 60 – 120 км при вторгненні у мезосферу високоенергійних електронів та протонів. Найбільший внесок у ці дослідження внесли [6] Галілео Галілей (Galileo Galilei, 1564 – 1642 рр., Італія, вивчав природу північних сьйв), Едмунд Холлі (Edmund Halley, 1656 – 1742 рр., Англія, досліджував природу північних сьйв і взаємодію верхньої атмосфери з метеоритами), Леонард Ейлер

(Leonard Euler, 1707 – 1783 pp., Швейцарія, Німеччина, Росія, вперше висунув гіпотезу про вплив на полярну атмосферу сонячного випромінювання і високоенергійних частинок), Бенджамін Франклін (Benjamin Franklin, 1706 – 1790 pp., США, вивчав електричні явища в атмосфері і відмінності високоширотної атмосфери від середньоширотної); Михайло Васильович Ломоносов (Ломоносов М. В., 1711 – 1765 pp., Росія, досліджував електричні явища в атмосфері), Георг Вільгельм Ріхман (Ріхман Г. В., 1711 – 1753 pp., Росія, вивчав електричні явища в атмосфері, загинув при проведенні експериментів від кульової блискавки), Джеймс Кук (James Cook, 1728 – 1779 pp., Великобританія, вперше спостерігав і описав полярні сьйва в південній півкулі), Генрі Кавендіш (Henry Cavendish, 1731 – 1810 pp., Великобританія, вперше експериментально оцінив висоту полярних сьйв, які лежать у межах 83 – 114 км).

У XIX ст. дослідження верхньої атмосфери продовжили Карл Фрідріх Гаусс (Carl Friedrich Гаусса, 1777 – 1855 pp., Німеччина, припустив існування електричних струмів у верхній атмосфері, що викликають варіації геомагнітного поля на поверхні Землі), Андерс Йонас Ангстрем (Anders Jonas Angstrom, 1814 – 1874 pp., Швеція, один з основоположників оптичної спектроскопії, вперше виміряв спектри полярних сьйв), Йоганн Рудольф Вольф (Johann Rudolf Wolf, 1816 – 1893 pp., Швейцарія, виявив 11-річний цикл сонячної активності та зв'язок геомагнітної активності з сонячною активністю), Джозеф Джон Томсон (John Joseph Thomson, 1856 – 1940 pp., Великобританія, експериментально відкрив існування потоків високоенергійних електронів у верхній атмосфері).

Подальший розвиток геофізичних наук багато в чому визначили роботи двох вчених XIX ст.. Одним з них був Джеймс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell, 1831 – 1879 pp., Великобританія) – засновник сучасної класичної електродинаміки. Саме він уперше ввів поняття електромагнітного поля,

передбачив існування електромагнітних хвиль і електромагнітну природу світла.

Другим видатним вченим був Костянтин Едуардович Ціолковський (Ціолковський К. Е., 1857 – 1935 рр., Росія, СРСР) – основоположник теорії космонавтики [6]. Він розробив фундаментальні закони ракетного руху та методи досягнення ракетами орбітальних швидкостей, досліджував рух в космосі тіл зі змінною масою, передбачив запуск штучних супутників Землі, запропонував використання рідинних воднево-кисневих двигунів [6].

Практичне використання передбачених Дж. Максвеллом електромагнітних хвиль почалося з винаходом радіо (О. С. Попов – 1895 р.; Г. Марконі – 1896 р.). Існування іоносфери було встановлено в 1901 р. при проведенні Г. Марконі успішного сеансу радіозв'язку через Атлантичний океан. Експеримент показав, що радіохвилі поширювалися вздовж поверхні Землі набагато далі, ніж можна було очікувати за рахунок ефекту дифракції [6]. У 1902 р. Олівер Хевісайд (Oliver Heaviside, 1850 – 1925 рр., Великобританія) та Артур Едвін Кеннеллі (Artur Edvin Kennelly, 1862 – 1939 рр., США) припустили існування іонізованого шару у верхній атмосфері, який відбиває радіохвилі і сприяє передачі радіосигналів в обхід кривизни земної поверхні. У першій половині ХХ ст. цей шар стали називати шаром Хевісайда – Кеннеллі. За сучасною класифікацією це шар Е іоносфери [2,8]. Едвард Віктор Епплтон (Edvard Victor Appleton, 1892 – 1975 рр., Великобританія, лауреат Нобелівської премії 1947 р. за дослідження іоносфери) запропонував залежно від властивостей, що визначають відбиття радіохвиль різних діапазонів, виділяти в іоносфері три шари – D, E і F [2,6].

Датою початку ракетно-космічної ери розвитку людства з практичним втіленням ідей К. Е. Ціолковського традиційно вважається запуск у СРСР 4 жовтня 1957 року першого штучного супутника Землі (ШСЗ) [6]. Керували розробкою цього проекту в СРСР Сергій Павлович Корольов (1907 – 1966 рр.) і

Михайло Клавдійович Тихонравов (1900 – 1974 рр.). Другий ШСЗ був запущений в СРСР 3 листопада 1957 року.

У США перший успішний запуск ШСЗ був здійснений 31 січня 1958 року, керував розробкою і запуском цієї моделі ШСЗ Вернер фон Браун (Wernher von Braun, 1912 – 1977 рр.). За допомогою наукової апаратури, розробленої під керівництвом Джеймса Ван Аллена (James Alfred Van Allen, 1914 – 2006 рр., США – астрофізик) та встановленої на цьому супутнику, було відкрито існування радіаційних поясів Землі [9]. Таким чином, в результаті подальшого бурхливого розвитку як методів дистанційної діагностики навколосемного простору з використанням радіохвиль різних діапазонів, так і прямих методів вимірювання параметрів верхньої атмосфери з допомогою апаратури, встановленої на ШСЗ і ракетах, в різних регіонах Земної кулі було отримано великий обсяг необхідних експериментальних даних. Це дозволило до 70-х рр.. ХХ ст. побудувати класичні моделі верхньої атмосфери і глобального атмосферного електричного ланцюга [1–6].

2.2. Класична модель глобального атмосферного електричного ланцюга

Класична модель глобальної атмосферної електричного ланцюга склалася до початку 70-х років 20-го століття [2,4,5]. Одним з основних елементів цього ланцюга вважається глобальний сферичний конденсатор, зовнішньої обкладкою якого є позитивно заряджена нижня іоносфера з потенціалом приблизно 260 кВ относительно негативно зарядженої поверхні Землі (внутрішня обкладка). Загальний струм розряду цього конденсатора через атмосферу приблизно становить 1 кА (діапазон можливих змін 0,75–3,0 кА) по всій поверхні Землі. Традиційно вважалося, що існує три основних джерела електрики в глобальному ланцюгу: глобальна грозова активність, динамо-взаємодія між

Сонячним вітром і магнітним полем Землі, а також динамо-ефект в Е-області іоносфери за рахунок присутності атмосферної циркуляції середовища.

Гроза активність є найбільш потужним джерелом геоелектрики і перевершує за потужністю інші джерела приблизно в три рази. Струм зарядження від блискавки області (струм Вільсона) простягається до висот іоносфери. Замикається глобальний електричний ланцюг знову на поверхні землі за рахунок глобального струму розрядки "ясної погоди" через стратосферу і тропосферу. Розряди хмара-земля є також каналом розрядки в глобальному електричному ланцюзі із середнім струмом приблизно 1 кА. Тобто в області грозової активності на поверхні землі реєструється середній сумарний струм близько 2 кА [2,4], який включає в себе дві приблизно рівноцінні складові - глобальний струм атмосферної розрядки і струм блискавичних розрядів.

За останніми даними [5] глобальна середньорічна частота спалахів (внутріоблачні розряди і розряди хмара-земля) оцінюється як 46 с^{-1} , що більш ніж в два рази нижче традиційно використовуваної оцінки 100 с^{-1} . Приблизно 78% всіх блискавок реєструється між 30° пд.ш. і 30° пн.ш. . Максимальна середня щільність числа спалахів на одиницю поверхні Землі перевищує $80 \text{ км}^2 / \text{рік}$ і спостерігається в Африці (Руанда). Весь басейн р.Конго площею близько 3 млн км^2 регулярно демонструє найбільшу блискавичну активність, хоча і інші екваторіальні джерела (в Південній Америці і Південно-Східній Азії) рясніють грозами. Виявилося, що істотний внесок в глобальну грозову активність дають грозові осередки субтропіків і середніх широт. Деякі з них, наприклад в Північній Аргентині і Парагваї, лідирують за темпами блискавичних спалахів (більше 100 хв^{-1}). Вивчення регіональних особливостей статистики (кліматологія блискавки) вимагає подальшого вдосконалення супутникових і наземних засобів картування гроз. Ці дослідження інтенсивно ведуться у зв'язку з усвідомленням блискавичної активності як важливого фактора клімату

планети, що чутливо реагує на зміни температури, вологості, радіаційного режиму і складу атмосфери [5].

У даній моделі вважалося, що атмосферний електричне поле зменшується з ростом висоти над поверхнею Землі через відповідного збільшення провідності середовища. Швидке збільшення провідності з ростом висоти призводить також до того, що велика частина сумарного атмосферного опору припадає на приповерхневих шарів Землі (приблизно половина цього опору сконцентрована в діапазоні висот 0–3 км). Загальна глобальне опір шару між поверхнею Землі і іоносферою становить приблизно 200 Ом, ємність глобального конденсатора - 1Φ з характерним часом розряду цього глобального конденсатора близько 1000–3000 с [5]. На поверхні Землі в ясну погоду напруженість електричного поля становить близько 150 В / м, а під областю грозової активності воно може збільшуватися в десятки разів і більше.

У відсутності грозової активності так зване електричне поле ясною (доброї) погоди також дуже мінливе [1–5]. Напруженість вертикальної компоненти поля (яка зазвичай набагато більше горизонтальної) досягає декількох кВ / м при опадах, буревій і грозовий хмарності. Тому вводиться поняття умов гарної погоди, відповідних швидкості вітру не більше 6 м / с без будь-якого роду опадів, інею, туману, нижньої хмарності. Таким чином, за цих умов поблизу поверхні Землі існує електричне поле напруженістю близько 150 В / м, уздовж якого в слабо провідному повітрі тече електричний струм з густиною кілька пА / м², тобто поле "дихає" - змінюється в часі і просторі, причому коливання щодо середнього значення можуть становити від одиниць до десятків відсотків. Вимірювання електричного поля, струму і провідності в умовах гарної погоди служать потужним засобом вивчення електричного стану атмосфери. Однак використовувати його можна, тільки навчившись розділяти глобальні (тобто планетарного масштабу), регіональні (з масштабом порядку висоти нейтральної атмосфери 100 км) і локальні збурення електричних

параметрів. Останні, в свою чергу, безпосередньо пов'язані як зі змінами іонно-аерозольного складу, так і з динамікою середовища. Отже, електрику гарної погоди нерозривно пов'язано з грозовою електрикою. Фізичною причиною формування глобального атмосферного ланцюга в атмосфері є різке зростання провідності повітря з висотою. Поблизу поверхні Землі провідність повітря дуже мала і становить $(2-3) \cdot 10^{-14}$ См/м, що відповідає концентрації легких іонів близько 10^3 см⁻³. З ростом висоти завдяки збільшенню рівня іонізації, що визначається галактичних космічними променями, а вище – ультрафіолетовим і рентгенівським випромінюванням Сонця, провідність зростає майже експоненціально з характерним масштабом близько 6 км. Вже на висоті D – області іоносфери вона збільшується більш ніж на 10 порядків в порівнянні з тропосферою. Провідність землі в поверхневому шарі (і тим більше води в океані) теж перевищує провідність прикордонного шару атмосфери на 10-12 порядків. Таким чином, постійно функціонуючі грозові генератори виявляються зосередженими в досить вузькому слабо провідному шарі між земною поверхнею і іоносферою. Отже, при спрощеному поданні глобального атмосферного електричного ланцюга земна поверхня і нижня межа іоносфери розглядаються як обкладинки гігантського сферичного конденсатора, який розряджується в областях гарної погоди і заряджується в областях грозової активності. При цьому квазістаціонарні струми зарядки замикаються повністю на землю поблизу грозових хмар, а частково "затягуються" у вищерозташовані області високої провідності і розтікаються по іоносфері. Вважається, що саме квазістаціонарні струми в першу чергу "несуть відповідальність" за підтримку різниці потенціалів ~ 350 кВ між іоносферою і землею.

Схематично глобальний атмосферний ланцюг показаний на рис. 2.1.

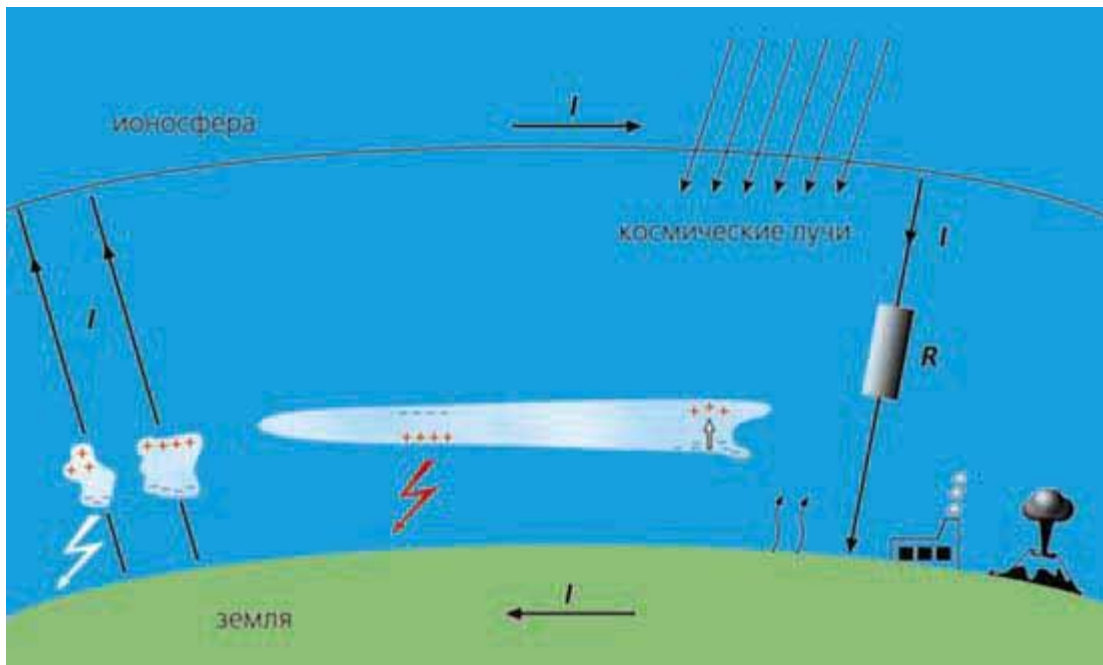


Рис.2.1. Схематичне зображення глобального атмосферного електричного ланцюга.

З моделі атмосферного електричного конденсатора витікає, що накопичення заряду у атмосфері вище будь-якого рівня є зворотно пропорційним до провідності на цьому рівні. Тому розподіл заряду на зовнішній атмосферній обкладинці сферичного конденсатора повинен дзеркально відображати висотний профіль провідності на відповідній ділянці. Наслідком швидкого збільшення провідності з висотою є те, що переважна частина інтегрального атмосферного опору по висоті концентрується біля поверхні Землі (наприклад, приблизно половина цього інтегрального опору сконцентрована у діапазоні висот атмосфери 0–3 км). Глобальний опір між усією поверхнею Землі та іоносферою складає приблизно 200 Ом, ємність глобального конденсатора – 1 Ф з часовою константою у діапазоні 500–3000 с [4,5].

Так як верхня частина більшості грозових хмар має позитивний заряд, потенціал іоносфери також виявляється позитивним, і в областях гарної погоди електричне поле направлено вниз, обумовлюючи тим самим струми провідності, які замикають геоелектричний ланцюг. Якби дія генераторів припинилася, різниця потенціалів між поверхнею Землі і іоносферою зникла б за час близько 8 хв. Таким чином, необхідні комплексні експерименти, що включають уніфіковані високоточні вимірювання електричного поля і струму на регіональних масштабах (більше 100 км) і вимірювання інтегральної активності грозових генераторів. Останні експериментальні дані показують [5], що глобальний атмосферний електричний ланцюг є відкритою дисипативною системою, що підтримується у стані динамічної рівноваги за рахунок зовнішнього потоку енергії, у першу чергу енергії випромінювання Сонця.

Встановлено, що електрична енергія генерується переважно в областях зниженого атмосферного тиску і в зонах холодних фронтів і становить в середньому 5 – 10¹³ Дж, що на два порядки вище енергії, зосередженої в глобальному сферичному конденсаторі земля-іоносфера. Середня швидкість дисипації електричної енергії 4·10¹¹ Вт перевищує швидкість розсіювання енергії в тектонічних і магматичних процесах і характеризує глобальний електричний ланцюг як динамічну систему з малим часом оновлення електричної енергії. Трансформація енергії в атмосфері супроводжується генерацією дисипативних структур різних масштабів, зокрема конвективних систем і аероелектричних структур, що можна уявляти у вигляді «пірамід» накопичення електричної енергії та її дисипації в атмосфері. Отже, вивчення енергетики, структури і динаміки глобального електричного ланцюга є однією з найбільш актуальних проблем атмосферної електрики. До того ж необхідно продовжити ідентифікацію активних елементів у глобальному електричному ланцюгу [2], бо загальним недоліком класичних моделей локальних, великомасштабних та глобальних процесів у атмосферному електричному

ланцюзі є неврахування присутності на мезосферних висотах власних потужних електричних полів.

2.3. Розрядні явища в мезосфері

У кінці XX століття почалися дослідження розрядних явищ в мезосфері, які корелюють з грозовою активністю, тобто так званих спрайтів (область світіння простягається від висот 50–55 км до 85–90 км над землею, а тривалість спалаху складає від одиниць до десятків мілісекунд), ельфів (висоти 70–90 км, тривалість менше 100 мкс) і джетів (розряди, що стартують у верхній частині хмари і поширюються до мезосферних висот зі швидкістю близько 100 км / с). Реєстрація висотних розрядів і діагностика їх характеристик ускладнені через малі часи життя і спорадичну природу грозових розрядів. До сих пір фізичні моделі спрайтів, ельфів і джетів залишаються предметом дискусій [5]. Найбільша інформація до теперішнього часу накопичена про спрайти (див. рис.2.2).

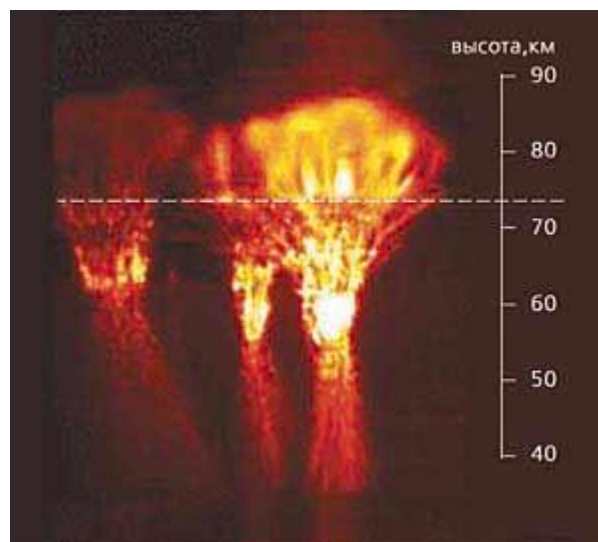


Рис.2.2. Фотографія спрайту (По: Pasko V.P., Stenbaek-Nielsen H.C. // Geophys. Res. Lett. 2002. V.29 (A10); doi: 10.1029/2001GL014241).

Оптичний спалах у мезосфері виникає через кілька мілісекунд після позитивного розряду хмара–земля, іноді на відстані кілька десятків кілометрів по горизонталі від каналу блискавки. Розряд запалюється на досить великій висоті, оскільки поріг проббою повітря падає з висотою експоненційно, тоді як амплітуда збурень електричного поля, що виникають в момент потужних блискавичних спалахів хмара–земля, зменшується з висотою значно повільніше (за степеневим законом) і на висотах приблизно 75 км в атмосфері перевищує пробійне поле. За останнє десятиліття вивчення висотних розрядів в атмосфері перетворилося на новий великий напрямок геофізичної електродинаміки [1–5]. І хоча етап накопичення даних, що характеризують морфологію цих явищ, аж ніяк не завершений. Експерименти і теоретичні розрахунки показують, що ці розряди повинні розглядатися як частина динамічного процесу, що включає формування структури поля і заряду в хмарі і блискавичний розряд на землю. Широко обговорюються також різні підходи до моделювання [5] (див. рис. 2.3).

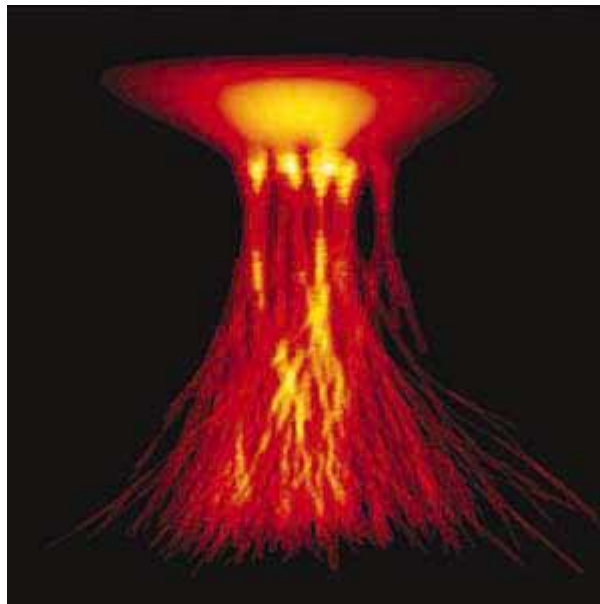


Рис.2.3. Зображення спрайту, отримане в рамках моделі, заснованої на теорії спрямованої перколяції. Модель описує ряд спостережуваних у експериментах особливостей тонкої структури і динаміки розвитку спрайтів.

Найближчі перспективи у вивченні висотних розрядів в атмосфері пов'язані з проведенням координованих наземних і космічних експериментів, а також з розробкою нових методів діагностики параметрів висотних розрядів, в тому числі з використанням можливостей радіохвильової діагностики.

2.4. Власні потужні електричні поля в мезосфері

Експериментальні дані, що постійно надходять від аерокосмічних спостережень, показують, що мезосферне середовище чуйно реагує не тільки на зміни сонячної активності, сонячні спалахи, геомагнітні бурі, високоенергійне космічне випромінювання і потоки метеоритів у мезосфері [10]., але і на події, що відбуваються в земній корі і нижній атмосфері, природні і штучні явища: грози і урагани, потужні землетруси, виверження вулканів, пилові бурі, випробування ядерних бомб і потужні промислові вибухи, старту космічних апаратів, аварії на атомних електростанціях з викидом в атмосферу активних хімічних реагентів, потужне радіовипромінювання радіотехнічних систем. Все це, природно, призводить до помітних змін характеристик поширюваних в мезосфері радіосигналів різних діапазонів, а іноді до повного зникнення радіозв'язку і порушення роботи телекомунікаційних систем.

У 1974 р. група радянських вчених з Новосибірського державного університету (лабораторія геоелектрики НДУ) під керівництвом Юрія Анатолійовича Брагіна (1931–2000 рр.) вперше опублікували результати виявлення існування потужних мезосферних електричних полів з напруженнями в кілька В/м, отримані з допомогою прямих ракетних вимірювань на висотах мезосфери [11]. Надалі протягом 15-ти років серія прямих ракетних вимірювань характеристик мезосферних електричних полів була проведена в різних регіонах земної кулі вченими як СРСР, так і США [12–21]. Можливі механізми генерації подібних електричних полів вже

обговорювалися в роботах [19–21]. Ці механізми можуть бути пов'язаними з конвективними процесами у нейтральній атмосфері, а також з варіаціями інших аерономічних характеристик середовища (наприклад, з концентраціями заряджених частинок та аерозолів).

Незважаючи на явний недолік результатів досліджень природи потужних мезосферних електричних полів, аналіз вже існуючих до цього часу експериментальних даних дозволив зробити попередні висновки про властивості цих полів, а саме: значна мінливість у часі, існування досить великих інтервалів часу, при яких локальні потужні електричні поля практично відсутні; просторова обмеженість по висоті області існування (для мезосфери – приблизно 55–80 км); можлива присутність крім вертикальної складової також і горизонтальної складової напруженості потужного мезосферного електричного поля; можливий вплив змін концентрацій важких іонів і аерозолів на величину цього поля.

Таким чином, відкриття існування в мезосфері власних потужних електричних полів викликало необхідність коригування існуючої до цього часу моделі глобальної атмосферної електричної ланцюга, а також розвитку досліджень впливу на електрично активну мезосферу різних потужних джерел атмосферних збурень (варіацій інтенсивності галактичного випромінювання, геомагнітних та іоносферних збурень, висипання високоенергетичних частинок, змін до атмосферної циркуляції, грозової активності, впливу вивержень вулканів, потужних землетрусів, тропосферних та стратосферних хімічних забруднень, аварій на АЕС, викидів в іоносферу активних хімічних реагентів, стартів космічних апаратів, потужних промислових і спеціальних вибухів, потужного штучного радіовипромінювання і т. д.). А з практичної точки зору це означало необхідність вивчення впливу вищевказаних процесів на поширення радіохвиль різних діапазонів для забезпечення стійкої роботи сучасних систем радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації і телекомунікації.

Однією з основних труднощів з експериментальної точки зору при дослідженні потужних мезосферних електричних полів залишалась неможливість (внаслідок їхньої високої коштовності) систематичних безпосередніх вимірювань напруженості електричних полів, а також атмосферної провідності на висотах 50–80 км за допомогою ракетних методів. Все це вимагало вивчення можливостей залучення більш дешевих дистанційних радіофізичних методів для проведення відповідних експериментальних досліджень, включаючи і вимірювання збурень параметрів нижньої іоносфери, які можуть викликатися наявністю або варіаціями інтенсивності потужних мезосферних електричних полів.

У 1974 році на Радіофізичній обсерваторії кафедри космічної радіофізики Харківського державного університету було введено в експлуатацію перший та до цього часу єдиний в Україні радіотехнічний комплекс часткових відбиттів для проведення регулярних досліджень параметрів мезосфери та нижньої іоносфери (сел. Гайдари Зміївського району Харківської області). Цей комплекс випромінює вгору імпульсні високочастотні радіосигнали, а потім приймає часткове відбите з висот мезосфери випромінювання. Зараз Радіофізична обсерваторія Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (РФО ХНУ) має статус Національного надбання України [22].

До початку 90-х років минулого сторіччя в РФО ХНУ вдалося накопичити та обробити результати десятків тисяч сеансів вимірювань параметрів мезосфери та нижньої іоносфери (концентрації електронів, температури електронів і частоти зіткнень електронів з нейтральними частинками). Частина результатів добре узгоджувалась з існуючими класичними уявленнями про мезосферу та нижню іоносферу. Але значна кількість результатів, що були отримані при наявності потужних збурюючих атмосферу джерел на різних віддаленнях від Харківської області, не могла бути пояснена у межах загальноновизнаних моделей. Такими збурюючими джерелами

були, наприклад, потужні землетруси, старту космічних ракет, підземні випробування ядерних та термоядерних устроїв, робота віддалених радіотехнічних комплексів, що випромінюють потужні радіохвилі. Незрозумілою була дуже швидка реакція мезосфери над Харківським регіоном (від одиниць секунд до хвилин) на початок дії вищевказаних збурюючих джерел, віддалених від місця вимірювань на великі відстані (до десяти тисяч кілометрів) [23].

У 1994 році були надруковані роботи [24,25], у яких було експериментально встановлено, що аварії на атомних електростанціях (АЕС) з викидами радіоактивних речовин у атмосферу, можуть викликати помітні збурення у нижній іоносфері, які суттєво впливають на поведінку амплітуди та фази ДНЧ сигналів. Була виявлена схожість цих ефектів з явищами, що реєструвалися на ДНЧ трасах, які проходили поблизу сейсмоактивних районів в період підготовки та під час потужних землетрусів. Було зроблене припущення про можливу електричну природу дії тропосферних збурень на мезосферу, тобто про присутність у мезосфері власних джерел потужних мезосферних електричних полів при відсутності зовнішніх джерел збурень (нормальні умови). Підставою для цього припущення були отримані раніше у світі ракетні вимірювання потужних мезосферних електричних полів [11–21]. Таким чином, значне збільшення тропосферної провідності за рахунок впливу радіоактивних викидів на АЕС або потужних землетрусів призводить до зменшення інтенсивності або навіть до повного зникнення потужних мезосферних електричних полів, що і відбивається відповідним образом на характеристиках ДНЧ радіохвиль, що розповсюджуються. Тут також була розроблена спрощена математична модель даних природних явищ та наведено теоретичні оцінки величин відповідних ефектів, які повністю узгоджувалися з результатами експериментів [25]. У наступних роботах цих авторів [26–28] вищезгадана

модель отримала подальший розвиток, а основні результати доповідалися на міжнародних наукових конференціях у США, Японії, Росії та ін. [29–31].

Таким чином був зроблений важливий перехід від епізодичного експериментального реєстрування наявності або відсутності потужних мезосферних електричних полів до початку створення теоретичних моделей електродинамічних процесів у електрично активній мезосфері, а також до виявлення механізмів електричних зв'язків мезосфери з іншими областями атмосфери у межах глобального атмосферного електричного ланцюга.

Починаючи з 1997 року, вперше у світі на кафедрі космічної радіофізики ХНУ імені В.Н. Каразіна (ХНУ) почалися дистанційні вимірювання параметрів мезосферної електрики за допомогою комплексу часткових відбиттів у Радіофізичній обсерваторії (сел. Гайдари Харківської області). Для цього використовувався розроблений унікальний метод дистанційної діагностики з залученням вертикального імпульсного ВЧ радіозондування мезосфери, який базувався на отриманні характеристик потужних мезосферних електричних полів за допомогою дистанційних вимірювань частоти зіткнень електронів з нейтральними частинками [32–35]. Подальше використання цих експериментальних даних дозволило не тільки прискорити процес створення моделі взаємодії потужних мезосферних електричних полів з іоносферною плазмою [36, 37], але і перейти до отримання статистичних параметрів мезосферної електрики [33–35,38,39].

В останні роки до експериментальних досліджень електрично активної мезосфери долучились канадські вчені (А.Н. Manson, С.Е. Meek – Institute Space & Atmospheric Studies, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada). З використанням канадського комплексу часткових відбиттів вдалося визначити характеристики електрично активної мезосфери над Канадою та порівняти їх з аналогічними характеристиками над Україною [40, 41].

У підсумку на підставі аналізу великого більшого масиву експериментальних даних, отриманих над регіонами України та Канади, вперше вдалося провести статистичне моделювання характеристик електрично активної мезосфери. При цьому було визначено, що ймовірність відсутності регіональних потужних мезосферних електричних полів (з напруженостями поля до 1 В/м та більше) склала біля 25% для України та біля 30% для Канади. В 2006-му році на конференції провідних спеціалістів НАТО з досліджень іоносфери (Аляска, США) була зроблена велика українсько-канадська наукова доповідь, яка узагальнює основні результати досліджень електрично активної мезосфери та її впливу на умови розповсюдження радіохвиль [42].

На початку ХХІ століття в класичну модель глобального атмосферного електричного ланцюга вже було введено атмосферне джерело електрики, яке відповідає за виникнення тропосферно-мезосферних електричних розрядів (спрайтів, джетів та ін.) [1]. Але елемент, який відображує вплив електрично активної мезосфери у цьому ланцюгу поки що був відсутній. Тому у роботах [43,44] (ХНУ, Україна та Environmental Technology Laboratory, Boulder, Colorado, USA) для аналізу електродинамічних тропосферно-мезосферних зв'язків була розроблена спрощена модель тропосферно-мезосферного ланцюга з введенням власного мезосферного джерела електрики. Схема такого ланцюга з роботи [44] наведена на рис. 2.4.

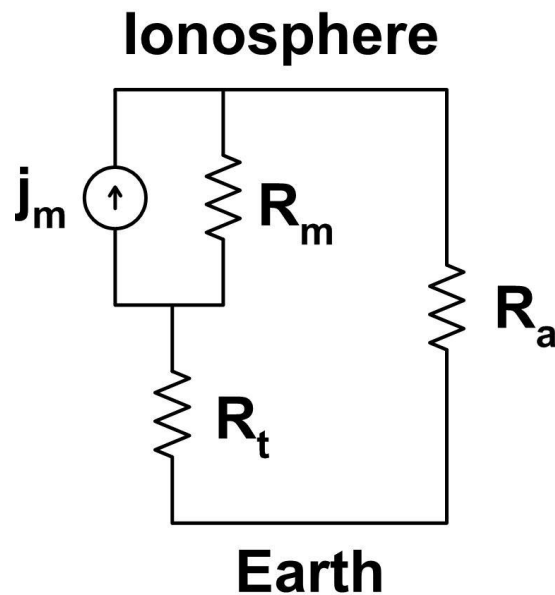


Рис.2.4. Спрощена схема локального тропосферно-мезосферного електричного ланцюга

Головними елементами тут є наступні: джерело мезосферного струму з густиною струму j_m ; локальний приземний опір R_t ; локальний мезосферний опір навантаження R_m для мезосферного джерела; зовнішній опір глобального шару атмосфери між поверхнею Землі та нижньою межею іоносфери R_a . За звичайних умов приземний опір R_t є значно більшим за опір навантаження R_m для мезосферного джерела. У свою чергу, опір R_m є значно більшим за опір глобального шару атмосфери R_a . При цьому електрони у мезосфері постійно “підігріваються” струмом від мезосферного джерела.

При виникненні великих збурень тропосферної провідності опір R_t може зменшуватися до десяти разів та більше. Внаслідок цього співвідношення між величинами R_t та R_m змінюється, тобто R_t може ставати значно меншим за R_m . Фактично це призводить до короткого замкнення мезосферного джерела електрики на землю. Мезосферний струм наближається до нуля, а електрони у мезосфері швидко охолоджуються, що призводить до швидкої зміни мезосферної провідності. На ці швидкі зміни провідності і реагують зондуєчі

радіохвилі. Таким чином, у даних роботах був запропонований новий механізм електродинамічних тропосферно-мезосферних зв'язків за збурених умов при наявності власного мезосферного джерела електрики.

За останні роки, базуючись на роботах харківських та канадських вчених, подібний мезосферний елемент електричного ланцюга з власним джерелом електрики було введено у загальну модель глобального атмосферного електричного ланцюгу [45].

Таким чином, відкриття існування власних потужних мезосферних електричних полів дало змогу розвинути електродинаміку електрично активної мезосфери з введенням у модель глобального атмосферного електричного ланцюга джерела потужної мезосферної електрики.

Однією з основних труднощів з експериментальної точки зору при дослідженні потужних мезосферних електричних полів є неможливість (внаслідок їхньої високої кошовності) систематичних великомасштабних безпосередніх вимірювань напруженості електричних полів, а також атмосферної провідності на висотах 50–80 км за допомогою ракетних методів. Все це створило підґрунтя для широкого впровадження в мезосферні дослідження дистанційних радіофізичних методів діагностики основних параметрів середовища на підставі використання радіозондування.

3. МЕТОД ДИСТАНЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНОЇ МЕЗОСФЕРИ

Запропонований у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна (кафедра космічної радіофізики) метод дистанційної діагностики характеристик потужних мезосферних електричних полів, а також параметрів збуреної нижньої іоносфери базується на наявності детермінованого зв'язку між напруженістю цих полів та ефективною частотою зіткнень електронів (див. [37–44]). Сама ж ефективна частота зіткнень дистанційно вимірюється за допомогою реєстрацій ЧВ сигналів.

Зв'язки між характеристиками потужних мезосферних електричних полів, іоносферної плазми та частково відбитих радіосигналів у квазістаціонарному випадку описує наступна система рівнянь:

$$R(z) = \frac{\overline{A_-^2}}{\overline{A_+^2}} = \frac{\left[(\omega + \omega_L)^2 + \nu_e^2 \right]^2 (\omega - \omega_L)^2 K_\varepsilon^2 \left(\frac{\omega - \omega_L}{\nu_e} \right) + \nu_e^2 K_\sigma^2 \left(\frac{\omega - \omega_L}{\nu_e} \right)}{\left[(\omega - \omega_L)^2 + \nu_e^2 \right]^2 (\omega + \omega_L)^2 K_\varepsilon^2 \left(\frac{\omega + \omega_L}{\nu_e} \right) + \nu_e^2 K_\sigma^2 \left(\frac{\omega + \omega_L}{\nu_e} \right)} \cdot \exp\{4K_+(z) - 4K_-(z)\}, \quad (3.1)$$

$$K_\pm(z) = \frac{2\pi e^2}{mc} \int_{z_0}^z \frac{N(z) \nu_e(z)}{(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu_e^2(z)} K_\sigma \left(\frac{\omega \pm \omega_L}{\nu_e(z)} \right) dz = \frac{2\pi}{c} \int_{z_0}^z \sigma_{e\pm}(z) dz, \quad (3.2)$$

$$\sigma_{e\pm}(z) = \frac{e^2 N(z) \nu_e(z)}{m \left[(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu_e^2(z) \right]} K_\sigma \left(\frac{\omega \pm \omega_L}{\nu_e(z)} \right), \quad (3.3)$$

$$q_i + v_d \lambda N - v_a N - \alpha_r (1 + \lambda) N^2 = 0, \quad (3.4)$$

$$q_i - \alpha_r (1 + \lambda) N^2 - \alpha_i \lambda (1 + \lambda) N^2 = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{2Q_e}{3kN} - \delta v_e (T_e - T_n) = 0, \quad (3.6)$$

$$j_e = \sigma_e E = const, \quad (3.7)$$

де:

$\overline{A_-^2}$ та $\overline{A_+^2}$ — усереднені інтенсивності незвичайної та звичайної компонент частково відбитих сигналів, відповідно,

$K_{\pm}(z)$ — інтегральне поглинення частково відбитого радіосигналу для звичайної (індекс "+") та незвичайної (індекс "-") компонент $K_-(z) > K_+(z)$,

$\sigma_{e\pm}$ — відповідна високочастотна електронна провідність для звичайної або незвичайної компоненти,

$\omega = 2\pi f$ (f — частота зондуєчої радіохвилі),

$\omega_L = 2\pi f_L$ (f_L — продольна складова гірчастоти електронів, для середніх широт $f_L \approx 1,35$ МГц),

$K_{\varepsilon}^2 \left(\frac{\omega \pm \omega_L}{v_e} \right)$ та $K_{\sigma}^2 \left(\frac{\omega \pm \omega_L}{v_e} \right)$ — кінетичні коефіцієнти для високочастотних

діелектричної проникності та провідності плазми у D-області іоносфери (див., наприклад, [39]),

e — заряд електрону,

m — маса спокою електрону,

c — швидкість світла у вакуумі,

z_0 — висота нижньої границі іоносфери (в більшості випадків вважається $z_0 = 60$ км вдень та $z_0 = 75 - 80$ км вночі).

q_i — швидкість іоноутворення,

ν_d — ефективна частота відлипання електронів від негативних іонів,

N — концентрація електронів,

$\lambda = N^- / N$ — відношення концентрації негативних іонів до концентрації електронів,

N^- — концентрація негативних іонів,

ν_a — ефективна частота прилипання електронів до нейтральних частинок,

α_r — ефективний коефіцієнт електрон-іонної рекомбінації,

α_i — ефективний коефіцієнт іон-іонної рекомбінації,

Q_e/N — середня енергія, яка передається електрону зовнішнім джерелом нагріву (наприклад, зовнішнім електричним полем),

k — стала Больцмана,

T_e — температура електронів,

T_n — температура нейтралів,

δ — відносна доля енергії, що втрачається електроном при одному зіткненні з важкою частинкою,

ν_e — ефективна частота зіткнень електронів з нейтралами,

j_e — густина струму, яка забезпечується зовнішнім атмосферним джерелом струму,

σ_e — низькочастотна електронна провідність плазми у D-області,

E — напруженість квазістаціонарного мезосферного вертикального електричного поля.

Тут співвідношення (3.1) описує зв'язок між відношенням усереднених інтенсивностей незвичайної та звичайної компонент частково відбитих сигналів при квазіпродольному розповсюдженні та параметрами збуреної D-області,

рівняння (3.4) – (3.6) є рівняннями балансу для концентрації електронів, концентрації позитивних іонів та температури електронів, відповідно, а рівняння (3.7) є нелінійним матеріальним рівнянням для потужних мезосферних електричних полів у квазістаціонарному випадку (закон Ома у диференційній формі). При запису рівнянь (3.4) – (3.6) вважалося, що слабоіонізована іоносферна плазма є квазінейтральною, температура позитивних та негативних іонів дорівнює температурі нейтральних частинок, а впливом процесів переносу на локальні плазмові збурення можна нехтувати. У D-області

$$Q_e = j_e E = j_e / \sigma_e. \quad (3.8)$$

Врахуємо також, що (див., наприклад, [39])

$$\sigma_e = K_\sigma(0) \frac{e^2 N}{m \nu_e}, \quad (3.9)$$

$$\nu_e = 5.8 \times 10^{-11} N_n T_e^{5/6}, \quad (3.10)$$

$$\delta = \delta_0 (T_n / T_e) \quad (T_e / T_n < 4), \quad \delta = 0.2 \delta_0 \quad (4 < T_e / T_n < 15), \quad (3.11)$$

$$\nu_a = (1.4 \times 10^{-29} (300/T_e) \exp(100/T_n) \exp(-700/T_e) N(O_2) + 1.0 \times 10^{-31} N(N_2)) N(O_2), \quad (3.12)$$

$$\alpha_r \approx 6.0 \times 10^{-6} \left(\frac{300}{T_n} \right)^{1/2} \left(\frac{T_n}{T_e} \right)^{1/2}, \quad (3.13)$$

де $K_\sigma = 1, 42$ [39],

N_n — концентрація нейтральних частинок,

$N(O_2)$ — концентрація молекулярного кисню у см^{-3} ,

$N(N_2)$ — концентрація молекулярного азоту у см^{-3} ,

T_e та T_n наводяться у К, v_a у с^{-1} ,

α_r у $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$, індексом "0" тут та далі позначені параметри іоносферної плазми у відсутності потужних мезосферних електричних полів.

Нехтуючи для 1-го самого нижнього шару частковим відбиттям з висоти z_1 диференційним поглиненням нормальних мод (у більшості випадків за денних умов це є справедливим при $z_1 < 66 - 69$ км), з (3.1) одержуємо наступне співвідношення для визначення збуреної $v_e(z_1)$ по експериментальному значенню $R(z_1)$ [39]:

$$R(z_1) = \frac{\left[(\omega + \omega_L)^2 + v_e^2(z_1) \right]^2 (\omega - \omega_L)^2 K_\varepsilon^2 \left(\frac{\omega - \omega_L}{v_e(z_1)} \right) + v_e^2(z_1) K_\sigma^2 \left(\frac{\omega - \omega_L}{v_e(z_1)} \right)}{\left[(\omega - \omega_L)^2 + v_e^2(z_1) \right]^2 (\omega + \omega_L)^2 K_\varepsilon^2 \left(\frac{\omega + \omega_L}{v_e(z_1)} \right) + v_e^2(z_1) K_\sigma^2 \left(\frac{\omega + \omega_L}{v_e(z_1)} \right)}. \quad (3.14)$$

Далі з (3.6) – (3.11) легко одержати вирази для величин електричних полів $E(z_1)$ [37 – 44]:

$$E^2 = \frac{km\delta_0 T_{e0}(z_1)}{0.97e^2} v_e^2(z_1) \left\{ 1 - \left(\frac{v_{e0}(z_1)}{v_e(z_1)} \right)^{6/5} \right\} \quad (T_e/T_{e0} \leq 4), \quad (3.15)$$

$$E^2 = \frac{km\delta_0 T_{e0}(z_1)}{4.85e^2} v_e^2(z_1) \left\{ \left(\frac{v_e(z_1)}{v_{e0}(z_1)} \right)^{6/5} - 1 \right\} \quad (T_e/T_{e0} > 4), \quad (3.16)$$

де $T_{e0}(z_1)$ та $v_{e0}(z_1)$ пов'язані співвідношенням (3.10).

Нажаль, суттєвим недоліком даного методу є можливість його застосування тільки за умов надійного прийому частково відбитих сигналів від нижньої частини D-області (60 – 70 км), що на практиці є можливим далеко не завжди.

Отже сукупність теоретичних співвідношень (3.1) – (3.16) визначає детерміновані функціональні зв'язки між характеристиками потужних мезосферних електричних полів та збуреннями параметрів області D та дозволяє теоретично моделювати детермінований вплив потужних мезосферних електричних полів на основні параметри нижньої іоносфери. Визначальними тут є збурення температури та ефективної частоти зіткнень електронів (див. (3.10), (3.15), (3.16)), використання яких дозволяє переходити до теоретичних оцінок інших збурень іоносферних параметрів. Зокрема, (3.1) та (3.14) описують збурення коефіцієнту частково відбитих у нижній іоносфері СЧ та ВЧ радіосигналів, (3.2) — збурення інтегрального високочастотного поглинення радіохвиль, (3.3) — збурення високочастотної провідності іоносферної плазми, (3.7) — зв'язок між характеристиками потужних мезосферних електричних полів та низькочастотною електронною провідністю плазми, (3.8) — джоулеві втрати енергії потужних мезосферних електричних полів, (3.10) — зв'язок між збуреннями температури та ефективної частоти зіткнень електронів, (3.11) — збурення коефіцієнту втрат енергії електроном при одному зіткненні, (3.12) — збурення ефективного коефіцієнту прилипання електронів, (3.13) — збурення ефективного коефіцієнту рекомбінації електронів та іонів [39]. Підсумкова мінімальна похибка запропонованого методу складає біля 20%, а максимальна може досягати 40 – 50%, конкретні ж значення похибок потребують уточнення у кожному конкретному експерименті.

4. СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНИХ МЕЗОСФЕРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

Для одержання статистичних характеристик потужної мезосферної електрики, як первинні, використовувалися масиви експериментальних реєстрацій частково відбитих у D-області радіосигналів, отриманих у Харківському національному університеті (ХНУ) (робочі частоти 1,8–3,0 МГц, тривалість зондуючих імпульсів 25 мкс, частота повторення імпульсів 1 Гц, висотний діапазон 60–66 км, загальна кількість первинних сеансів реєстрації $n=185$, тривалість одного сеансу 5–10 хв.) [37–45]. Величини v_e та E визначалися за допомогою метода, наведеного вище. На етапі попереднього відбору даних спочатку будувалися загальні гістограми розподілу величини v_e/v_{em} (тут v_{em} — модельне значення v_e при відсутності потужного мезосферного електричного поля на висоті, з якої приймався ЧВ сигнал). По аналогії з [37–45] з урахуванням кінетичних ефектів покладалося $v_{em} = 3,75 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ при $z = 60$ км, $v_{em} = 3,32 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ при $z = 61$ км, $v_{em} = 2,55 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ при $z = 63$ км, $v_{em} = 2,21 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ при $z = 64$ км, $v_{em} = 1,68 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ при $z = 66$ км, $v_{em} = 1,47 \times 10^7 \text{ c}^{-1}$ при $z = 67$ км. Гістограми, які показують загальні розподіли величин v_e/v_{em} , наведені на рис.4.1 (Україна). Тут $w_{vi} = n_i/n\Delta(v_e/v_{em})$, i — номер інтервалу дискретизації, довжина інтервалу дискретизації $\Delta(v_e/v_{em}) = 0,2$ для $i=1$ та $\Delta(v_e/v_{em}) = 0,4$ для $i > 1$, n_i — кількість реалізацій, що потрапила у i -й інтервал. Є очевидним, що генеральна сукупність величин v_e/v_{em} за відсутністю потужних мезосферних електричних полів повинна бути розподілена за Гаусовим законом з математичним сподіванням $M[v_e/v_{em}] = 1$. Це дає підстави вважати, що значення $v_e/v_{em} < 1$ відповідають випадкам відсутності потужних мезосферних електричних полів і повинні бути виключені з загального розподілу v_e/v_{em} при формуванні масиву збурених під впливом цих полів експериментальних значень

v_e / v_{em} . Окрім того, симетричність Гаусового розподілу величин v_e / v_{em} при відсутності потужних мезосферних електричних полів відносно $v_e / v_{em} = 1$ дає змогу виключити з загального розподілу і незбурену складову з $v_e / v_{em} > 1$.

За сформованими вищевказаним чином експериментальними масивами значень v_e / v_{em} у присутності потужних мезосферних електричних полів були одержані гістограми розподілу щільності ймовірності w_E для напруженості цих полів E , які подані на рис.4.2 (Україна). Тут $w_E = n_i / (n \Delta E)$, i – номер інтервалу, n_i – число значень E у інтервалі $(i - 1) \Delta E < E \leq i \Delta E$, $\Delta E = 0,5$ В/м – ширина інтервалу дискретизації за E , $n = 139$ – загальне число вимірювань E (Україна). Аналіз даних гістограм показав, що умовно з надійною ймовірністю не гірше 0,99 їх можна розбити на дві частини: основну частину ($0 < E \leq 2,5$ В/м, $n = 129$ для України) та "хвіст" розподілу ($E > 2,5$ В/м, $n = 10$ для України). При цьому основні частини з надійною ймовірністю не гірше 0,99 за критерієм Пірсона відповідають однопараметричному Релеєвському закону розподілу вигляду

$$f(E) = \frac{E}{\sigma^2} e^{-\frac{E^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.1)$$

де $\sigma = E_m$ – найбільш ймовірне значення E , $M_1[E] = (\pi / 2)^{1/2} \sigma$, $M_2[E] = 2 \sigma^2$ та $D[E] = (2 - \pi / 2) \sigma^2$ – математичне сподівання, другий початковий момент та дисперсія для Релеєвської генеральної сукупності значень E , відповідно. З рис.3.2 оцінка величини $M_1[E]$ за рівнем надійної ймовірності 0,99 дає $M_1[E] = 0,72 \pm 0,11$ В/м, де середнє вибіркве значення $\langle E_R \rangle = 0,72$ В/м, що відповідає параметру $\sigma = 0,57$ В/м. Відповідна гістограма розподілу Релеєвської щільності ймовірності w_E для напруженості потужних мезосферних електричних полів ($n = 129$) з апроксимуючим Релеєвським законом показана на рис. 4.3.

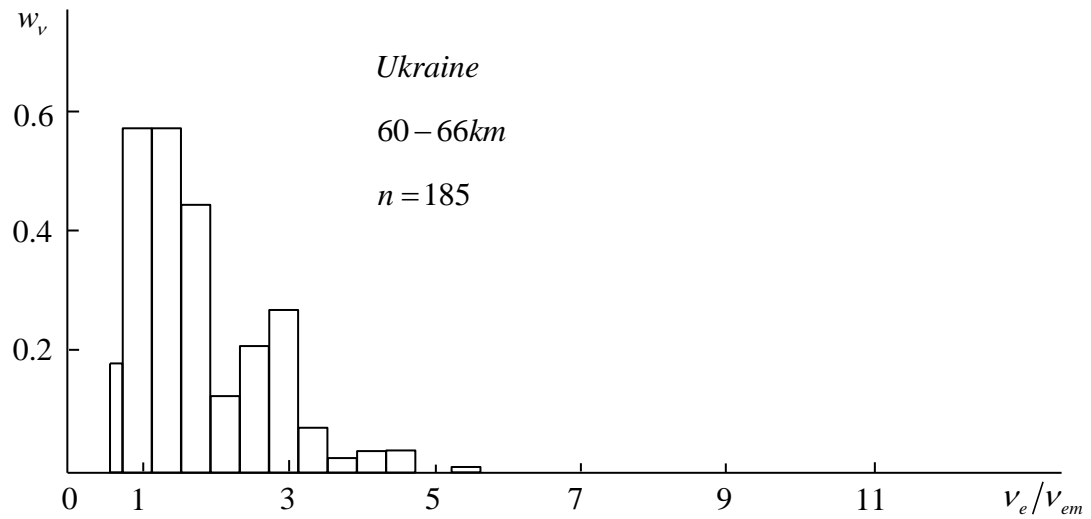


Рис. 4.1. Гістограма розподілу величин v_e/v_{em} у висотному інтервалі 60 – 66 км, одержаних над Україною

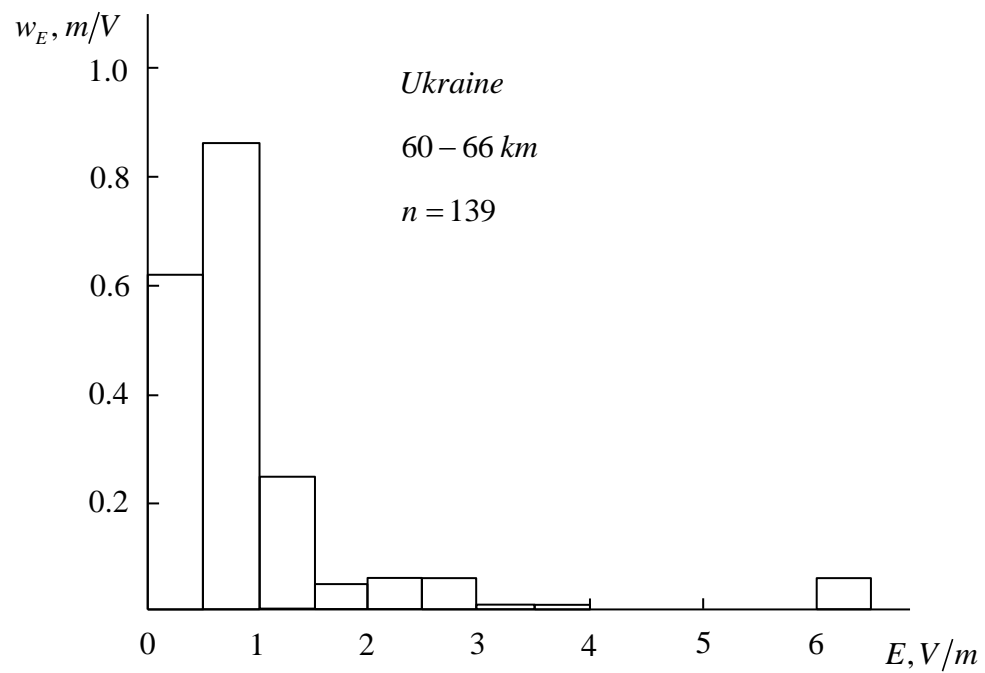


Рис. 4.2. Гістограма розподілу величин E у висотному інтервалі 60 – 66 км, одержаних над Україною

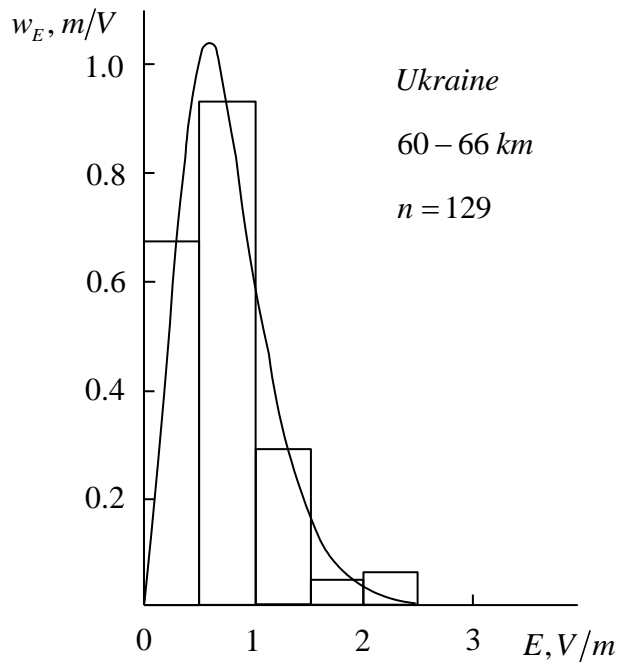


Рис. 4.3. Гістограма Релеєвської частини розподілу величин E , одержаних над Україною, та відповідна теоретична Релеєвська диференційна функція розподілу E

Таким чином, у мезосфері повинно існувати, у крайньому разі, два механізми генерації власних потужних мезосферних електричних полів, при цьому Релеєвський розподіл E може формуватися внаслідок інтерференції випадкових полів від великої кількості елементарних дрібномасштабних мезосферних генераторів. Ймовірність існування подібного інтегрального "Релеєвського" мезосферного генератора за експериментальними даними складає біля 70% для України, а ймовірність відсутності ПМЕП – біля 25%. для України.

Нажаль, первинний масив даних для $E > 2,5$ В/м ($n = 10$, ймовірність появи – біля 5% для України, див. рис. 4.2; $n = 21$, ймовірність появи – біля 12%) є недостатнім для статистичного моделювання і може тільки грубо характеризуватися середніми значеннями $\langle E \rangle = (4,3 \pm 1,3)$ В/м для України за рівнем 0,90. Значення E будуть обмежені зверху пороговими значеннями поля $E_t = 218 \times (p / p_0)$ кВ/м, при досягненні яких у атмосфері може розвиватися

електричний пробій (тут p – атмосферний тиск на висоті z , p_0 – атмосферний тиск на рівні моря), який супроводжується у середній атмосфері явищами типу "red sprites", "blue jets", "elves". Наприклад, для діапазону висот $z = 60 - 70$ км маємо $E_t = 50 - 10$ В/м відповідно.

Для виявлення можливої сезонної залежності статистичних характеристик потужних мезосферних електричних полів масиви експериментальних даних умовно розбивалися на 2 частини: "зимову" (24 вересня – 23 березня) та "літню" (24 березня – 23 вересня). Далі будувалися Релеєвські складові розподілу E ($n = 69$ для "зими" та $n = 60$ для "літа" для України та $n = 49$). Відповідні гістограми розподілу щільності ймовірності w_E з апроксимуючими Релеєвськими законами наведені на рис. 4.5 та рис. 4.6 для України. Відповідність гістограм Релеєвському закону розподілу за критерієм Пірсона підтверджується з надійною ймовірністю 0,99 при експериментальних $\langle E_R \rangle = 0,70$ В/м, $\sigma = 0,56$ В/м для "зими" та $\langle E_R \rangle = 0,75$ В/м, $\sigma = 0,60$ В/м для "літа" для України. Добре видно, що сезонні різниці є статистично незначущими. Значення $E > 2,5$ В/м також епізодично реєструвалися як "взимку" ($n = 6$ для України, так і "влітку" ($n = 4$ для України). Взагалі ж вищесказане може свідчити, наприклад, про те, що середні регіональні сезонні варіації мезосферних параметрів та середня регіональна грозова активність не справляють помітного впливу на середні характеристики "Релеєвського генератору" потужних мезосферних електричних полів.

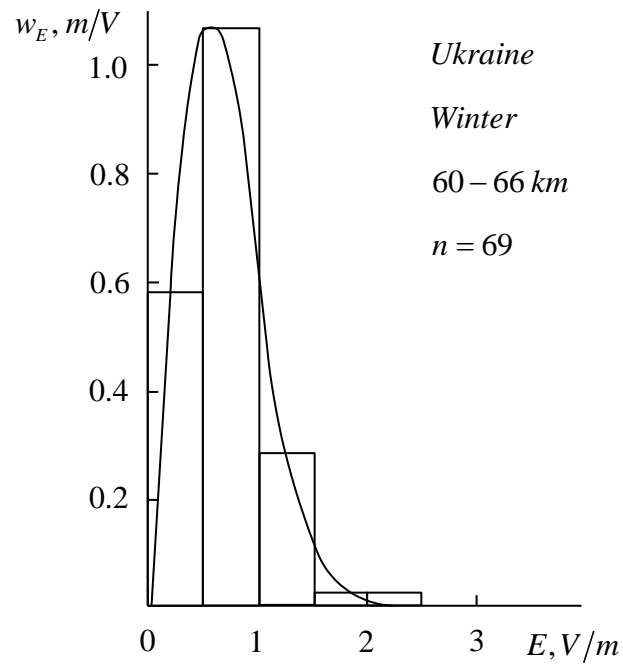


Рис.4.4. "Зимова" гістограма Релеєвської частини розподілу величин E , одержаних над Україною, та відповідна теоретична Релеєвська диференційна функція розподілу E

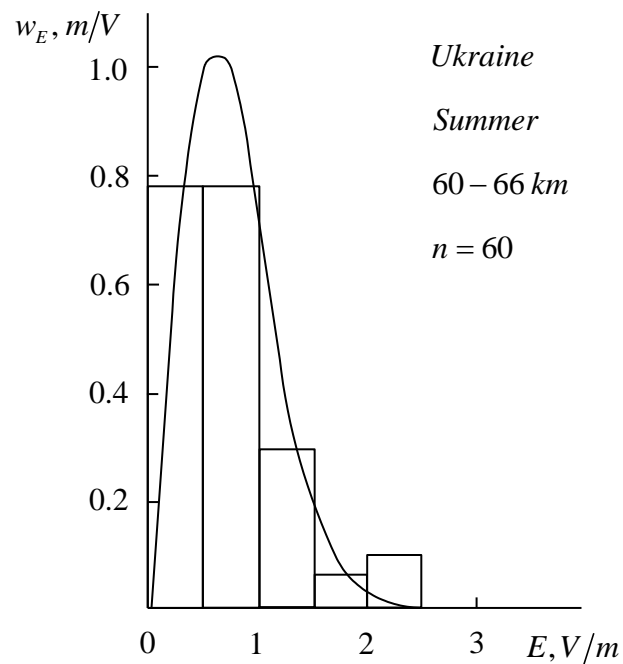


Рис. 4.5. "Літня" гістограма Релеєвської частини розподілу величин E , одержаних над Україною, та відповідна теоретична Релеєвська диференційна функція розподілу E

Доповнені у ході виконання даної роботи масиви експериментальних даних про ефективну частоту зіткнень електронів та напруженість потужного мезосферного електричного поля у нижній іоносфері наведено у таблиці 4.1 (умовна зима) та таблиці 4.2 (умовне літо).

Таблиця 4.1.

Експериментальні параметри нижньої іоносфери (зима, с. Гайдари)

№	Дата	Час, LT	z, км	f, МГц	a	$v_e \cdot 10^7, c^{-1}$	E, В/м	v_e / v_{e0}	j, А/м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20.11.79	12.20-12.30	66	2,779	1,58	5,74	0,97	3,18	$5,08 \cdot 10^{-8}$
2	05.02.79	11.49-11.59	63	2,982	2,02	3,45	0,39	1,35	$2,48 \cdot 10^{-8}$
3	14.03.79	07.58-08.08	63	2,980	1,88	3,75	0,47	1,47	$2,72 \cdot 10^{-8}$
4	14.03.79	07.58-08.08	66	2,980	2,21	3,00	0,43	1,79	$3,44 \cdot 10^{-8}$
5	25.10.79	11.32-11.42	63	2,610	1,92	3,62	0,43	1,42	$2,57 \cdot 10^{-8}$
6	03.02.81	18.36-18.46	66	2,547	2,00	3,27	0,49	1,95	$3,63 \cdot 10^{-8}$
7	04.02.81	12.38-12.48	66	2,582	2,11	3,12	0,45	1,86	$3,46 \cdot 10^{-8}$
8	20.03.81	14.41-14.51	63	2, 553	1,45	7,40	1,28	2,90	$4,28 \cdot 10^{-8}$
9	20.03.81	15.04-15.14	60	2,934	1,20	15,30	2,86	4,08	$4,73 \cdot 10^{-8}$
10	20.03.81	15.04-15.14	63	2,934	1,42	7,71	1,35	3,02	$4,41 \cdot 10^{-8}$
11	20.03.81	15.16-15.26	63	2,953	1,38	8,00	1,41	3,14	$4,47 \cdot 10^{-8}$
12	19.03.83	15.49-15.59	63	2,556	1,57	5,90	0,96	2,31	$3,72 \cdot 10^{-8}$
13	19.03.83	15.49-15.59	66	2,556	2,42	2,60	0,33	1,55	$2,98 \cdot 10^{-8}$
14	20.03.83	17.02-17.12	63	2,556	1,85	3,90	0,50	1,53	$2,78 \cdot 10^{-8}$
15	29.11.84	09.48-09.50	66	2,300	1,30	9,84	2,10	5,86	
16	29.11.84	09.50-09.53	66	2,300	1,25	12,70	4,69	7,56	
17	29.11.84	09.53-09.56	66	2,300	1,64	5,44	0,99	3,24	$5,11 \cdot 10^{-8}$
18	29.11.84	09.56-10.00	66	2,300	3,26	1,72	□ 0	1,02	□ 0
19	07.12.84	14.00-14.10	60	2,100	1,65	5,50	0,69	1,47	$2,40 \cdot 10^{-8}$
20	07.12.84	14.00-14.10	63	2,100	2,02	3,30	0,35	1,29	$2,33 \cdot 10^{-8}$
21	14.12.84	11.01-11.11	60	2,100	1,91	4,10	0,27	1,09	$1,36 \cdot 10^{-8}$

22	14.12.84	11.30-11.40	60	2,100	2,02	3,30	0	0,88	□ 0
23	14.12.84	11.30-11.40	63	2,100	2,89	2,15	0	0,84	□ 0
24	14.12.84	14.30-14.38	60	2,100	1,71	5,10	0,59	1,36	$2,26 \cdot 10^{-8}$
25	14.12.84	14.30-14.38	63	2,100	2,05	3,10	0,29	1,22	$2,01 \cdot 10^{-8}$
26	14.12.84	15.00-15.11	63	2,100	2,10	3,16	0,31	1,24	$2,14 \cdot 10^{-8}$
27	19.12.84	13.47-13.57	60	2,100	1,76	4,81	0,51	1,28	$2,12 \cdot 10^{-8}$
28	19.12.84	13.47-13.57	63	2,100	2,53	2,55	0	1,00	□ 0
29	19.12.84	13.47-13.57	66	2,100	1,22	13,5			
30	21.12.84	09.35-09.45	60	2,100	1,69	5,25	0,63	1,40	$2,32 \cdot 10^{-8}$
31	21.12.84	10.35-10.45	63	2,100	2,82	2,20	0	0,86	□ 0
32	24.12.84	11.42-11.54	60	2,100	1,98	3,50	0	0,93	□ 0
33	07.01.85	11.03-11.15	60	2,100	2,10	3,16	0	0,84	□ 0
34	04.02.85	15.04-15.17	63	2,100	2,06	3,24	0,33	1,27	$2,26 \cdot 10^{-8}$
35	27.09.85	16.08-16.18	60	2,100	1,43	7,40	1,14	1,97	$2,99 \cdot 10^{-8}$
36	22.10.85	17.07-17.17	60	2,100	1,68	5,29	0,64	1,41	$2,34 \cdot 10^{-8}$
37	13.11.85	14.00-14.10	60	2,100	1,36	8,48	1,39	2,26	$3,28 \cdot 10^{-8}$
38	13.11.85	14.00-14.10	63	2,100	2,60	2,50	0	0,98	□ 0
39	13.11.85	15.11-15.21	60	2,100	1,53	6,30	0,89	1,68	$2,70 \cdot 10^{-8}$
40	04.12.85	14.50-15.03	60	2,100	1,62	5,70	0,74	1,52	$2,48 \cdot 10^{-8}$
41	06.12.85	14.13-14.23	66	2,100	1,42	7,52	1,38	4,48	$5,94 \cdot 10^{-8}$
42	13.12.85	10.30-10.40	60	2,200	1,62	5,70	0,74	1,52	$2,48 \cdot 10^{-8}$
43	13.12.85	10.30-10.40	63	2,200	2,10	3,15	0,30	1,24	$2,10 \cdot 10^{-8}$
44	13.12.85	11.30-11.40	60	2,200	2,30	2,96	0	0,80	□ 0
45	13.12.85	12.30-12.40	60	2,200	2,16	3,05	0	0,81	□ 0
46	13.12.85	12.30-12.40	63	2,200	2,83	2,15	0	0,84	□ 0
47	13.12.85	13.00-13.10	60	2,200	1,75	4,80	0,50	1,28	$2,06 \cdot 10^{-8}$
48	13.12.85	13.00-13.10	63	2,200	1,90	4,04	0,54	1,58	$2,91 \cdot 10^{-8}$
49	13.12.85	13.40-13.50	60	2,200	1,60	5,79	0,76	1,54	$2,52 \cdot 10^{-8}$
50	13.12.85	15.04-15.14	60	2,200	1,45	7,15	1,09	1,91	$2,94 \cdot 10^{-8}$
51	13.12.85	15.31-15.41	60	2,200	1,64	5,50	0,69	1,47	$2,40 \cdot 10^{-8}$

52	21.12.85	15.30-15.40	60	2,100	1,69	5,20	0,61	1,39	$2,26 \cdot 10^{-8}$
53	21.12.85	15.30-15.40	63	2,100	2,60	2,50	0	0,98	□ 0
54	15.01.86	14.30-14.40	66	2,200	2,75	2,25	0,24	1,34	$2,54 \cdot 10^{-8}$
55	22.01.86	11.00-11.09	60	2,200	1,66	5,36	0,65	1,43	$2,35 \cdot 10^{-8}$
56	22.01.86	11.00-11.09	63	2,200	1,96	3,64	0,44	1,43	$2,62 \cdot 10^{-8}$
57	22.01.86	13.10-13.20	63	2,200	1,88	4,14	0,56	1,62	$2,94 \cdot 10^{-8}$
58	22.01.86	13.30-13.40	60	2,200	2,44	2,65	0	0,71	□ 0
59	26.02.86	15.30-15.40	63	2,200	1,98	3,45	0,39	1,35	$2,48 \cdot 10^{-8}$
60	26.02.86	15.30-15.40	66	2,200	3,02	1,96	0,16	1,17	$1,96 \cdot 10^{-8}$
61	12.03.86	16.12-16,23	60	2,200	2,61	2,44	0	0,65	□ 0
62	20.03.86	11.10-11.20	60	2,200	1,61	5,73	0,75	1,53	$2,50 \cdot 10^{-8}$
63	20.03.86	11.10-11.20	63	2,200	1,88	4,14	0,56	1,62	$2,94 \cdot 10^{-8}$
64	03.10.86	10.01-10.11	60	2,310	1,41	7,80	1,23	2,08	$3,08 \cdot 10^{-8}$
65	03.10.86	12.32-12.42	60	2,310	1,55	6,20	0,86	1,65	$2,66 \cdot 10^{-8}$
66	03.10.86	14.32-14.42	60	2,310	1,39	8,00	1,28	2,13	$3,13 \cdot 10^{-8}$
67	23.10.86	10.20-10.30	66	2,310	1,61	5,70	1,00	3,39	$4,69 \cdot 10^{-8}$
68	23.10.86	12.50-13.00	63	2,310	1,71	4,95	0,75	1,94	$3,32 \cdot 10^{-8}$
69	23.10.86	12.50-13.00	66	2,310	1,87	4,05	0,65	2,41	$4,06 \cdot 10^{-8}$
70	26.11.86	09.50-10.00	60	2,310	1,60	5,74	0,75	1,53	$2,50 \cdot 10^{-8}$
71	26.11.86	09.50-10.00	63	2,310	2,32	2,83	□ 0	1,11	□ 0
72	26.11.86	11.21-11.31	63	2,310	2,22	2,95	0,24	1,16	$1,82 \cdot 10^{-8}$
73	26.11.86	11.50-12.00	63	2,310	2,02	3,24	0,33	1,27	$2,26 \cdot 10^{-8}$
74	26.11.86	12.20-12.30	60	2,310	2,57	2,48	0	0,66	□ 0
75	19.01.87	14.50-15.00	66	2,310	2,12	3,10	0,45	1,85	$3,48 \cdot 10^{-8}$
76	12.10.87	12.00-12.10	66	2,310	1,89	3,98	0,64	2,37	$4,06 \cdot 10^{-8}$
77	23.10.87	13.50-14.00	66	2,100	3,09	1,98	0,17	1,18	$2,06 \cdot 10^{-8}$
78	23.10.87	14.25-14.35	66	2,100	3,46	1,78	□ 0	1,06	□ 0
79	16.12.87	11.21-11.32	63	2,200	2,17	3,05	0,27	1,20	$1,97 \cdot 10^{-8}$
80	16.12.87	11.21-11.32	66	2,200	3,98	1,40	0	0,83	□ 0

81	29.12.87	14.11-14.21	63	2,200	2,21	2,98	0,25	1,17	$1,87 \cdot 10^{-8}$
82	24.02.88	11.06-11.19	66	2,200	2,58	2,48	0,30	1,48	$2,84 \cdot 10^{-8}$
83	24.02.88	11.45-11.56	63	2,200	1,89	4,10	0,55	1,61	$2,90 \cdot 10^{-8}$
84	24.02.88	11.45-11.56	66	2,200	2,38	2,76	0,37	1,64	$3,20 \cdot 10^{-8}$
85	24.02.88	12.45-12.55	66	2,200	2,62	2,43	0,29	1,45	$2,80 \cdot 10^{-8}$
86	24.02.88	15.47-15,59	66	2,200	2,15	3,10	0,45	1,85	$3,50 \cdot 10^{-8}$
87	21.03.88	13.00-13.11	66	2,200	2,14	3,10	0,45	1,85	$3,48 \cdot 10^{-8}$
88	21.03.88	15.37-15.47	66	2,200	2,17	3,05	0,44	1,82	$3,46 \cdot 10^{-8}$
89	05.10.88	11.07-11.17	66	2,310	2,08	3,15	0,46	1,88	$3,54 \cdot 10^{-8}$
90	30.11.88	09.45-09.55	66	2,910	1,42	7,71	2,45	4,59	$10,4 \cdot 10^{-8}$
91	30.11.88	10.49-11.00	63	2,910	1,04	31,0	6,17	12,2	
92	30.11.88	11.21-11.31	63	2,910	1,04	31,0	6,17	12,2	
93	30.11.88	11.50-12.00	63	2,910	1,17	18,5	3,60	7,25	
94	30.11.88	11.50-12.00	66	2,910	1,63	5,30	0,82	3,15	$4,31 \cdot 10^{-8}$
95	30.11.88	12.20-12.31	63	2,910	1,04	31,0	6,17	12,2	
96	30.11.88	12.20-12.31	66	2,910	1,62	5,34	0,83	3,18	$4,34 \cdot 10^{-8}$
97	07.12.88	12.51-13.01	63	2,310	1,70	5,02	0,77	1,97	$3,36 \cdot 10^{-8}$
98	07.12.88	12.51-13.01	66	2,310	1,84	4,19	0,68	2,49	$4,19 \cdot 10^{-8}$
99	07.12.88	15.18-15.30	66	2,310	1,87	4,06	0,66	2,42	$4,14 \cdot 10^{-8}$
100	28.12.88	11.35-11.51	63	2,310	1,30	9,85			
101	28.12.88	11.51-12.01	66	2,310	1,79	4,45	0,74	2,65	$4,32 \cdot 10^{-8}$
102	28.12.88	13.56-14.06	66	2,310	1,70	5,02	0,86	2,99	$4,62 \cdot 10^{-8}$
103	28.12.88	14.30-14.40	66	2,310	1,73	4,84	0,82	2,88	$4,57 \cdot 10^{-8}$
104	28.12.88	14.48-14.58	66	2,310	1,85	4,15			
105	28.12.88	14.58-15.08	66	2,310	1,80	4,38	0,72	2,61	$4,27 \cdot 10^{-8}$
106	08.12.92	13.40-13.50	63	2,200	2,75	2,25	0	0,88	□ 0
107	19.01.93	14.20-14.30	63	2,200	3,12	1,90	0	0,78	□ 0
108	19.01.93	14.50-15.00	63	2,200	3,03	1,95	0	0,82	□ 0
109	20.01.93	12.30-12.40	66	2,500	1,72	4,75	0,80	2,83	$4,50 \cdot 10^{-8}$

110	20.01.93	13.00-13.10	66	2.500	1,69	4,95	0,84	2,95	$4,52 \cdot 10^{-8}$
111	08.01.94	12.40-12.50	66	2,100	3,15	1,95	0,16	1,16	$1,97 \cdot 10^{-8}$
112	26.10.94	12.30-12.40	66	2,100	2,75	2,32	0,26	1,38	$2,67 \cdot 10^{-8}$
113	26.10.94	12.40-12.50	66	2,100	2,44	2,70	0,36	1,61	$3,16 \cdot 10^{-8}$
114	01.11.94	12.30-12.40	66	2,100	2,42	2,72	0,37	1,62	$3,17 \cdot 10^{-8}$
115	23.11.94	13.40-13.50	63	2,200	2,33	2,83	□ 0	1,11	□ 0
116	25.11.94	12.40-12.50	63	2,100	2,31	2,86	□ 0	1,12	□ 0
117	25.11.94	13.00-13.10	63	2,100	2,75	2,30	0	0,90	□ 0
118	17.10.06	15.30-15.40	63	2,310	1,70	5,02	0,75		
119	17.10.06	15.50-16.00	66	2,310	2,26	2,97	0,30		
120	17.10.06	16.50-17.00	66	2,310	2,33	2,80	0,34		
121	18.10.06	08.00-08.10	63	2,310	1,66	5,29	0,80		
122	18.10.06	09.00-09.10	63	2,310	1,54	6,27	1,05		
123	18.10.06	09.20-09.30	63	2,310	1,68	5,14	0,78		
124	18.10.06	09.30-09.40	63	2,310	1,31	9,64	1,73		
125	18.10.06	10.30-10.40	63	2,310	1,75	4,70	0,70		
126	07.12.06	09.00-09.10	60	2,310	1,42	7,64	1,15		
127	07.12.06	09.10-09.20	60	2,310	1,29	10,35	1,80		
128	07.12.06	09.50-10.00	60	2,310	1,12	21,0	4,50		
129	07.12.06	10.00-10.10	60	2,310	1,63	5,52	0,70		
130	07.12.06	10.10-10.20	60	2,310	1,58	5,89	0,75		
131	07.12.06	11.30-11.40	60	2,310	1,70	5,02	0,60		
132	07.12.06	12.00-12.10	60	2,310	1,39	8,06	1,30		
133	07.12.06	13.00-13.10	60	2,310	1,69	5,08	0,62		
134	07.12.06	13.10-13.20	60	2,310	1,73	4,82	0,55		
135	07.12.06	13.50-14.00	60	2,310	1,69	5,08	0,62		
136	14.12.06	13.10-13.20	66	2,310	1,44	7,36	1,60		
137	14.12.06	13.20-13.30	66	2,310	3,60	1,55	0		□ 0
138	14.12.06	13.30-13.40	66	2,310	1,46	7,11	1,45		
139	14.12.06	13.50-14.00	66	2,310	3,75	1,49	0		□ 0
140	14.12.06	14.10-14.20	66	2,310	2,92	1,98	0,17		

141	14.12.06	14.20-14.30	66	2,310	1,36	8,64	2,65		
142	14.12.06	15.00-15.10	66	2,310	3,14	1,82	0,10		
143	16.12.06	09.00-09.10	66	2,310	2,38	2,72	0,37		
144	16.12.06	09.10-09.20	66	2,310	3,40	1,66	0		□ 0
145	16.12.06	09.20-09.30	66	2,310	2,05	3,19	0,50		
146	16.12.06	09.30-09.40	66	2,310	3,54	1,60	0		□ 0
147	16.12.06	10.00-10.10	63	2,310	2,63	2,41	0		□ 0
148	16.12.06	10.00-10,10	66	2,310	3,44	1,64	0		□ 0
149	16.12.06	10.10-10.20	63	2,310	2,66	2,35	0		□ 0
150	16.12.06	11.30-11.40	66	2,310	3,32	1,70	0		□ 0
151	16.12.06	12.50-13.00	66	2,310	3,03	1,88	0,13		
152	16.12.06	13.40-13.50	66	2,310	3,47	1,63	0		□ 0
153	16.12.06	14.00-14.10	63	2,310	2,62	2,53	0		□ 0
154	16.12.06	14.10-14.20	60	2,310	1,14	19,7	4,3		
155	16.12.06	14.10-14.20	63	2,310	1,97	3,50	0,42		
156	16.12.06	14.10-14.20	66	2,310	1,55	6,15	1,10		

Таблиця 4.2.

Експериментальні параметри нижньої іоносфери (зима, с. Гайдари)

№	Дата	Час, LT	z, км	f, МГц	a	$v_e \cdot 10^7, c^{-1}$	E, В/м	v_e / v_{e0}	j, А/м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	27.03.79	08.08-08.18	60	2,670	1,86	3,85	0	1,03	□ 0
2	27.03.79	08.08-08.18	63	2,670	1,95	3,53	0,41	1,38	$2,55 \cdot 10^{-8}$
3	29.03.79	08.08-08.18	60	2,332	1,93	3,76	0	1,00	□ 0
4	03.04.79	07.52-08.02	63	2,533	2,14	3,06	0,28	1,20	$2,05 \cdot 10^{-8}$
5	05.04.79	06.55-07.05	60	1,903	1,24	12,00	2,15	3,20	$4,04 \cdot 10^{-8}$
6	06.04.79	06.55-07.05	60	1,900	1,37	8,30	1,35	2,21	$3,22 \cdot 10^{-8}$
7	06.04.79	07.47-07.57	60	2,303	1,27	11,30	2,00	3,01	$3,88 \cdot 10^{-8}$
8	31.07.81	18.10-18.20	63	2,610	2,03	3,22	0,33	1,26	$2,27 \cdot 10^{-8}$

9	31.07.81	18.10-18.20	66	2,610	3,43	1,45	0	0,86	□ 0
10	31.07.81	17.30-17.40	60	2,610	1,30	10,20	1,76	2,72	$3,60 \cdot 10^{-8}$
11	01.08.81	17.31-17.41	60	2,610	1,82	4,00	0,23	1,07	$1,18 \cdot 10^{-8}$
12	03.06.82	13.30-13.42	63	2,560	1,38	8,32	1,48	3,26	$4,56 \cdot 10^{-8}$
13	27.03.85	16.37-16.47	60	2,100	1,53	6,35	0,90	1,69	$2,72 \cdot 10^{-8}$
14	20.09.85	12.11-12.22	60	2,100	1,20	14,50	2,69	3,87	$4,53 \cdot 10^{-8}$
15	20.09.85	12.11-12.22	63	2,100	2,04	3,27	0,34	1,28	$2,31 \cdot 10^{-8}$
16	20.09.85	14.05-14.15	60	2,100	1,18	16,00	3,00	4,27	$4,86 \cdot 10^{-8}$
17	20.09.85	15.15-15.26	60	2,100	1,21	14,00	2,58	3,73	$4,43 \cdot 10^{-8}$
18	20.09.85	18.00-18.10	60	2,100	1,81	4,59	0,44	1,22	$1,92 \cdot 10^{-8}$
19	14.05.86	13.32-13.42	66	2,310	2,36	2,79	0,38	1,66	$3,24 \cdot 10^{-8}$
20	01.06.86	12.05-12.15	60	2,310	2,06	3,18	0	0,85	□ 0
21	22.08.86	14.45-14.55	63	2,310	2,08	3,16	0,31	1,24	$2,17 \cdot 10^{-8}$
22	22.08.86	14.45-14.55	66	2,310	2,71	2,25	0,24	1,34	$2,54 \cdot 10^{-8}$
23	27.03.87	12.05-12.15	63	2,310	1,86	4,11	0,55	1,61	$2,90 \cdot 10^{-8}$
24	27.03.87	12.05-12.15	66	2,310	3,09	1,83	0	1,09	□ 0
25	07.05.87	15.24-15.34	66	2,310	3,49	1,61	0	0,96	□ 0
26	25.05.87	15.46-15.56	63	2,310	2,10	3,12	0,30	1,22	$2,14 \cdot 10^{-8}$
27	25.05.87	16.37-16.47	63	2,310	2,28	2,90	0,22	1,14	$1,69 \cdot 10^{-8}$
28	25.05.87	16.37-16.47	66	2,310	3,47	1,62	0	0,96	□ 0
29	03.06.87	11.42-11.52	60	2,310	2,13	3,10	0	0,83	□ 0
30	03.06.87	11.42-11.52	63	2,310	2,39	2,70	□ 0	1,06	□ 0
31	13.04.88	10.57-11.07	66	2,600	1,67	5,10	0,88	3,04	$4,73 \cdot 10^{-8}$
32	13.04.88	11.19-11.29	66	2,600	1,70	4,85	0,82	2,89	$4,56 \cdot 10^{-8}$
33	13.04.88	12.00-12.10	63	2,600	1,49	6,90	1,18	2,71	$4,10 \cdot 10^{-8}$
34	13.04.88	12.00-12.10	66	2,600	1,77	4,35	0,72	2,59	$4,30 \cdot 10^{-8}$
35	13.04.88	12.30-12.40	63	2,600	1,50	6,78	1,15	2,66	$4,15 \cdot 10^{-8}$
36	13.04.88	12.30-12.40	66	2,600	1,80	4,13	0,67	2,46	$4,18 \cdot 10^{-8}$
37	13.04.88	13.00-13.10	66	2,600	1,94	3,53	0,54	2,10	$3,75 \cdot 10^{-8}$

38	13.04.88	13.40-13.50	66	2,600	1,47	7,15	1,30	4,26	$5,75 \cdot 10^{-8}$
39	27.04.88	15.13-15.24	60	2,310	1,54	6,27	0,88	1,67	$2,69 \cdot 10^{-8}$
40	27.04.88	15.13-15.24	63	2,310	1,78	4,50	0,64	1,76	$3,09 \cdot 10^{-8}$
41	27.04.88	15.41-15.53	63	2,310	1,73	4,80	0,72	1,88	$3,47 \cdot 10^{-8}$
42	27.04.88	15.41-15.53	66	2,310	3,18	1,80	□ 0	1,07	□ 0
43	27.04.88	16.31-16.41	66	2,310	1,74	4,76	0,80	2,83	$4,50 \cdot 10^{-8}$
44	29.04.88	15.21-15.35	66	2,310	1,69	5,08	0,87	3,02	$4,71 \cdot 10^{-8}$
45	11.05.88	11.54-12.04	66	2,310	1,68	5,14	0,88	3,06	$4,72 \cdot 10^{-8}$
46	11.05.88	15.38-15.48	66	2,310	1,72	4,89	0,83	2,91	$4,58 \cdot 10^{-8}$
47	11.05.88	16.24-16.34	63	2,310	1,61	5,69	0,91	2,23	$3,62 \cdot 10^{-8}$
48	11.05.88	16.24-16.34	66	2,310	1,80	4,38	0,72	2,61	$4,27 \cdot 10^{-8}$
49	18.05.88	10.00-10.10	66	2,310	1,86	4,11	0,67	2,45	$4,15 \cdot 10^{-8}$
50	18.05.88	10.34-10.44	66	2,310	1,87	4,07	0,66	2,42	$4,13 \cdot 10^{-8}$
51	20.05.88	15.41-15.51	63	2,610	1,23	14,00	2,67	5,49	$6,22 \cdot 10^{-8}$
52	25.05.88	12.03-12.13	66	2,310	1,74	4,76	0,80	2,83	$4,50 \cdot 10^{-8}$
53	30.05.88	15.49-15.59	63	2,100	1,73	5,00	0,76	1,96	$3,33 \cdot 10^{-8}$
54	30.05.88	15.49-15,59	66	2,100	2,55	2,56	0,32	1,52	$2,95 \cdot 10^{-8}$
55	08.06.88	11.54-12.04	60	2,100	1,24	12,40	2,24	3,31	$4,11 \cdot 10^{-8}$
56	08.06.88	11.54-12.04	63	2,100	2,81	2,26	0	0,89	□ 0
57	08.06.88	12.10-12.20	63	2,100	2,59	2,50	0	0,98	□ 0
58	15.06.88	11.35-11.45	66	2,310	2,58	2,47	0,30	1,47	$2,86 \cdot 10^{-8}$
59	06.07.88	10.00-10.10	63	2,310	1,53	6,60	1,11	2,59	$3,96 \cdot 10^{-8}$
60	06.07.88	10.00-10.10	66	2,310	2,11	3,12	0,45	1,86	$3,50 \cdot 10^{-8}$
61	13.07.88	11.48-11.58	66	2,600	1,58	5,80	1,02	3,45	$5,09 \cdot 10^{-8}$
62	14.07.88	14.00-14.10	60	2,100	1,83	4,50	041	1,20	$1,84 \cdot 10^{-8}$
63	14.07.88	14.00-14.10	63	2,100	2,02	3,30	0,35	1,29	$2,33 \cdot 10^{-8}$
64	20.07.88	13.33-13.43	63	2,600	1,42	7,74	1,36	3,04	$4,42 \cdot 10^{-8}$
65	20.07.88	13.33-13.43	66	2,600	1,73	4,65	0,78	2,77	$4,44 \cdot 10^{-8}$
66	20.07.88	15.40-15.50	63	2,600	1,49	6,90	1,18	2,71	$4,1 \cdot 10^{-8}$

67	20.07.88	15.40-15.50	66	2,600	1,61	5,54	0,97	3,30	$4,98 \cdot 10^{-8}$
68	22.07.88	15.45-15.55	66	2,310	2,01	3,25	0,48	1,93	$3,59 \cdot 10^{-8}$
69	03.08.88	09.55-10.06	66	2,200	1,97	3,55	0,55	2,11	$3,81 \cdot 10^{-8}$
70	29.03.89	11.50-12.01	66	2,200	2,25	2,95	0,41	1,76	$3,34 \cdot 10^{-8}$
71	05.04.89	12.03-12.14	66	2,310	2,02	3,24	0,48	1,93	$3,59 \cdot 10^{-8}$
72	05.04.89	14.50-15.01	66	2,310	2,21	2,98	0,42	1,77	$3,40 \cdot 10^{-8}$
73	05.04.89	15.20-15.31	66	2,310	2,20	3,00	0,43	1,79	$3,44 \cdot 10^{-8}$
74	12.04.89	11.00-11.11	63	2,100	1,33	9,00	1,62	3,53	$4,78 \cdot 10^{-8}$
75	12.04.89	11.00-11.11	66	2,100	3,88	1,55	0	0,93	□ 0
76	24.05.89	12.00-12.10	66	2,100	2,45	2,69	0,35	1,60	$3,10 \cdot 10^{-8}$
77	10.06.93	12.30-12.40	60	2,100	2,56	2,55	0	0,68 ?	□ 0

Далі на рис. 4.6 – 4.8 наведено отримані при виконанні даної роботи з використанням оновленого масиву даних умовно зимова, умовно літня та загальна гістограми розподілу напруженості електричного поля у мезосфері.

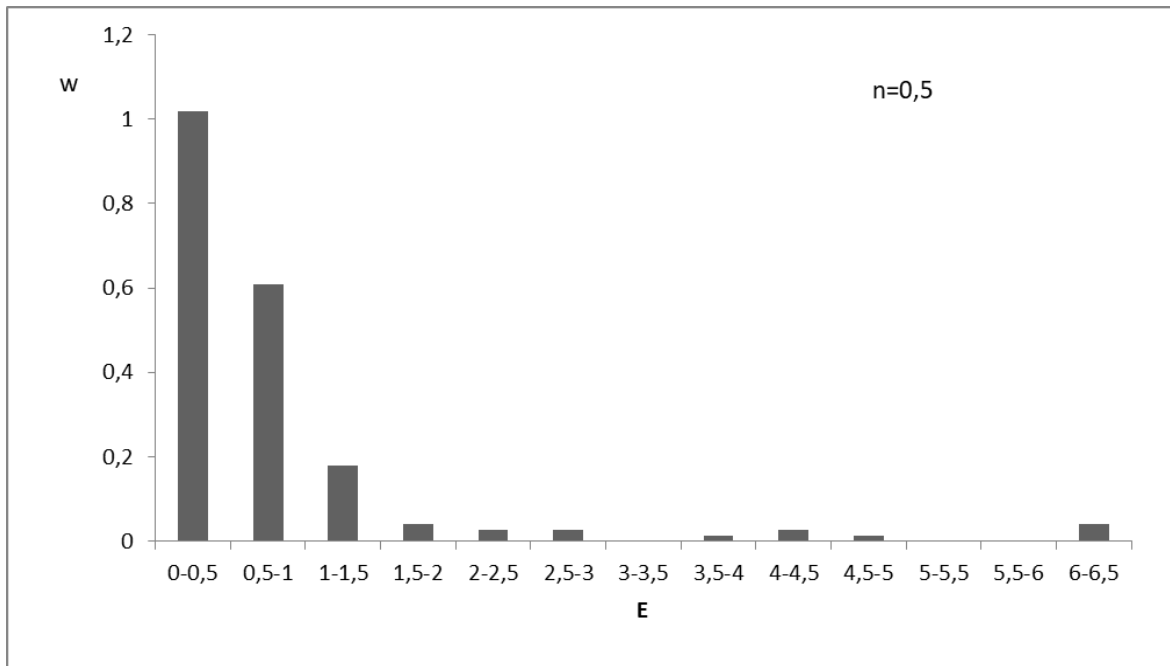


Рис.4.6. "Зимова" гістограма розподілу величин E, одержаних над Україною с.Гайдари.

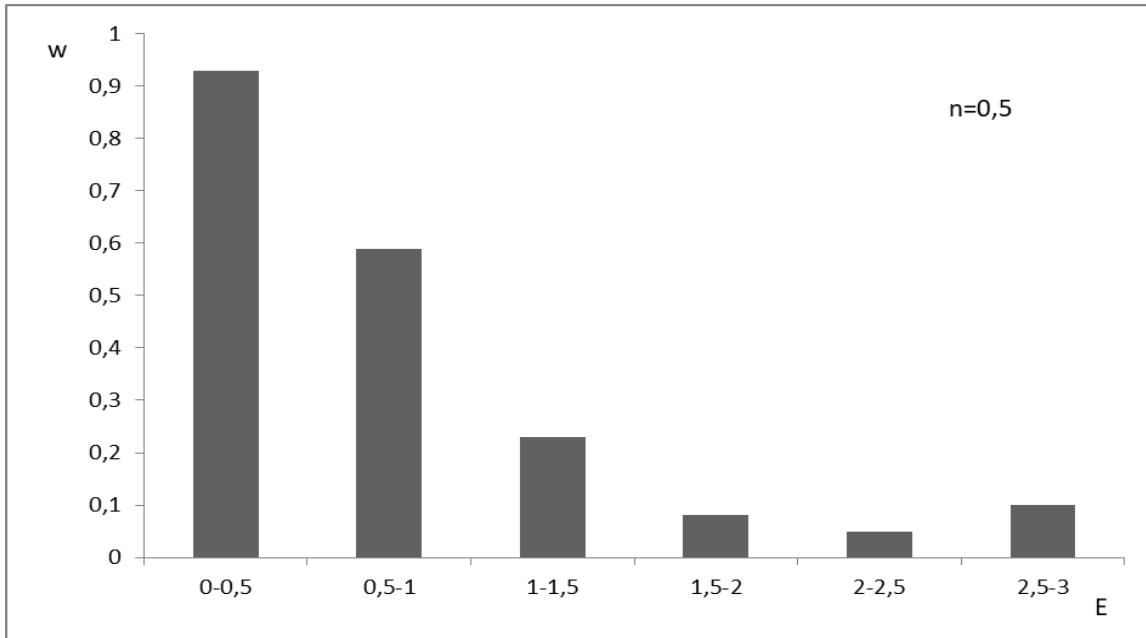


Рис. 4.7. "Літня" гістограма розподілу величин E, одержаних над Україною с.Гайдари.

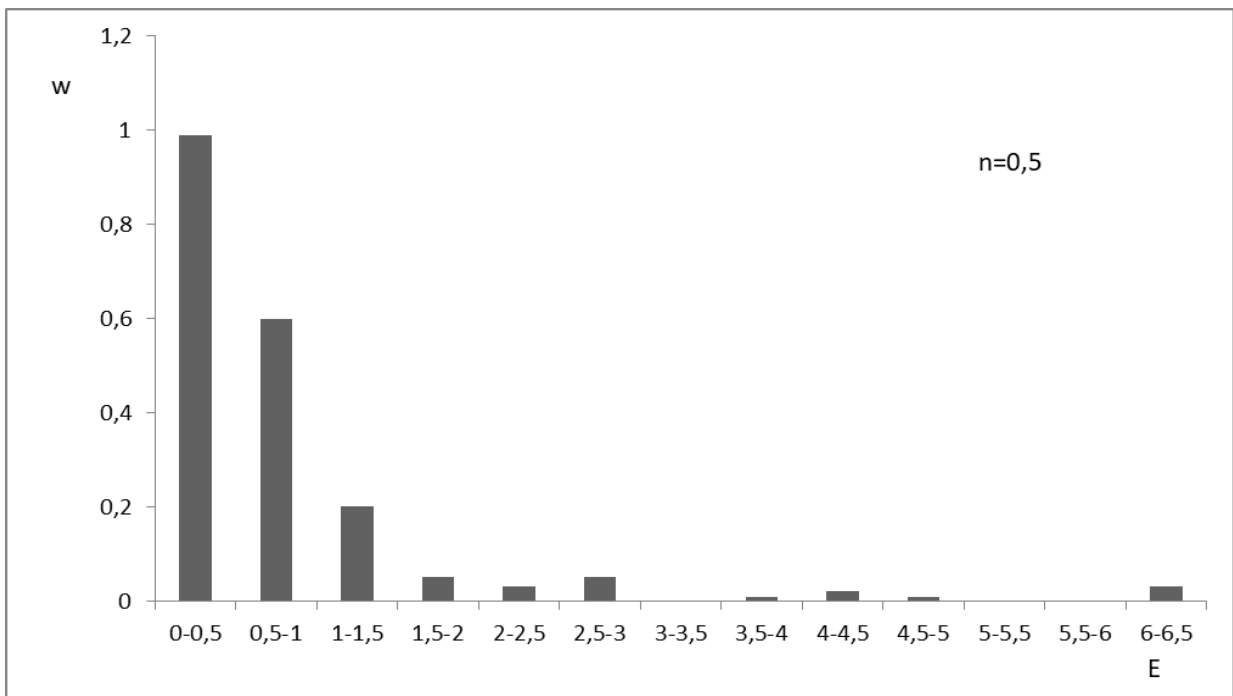


Рис.4.8. "Загальна" гістограма розподілу величин E, одержаних над Україною с.Гайдари.

Можна бачити, що гістограми на рис. 4.6–4.8 добре узгоджуються з отриманими раніше гістограмами (див. рис. 4.2, 4.4, 4.5). При цьому математичне очікування та дисперсія для гістограми з рис. 4.6 склали $0,77 \text{ В/м}$ та $0,18 (\text{В/м})^2$, для гістограми з рис. 4.7 – $1,27 \text{ В/м}$ та $0,34 (\text{В/м})^2$, для гістограми з рис. 4.7 – $1,02 \text{ В/м}$ та $0,20 (\text{В/м})^2$.

Таким чином, проведений статистичний аналіз оновленого масиву експериментальних даних про параметри електрично активної мезосфери дозволив підтвердити зроблені раніше іншими авторами наступні висновки.

У мезосфері існує, у крайньому разі, два механізми генерації потужних мезосферних електричних полів, найбільш ймовірним з яких (з ймовірністю реалізації приблизно 60–70%) може бути інтерференція випадкових полів від великої кількості елементарних дрібномасштабних мезосферних генераторів, яка призводить до однопараметричного Релеєвського розподілу результуючої напруженості E потужних мезосферних електричних полів з середніми значеннями $0,7\text{--}1,0 \text{ В/м}$ у висотному діапазоні $60\text{--}67 \text{ км}$ (або до відповідного однопараметричного експоненційного розподілу інтенсивності E^2 потужних мезосферних електричних полів). Другий механізм невідомої поки ще природи призводить до епізодичної (ймовірність реалізації у межах 5–15%) появи потужних мезосферних електричних полів з напруженостями $E > 2,5 \text{ В/м}$ (середнє значення напруженості таких потужних мезосферних електричних полів приблизно 4 В/м). Статистично значущих сезонних та добових різниць в усереднених характеристиках потужних мезосферних електричних полів виявити не вдалося. Ймовірність відсутності регіональних потужних мезосферних електричних полів склала біля 25% для України.

5. ВИСНОВКИ

Основні висновки даної роботи можна звести до наступного.

Відкриття існування власних потужних мезосферних електричних полів вимагає розвитку електродинаміки електрично активної мезосфери з введенням у модель глобального атмосферного електричного ланцюга джерела потужної мезосферної електрики.

У ХНУ імені В.Н. Каразіна на кафедрі космічної радіофізики було розроблено метод дистанційної діагностики параметрів електрично активної мезосфери, за допомогою якого було отримано великий масив експериментальних даних.

Проведений у даній роботі статистичний аналіз оновленого на цей час масиву відповідних експериментальних даних, одержаних в Україні з використанням розробленого методу за реєстраціями частково відбитих з висот 60 – 67 км радіосигналів, дозволив підтвердити наступне.

У мезосфері існує, у крайньому разі, два механізми генерації потужних мезосферних електричних полів, найбільш ймовірним з яких (з ймовірністю реалізації приблизно 60–70%) може бути інтерференція випадкових полів від великої кількості елементарних дрібномасштабних мезосферних генераторів, яка призводить до однопараметричного Релеєвського розподілу результуючої напруженості E потужних мезосферних електричних полів з середніми значеннями 0,7–1,0 В/м у висотному діапазоні 60 – 67 км (або до відповідного однопараметричного експоненційного розподілу інтенсивності E^2 потужних мезосферних електричних полів). Другий механізм невідомої поки ще природи призводить до епізодичної (ймовірність реалізації у межах 5–15%) появи потужних мезосферних електричних полів з напруженостями $E > 2,5$ В/м (середнє значення напруженості таких потужних мезосферних електричних полів приблизно 4 В/м). Статистично значущих сезонних та добових різниць в

усереднених характеристиках потужних мезосферних електричних полів виявити не вдалося. Ймовірність відсутності регіональних потужних мезосферних електричних полів склала біля 25% для України.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Rycroft M. J. The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change / M. J. Rycroft, S. Israelsson, C. Price // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.–2000.–V. 62.–P. 1563–1576.
2. Volland H. Atmospheric electrodynamics / H. Volland.–Berlin: Springer–Verlag, 1984. 205 p.
3. Rycroft M. J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An overview / M. J. Rycroft // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.–2006.–V. 68.–P. 445–456.
4. Bering E. A. The global electric circuit / E. A. Bering, A. A. Few, J. R. Benbrook // Phys. Today.–1998.–Oct.–P. 24–30.
5. Мареев Е. А. Загадки атмосферного электричества / Е. А. Мареев, В. Ю Трахтенгерц // Природа.–2007.–№3.–С. 24–33.
6. Shunk R. W. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. W. Shunk, A. F. Nagy.–Cambridge: University Press, 2000. 554 p.
8. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. Пер. с англ.–М.:Мир, 1973. 504 с.
9. Van Allen J.A. Radiation belts around the earth / J.A. Van Allen // Sci. Amer.–1959.–V,200.–P.39.
10. Велинов П. Воздействие космических лучей на ионосферу и распространение радиоволн / П. Велинов, Г. Несторов, Л. Дорман.–София: Болг. АН, 1974. 311с.
11. Брагин Ю. А. Прямые измерения напряженности электрического поля атмосферы до 80 км / Ю. А. Брагин, А. А. Тютин, А. А. Кочеев // Космические исследования.–1974.–Т.12, вып.2.–С. 306–308.
12. Goldberg R. A. Middle atmospheric electrodynamics: status and future / R. A. Goldberg // J. Atmos. Terr. Phys.–1984.–V.46, № 11.–P. 1083–1101.

13. Тютин А. А. Мезосферный максимум напряженности электрического поля / А. А. Тютин // Космические исследования.—1976.—Т.14, вып.1.—С. 143–144.
14. Брагин О. А. Прямые измерения электропроводности атмосферы до высот 80 км на станции Молодежная (Антарктида) / О. А. Брагин, Ю. А. Брагин, А. А. Кочеев // Космические исследования.—1980.—Т.18, вып.2.—С. 287–289.
15. Maynard N. G. Intense variable electric fields at ionospheric altitudes in the high latitude regions as observed by DE-2 / N. G. Maynard, J. P. Heppner, A. Egeland // Geophys. Res. Lett.—1982.—V.9, № 9.—P. 981–984.
16. Hale L. C. Measurements of middle-atmosphere electric fields and associated electrical conductivities / L. C. Hale, C. L. Croskey, J. D. Mitchell // Geophys. Res. Lett.—1981.—V. 8.—P. 927–930.
17. Goldberg R. A. Middle atmospheric electrodynamics during MAP / R. A. Goldberg // Adv. Space Res.—1990.—V. 10, № 10.—P. 209–217.
18. Kelley M. C. Large amplitude middle atmospheric electric fields: fact or fiction ? / M. C. Kelley, C. L. Siefring, R. F. Pfaff // Geophys. Res. Lett.—1983.—V.10, № 8.—P. 733–736.
19. Aikin A. C. A Van de Graaf source mechanism for middle atmospheric vertical electric fields / A. C. Aikin, N. C. Maynard // J. Atmos. Terr. Phys.—1990.—V.52.—P. 695–705.
20. Поляков С. В. О генерации электрических полей в верхней атмосфере / С. В. Поляков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц // Геомагнетизм и аэрномия.—1990.—Т.30, № 5.—С. 869–871.
21. Zadorozhny A. M. Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields / A. M. Zadorozhny, A. A. Tyutin // Ann. Geophys.—1998.—V.16.—P. 1544–1551.
22. Гармаш К. П. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина: Исследование околоземной

космической среды / К. П. Гармаш, А. И. Гритчин, С. И. Мартыненко, В. А. Поднос, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, В. Н. Федоренко, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии»: Материалы конференции 14–18 сентября 2009.–Севастополь, Крым, Украина, 2009.–С. 943–944.

23. Rozumenko V. T. Studies of global and large-scale ionospheric phenomena due to sources of energy of different nature / V. T. Rozumenko, L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Turkish J. Phys.–1994.–Vol. 18, № 11.–P. 1193–1198.

24. Фукс И. М. Аномалии СДВ-сигнала как отклик на процессы в приземной атмосфере / И. М. Фукс, Р. С. Шубова // Геомагнетизм и аэрономия.–1994.–Т. 34, № 2.–С. 130–136.

25. Мартыненко С. И. Отклик нижней ионосферы на изменение проводимости приземной атмосферы / С. И. Мартыненко, И. М. Фукс, Р. С. Шубова // Геомагнетизм и аэрономия.–1994.–Т. 34, № 2.–С. 121–129.

26. Martynenko S. I. Ionospheric electric-field influence on the parameters of VLF signals connected with nuclear accidents and earthquakes / S. I. Martynenko, I. M. Fuks, R. S. Shubova // J. Atmos. Electricity.–1996.–Vol. 16, № 3.–P. 259–269.

27. Fuks I. M. Lower ionosphere response to conductivity variations of the near-earth atmosphere / I. M. Fuks, R. S. Shubova, S. I. Martynenko // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.–1997.–Vol. 59, № 9.–P. 961–965.

28. Fuks I. M. Comment on “On the long-range detection of radioactivity using electromagnetic radiation” / I. M. Fuks, S. I. Martynenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.–2004.–Vol. A 523.–P. 246–248.

29. Martynenko S. I. Ionospheric electric-field influence on the parameters of VLF signals connected with nuclear accidents and earthquakes / S. I. Martynenko, I. M. Fuks, R. S. Shubova // 10th International Conference on Atmospheric

Electricity (June 10–14, 1996, Osaka, Japan). Proceedings.–Tokyo, Japan, 1996.–P. 444–447.

30. Martynenko S. I. Influence of nuclear accidents on the parameters of VLF signals / S. I. Martynenko, I. M. Fuks, R. S. Shubova // USNC/URSI Radio Science Meeting (July 21–26, 1996, Baltimore, USA).–Baltimore, Maryland: IEEE, 1996.–P.416.

31. Martynenko S. I. Lower ionosphere modification by electrostatic atmospheric electric field and VLF wave propagation / S. I. Martynenko, R. S. Shubova // V-th International Suzdal URSI Symp. on the Modification of Ionosphere (ISSMI'98). Book of Abstracts.–M.: IZMIRAN, 1998.–P.107.

32. Гоков А. М. Изменения частоты соударений электронов и электрические поля в нижней ионосфере / А. М. Гоков, С. И. Мартыненко // Геомагнетизм и аэрномия.–1997.–Т. 37, № 2.–С. 76–80.

33. Martynenko S. I. Mesospheric electric field measurements with a partial reflection radar / S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov, A. M. Gokov // J. Atmos. Electricity.–1999.–Vol. 19, № 2.–P. 81–86.

34. Martynenko S. I. New possibilities for mesospheric electricity diagnostics / S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov // Adv. Space Res.–2001.–Vol.27, № 6–7.–P.1127–1132.

35. Мартыненко С. И. Методика дистанционной диагностики ионосферных возмущений в мощном мезосферном электрическом поле / С. И. Мартыненко // Радиофизика и радиоастрономия.–2003.–Т.8, № 2.–С. 127–136.

36. Мартыненко С. И. Взаимосвязь временных и пространственных масштабов возмущений в нижней ионосфере, вызываемых внешним электрическим полем / С. И. Мартыненко // Геомагнетизм и аэрномия.–1999.–Т. 39, № 2 .–С. 249–253.

37. Martynenko S. I. Atmospheric electric field and disturbances of the lower ionosphere parameters / S. I. Martynenko // J. Atmos. Electricity. – 1999. – Vol. 19, № 1.–P. 1–9.

38. Martynenko S. I. Statistical properties of large mesospheric electric fields / S. I. Martynenko // J. Atmos. Electricity.–2002.–Vol.22, № 2.–P.101–106.

39. Мартыненко С. И. Моделирование статистических характеристик мощных мезосферных электрических полей / С. И. Мартыненко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка.–2002.–№ 570, вип. 2'2002.–С. 184–187.

40. Meek C. E. Remote sensing of mesospheric electric fields using MF radar / C. E. Meek, A. H. Manson, S. I. Martynenko, V. T. Rozumemko, O. F. Tyrnov // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2004.–Vol. 66.–P. 881–890.

41. Martynenko S. I. Statistical parameters of nonisothermal lower ionospheric plasma in the electrically active mesosphere / S. I. Martynenko, V. T. Rozumemko, O. F. Tyrnov, A. H. Manson, C. E. Meek // Adv. Space Res.–2005.–Vol. 35.–P. 1467 – 1471.

42. Manson A. H. VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60–70 km Altitude Range / A. H. Manson, C. E. Meek, S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov // Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 8. Neuilly-sur Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>. –2006.–P. 8-1–8- 46.

43. Мартыненко С. И. Эффект “охлаждения” области D ионосферы под действием возмущенной тропосферной проводимости / С. И. Мартыненко // Радиофізика и радиоастрономія. – 2004.–Т. 9, № 2.–С. 217–220.

44. Martynenko S. I. On the electrical coupling between the troposphere and the mesosphere / S. I. Martynenko, S. F. Clifford // International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, GI.–2007.– Vol. 6.–P. 1–6.

45. Rycroft M. J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An overview / M. J. Rycroft // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.–2006.–V. 68.–P. 445–456.