

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет

імені В. Н. Каразіна

Факультет радіофізики, біомедичної

електроніки та комп'ютерних систем

Кафедра космічної радіофізики

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ ініціали, прізвище  
підпис

“\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 року

**Кваліфікаційна робота  
магістра**

на тему: **НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ СТАН ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНОЇ  
МЕЗОСФЕРИ**

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

Кисельов М.С.

Керівник

кандидат фіз.-мат. наук,

доцент

С. І. Мартиненко

Консультант

2020 рік

## Реферат

Кисельов М. С. Неізотермічний стан електрично активної мезосфери. Звіт з переддипломної практики. Харків, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем, кафедра космічної радіофізики, 2020, 5 рис., 24 с., 14 посилань.

У даній роботі на підставі відомих з літератури результатів вивчається взаємодія потужних мезосферних електричних полів з параметрами плазми області D іоносфери. Показано, що первинні швидкі збурення температури електронів, збурення ефективної частоти зіткнень електронів та коефіцієнта втрат енергії для електронів є переважаючими за своєю інтенсивністю.

Ключові слова: іоносфера, потужні мезосферні електричні поля.

## Abstract

Kiseljov M. S., Nonisothermal Electrically Active Mesosphere, Report on Research, Department of Space Radio Physics, School of Radio Physics, Biomedical Electronics and Computer Systems, Kharkiv V. Karazin National University, Kharkiv, 2020, 24 Pages, 5 Figures, 14 References.

In this paper we analyze the formulas that describe the interaction of powerful mesospheric electric fields and plasma of the ionosphere domain D, and the results known from the literature showed that the predominant in intensity are the primary fast electron temperature perturbations and tracing their indignation effective collision frequency of electrons and the coefficient energy loss of electrons.

Key words: Ionosphere, Large Mesospheric Electric Fields.

## Реферат

Киселёв М. С. Неизотармическое состояние электрически активной мезосферы. Отчёт по преддипломной практике. Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, факультет радиофизики, биомедицинской электроники и компьютерных систем, кафедра космической радиофизики, 2020, 5 рис., 24 с., 14 библиографических ссылок.

В данной работе на основании известных из литературы результатов изучается взаимодействие мощных мезосферных электрических полей с параметрами плазмы области D ионосферы. Показано, что преобладающими по своей интенсивности являются первичные быстрые возмущения температуры электронов и отслеживающие их возмущения эффективной частоты соударений электронов и коэффициента потерь энергии для электронов.

Ключевые слова: ионосфера, мощные мезосферные электрические поля.

## ЗМІСТ

1. ВСТУП.....	6
2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНОЇ МЕЗОСФЕРИ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	7
2.1. Результати експериментальних досліджень потужних мезосферних електричних полів прямими ракетними методами .....	7
2.2. Результати дистанційного зондування електрично активної мезосфери.....	12
3. ВПЛИВ ПОТУЖНИХ МЕЗОСФЕРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ПАРАМЕТРИ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ.....	15
4. ВИСНОВКИ.....	21
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	23

## 1. ВСТУП

Вивчення взаємодії атмосферної електрики з навколосемним середовищем є одним з актуальних напрямків сучасних радіофізичних та геофізичних досліджень. Це обумовлюється суттєвим впливом цих процесів на умови розповсюдження радіохвиль та роботу радіотелекомунікаційних та аерокосмічних систем. Особливо все вищесказане стосується порівняно маловивчених електродинамічних процесів в мезосфері (середній атмосфері).

В останній час світовою науковою спільнотою було доведено, що мезосфера є не тільки дуже чутливою до впливу зовнішніх збурень різноманітної природи, але і важливою електрично активною складовою глобального атмосферного електричного ланцюга. Тому актуальність і важливість даних досліджень не викликає сумнівів.

Отже, об'єктом вивчення у даній роботі є електрично активна мезосфера, а предметом досліджень – неізотермічний стан електрично активної мезосфери за рахунок електродинамічних процесів, що відбуваються у цьому середовищі.

Робота складається зі вступу, основної частини та висновків. В основній частині розглядаються збурення, що з'являються у нижній іоносфері при взаємодії власних потужних мезосферних електричних полів з іоносферною плазмою. Аналізуються також відомі з літератури основні результати експериментальних досліджень характеристик електрично активної мезосфери, які були одержані як за допомогою прямих ракетних вимірювань, так і з використанням дистанційних методів радіозондування. У висновках наведено основні результати роботи.

## **2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНО АКТИВНОЇ МЕЗОСФЕРИ. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД**

В даний час існує ряд результатів прямих (за допомогою ракетних методів [1-5]) і дистанційних (за допомогою методу часткових відбиттів [6-13]) вимірювань потужних електричних полів на висотах мезосфери. При цьому було показано, що напруженості власних мезосферних електричних полів, що спостерігалися, можуть досягати величин до 1 В/м і більше.

### **2.1 Результати експериментальних досліджень потужних мезосферних електричних полів прямими ракетними методами**

Вперше про виявлення потужних мезосферних електричних полів (ПМЕП) за допомогою прямих ракетних вимірювань в середній атмосфері було заявлено в роботах [1, 2]. Потім ці вимірювання тривали в роботах [3-5]. В результаті було виявлено різке збільшення поля на висотах близько 60км з півшириною шару існування електрики в 10 км. Було встановлено, що в денний час напруженість поля може досягати  $E = 4$  В/м на висотах близько 60 км і  $E = 6$  В/м на висоті близько 70км. Як в денний час доби, так і в нічний, на висоті менше 10км напруженість є практично постійною. В експериментах, проведених в полярній зоні, було зареєстровано швидке зростання поля у верхній точці польоту.

Згадані вище дослідження сильних електричних полів дозволили встановити наступні їх головні характеристики. Ці поля зустрічаються в мезосфері і верхній стратосфері, можуть бути як горизонтальними, так і вертикальними, досягати величин порядку декількох В/м, мають півширину

шару розташування близько 10 км. Однак природа і роль цих полів у фізиці та хімії середньої атмосфери до кінця не вивчені досі.

Результати прямих вимірювань напруженості вертикальних електричних полів представлені на рис.2.1, 2.2, 2.3 [5].

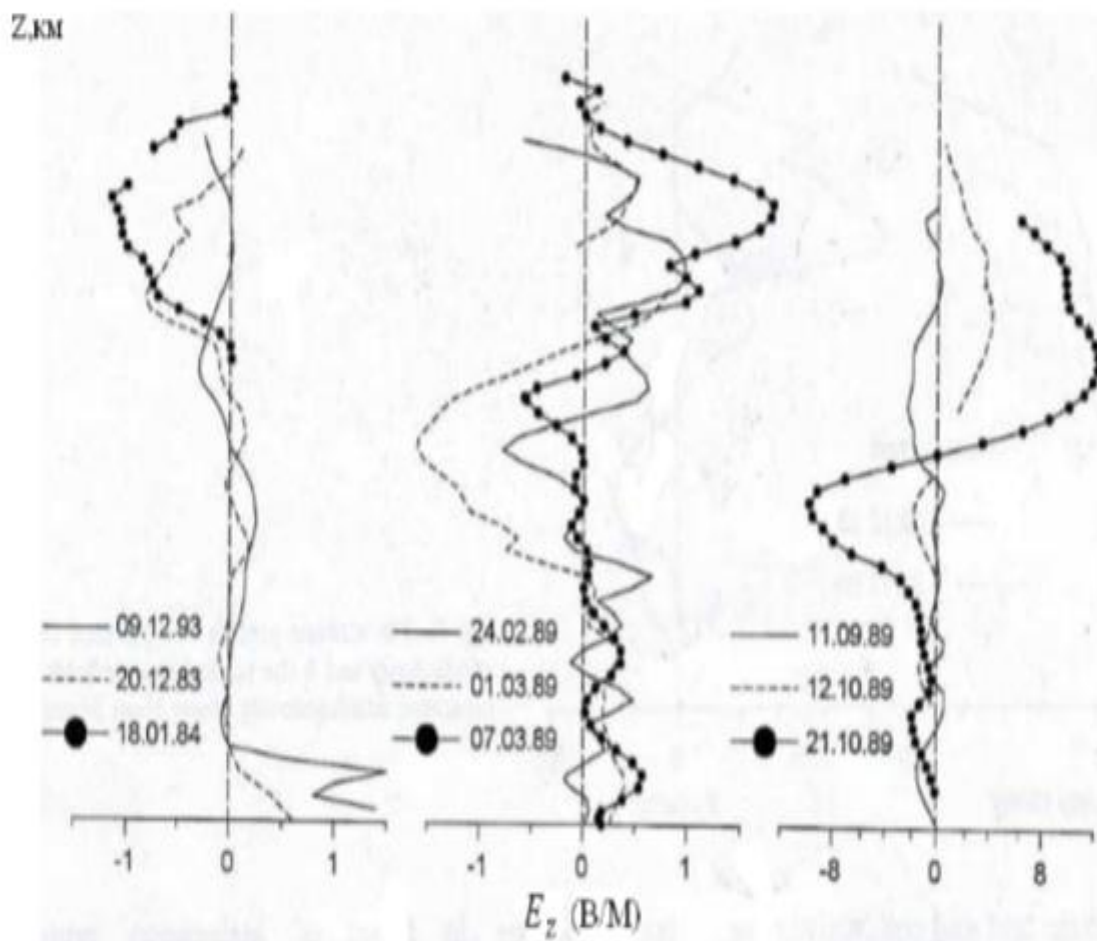


Рис. 2.1. Вертикальні електричні поля, що вимірювались на острові Хейса ( $80,6^{\circ}\text{N}$ ) [5].



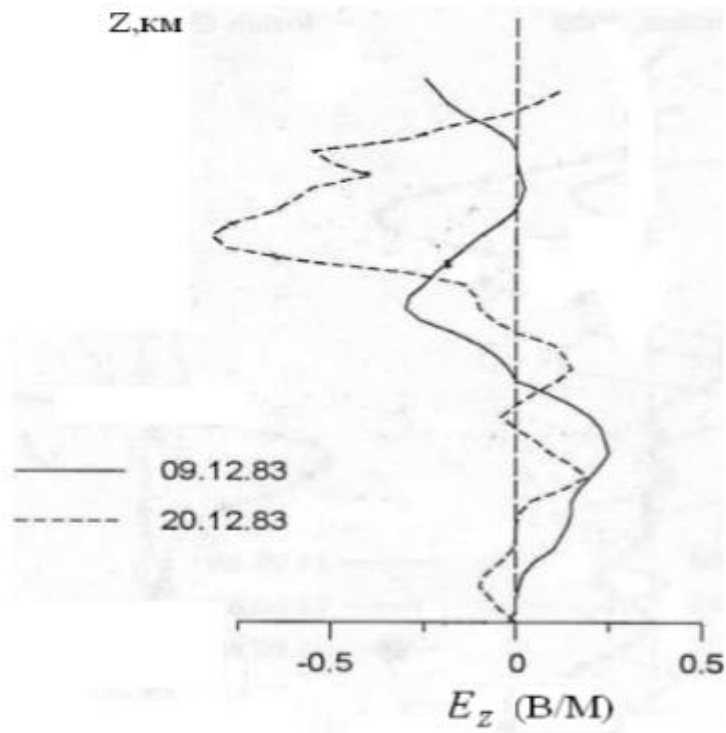


Рис. 2.2 Вертикальні електричні поля, що вимірювались на острові Хейса (80,6°N) [5].

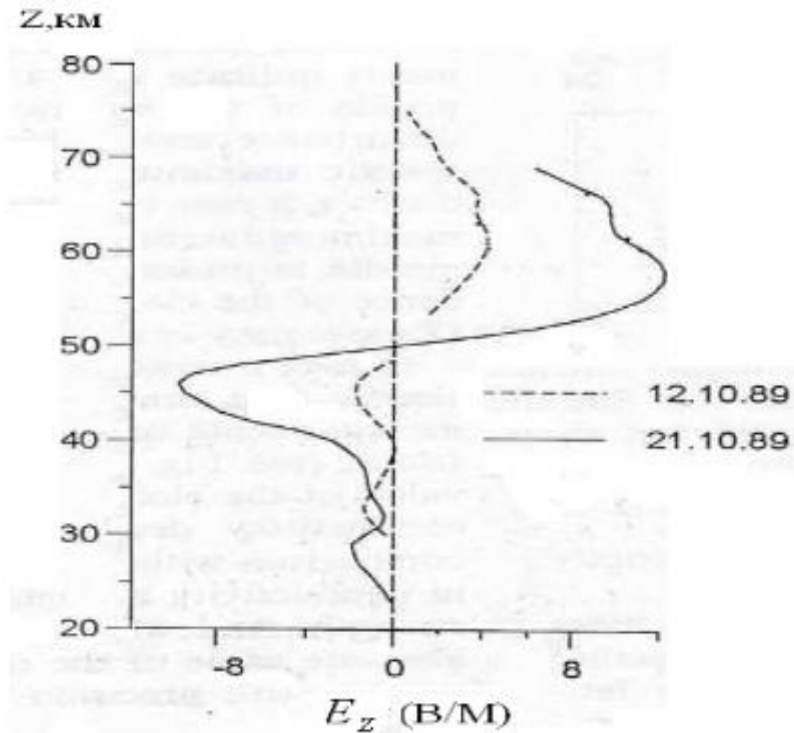


Рис.2.3. Вертикальні електричні поля, що вимірювались в Індійському океані (50-60°S) [5].

У спокійний геомагнітний період максимальне значення напруженості електричного поля склало 0,8 В/м. Під час запуску, проведеного в умовах геомагнітних збурень, максимум напруги електричного поля збільшився до 1,2 В/м і виник на висоті 70 км (див.2.1 а).

Вимірювання, проведені на високих широтах, демонструють залежність висотного профілю напруженості електричного поля від рівня геомагнітних збурень: коли останній зростає, мезосферний максимум напруженості електричного поля стає більш явним, з'являється на більшій висоті, а його величина зростає [1-4].

Максимум абсолютного значення напруженості електричного поля в мезосфері при менш спокійних геомагнітних умовах виявився більше максимуму, отриманого в більш спокійній геомагнітній обстановці (рис.2.1). Результати цих вимірювань, проведених під час спалаху на сонці, наведені на

рис.2.1 . Максимум абсолютного значення вертикальної складовою напруги електричного поля для цього запуску знаходиться на висотах 50 і 70 км, і становить близько 10 В/м. максимальне значення напруги 12 В/м було зареєстровано на висоті 58 км (58,5°S) 21 жовтня під час під час спалаху на сонці (SPE). Спостережувана поведінка електричних полів під час геомагнітних збурень і SPE ще раз підкреслює високу електричну активність мезосфери, а саме існування мезосферного електричного генератора.

Одним з можливих механізмів, є гравітаційне осідання заряджених аерозолів, а також кореляція між аерозольним змістом і мезосферними електричними полями [5]. Для пояснення існування в мезосфері спостережуваних електричних полів передбачалося одночасна наявність там як негативно, так і позитивно заряджених аерозольних частинок різних розмірів. У цій моделі більш масивні заряджені частинки падають з більшою швидкістю, створюючи поділ заряду. Більш дрібні частинки, переносять заряд іншого знака, зменшують провідність атмосфера. Якщо негативні і позитивні заряди, що переносяться частинками, перевищують відповідні заряди, що переносяться електронами і іонами, то ефективна провідність атмосфери визначається більш дрібними аерозольними частинками. Однак, якщо розрахувати провідність для частинок з радіусом 20 нм і концентрацією  $10^3 \text{ см}^{-3}$  на висоті 60 км, то її величина складе  $10^{12} \text{ С/м}$ , що приблизно на два порядки менше результатів вимірювання. Можлива причина відмінності між отриманою і вимірною ефективною провідністю може бути виявлена, якщо припустити, що мезосферна плазма складається з негативно і позитивно заряджених аерозольних частинок, оточених хмарами позитивних або негативних іонів, а також електронів.

Під час геомагнітних збурень спостерігалось одночасне збільшення напруженості вертикального електричного поля і електричної провідності [5]. Така поведінка електричних полів у час геомагнітних збурень свідчить

про високу електричну активності мезосфери, що, в свою чергу, передбачає наявність мезосферного генератора.

## **2.2 Результати дистанційного зондування електрично активної мезосфери**

З використанням розробленого у Харківському національному університеті методу дистанційної діагностики електричних характеристик мезосфери за допомогою реєстрацій частково відбитих радіосигналів був отриманий найбільший в даний час масив відповідних експериментальних даних для регіонів України [6-13] та Канади [6, 7]. Проведена обробка і статистичний аналіз цього масиву реєстрацій частково відбитих з висот 60 – 67 км радіосигналів дозволили вперше отримати експериментальні функції розподілу напруженості власних потужних мезосферних електричних полів і показав наступне.

У мезосфері існують, принаймні, два механізми генерації потужних мезосферних електричних полів (ПМЕП), найбільш вірогідним з яких (з імовірністю реалізації приблизно 60-70%) може бути інтерференція випадкових полів від великого числа елементарних дрібномасштабних мезосферних генераторів, яка призводить до однопараметричному Релеївському розподілу результуючої напруженості  $E$  досліджуваних ПМЕП із середніми значеннями 0,7-0,9 В/м в висотному діапазоні 60-67 км (або до відповідного однопараметричного експоненційного розподілу інтенсивності  $E^2$  ПМЭП). Інший механізм невідомої поки ще природи призводить до епізодичному (ймовірність реалізації в межах 5-15%) появі ПМЕП з напруженостями  $E > 2,5$  В/м (середнє значення напруженості таких ПМЕП приблизно 4 В/м). Статистично значущих сезонних і добових варіацій у усереднених характеристиках ПМЕП виявити не вдалося. Ймовірність відсутності регіональних ПМЕП склала близько 25% для України і близько

30% для Канади. Результати порівняння українських та канадських даних свідчили про можливе існування широтної залежності в усереднених характеристиках ПМЕП [16].

Таким чином, отримані експериментальні результати можуть служити основою для розробки статистичних емпіричних моделей ММЕП, дозволяють отримувати ймовірнісні регіональні прогнози (принаймні над регіонами України та Канади) очікуваних величин напруженостей потужних мезосферних електричних полів у нижній частині D-області іоносфери, а також дослідити вплив мезосферної електрики на параметри нижньої іоносфери.

Отже, аналіз існуючих експериментальних даних дозволив зробити деякі попередні висновки про властивості цих полів: значна змінність у часі, існують досить значні інтервали часу, на яких локальні потужні електричні поля практично відсутні; просторова обмеженість по висоті області існування (для мезосфери-приблизно 55-75 км).

Результати дистанційного зондування показали, що в мезосфері існують, принаймні, два механізми генерації потужних мезосферних електричних полів (ПМЕП), найбільш вірогідним з яких (з імовірністю реалізації приблизно 60-70%) може бути інтерференція випадкових полів від великого числа елементарних дрібномасштабних мезосферних генераторів, що призводить до однопараметричного Релеєвського розподілу результуючої напруженості  $E$  досліджуваних ПМЕП со середніми значеннями 0,7-0,9 В/м у висотному діапазоні 60-67 км (або к відповідному однопараметричному експоненціальному розподілу інтенсивності  $E^2$  ПМЕП). Інший механізм невідомої поки ще природи призводить до епізодичного (ймовірність реалізації в межах 5-15%) появи ПМЕП з напруженостями  $E > 2,5$  В/м (середнє значення напруженості таких ПМЕП приблизно 4 В/м). Статистично значущих сезонних і добових варіацій в усереднених характеристиках ПМЕП не вдалося. Імовірність відсутності

регіональних ПМЕП склала близько 25% для України і близько 30% для Канади. Результати порівняння українських та Канадських даних свідчили про можливе існування широтної залежності в усереднених характеристиках ПМЕП [16]. Порівняння характеристик мезосферних полів, отриманих за результатами прямих ракетних вимірювань і за даними дистанційного зондування з використанням частково відбитих радіосигналів, показало їх хороше узгодження по величинам. Така взаємоузгодженість експериментальних даних, отриманих різними методами, свідчить про ефективність цих методів при дослідженнях електрично активної мезосфери і о надійності одержуваних при цьому експериментальних результатів. Це відкриває можливість їх широкого використання для чисельного моделювання збурень параметрів нижньої іоносфери під впливом потужних мезосферних електричних полів.

### 3. ВПЛИВ ПОТУЖНИХ МЕЗОСФЕРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА ПАРАМЕТРИ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ

Для оцінки впливу варіацій напруженості мезосферного електричного поля на параметри нижньої іоносфери можна використовувати систему рівнянь балансу електронної концентрації, температури електронів і концентрації позитивних іонів у шарово-неоднорідній слабоіонізованій плазмі, доповнену законом Ома в диференційній формі і умовою квазінейтральності [6–11]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = q_{i0} + \nu_{de}\lambda N - \nu_a N - \alpha_r(1 + \lambda)N^2 + (D_i + D_a)\frac{\partial^2 N}{\partial z^2}, \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial N^+}{\partial t} = q_{i0} - \alpha_r(1 + \lambda)N^2 - \alpha_i\lambda(1 + \lambda)N^2 + (D_i + D_a)\frac{\partial^2 N^+}{\partial z^2}, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{2Q_e}{3kN} - \delta\nu_e(T_e - T_n), \quad (3.3)$$

$$j = \sigma_e E, \quad (3.4)$$

$$N^+ = N + N^-, \quad (3.5)$$

де

$q_i$  – швидкість іоноутворення,

$\nu_{de}$  – ефективна частота відлипання електронів від негативних іонів,

$\lambda = N^- / N$ ,

$N^-$  – концентрація негативних іонів,  
 $\nu_a$  – ефективна частота прилипання електронів до нейтральних частинок,  
 $\alpha_r$  – ефективний коефіцієнт дисоціативної рекомбінації електронів і позитивних іонів,  
 $\alpha_i$  – ефективний коефіцієнт іон-іонної рекомбінації,  
 $D_a$  – коефіцієнт амбіполярної дифузії,  
 $D_t$  – коефіцієнт турбулентної дифузії,  
 $k$  – стала Больцмана,  
 $T_n$  – температура нейтральних часток,  
 $\delta$  – середня частка енергії, що втрачається електроном при одному зіткненні з важкою частинкою,  
 $\sigma_e$  – електронна провідність плазми,  
 $E$  – напруженість потужного мезосферного електричного поля,  
 $Q_e/N$  – енергія, що віддається в середньому електрону плазми сторонніми джерелами нагріву (потужним мезосферним електричним полем),  
 $j$  – густина струму мезосферного джерела електричного поля,  
 $\nu_e$  – ефективна частота зіткнень електронів.

Тут  $Q_e = \sigma_e E^2$  (закон Джоуля-Ленця).

Розглянемо область іоносфери біля висоти її початку  $z = 60$  км (верхня межа приземного хвилеводу). Врахуємо, що електронна провідність постійного струму буде [11]

$$\sigma_e = 1,4e^2 N / m\nu_e, \quad (3.6)$$

де  $e$  і  $m$  – заряд та маса електрона, відповідно. Введемо також наступні характерні часи змін параметрів іоносфери [12, 13]



$$t_1 = t_{T_e} = (\delta v_e)^{-1}, \quad (3.7)$$

$$t_2 = t'_N = (v_{de} + v_a)^{-1}, \quad (3.8)$$

$$t_3 = t_N = \frac{1}{2} \{q_i(\alpha_r + \lambda \alpha_i)/(1 + \lambda)\}^{-1/2}, \quad (3.9)$$

де

$t_{T_e}$  – час розвитку збурень  $T_e$ ,

$t'_N$  – час розвитку збурень  $N$  за рахунок активізації процесів прилипання,

$t_N$  – час розвитку збурень  $N$  за рахунок зміни іонізаційно-рекомбінаційного балансу.

Чисельні оцінки показують, що в області D іоносфери  $t_{T_e}/t'_N, t'_N/t_N \leq 10^{-3}$  (тобто  $t_{T_e} \ll t'_N \ll t_N$ ), що дає можливість проранжувати за ступенем малості характерні часові масштаби  $t_1, t_2, \dots, t_k$  ( $k$  – максимальне число використаних часових масштабів, у даному випадку  $k=3$ ), тобто представити їх у вигляді  $t_1 \ll t_2 \ll \dots \ll t_k$ . Тоді для інтервалу часу  $0 < t \leq t_{T_e}$  із (3.3), легко отримати рівняння для опису  $T_e(t)$  [11–13]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{0,97e^2 E^2}{kmv_{e0}\theta^{5/6}} - \delta(\theta)v_{e0}\theta^{5/6}(\theta-1)T_{e0}, \quad (3.10)$$

де  $\theta = T_e/T_{e0}$ ,  $\theta(0) = 1$ ,  $E(t < 0) = 0$ , тут індексом "0" позначені параметри незбуреної іоносфери. При цьому  $v_e = v_{e0}\theta^{5/6}$ , тобто збурення ефективної частоти зіткнень електронів виражаються через збурення температури електронів. Величина збурень  $\delta$  також пов'язана зі збуреннями  $T_e$  співвідношенням  $\delta = \delta_0(T_n/T_e)$ .

У квазістаціонарному випадку ( $d\theta/dt \approx 0$ ) із (3.10) отримуємо

$$E^2 = \frac{km\delta_0 T_{e0}}{0,97e^2} \cdot v_e^2 \left\{ 1 - \left( \frac{v_{e0}}{v_e} \right)^{6/5} \right\}. \quad (3.11)$$

Із (3.11) визначаються квазістаціонарні значення збурень температури електронів  $\theta_\infty$ . При цьому [11–13]

$$\alpha_r(\theta_\infty) \approx 6,0 \cdot 10^{-6} \left( \frac{300}{T_n} \right)^{1/2} \left( \frac{T_n}{\theta_\infty T_{e0}} \right)^{1/2} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}, \quad (3.12)$$

$$v_a = (k_1 N_{O_2} + k_2 N_{N_2}) N_{O_2}, \quad (3.13)$$

$$k_1 = 1,4 \cdot 10^{-29} (300/\theta_\infty T_{e0}) \exp(100/T_n) \exp(-700/\theta_\infty T_{e0}) \text{ см}^6 \text{ с}^{-1},$$

$$k_2 = 1,0 \cdot 10^{-31} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1},$$

де  $N_{O_2}(z)$  і  $N_{N_2}(z)$  – концентрації молекулярного кисню і молекулярного азоту в  $\text{см}^{-3}$ , відповідно,  $T_e$  і  $T_n$  наведені в К.

Із (3.1)–(3.5) слідує, що стале значення збуреної електронної концентрації  $N_\infty$  за рахунок присутності мезосферного електричного поля визначається виразом

$$N_\infty = q_{i0}^{1/2} \left\{ \left( 1 + \frac{v_a(T_{e\infty})}{v_{de}} \right) \left( \alpha_r(T_{e\infty}) + \frac{v_a(T_{e\infty})}{v_{de}} \alpha_{i0} \right) \right\}^{-1/2}. \quad (3.14)$$

Чисельні оцінки очікуваних збурень висотного профілю ефективної частоти зіткнень електронів у квазістаціонарному випадку для  $E_1 = 1\hat{A} \cdot \dot{\iota}^{-1}$  і  $E_2 = 10\hat{A} \cdot \dot{\iota}^{-1}$  (із залученням результатів роботи [11]) наведені на рис. 3.1. Аналогічні оцінки збурень висотного профілю концентрації електронів дані на рис. 3.2.

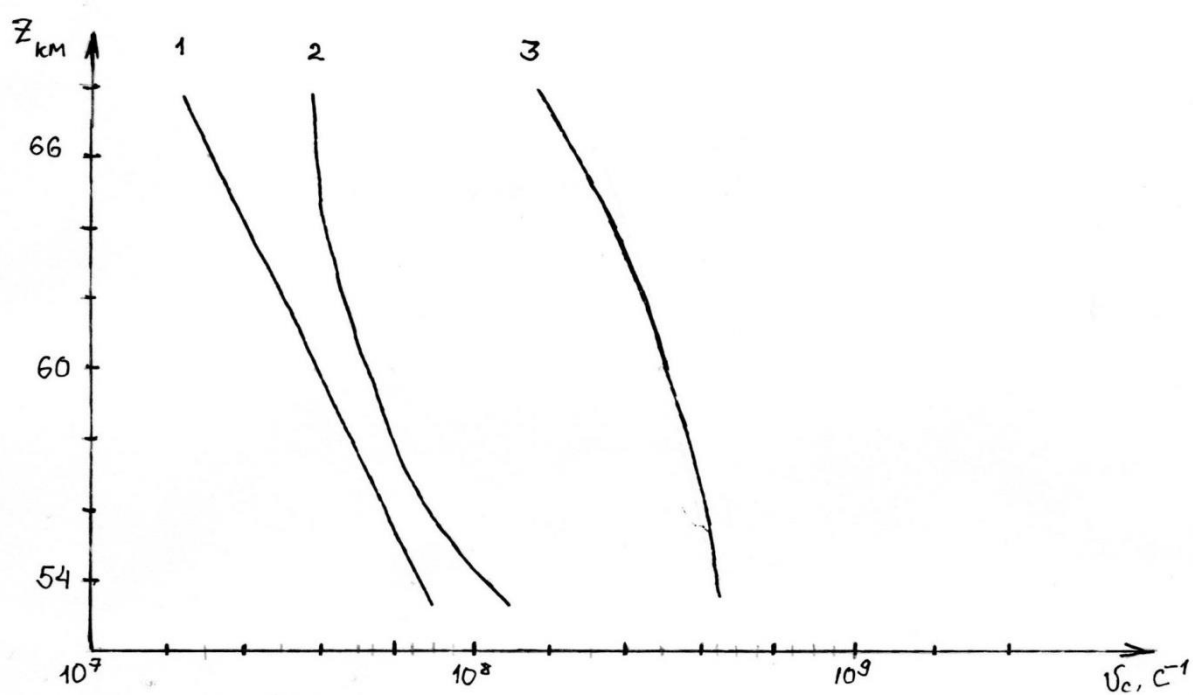


Рис. 3.1 Висотні залежності ефективних частот зіткнень 1-  $\nu_{e0}(z)$ ; 2-  $\nu_e^{(1)}(z)$ ; 3 -  $\nu_e^{(2)}(z)$ .

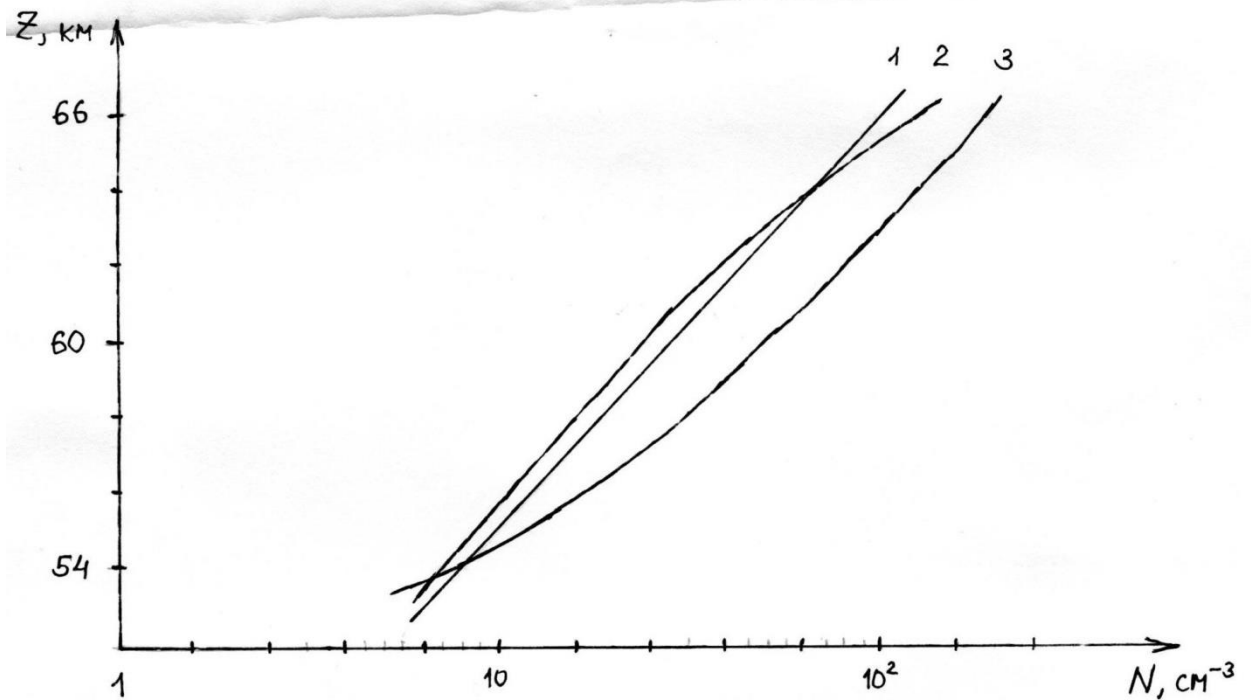


Рис 3.2 Висотні залежності електронних концентрацій 1 -  $N_0(z)$ ; 2 -  $N^{(1)}(z)$ ; 3 -  $N^{(2)}(z)$ .

Аналіз результатів чисельних розрахунків показує, що переважаючими за своєю інтенсивністю є первинні швидкі збурення температури електронів.. Вторинні збурення концентрації електронів є значно меншими за інтенсивністю (до декількох разів) та більш повільними за характерним часом розвитку та релаксації, ніж первинні збурення  $T_e$ .

Далі в таблиці 3.1 наводяться результати чисельного моделювання висотних залежностей збурень параметрів D-області іоносфери, що викликаються впливом потужних мезосферних електричних полів. Для опису незворушних умов використовувалася стандартна модель денної середньоширотної області D іоносфери. Значення збурюючих електричних полів бралися з робіт [6–10].

Таблиця 3.1

Параметри плазмових збурень денної середньоширотної D-зони при наявності потужних мезосферних електричних полів

$z$ (км)	60	63	66	69	72
$E$ (В/м)	0,20	0,40	0,46	0,40	0,02
$v_e$ (с <sup>-1</sup> )	$4,00 \times 10^7$	$3,45 \times 10^7$	$3,15 \times 10^7$	$2,51 \times 10^7$	$6,90 \times 10^6$
$v_e / v_{e0}$	1,08	1,37	1,88	2,29	1,01
$T_e / T_{e0}$	1,13	1,50	2,13	2,70	1,01
$\delta / \delta_0$	0,87	0,76	0,47	0,37	0,99
$N$ (см <sup>-3</sup> )	50	52	60	60	350
$v_a / v_{a0}$	1,10	1,42	1,95	2,15	1,0
$\alpha_r / \alpha_{r0}$	0,86	0,75	0,69	0,61	1,0
$\lambda / \lambda_0$	1,15	1,62	1,95	2,15	1,0
$N / N_0$	0,96	0,93	1,00	1,11	1,0
$N^- / N_0^-$	1,09	1,52	1,95	2,39	1,0
$N^+ / N_0^+$	1,15	1,45	1,50	1,47	1,0
$\sigma_e / \sigma_{e0}$	0,90	0,78	0,53	0,48	0,99

Аналіз результатів показує, що основними первинними збуреннями є збурення температури електронів під дією потужної мезосферної електрики. Тут ці відносні збурення досягають двох разів і більше. При цьому відносні збурення концентрації електронів не перевищують десятка відсотків. Надалі наявність збурень температури електронів призводить до розвитку збурень

цілого ряду параметрів іоносферної плазми, а саме: ефективної частоти зіткнень електронів, електронної провідності плазми, відносної частки енергії, що втрачається електроном при одному зіткненні з важкою часткою, і т. д.

## 4. ВИСНОВКИ

Отже, аналіз існуючих експериментальних даних дозволив зробити деякі попередні висновки про властивості цих полів: значна змінність у часі, існують досить значні інтервали часу, на яких локальні потужні електричні поля практично відсутні; просторова обмеженість по висоті області існування (для мезосфери-приблизно 55-75 км).

Результати дистанційного зондування показали, що в мезосфері існують, принаймні, два механізми генерації потужних мезосферних електричних полів (ПМЕП), найбільш вірогідним з яких (з імовірністю реалізації приблизно 60-70%) може бути інтерференція випадкових полів від великого числа елементарних дрібномасштабних мезосферних генераторів, що призводить до однопараметричного Релеєвського розподілу результуючої напруженості  $E$  досліджуваних ПМЕП со середніми значеннями 0,7-0,9 В/м у висотному діапазоні 60-67 км (або к відповідному однопараметричному експоненціальному розподілу інтенсивності  $E^2$  ПМЕП). Інший механізм невідомої поки ще природи призводить до епізодичного (ймовірність реалізації в межах 5-15%) появи ПМЕП з напруженостями  $E > 2,5$  В/м (середнє значення напруженості таких ПМЕП приблизно 4 В/м). Статистично значущих сезонних і добових варіацій в усереднених характеристиках ПМЕП не вдалося. Імовірність відсутності регіональних ПМЕП склала близько 25% для України і близько 30% для Канади. Результати порівняння українських та Канадських даних свідчили про можливе існування широтної залежності в усереднених характеристиках ПМЕП [16]. Порівняння характеристик мезосферних полів, отриманих за результатами прямих ракетних вимірювань і за даними дистанційного зондування з використанням частково відбитих радіосигналів, показало їх хороше узгодження по величинам. Така взаємоузгодженість експериментальних даних, отриманих різними методами, свідчить про

ефективність цих методів при дослідженнях електрично активної мезосфери і о надійності одержуваних при цьому експериментальних результатів. Це відкриває можливість їх широкого використання для чисельного моделювання збурень параметрів нижньої іоносфери під впливом потужних мезосферних електричних полів.

Аналіз результатів чисельних розрахунків показує, що переважаючими за своєю інтенсивністю є первинні швидкі збурення температури електронів.. Вторинні збурення концентрації електронів є значно меншими за інтенсивністю (до декількох разів) та більш повільними за характерним часом розвитку та релаксації, ніж первинні збурення  $T_e$ . Тобто за рахунок наявності постійних збурень температури електронів плазма у мезосфері переходить у неізотермічний стан (температура електронів значно переважає температури іонів та нейтральних частинок).

У подальшому наявність збурень температури електронів призводить до розвитку збурень цілої низки параметрів іоносферної плазми, а саме: ефективної частоти зіткнень електронів, електронної провідності плазми, відносної долі енергії, що втрачається електроном при одному зіткненні з важкою частинкою, та ін. Тому електродинамічні процеси у неізотермічній електрично активній мезосфері можуть справляти суттєвий вплив на умови розповсюдження радіохвиль різних діапазонів і, як наслідок, на функціонування систем радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіометеорології, аерокосмічних систем.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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.
2. Тютин А. А. Мезосферный максимум напряженности электрического поля / А. А. Тютин // Космические исследования.–1976.–Т.14, вып.1.–С. 143–144.
3. Goldberg R. A. Middle atmospheric electrodynamics: status and future / R. A. Goldberg // J. Atmos. Terr. Phys.–1984.–V.46, № 11.–P. 1083–1101.
4. Goldberg R. A. / R. A. Goldberg // Electrodynamics of the high latitude mesosphere, J. Geophys Res.–1989.–V. 94.–P. 14661–14672.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Мартыненко С. И. Методика дистанционной диагностики ионосферных возмущений в мощном мезосферном электрическом поле / С. И. Мартыненко // Радиопизика и радиоастрономия.–2003.–Т.8, № 2.–С. 127–136.

9. 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.
10. 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.
11. Мартыненко С. И. Отклик нижней ионосферы на изменение проводимости приземной атмосферы / С. И. Мартыненко, И. М. Фукс, Р. С. Шубова // *Геомагнетизм и аэрномия.*—1994.—Т. 34, № 2.—С. 121–129.
12. 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.
13. 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.
14. Гуревич А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург. – М.: Наука, 1973. 272 с.