

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В. Н. Каразіна

Милованов Юрій Борисович

УДК 550.388

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРНО-ІОНОСФЕРНОМУ РАДІОКАНАЛІ,  
ВИКЛИКАНІ ДІЄЮ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ

01.04.03 «Радіофізика»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі космічної радіофізики в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор  
Чорногор Леонід Феоктистович.  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
професор кафедри космічної радіофізики

Офіційні опоненти доктор фізико-математичних наук, професор  
Ніколаєнко Олександр Павлович,  
старший науковий співробітник  
Інститут радіофізики та електроніки НАН України  
імені О. Я. Усикова, м. Харків

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
Галушко Володимир Григорович,  
провідний науковий співробітник  
Радіоастрономічний інститут НАН України, м. Харків.

Захист відбудеться «\_\_»\_\_\_\_\_2019 р. о \_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.

Автореферат розісланий «\_\_»\_\_\_\_\_2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

доктор фіз. - мат. наук, професор

Ю. В. Аркуша

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Навколоземне та космічне середовища, тобто нейтральна атмосфера, іоносфера та магнітосфера, були та залишаються основним каналом поширення радіохвиль. Ці середовища істотно впливають на поширення радіохвиль усіх діапазонів, починаючи від одиниць герц і закінчуючи десятками гігагерц. Радіохвилі цих діапазонів використовуються при розв'язанні задач телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії та радіофізичного моніторингу стану навколоземного та космічного середовищ.

Навколоземне та космічне середовища визначально або відчутно впливають на поширення радіохвиль усіх діапазонів. Ці середовища відповідальні за формування регулярних і нерегулярних радіофізичних ефектів. Саме атмосфера, іоносфера та магнітосфера обмежують потенційні якісні показники радіотехнічних систем, які використовуються при розв'язанні задач телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії та радіофізичного моніторингу процесів у різних середовищах. До якісних показників, як відомо, відносяться точність, дальність дії, роздільна здатність, пропускна здатність та інші показники.

Величина радіофізичних ефектів суттєво залежить від стану атмосферно-іоносферно-магнітосферного радіоканалу. Параметри радіоканалу можуть значно змінюватися під дією потужних джерел енерговиділення природного та техногенного походження.

Тому вивчення впливу високоенергетичних джерел на атмосферно-іоносферно-магнітосферний радіоканал є актуальною задачею космічної радіофізики.

Актуальність вивчення фізичних процесів в атмосферно-іоносферно-магнітосферному радіоканалі полягає в тому, що викликані прольотом і вибухом космічного тіла (метеороїдом) і потужним радіовипромінюванням ефекти виникають у всіх земних оболонках і можуть існувати протягом часу від одиниць хвилин до декількох годин. Створювані при цьому збурення параметрів радіоканалу можуть поширюватися на сотні та навіть тисячі кілометрів від місця падіння космічного тіла.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** У дисертації наведено результати досліджень, виконаних автором самостійно або з його науковим керівником протягом 2006–2018 рр. відповідно до науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Основними з них є такі:

1. Радіофізичні дослідження нелінійних процесів і явищ в навколоземному космічному середовищі (2006–2008 рр.), номер держреєстрації 0100U003361. (Здобувач – виконавець).

2. Радіофізичні та магнітометричні дослідження нелінійних явищ з використанням нових методів обробки сигналів (2006–2008 рр.), номер держреєстрації 0103U004238. (Здобувач – виконавець).

3. Радіофізичні та магнітометричні ефекти впливу на геокосмос високоенергетичних джерел (2006–2008 рр.), номер держреєстрації 0106U001549. (Здобувач – виконавець).

4. Результати експериментальних досліджень квазіперіодичних варіацій геомагнітного поля (2007–2009 рр.), номер держреєстрації 0106U001548. (Здобувач – виконавець).

5. Радіофізичні дослідження нелінійних процесів і явищ в навколоземному космічному середовищі (2009–2011 рр.), номер держреєстрації 0109U000553. (Здобувач – виконавець)

6. Теоретичні та емпіричні моделі високоенергетичних явищ у геосфері як в нелінійній відкритій динамічній системі (2009–2011 рр.), номер держреєстрації 0106U001549. (Здобувач – виконавець).

7. Радіофізичні та магнітометричні ефекти в системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (2009–2011 рр.), номер держреєстрації 0109U000554. (Здобувач – виконавець).

8. Фізичні ефекти та екологічні наслідки в геокосмосі, викликані стартами ракет, на фоні природних високоенергетичних процесів (2012–2014 рр.), номер держреєстрації 0112U002153. (Здобувач – виконавець).

9. Магніто-іоносферні ефекти та радіогеофізична сумісність, зумовлені дією потужного радіовипромінювання віддалених радіосистем і супутніх природних високоенергетичних процесів (2012–2014 рр.), номер держреєстрації 0112U001316. (Здобувач – виконавець).

10. Глобальні збурення, стимульовані космічною діяльністю та потужним радіовипромінюванням віддалених радіосистем і їх екологічні наслідки (2013–2015 рр.), номер держреєстрації 0115U000463. (Здобувач – виконавець).

11. Моделювання динамічних процесів в іоносфері та геомагнітному полі в період аномального 24-го циклу сонячної активності (2015–2017 рр.), номер держреєстрації 0115U000467. (Здобувач – виконавець).

12. Дистанційний вплив потужного радіовипромінювання на канали телекомунікацій та електронну апаратуру (2016–2018 рр.), номер держреєстрації 0116U000822. (Здобувач – виконавець).

13. Розробка методів аналізу короткочасних і надширококутних процесів на основі нетрадиційних лінійних і нелінійних інтегральних перетворень (2017–2019 рр.), номер держреєстрації 0117U004872. (Здобувач – виконавець).

14. Розробка глобальної напівемпіричної моделі електронної концентрації іоносфери поточного часу (2017–2019 рр.), номер держреєстрації 0117U004872. (Здобувач – виконавець).

У всіх звітах автор дисертації був виконавцем окремих розділів.

**Мета та задачі дослідження.** Теоретичні й експериментальні дослідження, а також математичне моделювання низки фізичних процесів в атмосферно-іоносферному радіоканалі, викликаних впливом на середовище польоту та вибуху Челябінського метеороїда та потужного радіовипромінювання наземної радіосистеми середньо-, високо-, та ультрависокочастотного діапазонів.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались наступні задачі.

1. Моделювання збурень параметрів атмосферно-іоносферного радіоканалу, викликаних впливом потужного радіовипромінювання наземних радіосистем різних діапазонів.

2. Теоретичні дослідження та моделювання атмосферних ефектів, що супроводжували падіння Челябінського космічного тіла.

3. Моделювання спливання метеороїдного терміку в атмосфері Землі.

4. Експериментальні радіофізичні дослідження хвильових збурень в іоносфері, викликаних польотом і вибухом Челябінського метеороїда.

**Об'єкти дослідження** – атмосфера на стратосферних та мезосферних висотах; іоносфера на висотах D-, E- та F-шарів.

**Предмет дослідження** – фізичні ефекти, викликані польотом та вибухом Челябінського метеороїда, а також впливом потужного середньо-, високо- та ультрависокочастотного радіовипромінювань наземних радіосистем.

#### **Методи дослідження**

Фізичне моделювання – взаємодія потужного радіовипромінювання з плазмою іоносфери, падіння метеороїда, підйом терміка; числове моделювання – рівняння електронного балансу, хвильове, руху метеороїда, випромінювання метеороїда, енергетичний баланс; методи регуляризації – визначення процесів, що супроводжують падіння Челябінського метеороїда; експериментальний метод – обробка сигналів с GPS супутників.

#### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Розроблено фізико-математичну модель взаємодії потужного безперервного радіовипромінювання гектометрового та декаметрового діапазонів з гіротропною плазмою іоносфери. Числове моделювання показало, що під дією радіовипромінювання наземних радіосистем з ефективною потужністю в одиниці гігават температура електронів в іоносфері може збільшуватися в десятки разів, а концентрація електронів – в кілька разів.

2. Розроблено фізико-математичну модель, що описує амплітудне самодіяння потужних радіохвиль в гіротропній іоносфері. Числове моделювання показало, що ефект самопросвітлення плазми яскраво виражений в діапазоні висот 65–90 км, на більших висотах він поступово змінюється ефектом самопомутніння плазми. Встановлено, що частотна залежність множника самодіяння незвичайної радіохвилі є немонотонною, а звичайної радіохвилі – монотонною.

3. Розроблено фізико-математичну модель взаємодії надпотужних (~1 ГВт) надкоротких (~1 нс) радіоімпульсів з атмосферним газом і плазмою іоносфери. Встановлено, що для пробою атмосферного газу на висотах 30–60 км необхідна енергія радіоімпульсу ~1–100 Дж, температура електронів при цьому збільшується в десятки разів.

4. Вперше з використанням регуляризуючих алгоритмів і чисельних даних відеоспостережень за траєкторією Челябінського метеороїда отримано висотно-часові залежності швидкості та гальмування космічного тіла. На основі кінематичних характеристик метеороїда з використанням рівнянь метеорної фізики розраховані висотно-часові залежності маси, міделю, інтенсивності

випромінювання, температури поверхні випромінювання (близько 6400 К), оцінено коефіцієнти динамічного опору ( $\sim 0.76$ ) та абляції ( $\sim 0.4$ ), а також питома енергія абляції (близько 16.2 МДж/кг).

5. Розроблено фізико-математичну модель, що описує висотно-часові залежності швидкості підйому, радіусу та надлишку температури в терміку, (нагрітого газового утворення) утвореного вибухом великого метеороїда в атмосфері Землі. Встановлено, що швидкість підйому терміку змінюється немонотонно та в залежності від його розміру може досягати 10–180 м/с. Показано, що в процесі підйому термік досить швидко охолоджується, а його радіус збільшується в 6–25 разів залежно від його початкових параметрів. Основні висновки моделі підтверджуються результатами спостережень за підйомом терміку, утвореного під час вибуху Челябінського метеороїда.

6. Вперше за даними Європейської мережі наземних радіоприймальних пристроїв та системи GPS-супутників визначено основні параметри хвильових збурень, згенерованих прольотом і вибухом Челябінського метеороїда: період (8–10 хв); тривалість цуга (5–6 періодів); швидкість поширення (близько 500 м/с); відносна амплітуда збурень концентрації електронів (2.4–23%).

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати, отримані в даній дисертаційній роботі, можуть бути використані в наступних випадках.

Дослідження реакції атмосфери на політ та вибух Челябінського метеороїда в масштабах Східної Європи дозволяють змоделювати вплив збуреного навколосезонного та космічного середовища на умови поширення радіохвиль, випромінюваних радіотехнічними системами різного призначення.

Практичне значення також має виявлення величини збурень при нагріві іоносфери та електричного пробоя атмосфери радіовипромінюванням потужних радіотехнічних систем. Отримані при цьому вихідні дані дозволять прогнозувати вплив виникаючих збурень на атмосферно-іоносферні канали телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та радіофізичного моніторингу стану іоносферного радіоканалу.

Вивчені в дисертаційній роботі квазіперіодичні та аперіодичні збурення, в підсумку, обмежують потенційні характеристики радіосистем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та радіофізичного моніторингу стану іоносферного радіоканалу та ін.

Цим і визначається практична значущість отриманих в роботі результатів.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові публікації виконано у співавторстві. Дисертант брав участь в обробці експериментальних даних, в інтерпретації отриманих результатів, написанні окремих розділів статей і тез. Математичне моделювання низки ефектів в атмосфері й іоносфері виконано дисертантом самостійно.

Результати дисертаційної роботи опубліковані в 7 статтях [1–7] і в 3-х працях конференцій [8–10].

У 6 статтях автором виконано фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів і його аналіз, написано окремі розділи.

В статті [1] автор брав участь у розробці методики обробки експериментальних даних, їх обробці та фізичному тлумаченні, а також у написанні окремих розділів.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації доповідалися на наступних конференціях:

I Українська конференція, присвячена 100-річчю з дня народження В. А. Місюри (Харків, Україна, 2013);

14<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research (Uzhhorod, Ukraine, 2014);

17<sup>th</sup> Ukrainian conference on space research (Odesa, Ukraine, 2017).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 10 наукових працях, зокрема 7 статей у вітчизняних і закордонних фахових виданнях (за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика) та в 3 тезах доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 207 сторінок. Дисертація містить 68 рисунків (з них 9 на 9 окремих сторінках) і 21 таблиць. Список використаних джерел на 26 сторінках налічує 262 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить вибір теми та актуальність дисертації, встановлено її зв'язок з науковими програмами. Визначено об'єкт і предмет дослідження, зазначено використані методи та положення, що виносяться на захист. Наведені дані про особистий внесок автора дисертації в публікаціях, сформульовано отримані результати та розглянуто їх практичне значення.

**У розділі 1 «Аналітичний огляд»** викладений аналітичний огляд літератури. Атмосфера, іоносфера та магнітосфера розглядаються як канал поширення радіохвиль, перераховуються основні джерела збурень, фізичні процеси в іоносфері, викликані дією потужного радіовипромінювання, а також фізичні процеси, викликані внаслідок падіння Челябінського метеороїда.

У висновках до першого розділу затверджується, що атмосфера, іоносфера та магнітосфера були та залишаються основним радіоканалом, який використовують чисельні засоби телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіоастрономії та радіофізичного моніторингу середовищ. Атмосфера та геокосмічне середовище суттєво впливають на поширення радіохвиль практично всіх діапазонів, викликаючи регулярні та нерегулярні радіофізичні ефекти. Зміни параметрів радіоканалу обмежують потенційні якісні показники радіосистем різного призначення.

Існує ціла низка потужних джерел енерговиділення природного та техногенного походження, які систематично або епізодично впливають на атмосферно-іоносферно-магнітосферний канал поширення радіохвиль. Збурення параметрів радіоканалу істотно впливають на здатність радіосистем різного призначення розв'язувати поставлені перед ними задачі. В теперішній час недостатньо вивчений вплив потужних джерел енерговиділення на параметри радіоканалу, відсутні детальні фізико-математичні моделі відповідних процесів.

Потужність наземних радіозасобів досягла 1–10 ГВт. Радіовипромінювання таких радіозасобів здатне викликати значні збурення параметрів атмосферно-іоносферного каналу поширення радіохвиль. Потрібні створення або розвиток фізико-математичних моделей процесів, що впливають на параметри цього каналу.

Вторгнення в геокосмос і атмосферу великих (розміром більше 1–3 м) космічних тіл здатне викликати значні збурення атмосферно-іоносферно-магнітосферного каналу поширення радіохвиль. Потрібний розвиток фізико-математичних моделей взаємодії космічних тіл з атмосферою, іоносферою та магнітосферою, а також моделей, що описують збурення параметрів атмосферно-іоносферно-магнітосферного каналу поширення радіохвиль.

У цій роботі зроблена спроба частково заповнити існуючі прогалини в фізико-математичному моделюванні процесів в радіоканалі, що виникають при впливі на навколоземне середовище потужного радіовипромінювання наземних радіосистем та космічних тіл, які вторгаються в це середовище (зокрема, Челябінського метеороїда).

**У розділі 2 «Моделювання нагріву та збільшення концентрації електронів потужним радіовипромінюванням»** наведено результати числового моделювання збурення температури та концентрації електронів при впливі на іоносферу потужним безперервним радіовипромінюванням для різних частот, потужностей та поляризацій радіохвилі, результати моделювання іонізації атмосфери наносекундними імпульсами, а також результати моделювання амплітудного самодіяння радіохвилі при нагріві електронів і збурення концентрації електронів. Вивчені залежності ефектів від частоти, поляризації та потужності радіохвиль.

Для фізико-математичного моделювання у підрозділі 2.1 використано рівняння балансу температури електронів, залежність частоти зіткнень електронів з важкими частинками від температури електронів, емпірична залежність відносної частки енергії, що втрачається електроном при зіткненні з важкими частинками, від відносної температури та рівняння для амплітуди радіохвилі для оцінки ефектів взаємодії потужної радіохвилі з іоносферою й атмосферою.

У рівнянні балансу заряджених частинок враховувались електрони, позитивні та негативні іони трьох типів. Враховано швидкості утворення позитивних іонів та негативних іонів, швидкості відлипання електронів від негативних іонів, а також коефіцієнти рекомбінації електронів з позитивними та негативними іонами. Використано залежність відносної концентрації електронів від їх відносної температури. Побудована модель пояснює, як збільшення



температури електронів в різних шарах іоносфери для хвиль О- та Х-поляризацій так і ефект самодіяння та задає умови для іонізації потужним випромінюванням.

В підрозділі 2.2 продемонстровано, що в D-області іоносфери мають місце значні збурення температури електронів. У E- та F-областях іоносфери в нічний час збурення температури електронів також значне. Збурення концентрації електронів на всіх висотах значно менше, ніж збурення температури електронів. Наприклад, радіовипромінювання О-поляризації нагрівного стенду з параметрами типу стенду “Сура” здатне збільшити температуру електронів у 8–10, 2–7 разів і на десятки відсотків у D-, E- та F-областях іоносфери відповідно. Радіовипромінювання Х-поляризації може збільшити температуру електронів в нічний час у 16–17, 5–12 та 1.5–5 рази в D-, E- та F-областях іоносфери відповідно. У денний час ефективно збурюється лише D-область іоносфери. Приклад висотних залежностей відносної температури наведений на рис.1.

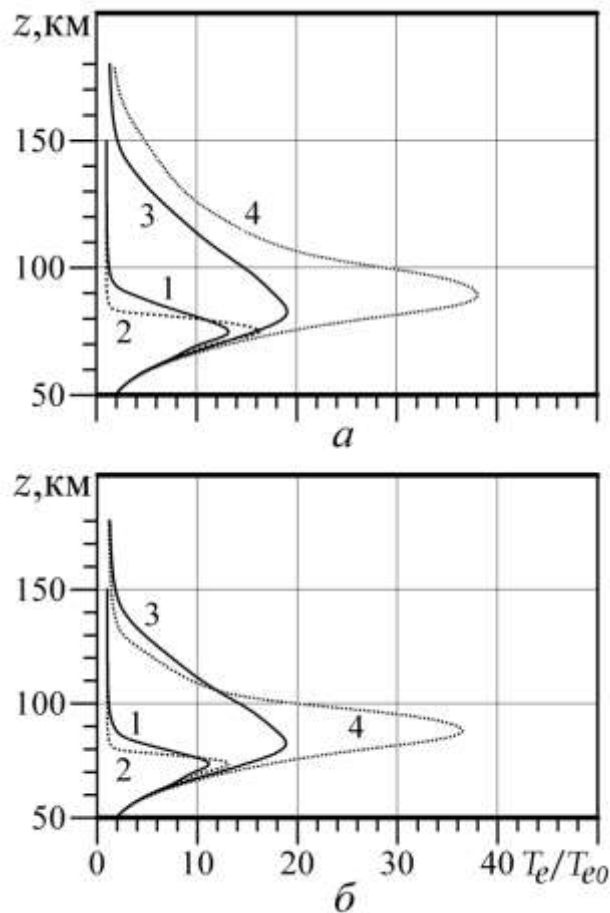


Рис. 1. Висотні профілі відносної температури електронів при збуренні  $T_e(a)$ , а також  $T_e$  і  $N$  (б): 1 – О-хвиля, день; 2 – Х-хвиля, день; 3 – О-хвиля, ніч; 4 – Х-хвиля, ніч. Параметри стенда:  $PG = 400$  МВт та  $f = 2.8$  МГц

При дії на середовище радіохвилі з гірчастотою електронів в денний час збурюється в основному D-область іоносфери, де температура електронів може збільшуватися у десятки разів для радіохвилі О- та Х-поляризацій. В нічний час радіохвиля Х-поляризації також збурює тільки D-область іоносфери, де вона повністю поглинається внаслідок гірорезонансу. Тут має місце виключно сильний

нагрів електронів – їх температура збільшується приблизно у 100 разів. Для максимального збурення E- та F-областей іоносфери в нічний час рекомендується використовувати радіохвилю X-поляризації з частотою 3–4 МГц.

У підрозділі 2.3 встановлено, що збурення концентрації електронів внаслідок часткового придушення процесу рекомбінації відносно невелике. Концентрація електронів в нічний час зазвичай збільшується в 2.5–3, 1.5–2 та 1.2–1.5 рази в D-, E- та F-областях іоносфери відповідно. У денний час помітне збурення концентрації електронів має місце лише в D-області іоносфери.

В підрозділі 2.4 показано, що нагрів електронів надкоротким радіоімпульсом на висотах 30–60 км істотний вже за тривалості імпульса порядку 1 нс та потужності 1 ГВт. Пробій атмосфери на висотах 30–60 км настає вже при потужності рівної 0.3–1.3 ГВт на частоті 10 ГГц. При зменшенні частоти до 1 ГГц у фіксованій площі антени потужність збільшується до 1–30 ГВт. Для оптимізації процесу пробою атмосфери на висотах 30–60 км радіоімпульсами потужність необхідно збільшити приблизно в 25–64 рази.

В підрозділах 2.5 та 2.6 виконано моделювання ефекту амплітудного самодіяння радіохвиль. Ефектом амплітудного самодіяння поблизу нижньої границі іоносфери, тобто на висотах менших за приблизно 60 км, можна знехтувати. У діапазоні висот 65–90 км яскраво виражений ефект самопросвітлення плазми. Величина ефекту збільшується для хвилі X-поляризації при наближенні її частоти до гірчастоти електронів. На висотах більших за 70–90 км ефект самопросвітлення поступово замінюється ефектом самопомутніння.

Доведено, що частотна залежність множника самодіяння для хвилі O-поляризації  $F_{s+}$  на всіх висотах для денного та нічного часу доби є монотонною: при збільшенні частоти значення  $F_{s+}$  поступово збільшується, наближаючись до одиниці.

Встановлено, що частотна залежність множника самодіяння для хвилі X-поляризації  $F_{s-}$  для денного та нічного часу є немонотонною: при збільшенні частоти від 1.4 МГц  $F_{s-}$  спочатку убиває, досягає мінімального значення при частоті 3.5–4 МГц, а потім збільшується, досягаючи граничних значень, що дорівнюють 0.8 та 0.9 в нічний час або 0.15 та 0.4 в денний час за ефективної потужності 3.6 та 0.3 ГВт відповідно.

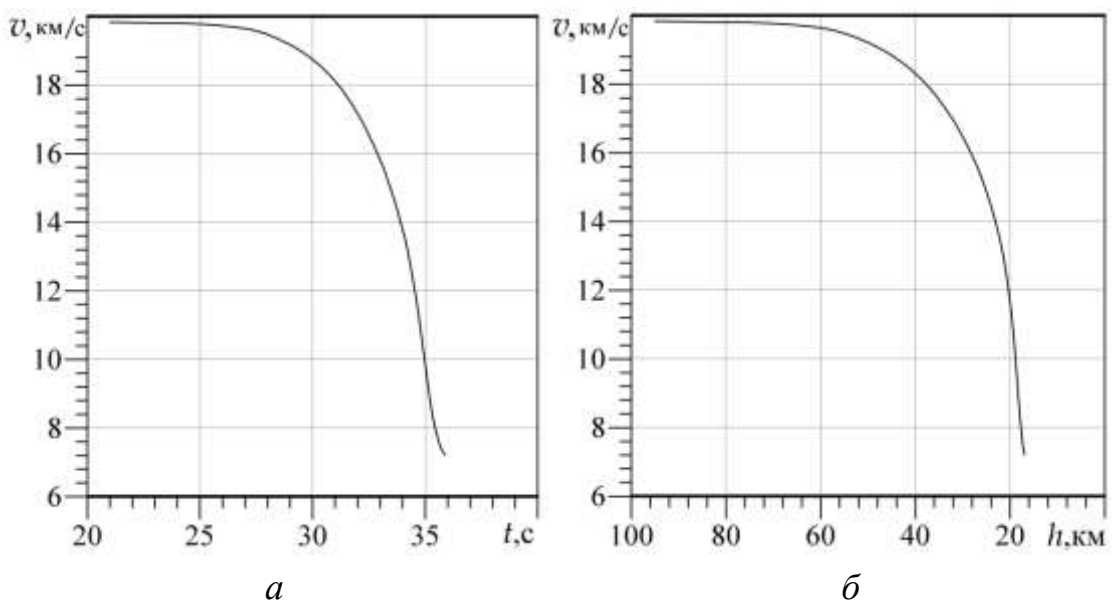
**В розділі 3 «Моделювання атмосферно-іоносферних ефектів, викликаних падінням Челябінського космічного тіла»** числовими методами розв'язано обернену задачу – знаходження висотних та часових залежностей основних параметрів метеороїда зі спостережень траєкторних даних. Оскільки обернена задача відноситься до некоректних задач математичної фізики, в роботі використовуються регуляризуючі алгоритми. Похибки вимірювань даних спостережень траєкторії та світності формують велику область можливих рішень. Також вимога єдиного рішення робить задачу некоректною. Методи регуляризації значно звужують область рішень, допомагають обрати прийнятний результат. Для цього використовувались рівняння руху, низка емпіричних співвідношень та

відомі фізичні закони. Послідовне використання цих зв'язків у розрахунках породжує збіжний ітераційний процес. Цей процес і є регуляризованим алгоритмом.

Для більш повного опису динаміки руху метеороїда необхідно знати не тільки координати в інерційній системі координат, але й швидкість та прискорення. В умовах існування похибки вимірювань визначення швидкості та прискорення також є некоректними задачами. Під час польоту метеороїд взаємодіє з атмосферним повітрям, породжуючи різні процеси, такі як нагрів та дроблення. Внаслідок зміни густини атмосферного повітря рух метеороїда є нерівномірним. Для опису змін в динаміці руху вздовж траєкторії виникла потреба використовувати для апроксимації траєкторії кусково-поліноміальну модель у вигляді кубічних сплайнів, так званої регресії. У цьому разі третій порядок поліномів є достатнім для опису динаміки польоту, обрахування швидкості та прискорення із аналітичної моделі регресії.

Обчислено висотні та часові залежності швидкості, прискорення, маси та міделя метеороїда. Розраховано висотно-часовий енергетичний баланс основних процесів, супроводжуваних падіння метеороїда. Виявляється, що на передачу енергії повітря, випромінювання, абляцію (руйнування) та втрату маси витрачається близько 78, 37, 38 і 311 кт ТНТ енергії. Вперше з використанням регуляризованих алгоритмів та чисельних даних відеоспостережень траєкторії Челябінського метеороїда одержано висотно-часові залежності швидкості та гальмування космічного тіла (рис. 2).

Використовуючи кінематичні характеристики метеороїда з урахуванням рівнянь метеорної фізики, розраховано висотно-часові залежності маси (див. рис. 2), міделя, потужності випромінювання, температури поверхні випромінювання (близько 6400 К), одержані коефіцієнти динамічного опору ( $\sim 0.76$ ) та абляції ( $\sim 0.4$ ), а також питома енергія абляції (близько 16.2 МДж/кг).



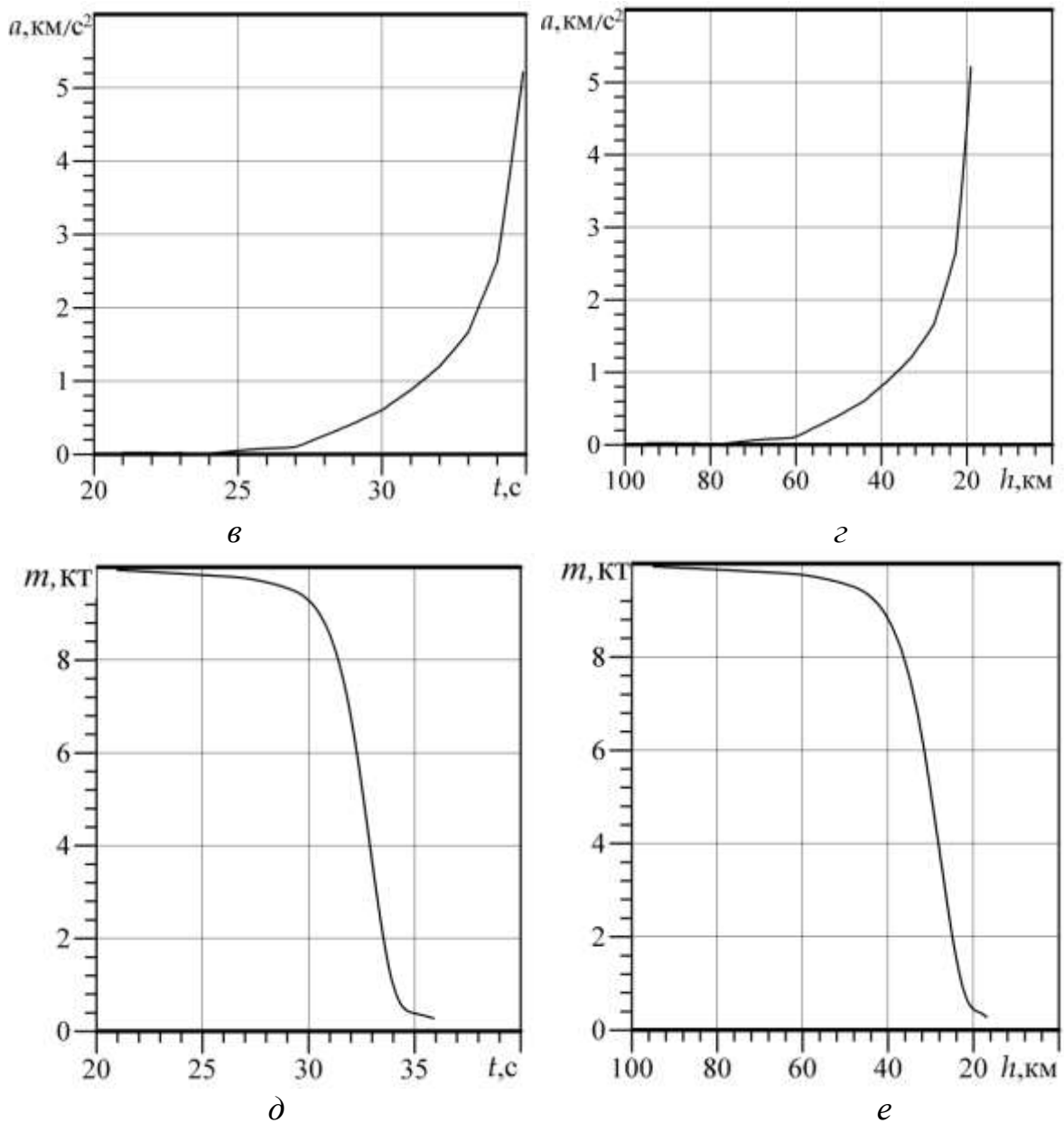


Рис.2. Висотно-часові залежності швидкості, модуля прискорення та маси метеороїда (час відраховується від моменту 03:20:00 UT)

**В розділі 4 «Моделювання спливання метеороїдного терміка в атмосфері Землі»** проведено фізико-математичне моделювання руху нагрітого газового утворення, що називають терміком, одержано числовий розв'язок системи нелінійних диференційних рівнянь, що описує швидкість підняття, радіус терміка та надлишок температури в ньому як функцію висоти та часу підняття терміка. Приклад результату моделювання наведено на рис. 3. Встановлено, що швидкість підняття змінюється немонотонно: спочатку вона швидко збільшувалась, швидкість її збільшення з ростом сили опору повітря, що набігає, зменшується; зі спливанням тривалого часу (десятки-тисячі секунд) ця швидкість близька до максимальної (близько 10 – 180 м/с), а потім вона порівняно повільно (за сотні-тисячі секунд) спадає до нуля.

Як і очікувалось, чим більше нагрітий термік і більший його розмір, тим швидше він підіймається та досягає більших висот за більш тривалий час. В

процесі підняття радіус терміка збільшується в 6 – 25 разів в залежності від його початкового розміру та початкової температури за рахунок приєднання холодного повітря. Швидкість зростання радіуса терміка тим більше, чим більше поточне значення радіуса. Малорозмірний термік у більше число разів збільшує свій розмір, ніж великий термік. Збільшення радіусу терміку відбувається до повної його зупинки. Слабо нагріті терміки, більш повільно підіймаються, приєднуючи меншу масу холодного повітря та менше збільшуючись у розмірах. Показано, що швидкість охолодження пропорційна швидкості підняття терміка та максимальна при досягненні максимального значення цієї швидкості. Більш нагрітий термік охолоджується швидше, ніж менш нагрітий. Швидкість охолодження терміку порівняно слабо залежить від його початкового розміру. Головним допущенням розглянутої моделі є неврахування охолодження терміка внаслідок випромінювання, яке особливо суттєво для значної початкової температури терміка. Нехтування ефектом випромінювання призводить до завищення часу підняття та максимальної висоти підйому терміка. Менш суттєвим є неврахування атмосферного вітру та охолодження терміка за рахунок турбулентного перемішування з холодним повітрям. Вагомим допущенням поточної моделі є неврахування зменшення густини атмосфери зі зростанням висоти. Тому розрахунки, строго кажучи, справедливі на висотах підйому не більше декількох кілометрів. Нехтування падінням з висотою густини атмосфери виключає появи згасаючих коливань терміку поблизу висоти його затримки. В цілому розглянута модель якісно та частково кількісно підтверджується результатами спостережень за підняттям терміка, утвореного вибухом Челябінського метеороїда.

**В розділі 5 «Радіофізичні спостереження хвильових збурень в іоносфері, викликаних падінням Челябінського метеороїда»** вивчені часові варіації повного електронного вмісту (ПЕВ)  $N_L$  на день падіння Челябінського метеороїда. Значення ПЕВ отримані за допомогою GPS-супутників та наземних радіоприймачів, віддалених від місця вибуху метеороїда на відстані 240–360 км. Для ілюстрації наведемо рис. 3, де нанесено положення штучних супутників GPS на час вибуху (колами на підіоносферних кривих) та хрестиком положення вибуху.

Вперше за даними Європейської мережі наземних радіоприймачів GPS-супутників одержано основні параметри хвильових збурень, породжених прольотом та вибухом Челябінського метеороїда. Виявлено квазіперіодичні (хвильові) збурення ПЕВ з часом запізнення 12–20 хв, періодом 8–10 хв, тривалістю 30–40 хв та відносною амплітудою близько 0.6–3.5 %.

Часові варіації  $\dot{N}_L$  наведено на рис. 4. Пунктирним відрізком «1» позначено час вибуху, а відрізком «2» – початок збурення.

В ударній хвилі амплітуда збурень була у декілька разів більшою. Середня швидкість поширення збурень виявилась близько до 500 м/с.

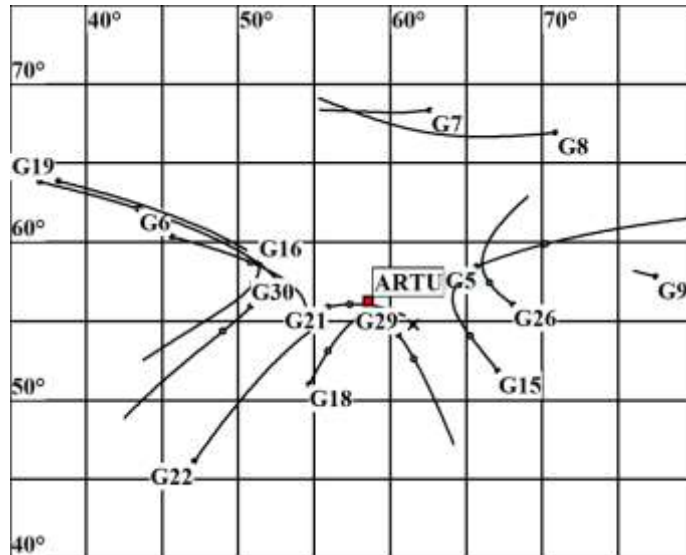


Рис. 3. Траєкторії підіоносферних точок супутників GPS 15 лютого 2013 р. на період часу 03:00 – 05:00 UT відносно станції ARTU

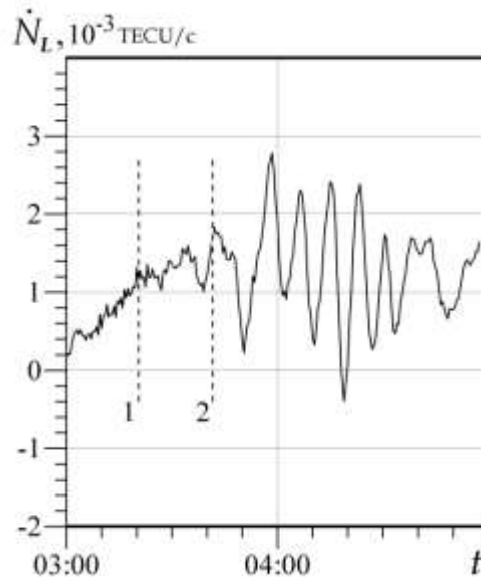


Рис. 4. Часові варіації  $\dot{N}_L$  для супутника G6 (станція ARTU)

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна радіофізична задача, спрямована на теоретичні й експериментальні дослідження, а також математичне моделювання низки фізичних процесів в атмосферно-іоносферному радіоканалі, викликаних впливом на середовище польоту та вибуху Челябінського метеороїда та потужного радіовипромінювання наземної радіосистеми середньо-, високо-, та ультрависокочастотного діапазонів.

1. Розроблено фізико-математичну модель та виконано числове моделювання взаємодії потужного безперервного радіовипромінювання гектометрового та декаметрового діапазонів з гіротропною плазмою іоносфери.

2. Розроблено фізико-математичну модель, що описує амплітудне самодіяння потужних радіохвиль в гіротропній іоносфері. Числове моделювання показало, що ефект самопросвітлення плазми яскраво виражений в діапазоні

висот 65–90 км, на більших висотах він поступово замінюється ефектом самопомутнення плазми. Встановлено, що частотна залежність множника самодіяння незвичайної радіохвилі є немонотонною, а звичайної радіохвилі – монотонною.

3. Розроблено фізико-математичну модель взаємодії надпотужних (~1 ГВт) надкоротких (~1 нс) радіоімпульсів з атмосферним газом та плазмою іоносфери. Встановлено, що для пробою атмосферного газу на висотах 30–60 км необхідна енергія радіоімпульсу ~1–100 Дж, температура електронів при цьому збільшується в десятки разів.

4. Вперше з використанням численних даних відеоспостережень за траєкторією Челябінського метеороїда і регуляризованих алгоритмів отримано висотно-часові залежності швидкості та гальмування космічного тіла. На основі кінематичних характеристик метеороїда з використанням рівнянь метеорної фізики розраховані висотно-часові залежності маси, міделю, інтенсивності випромінювання, температури поверхні випромінювання (близько 6400 К), оцінено коефіцієнти динамічного опору (~0.76) та абляції (~0.4), а також питома енергія абляції (близько 16.2 МДж/кг).

5. Розроблено фізико-математичну модель, що описує висотно-часові залежності швидкості підйому, радіусу та надлишку температури в терміку, утвореного вибухом великого метеороїда в атмосфері Землі. Встановлено, що швидкість підйому терміку змінюється немонотонно та в залежності від його розміру може досягати 10–180 м/с. Показано, що в процесі підйому термік досить швидко охолоджується, та його радіус збільшується у 6–25 разів залежно від його початкових параметрів. Основні висновки моделі підтверджуються результатами спостережень за підйомом терміку, утвореного під час вибуху Челябінського метеороїда.

6. Вперше за даними Європейської мережі наземних радіоприймальних пристроїв системи GPS-супутників визначено основні параметри хвильових збурень, згенерованих прольотом та вибухом Челябінського метеороїда: період (8–10 хв); тривалість цуга (5–6 періодів); швидкість поширення (близько 500 м/с); відносна амплітуда збурень концентрації електронів (2.4–23%). Такі параметри притаманні акустико-гравітаційним хвилям у верхній атмосфері.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Наукові праці у наукових фахових виданнях України

1. Спутниковые наблюдения ионосферных возмущений, последовавших за падением Челябинского метеорита / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов, В. Н. Федоренко, А. М. Цымбал // Космична наука і технологія. – 2013. – Т. 19, № 6. – С.38 – 46. (автору дисертації належать розробка методики обробки експериментальних даних, їх обробка та фізичне тлумачення).

2. Черногор Л. Ф. Возмущение ионосферы мощным непрерывным проходящим радиоизлучением: результаты численного моделирования / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов. // Радиофизика и радиоастрономия, – 2015. – Т. 20, №1. – С.48–63. (автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).

3. Черногор Л. Ф. Амплитудное самовоздействие мощных непрерывных проходящих радиоволн в ионосфере: результаты численного моделирования / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. **Милованов** // Радиофизика и радиоастрономия. – 2015. – Т. 20, №2. – С.122–132. *(автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).*

4. **Милованов** Ю. Б. Регуляризация алгоритма расчета высотно-временных характеристик, описывающих динамику падения Челябинского метеороида / Ю. Б. Милованов, Л. Ф. Черногор // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Радиофизика та електроніка". – 2017. – Вип. 26. – С. 75 – 79. *(автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).*

5. Черногор Л. Ф. Взаимодействие сверхмощных радиоимпульсов наносекундной длительности с атмосферой и плазмой нижней ионосферы / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. **Милованов**, В. Т. Розуменко. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Радиофизика та електроніка". – 2017. – Вип. 27. – С. 53 – 56. *(автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).*

6. Chernogor L. F. A rise of a meteoroid thermal in the terrestrial atmosphere / L. F. Chernogor, Yu. B. **Mylovanov** // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2018. – Vol. 34, No 4. – P. 198–206. (SCOPUS). *(автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).*

6а. Черногор Л. Ф. Всплывание метеороидного термика в атмосфере Земли / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. **Милованов** // Кинематика и физика небесных тел. – 2018. – Т. 34, №4. – С. 53–66. *(автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).*

7. Черногор Л. Ф. Динамика падения Челябинского метеороида: высотно-временные зависимости / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. **Милованов** // Радиофизика и радиоастрономия. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 104 – 115. *(автору дисертації належать фізико-математичне моделювання низки фізичних і радіофізичних ефектів та їх аналіз).*

**Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях)**

8. Возмущения полного электронного содержания ионосферы, вызванные падением Челябинского метеороида / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. **Милованов**, В. Н. Федоренко, А. М. Цымбал // Радиофизические исследования ионосферы (РФИИ – 2013). – Сборник тезисов докладов I Украинской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры. – Харьков, 24 – 25 октября 2013 г. – С. 40 – 43.

9. **Милованов** Ю. Б. Численное моделирование эффектов пролета Челябинского космического тела / Ю. Б. Милованов, Л. Ф. Черногор // Ukrainian conference on space research. Uzhhorod, Ukraine. 8 – 12 September 2014. Abstracts. – Kyiv, 2014. – P. 36.



10. Черногор Л. Ф. Высотно-временные характеристики, описывающие динамику падения Челябинского метеороида / Л. Ф. Черногор, Ю. Б. Милованов // 17th Ukrainian conference on space research. Abstracts 2017. Odesa, Ukraine, 21–25, August, 2017. – С. 163.

### АНОТАЦІЯ

**Милованов Юрій Борисович.** «Фізичні процеси в атмосферно-іоносферному радіоканалі, викликані дією високоенергетичних джерел». – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2019.

Параметри радіоканалу атмосфера – іоносфера суттєво змінюються під дією потужних джерел енерговиділення природного та техногенного походження. В роботі обрані два джерела: падіння великого космічного тіла і потужне радіовипромінювання.

Наведені результати числового моделювання збурень температури та концентрації електронів при дії на іоносферу потужним неперервним радіовипромінюванням для різних частот, потужностей і поляризацій радіохвиль. Побудована модель пояснює збільшення температури електронів в різних областях іоносфери для хвиль O- та X-поляризацій, ефект самодіяння, формування умов для пробією нейтральної атмосфери потужним випромінюванням. Виявляється, що в діапазоні висот 65–90 км яскраво виражений ефект самопросвітління плазми.

Величина ефекту збільшується для хвилі X-поляризації при наближенні її частоти до гірчастоти електронів. На висотах, більших за 70–90 км ефект самопросвітління поступово замінюється ефектом самопомутніння.

Досліджена частотна залежність множника самодіяння. Пробією атмосфери на висотах 30 – 60 км настає вже за потужності, рівної 0.3 – 1.3 ГВт на частоті 10 ГГц.

За допомогою числових методів розв’язана обернена задача – знаходження висотних і часових залежностей основних параметрів метеороїда з спостережень траєкторних даних з використанням алгоритмів регуляризації. Одержано висотні та часові залежності швидкості, прискорення, маси, міделю, температури поверхні метеороїда. Розраховані коефіцієнт і питома енергія абляції.

Для вивчення руху нагрітого газового утворення (терміку) одержано числовий розв’язок диференціальних рівнянь для швидкості підйому, радіусу терміку та надлишку температури та побудовано фізико-математичну модель, що описує висотні та часові зміни параметрів терміку.

Часові варіації повного електронного вмісту на час падіння Челябінського метеороїда одержані за допомогою GPS-супутників. Виявлені квазіперіодичні збурення тривалістю до 40 хв. Швидкість поширення збурень є близькою до 500 м/с. Такі швидкості притаманні для акустико-гравітаційних хвиль в верхній атмосфері.

**Ключові слова:** радіоканал, атмосфера, іоносфера, високоенергетичні джерела, Челябінський метеороїд, потужне радіовипромінювання, збурення параметрів, фізико-математичні моделі.

## АННОТАЦІЯ

**Милованов Юрій Борисович.** «Физические процессы в атмосферно-ионосферном радиоканале, вызванные воздействием высокоэнергетических источников». – *Квалификационная научная работа на правах рукописи.*

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика. – Харьковський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, 2019.

Параметры радиоканала атмосфера – ионосфера значительно изменяются под действием мощных источников энерговыделения природного и техногенного происхождения. В работе выбраны два источника: падение большого космического тела и мощное радиоизлучение.

Проведено численное моделирование возмущения температуры и концентрации электронов при воздействии на ионосферу мощным непрерывным радиоизлучением для различных частот, мощностей и поляризаций радиоволн. Построенная модель объясняет увеличение температуры электронов в различных областях ионосферы для волн О- и Х-поляризаций эффект самовоздействия, формирование условий для пробоя нейтральной атмосферы мощным излучением. Оказалось, что в диапазоне высот 65–90 км ярко выражен эффект самопросветления плазмы. Величина эффекта увеличивается для волны Х-поляризации при приближении ее частоты к гирочастоте электронов. На высотах, больших 70–90 км, эффект самопросветления постепенно сменяется эффектом самопомутнения. Исследована частотная зависимость множителя самовоздействия. Показано, что пробой атмосферы на высотах 30 – 60 км наступает уже при мощности равной 0.3 – 1.3 ГВт на частоте 10 ГГц.

С использованием алгоритмов регуляризации численно решена обратная задача – нахождение высотных и временных зависимостей основных параметров метеороида из наблюдений траекторных данных. Оценены высотные и временные зависимости скорости, ускорения, массы, миделя, температуры метеороида. Оценены коэффициент и удельная энергия абляции.

Для изучения движения нагретого газового образования (термика) получено численное решение дифференциальных уравнений для скорости подъема, радиуса термика и избытка температуры и построена физико-математическая модель, описывающая высотные и временные изменения параметров термика.

С помощью GPS-спутников получены временные вариации полного электронного содержания в день падения Челябинского метеороида. Обнаружены квазипериодические возмущения продолжительностью до 40 мин. Скорость распространения возмущений была около 500 м/с, что характерно для акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере.

**Ключевые слова:** радиоканал, атмосфера, ионосфера, высокоэнергетические источники, Челябинский метеороид, мощное радиоизлучение, возмущение параметров, физико-математические модели.

## ABSTARCT

**Mylovanov Yuriy Borisovich. Physical Processes in the Atmosphere-Ionosphere Radio Channel Caused by the Action of High-Energy Sources.** – *Qualification scientific paper, manuscript.*

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.04.03 – radiophysics. – Kharkiv National University named after V. N. Karazin, Kharkiv, 2019.

The parameters of the atmosphere-ionosphere radio channel change significantly under the action of high-power sources of energy of natural and man-made origin. The sources chosen for this study include the following two: celestial body entering the atmosphere and high-power radio emissions.

Results of numerical simulation of disturbances in the electron temperature and density in the ionosphere under the action of continuous high-power radio waves of different frequencies, powers, and polarizations are presented. The model developed in the study explains an increase in the electron temperature in various ionospheric regions, for the ordinary and extraordinary waves, the self-action effect, and the conditions for the breakdown of neutral atmosphere by high-power radio emissions. The effect of self-transparency proves to be strikingly distinct over 65–90 km altitude. The magnitude of the effect increases as the frequency of the extraordinary wave approaches to the electron gyrofrequency. At altitudes greater than 70–90 km, the effect of self-transparency is gradually superseded by the effect of self-murkiness.

The frequency dependence of the self-action factor has been studied. The breakdown of the atmosphere at an altitude range of 30 – 60 km occur for power of 0.3 – 1.3 GW at 10 GHz.

The inverse problem of finding the height and temporal dependences of the main parameters of a meteoroid has been numerically solved using the observation of the trajectory data and regularization algorithms. The height and temporal dependences of the meteoroid celerity, acceleration, mass, midsection, and temperature have been obtained.

The ablation coefficient and specific energy have been calculated.

To study the movement of a heated gas formation (thermic) a numerical solution to differential equations governing the speed of rising, the radius, and excess temperature has been obtained, and a physics-based mathematical model describing height and temporal variations of the thermic has been developed.

Temporal variations of the total electron content when the Chelyabinsk meteoroid was entering the atmosphere have been obtained from GPS measurements. Quasi-periodic disturbances lasting up to 40 min have been revealed. Propagation speed of the disturbances equals to approximately  $500 \text{ m s}^{-1}$ . Such propagation speeds are characteristic of the atmospheric gravity waves in the upper atmosphere.

**Key words:** Radio channel, atmosphere, ionosphere, high-energy sources, the Chelyabinsk meteoroid, powerful radio frequency, disturbance of parameters, physical and mathematical models.