**ВІДГУК**

офіційного опонента

доктора фізико-математичних наук, пров.н.с.

**Колоскова Олександра Валерійовича**

на дисертаційну роботу

**Барабаша Володимира Володимировича**

«АПЕРІОДИЧНІ ТА ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ В ІОНОСФЕРІ:

РЕЗУЛЬТАТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДУВАННЯ»,

подану на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.03 – Радіофізика

**Актуальність.**

Дисертаційна робота В.В. Барабаша присвячена вирішенню однієї з найважливіших проблем, що виникають при вивченні геокосмосу - дослідженню хвильових та аперіодичних збурень в іоносфері. На теперішній момент регулярна структура іоносфери вивчена досить добре. Існує декілька глобальних моделей (IRI, NeQuick та ін.), які дозволяють з достатньою для практичного використання точністю розраховувати середні характеристики іоносфери для різних рівнів сонячної та геомагнітної активності. У той же час поведінка хвильових і тим більше аперіодичних іоносферних збурень не підлягає точному розрахунку та прогнозу. З іншого боку саме ці іоносферні явища здатні швидко та суттєво змінювати характеристики іоносферних каналів розповсюдження радіохвиль. Таким чином саме вплив іоносферних збурень та їх непередбачуваний характер є основною перешкодою роботі майже всіх наземно-супутникових радіосистем. Оскільки на теперішній час ще не існує надійних теоретичних моделей неоднорідної структури іоносфери єдиною можливістю її врахування є проведення експериментальних моніторингових вимірювань. Натепер самим надіним, інформаційним, найкраще розробленим та найбільш поширеним радіофізичним методом спостережень є використання іонозондів. Саме тому вивчення аперіодичних та хвильових збурень у іоносфері методом вертикального зондування безумовно є актуальним, та має велике практичне і наукове значення.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Обґрунтованість наукових положень висновків та рекомендацій роботи забезпечено наступним:

1. Результати роботи отримані на основі використання класичного, та найбільш поширеного в світі методу діагностики – вертикального зондування іоносфери з використанням якісної національної та закордонної апаратури та баз даних.

2. Для обробки та аналізу залучено великий обсяг первинних даних, що їх отримано для різних пунктів спостереження, розташованих на великих відстанях один від одного.

3. Експериментальні дані аналізуються в рамках класичних підходів до обробки сигналів, з використанням статистичного, спектрального та вейвлет аналізу.

4. Положення дисертації підтверджено посиланнями на результати досліджень інших авторів, що їх було виконано у минулому.

5. Отримані результати та висновки не суперечать існуючим уявленням про іоносферні процеси, що розглядаються, та мають прозорий фізичний зміст.

6. Результати роботи пройшли апробацію на великій кількості національних та міжнародних конференцій та семінарів.

**Новизна і достовірність, повнота викладення отриманих результатів у наукових працях**

Переважна більшість результатів представлених в дисертації є новими. Найбільш важливими з них є такі:

1. Вперше проведено комплексні дослідження просторового розподілу іоносферних збурень над усією Європою під час сонячного затемнення та встановлена залежність величини збурень від фази затемнення. Визначені основні параметри аперіодичних і квазіперіодичних збурень в F-області іоносфери.

2. Вперше на відстанях до 2200 км виявлені великомасштабні аперіодичні іоносферні збурення, пов'язані з модифікацією іоносфери потужним штучним короткохвильовим випромінюванням. Проведено аналіз цих ефектів та запропоновано вірогідні фізичні механізми генерації неоднорідностей за спокійних та збурених іоносферних умов.

3. Вперше за допомогою мережі іонозондів виконані спостереження за великомасштабними збуреннями в іоносфері, що були викликані прольотом і вибухом великого метеороїду. Виявлено ефект генерації метеоритом хвильових збурень. Оцінені їх характерні параметри та дистанції на які поширюються збурення.

Зміст дисертації В.В. Барабаша з достатньою повнотою розкрито в 7-ми статтях у фахових та додатково у 2-х нефахових журналах, та матеріалах низки вітчизняних та міжнародних конференцій. Вищезазначені роботи повністю охоплюють весь матеріал дисертаційної роботи. Для кожного розділу виділені посилання на роботи за участю автора на базі яких було написано відповідний розділ.

**Зв'язок роботи з науковими програмами та темами.**

Всі результати досліджень, наведені у дисертації, отримані автором самостійно або спільно з його науковим керівником у рамках низки науково-дослідних робіт Інституту іоносфери НАНУ та МОНУ. Слід відзначити очевидне зростання наукової кваліфікації

здобувача. Якщо на початку роботи над дисертацією він виступав у ролі виконавця, то у останніх НДР вже виключно як відповідальний виконавець.

**Наукове значення результатів дисертаційної роботи.**

Наукова значущість дисертації полягає у тому, що в ній виконані комплексні та систематичні дослідження як фонових характеристик середньоширотної іоносфери у спокійних умовах, так і параметрів плазмових збурень від різних джерел природного та штучного походження. Серед проаналізованих джерел збурень є унікальні, пов'язані з падінням Челябинського метеороїду. Слід зазначити, що подібні події є вкрай рідкими, які повторюються у середньому раз на сто років. Ще однією відмінною рисою отриманих результатів є використання декількох далеко просторово рознесених пунктів спостережень що дозволило дослідити характеристики іоносферних збурень на відстанях до трьох тисяч кілометрів від джерел збудження. Крім того отримані результати та висновки стосуються різних геомагнітних умов, від спокійних до збурених.

**Практичне значення результатів дисертаційної роботи та можливі шляхи використання**

Практична користь від результатів дисертаційної роботи полягає в визначенні типів та параметрів іоносферних збурень та розмірів області їх розповсюдження для різних видів природних (сонячне затемнення, падіння метеороїду) та штучних (нагрів іоносфери потужним випромінюванням) джерел. Така інформація є корисною як для селекції неоднорідності та оцінки величини збуреності іоносфери, так і у якості вхідних даних для моделювання розповсюдження радіохвиль та прогнозувати впливу неоднорідностей на іоносферні канали телекомунікації, радіонавігації та радіолокації. Розроблені у дисертації методики та програми розрахунків є корисними для практичного використання при обробці даних великої світової мережі іонозондів.

Результати можуть бути впроваджені у академічних інститутах і університетах НАНУ та МОНУ, Державному космічному агентстві України, а також у службах-постачальниках послуг телекомунікації, радіонавігації та радіолокації.

**Структура та короткий зміст дисертаційного дослідження**

Дисертація написана зрозумілою мовою з використанням сучасної наукової термінології та оформлена згідно до вимог, що пред'являються для кандидатських дисертацій. Вона складається зі списку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 192 сторінки. Робота містить 40 рисунків і 19 таблиць, а список використаних джерел включає 209 найменувань.

*У першому оглядовому розділі* роботи представлено сучасний стан досліджень іоносферних ефектів для спокійних та збурених умов у навколоземному просторі та наведено класифікацію основних джерел збурень в іоносфері. Також там представлені відомості про характеристики діагностичної апаратури (іонозондів) і описано методики

обробки та аналізу іоносферних даних, що використано у роботі. *Другий розділ* присвячено визначенню та аналізу типової поведінки іоносфери українського регіону в період, близький до мінімуму сонячної активності. Це дозволило отримати фонові добово-сезонні варіації параметрів іоносфери на тлі яких у наступних розділах вивчаються ефекти збурень. *У третьому розділі* докладно вивчено зміну стану навколоземної плазми під час двох сонячних затемнень, що мали місце за спокійних умов та після сильної геокосмічної бурі Святого Патрика. Слід зазначити, що у останньому випадку такі дослідження було вперше виконано в масштабах Європи. У *четвертому розділі* досліджено іоносферні прояви унікальної події – прольоту та вибуху Челябінського метеороїда, яка сталася 15 лютого 2013 р. У розділі показано, що зіткнення метеороїда з атмосферою Землі призвело до генерації хвильових збурень, параметри яких було оцінено у діапазоні дистанцій до 3 тис. км від місця падіння. *У п'ятому розділі* наведено результати спостережень та аналізу аперіодичних великомасштабних збурень в іоносфері, що супроводжували модифікацію (нагрів) іоносфери потужним штучним короткохвильовим радіовипромінюванням. Вивчені та пояснені ефекти у поведінці мінімальної частоти $f_{min}$, що спостерігалася на іонограмах та критичної частоти іоносфери $f_oF2$, що виникають внаслідок штучної модифікації іоносфери на відстанях до 2200 км. Показано їх можливий зв'язок з висипанням високоенергійних електронів з радіаційного поясу Землі.

**Ідентичність змісту автореферату основним положенням дисертації**

Автореферат написано сучасною науковою мовою коротко, змістовно та без зайвих повторів. Він тезисно відображає всі результати та положення наведені в дисертації. Обґрунтування актуальності, цілі та задачі, основні результати а також пункти, що відображають їх новизну та практичне значення співпадають з матеріалами дисертації. Зміст анотації на різних мовах є ідентичним.

**Зауваження та недоліки дисертації та автореферату.**

В дисертації мають місце деякі недоліки. До загальних зауважень можна віднести такі:

1. З моєї точки зору, в дисертації мало уваги приділено формалізації кількісних критеріїв наявності або відсутності іоносферних ефектів, що досліджуються у роботі. Зазвичай у якості показників зазначається що, «із малюнків видно», «параметри суттєво відрізняються» та таке інше. Зрозуміло, що при розгляді поодинокої іоносферної події та одного «контрольного» дня розробити такі критерії досить важко. Для їх визначення доцільно було б залучати більшу кількість «контрольних» днів та проводити статистичний аналіз.
2. При вивченні іоносферних ефектів доцільно не лише наводити детальний опис, визначення їх основних чисельних характеристик та інтерпретацію вірогідних фізичних механізмів, а й виконувати узагальнення отриманих результатів.

Відносно зауважень до окремих розділів роботи можна відзначити наступне:

*До Анотації та Вступу* значних зауважень немає окрім декількох орфографічних та граматичних помилок.

*У розділі 1*

3. На сторінці 31 відзначається, що безперервні іоносферні спостереження в глобальних масштабах поки що неможливі. Проте вони вже проводяться (іонограми мережі іонозондів GIRO, карти повного електронного вмісту, дані SuperDARN), що зазначає й сам автор на стор. 101, та стор. 1 автореферату.

4. На стор. 35 при описі методик обробки іонограм, крім інструкції URSI має сенс згадати програми автоматичної обробки (Artist, AutoScala).

5. Стор. 51-52. Оскільки системний спектральний аналіз є основним інструментом вивчення іоносферних процесів, який застосовується у роботі доцільно розглянути його більш детально. Зокрема бажано було привести у дисертації формальні визначення для адаптивного перетворення Фур'є, енергограми, тощо.

6. Стор. 53. У пункті 5 висновків зазначено, що похибка одержання параметрів іоносферних процесів методом вертикального зондування не перевищує 10-20%, але у тексті розділу це ствердження розкрито недостатньо.

*У розділі 2*

7. Стор. 64. Пункт 1 висновків потребує більш детального обґрунтування у тексті розділу.

*У розділі 3*

8. Стор. 67, На рис. 3.1 мало б сенс розмістити графіки (а) і (б) на одній панелі, щоб наочно продемонструвати ефект сонячного затемнення.

9. Стор. 66-76. В параграфах 3.2.-3.3 доцільно було більше уваги приділити фізичній інтерпретації описаних там ефектів.

10. Стор. 76 та 102 (розділ 4) Необхідно пояснити як отримана формула $\sigma = \Delta t / \sqrt{12}$.

*У розділі 4*

11. У деяких випадках у «контрольні» дня проявляються ефекти, подібні до тих, що автор пов'язує з падінням метеороїду 15 лютого. Наприклад, варіації критичної частоти для станції «Алмати» 15 і 16 лютого (Рис. 4.2, Рис. 4.6) не можна назвати суттєво різними. Крім того значний сплеск $f_oF2$ подібний, до тих, що мали місце у день падіння метеороїда за даними станцій «Троїцьк» (Рис. 4.1) та «Прухониць» (Рис. 4.3) спостерігався на станції «Юліусрух» у «контрольний» день 14 лютого (Рис. 4.4).

*У розділі 5*

12. На стор. 119, не повністю розкрита мета, бо крім нагрівної кампанії 28-30 серпня 2012 р., в розділі розглянуто експеримент 2013 р.

13. Стор. 123-139, параграфи 5.4-5.5. Було б доцільно ввести більш конкретні критерії для визначення зв'язку поведінки $f_{min}$ з роботою нагрівного стенду, як це було зроблено для $f_oF2$ у параграфі 5.6.

*У висновках*

14. На мій погляд було б доцільно скоротити кількість та обсяг основних результатів за рахунок виділення найбільш суттєвих та більше уваги приділити їх узагальненню.

У авторефераті та дисертації має місце низка описок та граматичних некоректностей. У авторефераті стор. 6, 7, 11, 13, 14, 15, 20: У дисертації стор. 9, 10, 11, 12, 24, 66, 67, 84, 98, 101, 122, 134, 177.

**Відповідність дисертації встановленим вимогам і загальні висновки.**

Відзначені недоліки не є суттєвими, або мають характер рекомендацій і не зменшують високий науковий рівень проведених досліджень та отриманих результатів. Під час виконання дисертаційної роботи здобувач безпосередньо приймав участь у всіх етапах досліджень від модернізації апаратури, проведення вимірювань і обробки даних до моделювання та теоретичної інтерпретації результатів, що значно розширило коло його знань, вмінь та навиків.

Практична цінність дисертації полягає у можливості використання отриманого у роботі великого фактичного матеріалу про параметри іоносферних збурень різної природи для модулювання впливу цих неоднорідностей на умови поширення радіохвиль, яке дозволить зменшити їх негативний вплив на системи радіонавігації, радіолокації та телекомунікації і оптимізувати режими їх роботи. Слід також зазначити, що методики розроблені у роботі придатні для обробки даних найпоширенішого в світі методу вертикального зондування іоносфери, що дозволяє організувати глобальну діагностику іоносферних збурень використовуючи данні великої світової мережі іонозондів.

Дисертація є завершеним дослідженням, в якому на високому науковому рівні вирішена радіофізична задача оцінки реакції іоносфери на вплив різних типів джерел потужного енерговиділення та добових і сезонних варіацій електронної щільності на фазах росту та спаду сонячної активності. Її результати опубліковані в достатній кількості статей в фахових журналах та повно представлені на багатьох наукових конференціях.

Дисертаційна робота за змістом, оформленням, актуальністю теми, новизною та оригінальністю отриманих результатів, повністю задовольняє всім вимогам діючого законодавства, МОН України і пунктам 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, які пред'являються для кандидатських дисертації. Вважаю, що автор дисертації Барабаш Володимир Володимирович безумовно заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – Радіофізика.

**Офіційний опонент:**
доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник,
відділу радіофізики геокосмосу
Радіоастрономічного інституту НАН України О.В. Колосков

10.06.2019 р.

Підпис Колоскова Олександра Валерійовича засвідчую:
В.о. вченого секретаря,
Радіоастрономічного інституту НАН України
кандидат фізико-математичних наук Ю.В. Антоненко