

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук
Колоскова Олександра Валерійовича
на дисертаційну роботу **Розуменка Віктора Тимофійовича**
«Дія високоенергетичних джерел на атмосферно-космічні радіоканали»,
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика

Актуальність. З початком у середині минулого сторіччя космічної ери необхідність вивчення стану верхньої атмосфери та геокосмосу постійно зростає, бо навколоземна плазма стала не лише чинником впливу на людські технології, а ще й «середовищем існування» численних космічних апаратів. На теперішній момент на орбіті працює вже близько трьох тисяч штучних супутників. Вони, разом з традиційними наземними радіотехнічними системами використовують атмосферу та геокосмос в якості радіоканалів для радіохвиль практично всіх діапазонів, які забезпечують роботу систем навігації, телевізійної та інтернет комунікації, радіолокації, дистанційного радіозондування та радіоастрономії. Якість функціонування радіоканалів визначається взаємодією підсистем в системах Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ), яке відбуваються під впливом енергетичних потоків від Сонця, Землі та частково з далекого космосу. І якщо регулярні процеси у атмосфері та геокосмосі піддаються моделюванню і прогнозу в рамках сучасних фізичних уявлень, то реакції систем СМСМІАЗ і ЗАІМ на вплив високоенергетичних джерел, які суттєво збурюють параметри атмосферно-космічних радіоканалів вивчені недостатньо. Тому дослідження таких збурень і їх дії на радіоканали, на що спрямована дисертаційна робота здобувача, є **актуальною проблемою радіофізики** вирішення якої має високе наукове та практичне значення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у роботі. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації є **достовірними та обґрунтованими** завдяки цілісному та систематичному підходу до розв'язання важливої

радіофізичної проблеми, яку вирішує дисертаційна робота – вивчення впливу збурень обумовлених дією високоенергетичних джерел на атмосферно-космічні радіоканали. Дослідження ґрунтуються на застосуванні добре відомої системної парадигми стосовно об'єктів СМСМІАЗ та ЗАІМ, положення якої були додатково розвинуті автором у дисертаційній роботі. Адекватність отриманих експериментальних даних забезпечена використанням класичних методів дистанційної радіодіагностики: методу доплерівського зондування, методу часткових відбиттів (ЧВ), методу некогерентного розсіяння, методу вертикального зондування іоносфери, методу багаточастотного багатотрасового похилого зондування та магнітометричного методу. Обробка даних виконувалася методами статистичної радіофізики та математичної статистики, спектрального та кореляційного аналізу. Теоретичні дослідження включали фізичне моделювання з застосуванням аналітичних та цифрових методів.

Зв'язок дисертації з науковими програмами та темами. Всі результати досліджень, наведені у дисертації, отримані автором відповідно до 14 основних науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики у 6 з яких автор був науковим керівником.

Апробація та повнота викладення результатів у наукових працях. Результати дисертації добре та повно опубліковані в провідних фахових національних журналах з радіофізичної тематики, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук та у закордонних рейтингових журналах. За темою дисертації здобувачем опубліковано 38 наукових статей та 73 тези доповідей на міжнародних та українських конференціях, з яких 10 статей та 16 тез входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science.

Структура та короткий зміст дослідження. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 391 найменування і додатку, та містить 86 рисунків і 31 таблицю.

Розділ 1 є оглядовим. В ньому висвітлені невирішені дотепер проблеми, розглянуті сучасні уявлення про процеси і взаємозв'язки у системах СМСМІАЗ та ЗАІМ, а також вплив на них варіацій космічної та атмосферної погоди. Автор приділив велику увагу оцінкам енерговмісту природних і техногенних процесів

у цих системах, а також навів сучасні уявлення про фізичні процеси в атмосфері та геокосмосі, викликані падіннями метеороїдів, землетрусами, тайфунами, геокосмічними бурями, стартами і маневруванням ракет і космічних апаратів. Дано короткий опис засобів діагностики, які знаходяться у Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна та радіофізичного комплексу похилого зондування іоносфери, розміщеного у Харбінському інженерному університеті (КНР).

У *розділі 2* сформульовані основні положення системної парадигми стосовно систем СМСМІАЗ та ЗАІМ, які було розвинуто автором. Здобувачем розраховані енергетичні характеристики потоків «зверху» і «знизу» між підсистемами вказаних систем та показано, що вони можуть бути порівнянними. Також ним досліджені параметри фізичних носіїв цих потоків – хвильових збурень електромагнітної й гідродинамічної природи та висипань заряджених частинок.

Розділ 3 присвячено розгляду експериментальних досліджень фізичних процесів у атмосферно-іоносферних радіоканалах, викликаних дією високоенергетичних джерел до яких відносяться падіння великих метеороїдів (Челябінського та Камчатського) та динамічні процеси у мезосфері. Також проведено теоретичний аналіз впливу на мезосферу потужного наносекундного радіовипромінювання.

У *розділі 4* досліджуються сейсмо-іоносферні процеси і варіації характеристик радіохвиль у діапазоні частот 5–10 МГц, викликаних землетрусами помірної сили. Землетруси являють собою систематично діюче джерело енерговиділення, яке призводить до стохастичної активізації взаємодії підсистем у системі тектоносфера – атмосфера – іоносфера – магнітосфера, що є підсистемою ЗАІМ.

У *розділі 5* аналізуються фізичні процеси в геокосмосі, які супроводжували вплив на атмосферно-космічні радіоканали надпотужного тайфуну Hagibis, який з 5 по 13 жовтня 2019 р. існував в Азійсько-Тихоокеанському регіоні. Тайфуни належать до потужних атмосферних процесів, що виникають в системі океан – суша – атмосфера, яка є підсистемою ЗАІМ.

Розділ 6 присвячено вивченню впливу геокоsmічних бур (проявом яких є магнітні, атмосферні й електричні бурі) на радіоканали, що відповідають висотам нижньої, середньої і зовнішньої іоносфери. Ці дослідження дозволили провести розділення іоносферних бур за силою геомагнітного збурення, яке вони супроводжують, а також сприяли більш чіткому розумінню взаємодії між підсистемами в системі СМСМІАЗ.

У *Розділі 7* проведено аналіз фізичних процеси в атмосфері, іоносфері та геомагнітному полі, що супроводжували старту ракет, маневрування космічних апаратів та їх посадки.

Наукова новизна та значимість результатів отриманих автором у дисертаційній роботі полягає у наступному:

- Проведено теоретичні розрахунки і експериментальні дослідження та отримано числові оцінки основних параметрів фізичних процесів в атмосферно-іоносферних радіоканалах системи ЗАІМ, викликаних падіннями найкрупніших у поточному сторіччі метеороїдів - Челябінського та Камчатського.

- Вперше для українського регіону проаналізовані систематичні спостереження динаміки мезосфери, виконані за допомогою середньочастотного радара ЧВ. Встановлені основні добові та сезонні залежності величин (10–80 м/с) і напрямків (140–180°) зональної та меридіональної складових вектору спрямованої швидкості, значень турбулентної швидкості (2–6 м/с), амплітуд квазіперіодичних варіацій в діапазоні періодів 10–120 хв (не більше 8 м/с).

- Вперше продемонстрована можливість спостереження на відстанях ~1 - 2 тис. км динамічних процесів в іоносфері, що супроводжували землетруси помірної сили ($M \approx 5.9-6.5$). Встановлено, що сейсмічна активність супроводжується аперіодичними процесами в іоносфері на дистанціях 1 - 2 тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним уширенням доплерівських спектрів, наявністю інфразвукових коливань і акустико-гравітаційних хвиль. Оцінки амплітуди відносних збурень концентрації електронів дали ~0.15–0.31 % і 7–8 % для інфразвукових й акустико-гравітаційних хвиль відповідно. Тривалість цугів коливань склала 24–55 хв.

Характерні удавані швидкості поширення збурень відповідають швидкостям сейсмічних і акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі.

- Вперше за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлена реакція іоносфери на дію надпотужного тайфуну Hagibis. Дія тайфуну супроводжувалася підсиленням хвильової активності в атмосфері в діапазонах періодів від 12–15 до 60–150 хв. Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера здійснювалася за допомогою атмосферних гравітаційних хвиль. Найбільший вплив на іоносферу відповідав періоду максимальної енергетики тайфуну. Отримано оцінки коливань висоти відбиття під дією хвильових процесів: $\pm(30-50)$ км та відносної амплітуди квазіперіодичних варіацій концентрації електронів в F-області іоносфери: від 10–12 % для періодів ~20 хв до 30–60 %, для періодів ~60–120 хв.

- Вперше за результатами багаточастотних багатотрасових вимірювань встановлено, що геокосмічні бурі призводять до значного (до 1 Гц і більше) уширення доплерівських спектрів, підсилення багатомодовості, появі суттєвих (до ± 1 Гц і більше) аперіодичних і квазіперіодичних варіацій параметрів іоносфери. При цьому відносна амплітуда квазіперіодичних змін концентрації електронів в іоносфері може досягати десятків процентів, а період становить від 10 до 120 хв. Проведено класифікацію іоносферних бур за силою геомагнітного збурення.

- Аналіз даних багаторічних спостережень за збуреннями характеристик радіохвиль, параметрів іоносфери та геомагнітного поля, що супроводжують старти ракет і маневри космічних апаратів встановив, що в глобальних масштабах (на відстанях ~1–10 тис. км) в атмосфері та геокосмосі виникають збурення, що поширюються у вигляді акустико-гравітаційних хвиль (швидкість 0.3–0.8 км/с), повільних МГД хвиль (швидкість ~2–3 км/с) і гіротропних хвиль (швидкість ~10–25 км/с). Оцінки тривалості збурень становлять від десятків хвилин до декількох годин.

Практична цінність та можливі шляхи використання результатів роботи полягають в визначенні кількісних значень збурень, характеристик радіохвиль і параметрів атмосферно-іоносферного радіоканалу під дією

природних та техногенних високоенергетичних джерел, що їх проаналізовано у дисертаційній роботі. Ці характеристики можуть бути застосовані для розрахунку ефективності функціонування систем радіонавігації, телевізійної та інтернет комунікації, радіолокації, дистанційного радіозондування і радіоастрономії.

Переважна більшість результатів дисертації увійшла в підсумкові звіти за науково-дослідними роботам кафедри космічної радіофізики, для яких отримані акти про впровадження результатів досліджень.

Мова дисертації та автореферату, відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації. Дисертацію та автореферат написано сучасною науковою мовою змістовно та ясно. Автореферат тезисно відображає всі найважливіші результати та висновки отримані в дисертації та є ідентичним до її основних положень. Анотації на українській та англійській мовах співпадають за змістом.

Зауваження та недоліки. Дисертація та автореферат містять *недоліки*. Вони можуть бути поділені на загальні, ті, що стосуються окремих положень та розділів роботи і претензії до оформлення дисертації. *До загальних зауважень* можна віднести наступні:

1. Досить велика кількість висновків роботи базується на аналізі визначених дослідником подій, які відповідають значним змінам параметрів експериментальних записів. При цьому основна увага приділяється інтерпретації вже відібраних ефектів, а кількісні критерії селекції самих подій описані недостатньо. Зазвичай у якості показника наявності ефекту зазначається, що «характер поведінки доплерівських спектрів змінився», «мали місце значні варіації відносної амплітуди сигналу», «доплерівські спектри були більш дифузними, ніж у контрольний день», та таке інше. Було б доцільно всюди, де є така можливість кількісно порівнювати параметри подій, що відбираються з характеристиками у контрольні (спокійні) дні або інтервали часу, а також більш активно застосовувати статистичний аналіз даних, як це зокрема було виконано при порівнянні доплерівських зміщень частоти під час максимальної активності тайфуну Hagibis та в контрольні дні (стор. 215).

2. При розгляді основних факторів впливу на досліджувані процеси та явища в підсистемах СМСМІАЗ та ЗАІМ не завжди всі вони у повній мірі бралися

до уваги. Наприклад при вивченні ефектів падіння Челябінського метеороїда, на відміну від Камчатського, не аналізувався стан космічної погоди, урахування якого могло вплинути на інтерпретацію результатів. Також було б доцільно у всіх випадках аналізувати стан космічної погоди за єдиною стандартною методикою, тим більш, що алгоритм такого розгляду розроблено здобувачем, та він застосовується у декількох розділах дисертації.

До зауважень які стосуються окремих розділів дисертації та автореферату можна віднести наступні:

В анотації:

1. На стор. 3 замість терміну «спрямована швидкість» краще писати «спрямована швидкість вітру», тим більш, що саме цей термін застосовується при аналізі динамічних процесів у нижній іоносфері у підрозділі 3.4.

У вступі:

2. На стор. 51 бажано зазначити, що вивчення динамічних процесів в мезосфері проводилося не лише експериментально, а й теоретично.

3. Вказані на сторінці 53 оцінки діапазонів удаваних швидкостей поширення акустико-гравітаційних, повільних МГД та гіротропних хвиль, що виникають при стартах ракет та польотах космічних апаратів, дещо відрізняються від характеристик які визначені у розділі 7 дисертації (стор. 297). У той же час слід підкреслити, що оцінки швидкостей наведені в висновках (стор. 309), анотації (стор. 7) та авторефераті (стор. 23) співпадають з даними розділу 7.

У розділі 1:

4. У розділі доцільно більш детально описати ефекти іонізації приземної атмосфери радіоактивними газами на які вказується у висновках до розділу на стор. 102.

У розділі 2:

5. У тексті розділу доречно надати більше інформації щодо характеристик і типів хвильових процесів важливих для забезпечення взаємодії підсистем в системах СМСМІАЗ і ЗАІМ, виявлення яких констатується у висновках до розділу на стор. 115.

У розділі 3:

6. З матеріалів наведених у підрозділі 3.3 не завжди зрозуміло яким чином отримано оцінки деяких характеристик фізичних процесів, що супроводжували падіння Челябінського метеороїда. Це стосується наприклад періоду акустичних хвиль з найбільшою амплітудою, оціненого в 21 та 63 секунди для вибухів поблизу поверхні та на висоті 25 км відповідно (стор. 121-122).

7. При вивченні динамічних процесів в нижній іоносфері у підрозділі 3.4 не визначено конкретний обсяг даних радару ЧВ за допомогою яких проводився аналіз, а сказано лише, що застосовано тривалі вимірювання в різні сезони у 2000-2004 рр.

У розділі 4:

8. Оцінки відносної амплітуди збурень концентрації електронів для хвильових процесів за записами варіацій ДЗЧ наведено у підрозділі 4.2.5 без опису або посилань на алгоритм таких розрахунків, а відповідні формули розглянуто лише у підрозділі 4.3.3. Доцільно їх перенести до підрозділу 4.2.5.

9. В висновках до розділу у фразі: «Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше 1–2 тис. км від епіцентру» вислів «не менше» виглядає зайвим.

У розділі 5:

10. Варіації параметрів іонограм у збурені дні порівняно з контрольним днем, присутність яких відзначено на стор. 188 необхідно описати та проаналізувати більш детально.

11. Методика оцінки величини коливань висоти відбиття радіохвиль під дією хвильових процесів для 9 жовтня 2019 р., яку наведено у пункті 6 висновків (стор. 218) потребує пояснень у тексті розділу.

У розділі 6:

12. Розглянуті у підрозділі 6.3 результати спостережень ефектів іоносферної бурі 14-15 травня 2019 р. за допомогою комплексу похилого зондування іоносфери розташованого у Китаї краще порівнювати з варіаціями магнітного поля виміряними поблизу пункту спостереження, а не зареєстрованими в Україні.

У розділі 7:

13. На стр. 268 треба вказати що: «густина потоку радіовипромінювання із довжиною хвилі 10.7 см дорівнювала» 73 s.f.u., а не 73 Ян (або $7.3 \cdot 10^5$ Ян).

14. У висновках до розділу на стор. 298 зазначено, що в ньому використано багаторічні спостереження за варіаціями, пов'язаними зі стартами ракет на різних космодромах у всьому світі, проте у підрозділі 7.4 проаналізовані лише данні з космодромів Плесецьк і Байконур.

У висновках:

15. Обсяг висновків дисертаційної роботи можна зменшити. Компактний формат дав би змогу уникнути зайвої деталізації та дозволив більш змістовно сконцентруватися на найбільш важливих результатах роботи.

У дисертаційних матеріалах присутня низка *описок та граматичних недоліків*. Зокрема у *авторефераті*: на стор. 14 (в першій частині опису результатів підрозділу 4.3) вказані невірні параметри землетрусу; на стор. 19 в списку публікацій (джерело 39) зазначені хибні дати семінару; суцільна вертикальна лінія у підписі до Рис. 3 (а також на Рис. 4.1-4.8 у дисертації) показує початок землетрусу, а не іоносферної бурі; у пункті 5 висновків (стор 24), коректніше зазначити, що реакція іоносфери виявлена на дію супертайфуну а не супертайфунів. У *дисертації*: на стор. 89 треба замість ракети «Apollo» вказати «Saturn-5»; на стор. 111 у таблиці 2.2 варто вилучити порожній рядок, а на стор. 112 у таблиці 2.3 зайві повтори заголовку; в останньому рядку на стор. 125 слово «нове» є зайвим; у підписі до Рис. 4.1 на стор. 156 речення: «Амплітуда доплерівських ліній показана чорним-синім-червоним-зеленим-жовтим кольорами показані відносні амплітуди 1, 0.8, 0.6, 0.4 і 0.2 відповідно» потребує корекції; фраза на стор. 255: «Спрямований до екватора зміщення цих структур опосередковано підтверджено максимальними значеннями рівня полярного саява POES ...» не є коректною.

Відповідність дисертації встановленим вимогам та загальний висновок. Виявлені недоліки не є суттєвими та у своїй більшості мають характер рекомендацій, або стосуються форми подання матеріалів. Вони не зменшують високий рівень проведених досліджень, вирішальний вклад здобувача в розв'язання важливої наукової проблеми, актуальність практичну цінність, новизну та коректність основних положень і висновків роботи. Дисертація Віктора Тимофійовича Розуменка є завершеним дослідженням, в якому на

високому науковому рівні розв'язана важлива радіофізична проблема експериментального та теоретичного дослідження впливу високоенергетичних джерел природного та штучного походження на характеристики радіохвиль і атмосферно-космічні радіоканали, які використовуються засобами телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації, тощо.

Дисертаційна робота за змістом, оформленням, актуальністю теми, новизною, практичною значимістю, оригінальністю отриманих результатів і висновків повністю задовольняє всім вимогам діючого законодавства, МОН України та, зокрема, пунктам 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, які внесені згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р. №1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.), а також вимогам наказу №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. Вважаю, що автор дисертації Розуменко Віктор Тимофійович безумовно заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук,
завідувач науково-дослідною лабораторією,
«Електромагнітного оточення Землі»,
Радіоастрономічного інституту НАН України

Олександр Колосков

28.04.2021 р.

Підпис Колоскова Олександра Валерійовича засвідчую:

Учений секретар

Радіоастрономічного інституту НАН України

кандидат фізико-математичних наук



Юлія Антоненко

Відгук оценок 28 квітня 2021 р.

Учений секретар спецради