

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук
Ніколаєнка Олександра Павловича
на дисертацію **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 теми дисертації. Починаючи з кінця ХХ століття, верхня атмосфера та геокосмос стали середовищем для людства. У геокосмосі знаходиться велика кількість функціонуючих космічних апаратів. На Землі працюють чисельні радіопередавачі різного призначення. Атмосфера та геокосмос використовуються як наземними, так і космічними засобами в якості радіоканалів для практично всіх діапазонів з довжиною хвиль, починаючи від десятків тисяч кілометрів і закінчуючи міліметрами. Працездатність систем зв'язку, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування суттєво залежить від стану атмосфери та геокосмосу, що визначають стан атмосферно – космічних радіоканалів. Стан радіоканалів залежить від процесів на Сонці, частково від далекого космосу, а також від процесів на Землі та під землею. Потужні процесів на Землі викликають в геокосмосі та навіть далекому космосі реакцію підсистем Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ).

У цей час вже розроблені моделі атмосферно – космічного радіоканалу для спокійних умов. У той же час дія високоенергетичних джерел природного та штучного походження суттєво змінює параметри цього радіоканалу. Такі збурення на сьогодні вивчені недостатньо детально. Їх дослідження разом з впливом на радіоканали є **актуальною проблемою радіофізики**. На розв'язання цієї проблеми і спрямована дисертаційна робота Розуменка В. Т.

Структура дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, 31 таблиць і 86 рисунків, списку викорис-

таних джерел та додатку. Список використаних джерел містить 391 найменування.

Перший розділ, який є оглядовим, присвячено опису сучасних уявлень про процеси та взаємозв'язки у таких системах, як СМСМІАЗ та ЗАІМ, а також взаємному впливу на них варіацій як атмосферної, так і космічної погоди. В цьому розділі також наведені не вирішені дотепер проблеми. Автор приділив значну увагу оцінкам енергетики природних і техногенних процесів, досить детально розглянув сучасні уявлення про фізичні процеси в атмосфері та геокосмосі, які викликані землетрусами, тайфунами, геокосмічними бурями та метеороїдами, зокрема, Челябінським космічним тілом, а також впливом стартів і польотів потужних ракет. Коротко охарактеризована експериментальна база досліджень, яка розміщена в Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, а частково – на території Харбінського інженерного університету (КНР).

У розділі 2 сформульовані основні положення запропоновані та розвинуті автором дисертації. Найбільш важливими з них є такі.

- Системи СМСМІАЗ і ЗАІМ утворюють єдину природну систему, де головну роль відіграють потоки енергії, речовини та випромінювання «зверху».

- Складові частини систем СМСМІАЗ і ЗАІМ підтримують різноманітні зв'язки (прямі та зворотні, позитивні та негативні, їх комбінації).

- Системи СМСМІАЗ і ЗАІМ – це відкриті динамічні системи. До них надходить випромінювання та речовина як «знизу», так і «зверху».

- Завдяки протіканню високоенергетичних процесів системи СМСМІАЗ і ЗАІМ стають нелінійними системами.

Автор визначив енергетичні характеристики потоків «зверху» та «знизу» між підсистемами та знайшов параметри фізичних носіїв цих потоків – гідродинамічних й електромагнітних хвиль та потоків заряджених частинок.

У розділі 3 наведені результати експериментальних досліджень процесів у атмосфері й іоносфері, що викликані різними високоенергетичними джерелами. До них відносяться: падіння Челябінського метеороїду, динамічні процеси у мезосфері та дія наносекундного потужного радіовипромінювання гігагерцового діапазону.

Розділ 4 присвячений варіаціям кількісних характеристик радіохвиль у діапазоні частот 5–10 МГц, які викликані помірними землетрусами (магнітуда 5–6). Землетруси є випадковим джерелом енергопостачання, яке здатне запустити процеси у системі тектоносфера – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

У розділі 5 експериментально розглянуті фізичні процеси в геокосмосі, які супроводжували вплив найсильнішого за останні 60 років супертайфуну Hagibis, який спостерігався у жовтні 2019 р. в Азійсько-Тихоокеанському регіоні. Тайфуни належать до потужних атмосферних процесів, які виникають в системі океан – суша – атмосфера – іоносфера – магнітосфера та можуть впливати на атмосферно-космічні радіоканали.

У розділі 6 описано результати експериментальних досліджень фізичних процесів у іоносфері в широкому діапазоні висот, які мали місце протягом геокосмічних бур. Виконані дослідження сприяють більш чіткому опису взаємодії в системі Сонце – Земля, та впливу бур на атмосферно-космічні радіоканали.

У розділі 7 описані експериментальні спостереження ефектів у атмосфері, іоносфері та геомагнітному полі, що супроводжували старту ракет з різних космодромів, посадки космічних апаратів, а також їх маневрування в космосі.

Основні наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертації, є в достатній мірі **обґрунтованими та достовірними**, тому що вони обумовлені чіткою фізичною постановкою кінцевої мети та складових задач, методичною цілісністю дисертації, яка містить всі основні стадії від формулювання проблеми, обґрунтування ідеї експериментів, обробки експериментальних даних, аналізу отриманих результатів та їх фізичної інтерпретації.

Автор дисертації використовує апробовані методи наукових досліджень, до яких належать відомі радіофізичні методи дистанційного радіозондування – метод часткових відбиттів, метод доплеровського зондування, метод багаточастотного багатотрасового похилого зондування, метод некогерентного розсіяння, а також магнітометричний метод. При обробці результатів радіофізичних вимірювань використовувалися методи статистичної радіофізики та математичної статистики, спектральний аналіз, статистичний аналіз, кореляційний аналіз. При проведенні теоретичних досліджень використовувалися аналітичні та числові методи, а також фізичне моделювання.

Наукова новизна отриманих автором результатів полягає в наступному.

1. Проведено теоретичні й експериментальні дослідження (за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери) та виконано числові оцінки основних параметрів фізичних процесів у системах ЗАІМ і СМСМІАЗ, викликаних падінням найбільш унікальних космічних тіл – Челябінського та Камчатського метеороїдів. Визначено кількісні значення параметрів збурень у атмосферно-космічному радіоканалі.

2. Вперше для українського регіону впродовж систематичних спостережень за динамікою мезосфери за допомогою середньочастотного (частота ~ 2 МГц) радара встановлено основні добові та сезонні залежності величини ($10\text{--}80$ м/с), напрямку ($140\text{--}180^\circ$) зональної та меридіональної складових вектора спрямованої швидкості, значення турбулентної швидкості становило $2\text{--}6$ м/с. Амплітуда квазіперіодичних варіацій величини швидкості в діапазоні періодів $10\text{--}120$ хв не перевищувала 8 м/с.

3. Вперше продемонстрована можливість спостереження на відстанях $\sim 1\text{--}2$ тис. км динамічних процесів в іоносфері, що супроводжували землетруси помірної сили ($M \approx 5.9\text{--}6.5$). Встановлено, що землетруси викликали аперіодичні процеси в іоносфері на відстанях не менше декількох тисяч кілометрів від епіцентру завдяки багатьом модам поширення та значному розширенню доплерівських спектрів. Виявлено також хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань і в діапазоні атмосферно-гравітаційних хвиль. Амплітуда відносних збурень концентрації електронів викликаних інфразвуковою й атмосферною гравітаційною хвилями складала $\sim 0.15\text{--}0.31\%$ та $7\text{--}8\%$ відповідно. Тривалість цугів коливань становила $24\text{--}55$ хв. Виявлено дві характерні швидкості поширення збурень, які відповідають швидкостям сейсмічних і акустико-гравітаційних хвиль в атмосфері Землі.

4. Вперше за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлена реакція іоносфери на дію супертайфунів. Встановлено, що дія супертайфуну супроводжувалася підсиленням хвильової активності в атмосфері у діапазоні періодів від $12\text{--}15$ до $60\text{--}150$ хв. Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера підтримувалася атмосферними гравітаційними хвилями. Виявлено, що найбі-

льший вплив на іоносферу відбувався тоді, коли супертайфун мав максимальну енергетику. Під дією хвильових процесів висота відбиття радіохвиль змінювалася на $\pm(30-50)$ км, а відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів в F-області іоносфери змінювалася від 10–12 % для періодів ~ 20 хв до 30–60 %, для періодів $\sim 60-120$ хв.

5. Вперше за допомогою багаточастотних багатотрасових вимірювань виявлено, що геокосмічні бурі призводять до значного (до 1 Гц і більше) розширення доплеровських спектрів, підсилення багатомодовості, суттєвим (до ± 1 Гц і більше) аперіодичним і квазіперіодичним варіаціям параметрів іоносфери. Відносна амплітуда квазіперіодичних змін концентрації електронів в іоносфері досягала десятків процентів, а їх період становив $\sim 10-120$ хв. Встановлено, що характеристики радіохвиль у діапазоні частот 5–10 МГц зазнають суттєвих збурень у всіх областях іоносфери під час геокосмічних бур.

6. Впродовж багаторічних спостережень за збуреннями характеристик радіохвиль і параметрів іоносфери та геомагнітного поля, що виникають при стартах ракет і польотах космічних апаратів встановлено, що при цьому в глобальних масштабах (на відстанях до 10 тис. км) в атмосфері та геокосмосі реєструються збурення, які поширюються як акустико-гравітаційні хвилі (швидкість 0.3–0.8 км/с), повільні МГД хвилі (швидкість $\sim 1-10$ км/с) та магніто – гідродинамічні хвилі (швидкість $\sim 10-100$ км/с). Показано, що тривалість збурень становить від десятків хвилин до декількох годин.

Практична цінність полягає в отриманні кількісних характеристик збурень радіохвиль і параметрів атмосферно – космічного середовища під дією високоенергетичних джерел як природного (падінь метеороїдів, геокосмічних бур, тайфунів і землетрусів), так і техногенного походження (стартів потужних ракет, польотів космічних апаратів), що допомагає визначити ефективність функціонування радіотехнічних систем наземного та космічного базування.

Важливо, що основна частина результатів дисертації знайшла своє відображення у великій кількості підсумкових звітів з НДР кафедри космічної радіофізики, для яких буди отримані акти про впровадження результатів досліджень.

Публікації та апробація. Основні наукові результати опубліковані в журналах, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук та в престижних загальнонавчаних радіофізичних журналах за кордоном. За темою дисертації автором опубліковано 111 наукових праць: 38 статей, з яких 10 входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 73 тези доповідей на українських та міжнародних наукових конференціях.

Доповіді матеріалів роботи на наукових конференціях завжди викликали інтерес і схвалення у фахівців.

Мова дисертації та автореферату. У цілому дисертація написана грамотно, ясною та сучасною науковою мовою.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Дисертація В. Т. Розуменка містить певні **недоліки**. За мою думкою треба навести два з них.

1. Зауваження стосується неточностей, пов'язаних з описом виділення енергії землетрусів. На стор. 65 автор наводить вельми розумні формули, що зв'язують магнітуду землетрусу з об'ємом осередку, де відбувається сейсмічний процес. Згідно із цією формулою, магнітуда $M = 8$ відповідає енергії землетрусу $E = 10^{19}$ Дж. Потім в таблиці 1.5 на стор. 69 наводяться магнітуди, енерговиділення, характерна тривалість та інші параметри землетрусів. Дані цієї таблиці суперечать наведеним раніше формулам. Більш того, магнітуди в цій таблиці не зростають як логарифм енерговиділення! Подібні відхилення нервують читача та викликають певні сумніви щодо відповідних кількісних характеристик процесів, що характеризують вплив землетрусів на навколишнє середовище.
2. Літературні джерела далеко не повні. Наприклад, недостатньо відображені електромагнітні ефекти від землетрусів, яким були присвячені дві колективні монографії, видані TERRA Publishers в Токіо, не кажучи про відповідні міжнародні конференції і наради. Тому у списку цитованої літератури на жаль відсутні такі імена, як А. Fraser-Smith, Ю. Копитенко, С. Пулинець, Ю. Гальперін, А. Щекотов.

Зроблені зауваження, стосуються форми викладення матеріалу та оформлення дисертації. Вони відображають персональну думку опонента і не ставлять під сумнів правильність, цінність і новизну основних положень і висновків дисертаційної роботи, автор якої зробив істотний внесок у вивчення важливої радіофізичної проблеми.

Автором дисертаційної роботи розв'язана актуальна наукова проблема, присвячена експериментальному та теоретичному дослідженню впливу високо-

енергетичних джерел природного та штучного походження на характеристики радіохвиль і атмосферно – космічні радіоканали, які використовуються засобами радіозв'язку, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації, тощо.

Дисертаційна робота В. Т. Розуменка присвячена актуальній радіофізичній проблемі ті виконана на високому науковому рівні. Вона містить оригінальні та важливі наукові результати, відповідає вимогам п.п. 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.

Автор дисертації Розуменко Віктор Тимофійович безумовно заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук, професор,
с.н.с. відділу дистанційного зондування Землі
Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
Національної Академії наук України Олександр НІКОЛАЄНКО

Підпис доктора фіз.-мат. наук Ніколаєнка О. П. засвідчую.



Вчений секретар Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова
НАН України

кандидат фіз.-мат. наук

Ірина ПОЧАНІНА

*Відгук одержано 27 квітня 2021р
Вчений секретар спецради*