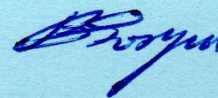


Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

РОЗУМЕНКО ВІКТОР ТИМОФІЙОВИЧ



УДК 550.388

ДЛЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ
НА АТМОСФЕРНО-КОСМІЧНІ РАДІОКАНАЛИ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
ЧОРНОГОР ЛЕОНІД ФЕОКТИСТОВИЧ,
Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна, завідувач кафедри космічної
радіофізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
НІКОЛАЄНКО ОЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ,
Інститут радіофізики та електроніки ім.
О. Я. Усикова НАН України,
старший науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник,
КОЛОСКОВ ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІЙОВИЧ,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач лабораторії
«Електромагнітне оточення Землі»

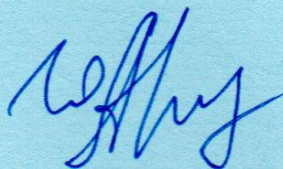
доктор технічних наук, професор,
ДОМНІН ІГОР ФЕЛІКСОВИЧ,
Інститут іоносфери НАН України
та МОН України, директор

Захист дисертації відбудеться «14» травня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02 Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна за адресою: Україна, 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:
Україна, 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4

Автореферат розісланий «14» квітня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої ученої ради
доктор фіз.-мат. наук, професор



Юрій АРКУША

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження.

В останні десятиліття верхня атмосфера та геокосмос стали середовищем існування людства. У геокосмосі функціонує більше тисячі штучних супутників Землі. Атмосфера та геокосмос використовуються в якості радіоканалів для радіохвиль практично всіх діапазонів, починаючи від одиниць кілогерц і закінчуючи гігагерцами. Функціонування систем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування суттєво залежить від стану атмосфери та геокосмосу, що визначають стан атмосферно-космічних радіоканалів. Останнє в основному визначається процесами на Сонці, частково процесами в далекому космосі, а також процесами на Землі. Під дією таких процесів виникає взаємодія підсистем в системах Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля (СМСМІАЗ) та Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера (ЗАІМ). Обґрунтовано (Чорногор Л. Ф., 1980-ті рр.), що системи СМСМІАЗ і ЗАІМ відносяться до відкритих динамічних стохастичних і нелінійних систем, яким властиві нетривіальні процеси, такі, як виникнення детермінованого хаосу, самоорганізація, тригерність і т.п. Перебудова взаємодії підсистем відбувається під дією високоенергетичних джерел різної фізичної природи на одну з підсистем. До природних джерел належать сонячні бурі, падіння великих космічних тіл (метеороїдів), грози, погодні фронти, урагани (тайфуни), смерчі (торнадо), виверження великих вулканів, потужні землетруси та ін. Обґрунтовано (Чорногор Л. Ф., 1980-ті рр.), що енергетика ряду техногенних процесів може бути сумірною з енергетикою природних процесів. Це означає, що стан атмосфери та геокосмосу, тобто стан атмосферно-космічної погоди формується як природними, так і техногенними джерелами енерговиділення. До останніх відносяться старту та польоти космічних апаратів, падіння великих космічних виробів, потужні вибухи, вплив потужним радіо- й акустичним випромінюванням, інжекція газів, плазми та хімічних реагентів та ін.

Важливо, що реакція атмосфери та геокосмосу суттєво залежить від їх стану. Вивченню такої реакції присвячена велика кількість наукових робіт, виконаних у різних країнах. Проте, вивчення реакції систем СМСМІАЗ і ЗАІМ на вплив високоенергетичних джерел залишається актуальною науковою проблемою. Справа у тому, що немає двох повністю подібних реакцій на дві подібні дії. Є загальні ланки в реакції, але є і відмінності. Прояви впливу високоенергетичних джерел на атмосферу та геокосмос залежать від положення в циклі сонячної активності, сезону, часу доби, місця спостереження, а також від засобів спостереження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У дисертації наведено результати досліджень, виконаних автором самостійно, або з його науковим консультантом, протягом 1996–2020 рр. відповідно до науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики

Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Основними з них є такі.

1. Дослідження збурень середньоширотної іоносфери (1997–1999 рр.), номер держреєстрації 0197U018347 (науковий керівник).

2. Дослідження впливу потужних джерел збурень на атмосферно-іоносферні електродинамічні зв'язки (2000–2002 рр.), номер держреєстрації 0100U003336 (науковий керівник).

3. Дослідження динаміки і електродинаміки мезосфери, нижньої термосфери та іоносфери (2003–2005 рр.), номер держреєстрації 0103U004239 (науковий керівник).

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

5. Дослідження електродинаміки електрично активної середньої атмосфери (2006–2008 рр.), номер держреєстрації 0106U001551 (науковий керівник).

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

7. Просторово-часова структура збурень в електрично активній мезосфері (2009–2011 рр.), номер держреєстрації 0109U000534 (науковий керівник).

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

9. Мезосфера як новий активний елемент у глобальному атмосферному електричному ланцюзі (2012–2014 рр.), номер держреєстрації 0112U001064 (науковий керівник).

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

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

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

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

14. Розробка глобальної напівемпіричної моделі електронної концентрації іоносфери поточного часу (2017–2019 рр.), номер держреєстрації 0117U004868 (науковий керівник).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження основних фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, що супроводжували вплив на навколоземне середовище падіння Челябінського та Камчатського метеороїдів,

геокоосмічних бур, тайфунів, землетрусів, стартів великих ракет, польотів космічних апаратів і потужного наносекундного радіовипромінювання, важливих для поширення радіохвиль і функціонування радіоканалів.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язуються наступні задачі:

- Розвиток основ системної парадигми стосовно об'єктів ЗАІМ і СМСМІАЗ.
- Теоретичне дослідження основних фізичних процесів, викликаних падінням Челябінського метеороїда.
- Експериментальні дослідження основних фізичних процесів, викликаних падінням Камчатського метеороїда.
- Експериментальні дослідження динамічних процесів у мезосфері.
- Експериментальні дослідження впливу землетрусів на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.
- Експериментальні дослідження впливу потужних тайфунів на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.
- Експериментальні дослідження впливу геокоосмічних бур на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.
- Експериментальні дослідження впливу стартів ракет і польотів космічних апаратів на характеристики радіосигналів і параметри іоносфери.

Об'єктом дослідження є верхня атмосфера та геокоосмос.

Предметом дослідження є фізичні процеси в атмосферно-космічних радіоканалах, зумовлені впливом на середовище високоенергетичними джерелами.

Методи дослідження. У дисертації для експериментальних досліджень використовуються відомі радіофізичні методи дистанційного радіозондування – метод часткових відбиттів, метод доплерівського 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 результатів.

1. Проведено теоретичні дослідження та виконано числові оцінки основних параметрів фізичних процесів у системі ЗАІМ, викликаних падінням найбільшого за останні 100 років космічного тіла – Челябінського метеороїда. Визначено кількісні значення параметрів збурень, що виникли в системі ЗАІМ.

2. За допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери виявлені іоносферні збурення, що послідували за падінням Камчатського метеороїда масою 1.41 кт і розміром близько 9.4 м. Знайдено три групи збурень: що мали удавані швидкості поширення 1.9–2.9 км/с, 620–770 м/с та 310–500 м/с.

3. Вперше для українського регіону наведені систематичні спостереження за динамікою мезосфери за допомогою середньочастотного (частота ~ 2 МГц) радара і встановлені 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 в діапазоні періодів $10\text{--}120$ хв не перевищувала 8 м/с.

4. 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 сейсмічна активність супроводжується аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше $1\text{--}2$ тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним уширенням доплерівських спектрів (ДС). Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період $4\text{--}5$ хв) і в діапазоні $15\text{--}30$ хв, які генеруються поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу. За оцінками, амплітуда відносних збурень концентрації електронів у полі інфразвукової й атмосферної гравітаційної хвиль була $\sim 0.15\text{--}0.31\%$ і $7\text{--}8\%$ відповідно. Тривалість цугів коливань була в межах $24\text{--}55$ хв. Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень, які відповідають швидкостям сейсмічних і акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі.

5. Вперше за допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери виявлена реакція іоносфери на дію супертайфунів. Дія супертайфуну супроводжувалася підсиленням хвильової активності в атмосфері. При цьому генерувалися хвильові процеси з періодом від $12\text{--}15$ до $60\text{--}150$ хв. Підтверджено, що взаємодія в системі атмосфера – верхня атмосфера – іоносфера здійснювалася за допомогою атмосферних гравітаційних хвиль. Найбільший вплив на іоносферу справлявся в ті дні, коли супертайфун мав максимальну енергетику. Під дією хвильових процесів висота відбиття радіохвиль коливалася в межах $\pm(30\text{--}50)$ км. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів в F-області іоносфери змінювалася від $10\text{--}12\%$ для періодів ~ 20 хв до $30\text{--}60\%$, для періодів $\sim 60\text{--}120$ хв.

6. Встановлено, що під час геокосмічних бур характеристики радіохвиль в діапазоні частот $5\text{--}10$ МГц зазнають суттєвих збурень у всіх областях іоносфери. Вперше за допомогою багаточастотних багатотрасових (до 14 радіотрас довжиною $\sim 1\text{--}2$ тис. км) вимірювань виявлено, що геокосмічні бурі призводять до значного (до 1 Гц і більше) уширення доплерівських 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 $\sim 10\text{--}120$ хв.

7. Проведено багаторічні спостереження 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 $\sim 1\text{--}10$ тис. км) в атмосфері

та геокосмосі виникають реєстровані збурення, що поширюються у вигляді акустико-гравітаційних хвиль (швидкість 0.3–0.8 км/с), повільних МГД хвиль (швидкість ~1–10 км/с) і гіротропних хвиль (швидкість ~10–100 км/с). Тривалість збурень становить від десятків хвилин до декількох годин.

Практичне значення отриманих результатів полягає в отриманні кількісних значень збурень характеристик радіохвиль і параметрів атмосферно-іоносферного радіоканалу під дією високоенергетичних джерел (падінь метеороїдів, геокоsmічних бур, тайфунів і землетрусів, а також стартів і польотів потужних космічних апаратів), що визначають ефективність функціонування систем телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування.

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

Особистий внесок здобувача полягає у постановці низки задач, таких як дослідження іоносферних ефектів великих метеороїдів, землетрусів, тайфунів, геокоsmічних бур та стартів і польотів потужних космічних апаратів. Дисертант брав участь у аналізі космічної погоди, стану іоносфери, визначенні іоносферних ефектів високоенергетичних джерел, у пошуку досліджуваних ефектів, обговорюванні результатів експериментальних і теоретичних досліджень і формулюванні основних результатів. У кожній статті та тезах писав відповідні розділи.

Апробація результатів дисертації. Представлені у роботі результати доповідалися на таких міжнародних і національних конференціях:

- Международный семинар «Физика космической плазмы» (Киев, Украина, 6–10 июня 1993).
- IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (Baltimore, Maryland, 21 – 26 July 1996).
- International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (Kharkov, Ukraine, 2-5 June 1998, 2000).
- Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere (Suzdal, Russian Federation, 26 – 29 August 1998).
- 24th General Assembly of the European Geophysical Society (The Hague, Netherlands, 19–23 April 1999).
- XXVIth General Assembly of the URSI (Toronto, Canada, 13–21 August 1999).
- XIX Всероссийская конференция «Распространение радиоволн» (Казань, Российская Федерация, 22–25 июня 1999)
- «Астрономия в Украине–2000 и перспектива» (Київ, Україна, 5–8 июня 2000).
- XXVII General Assembly of the international union of Radio Science (Maastricht, Netherlands, 17 – 24 August 2002).

- XX Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2–4 июля 2002).
- Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству (Владимир, Российская Федерация, 22–26 сентября 2003).
- Международная конференция, посвященная 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ (Томск, Российская Федерация, 29 сентября – 4 октября 2003).
- Міжнародна наукова конференція. Каразінські природознавчі студії. (Харків, Україна, 14–16 червня 2004).
- Международная конференция по физике солнечно-земных связей (Иркутск, Российская Федерация, 20 – 25 сентября 2004).
- 35th COSPAR Scientific Assembly. (Paris, France, 18–25 July 2004).
- Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям (Кацивели, Крым, Украина, 2002; Кацивели, Крым, 15 – 21 сентября 2003; Понизовка, Крым, Украина, 2004).
- 16th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 11–15 September 2006).
- Characterising the Ionosphere Meeting (Neuilly-sur-Seine, France, 12–16 June 2006).
- 16th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 11–15 September 2006).
- 36th COSPAR Scientific Assembly (Beijing, China, 16–23 July 2006).
- Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science “First Results from the International Heliophysical Year 2007”. Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences (Sozopol, Bulgaria, 02 – 06 June 2008).
- Українська конференція з космічних досліджень (Крым, Евпатория, Украина, 1 – 7 сентября 2008; Odesa, Ukraine, 24 – 28 August 2015; Odesa, Ukraine, 21–25 August 2017; Київ, Україна, 17 – 20 вересня 2018).
- 2009 19th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 14–18 September 2009).
- Первая украинская конференция «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства» (Харьков, Украина, 25 – 27 сентября 2012).
- 9-th International Conference “Problems of Geocosmos” (St. Petersburg, Petrodvorets, Russian Federation, October 8 – 12 2012).
- 23rd Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Sevastopol, Crimea, Ukraine, 9—13 September 2013).
- IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT) (Odessa, Ukraine, 16–20 September 2013).
- I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры (Харьков, Украина, 24 – 25 октября 2013).
- Міжнародна конференція в рамках IX Всеукраїнського фестивалю науки присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київського національного

університету імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всехсвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна (Київ, Україна, 25–29 травня 2015).

– Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених». (Умань, Україна, 23–24 травня 2018).

– Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 24–27 May 2016, 29 May– 01 June 2018; 28 May–31 May 2019; 27 – 29 May 2020).

– XVII International Young Scientists' Conference on Applied Physics (Kyiv, Ukraine, 23–27 May 2017).

– XIII International Conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, Ukraine, 24–27 October 2017).

– 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (Odessa, Ukraine, 4 – 7 September 2018).

– 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (Lviv, Ukraine 02–06 July 2019).

– Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science (Kyiv, Ukraine, 26–30 August 2019).

– 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week: 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (Kharkiv, Ukraine, 22–27 June 2020).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані у 111 наукових працях, серед яких 9 – статті у наукових фахових виданнях України, 14 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (з них 10 – статті у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 15 – статті, що додатково відображають зміст дисертації, 73 – матеріали доповідей на конференціях (зокрема 16 тез, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 379 сторінок, основного тексту – 269 сторінок. Робота ілюстрована 86 рисунками, 31 таблицею. Список використаних джерел містить 391 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано вибір теми дослідження, сформульовані мета та завдання проведених досліджень, визначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, перелічені наукові форуми, де відбулася їхня апробація, а також описаний особистий внесок здобувача.

У розділі 1 наведено аналітичний огляд наукової літератури за проблематикою роботи. Описані сучасні уявлення про процеси та взаємозв'язки у таких системах, як СМСМІАЗ та ЗАІМ, а також синергетичний вплив на них варіацій як атмосферної, так і космічної погоди. Вказано на невирішені дотепер

проблеми. Приділено увагу оцінкам енергетики природних і техногенних процесів у цих системах. Детально розглянуті сучасні уявлення про фізичні процеси в атмосфері та геокосмосі, викликані землетрусами, тайфунами, геокосмічними бурями та метеороїдами, зокрема Челябінським космічним тілом, впливом космічної діяльності. Коротко описана експериментальна база досліджень, переважно зосереджена у Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

У розділі 2 сформульовані основні положення системної парадигми, які зводяться до наступного:

- системи СМСМІАЗ і ЗАІМ утворюють єдину природну систему, яка описує роль потоків енергії, речовини та випромінювання «зверху».
- Земля та навколоземне середовище утворюють єдину природну систему. Вона складається з підсистем – внутрішніх і зовнішніх геосфер. Підсистеми тектоносфера, атмосфера, іоносфера та магнітосфера, а також океан, атмосфера, іоносфера та магнітосфера формують системи ТАІМ і ОАІМ, а разом – систему ЗАІМ. Система ЗАІМ описує роль потоків енергії, речовини та випромінювання «знизу».
- між складовими частинами систем СМСМІАЗ і ЗАІМ мають місце різноманітні зв'язки (прямі та зворотні, позитивні та негативні, їх комбінації).
- системи СМСМІАЗ і ЗАІМ – відкриті системи. У них надходить випромінювання, речовина, енергія й ентропія як «знизу», так і «зверху».
- системи СМСМІАЗ і ЗАІМ – динамічні системи. Їх узагальнені параметри змінюються в часі та просторі. Тому системи описуються диференціальними рівняннями в частинних похідних із початковими та граничними умовами, заданими з кінцевою похибкою.
- системи СМСМІАЗ і ЗАІМ – нелінійні системи, що є результатом протікання високоенергетичних процесів. Початкові співвідношення, що описують відповідні фізико-хімічні процеси, є нелінійними. Це призводить до біфуркацій, нестійкості систем, виникненню хаотичних режимів, самоорганізації, тригерності, появи впорядкованих структур і т. п.
- системи СМСМІАЗ і ЗАІМ мають здатність до саморозвитку, ускладнення та самоорганізації за рахунок використання зовнішніх джерел енергії, випромінювання, маси і т. п.

Наведено зведені енергетичні характеристики потоків «зверху» і «знизу» між підсистемами вказаних систем, а також параметри фізичних носіїв цих потоків – хвильових збурень гідродинамічної й електромагнітної природи та висипань заряджених частинок.

У розділі 3 описано фізичні процеси в атмосфері й іоносфері, викликані впливом високоенергетичних джерел різної природи. До таких джерел збурень в атмосферно-іоносферних радіоканалах відносяться, зокрема, падіння великих космічних тіл, динамічні процеси у мезосфері та дія нестаціонарного потужного радіовипромінювання різних частотних діапазонів.

Прикладом недавніх падінь космічних тіл є проліт Челябінського метеороїда 15 лютого 2013 р., який являв собою найбільш небезпечний удар

космічного тіла за останнє сторіччя, а також Камчатського метеороїда 18 грудня 2018 р.

В підрозділі 3.2 проведено фізичне моделювання процесів в атмосфері й іоносфері, які були викликані падінням Челябінського метеороїда. Проліт і вибух Челябінського космічного тіла викликав у всіх геооболонках помітні (або сильні) збурення. За результатами моделювання висота вибуху Челябінського тіла була близька до 25 км. Надлишок тиску на поверхні Землі поблизу епіцентру вибуху склав одиниці кілопаскалей. Цього виявилось достатньо для того, щоб викликати руйнування елементів конструкцій споруд на площі близько 6 тис. км². Енергія та потужність світлового спалаху склала близько 375 ТДж та 313 ТВт відповідно. Енергія спалаху є на 1 – 2 порядки меншою енергії, при якій виникає займання матеріалів і пожежі. Енергія вибухової хвилі й акустичних коливань була близька до 560 і 19 ТДж. Магнітуда землетрусу, спричиненого вибухом Челябінського тіла, не перевищувала 3 – 4. Відносні збурення тиску повітря та концентрації електронів на іоносферних висотах над епіцентром вибуху досягали сотень процентів. Збурення геомагнітного поля поблизу вибуху Челябінського тіла складало 0.5–1 нТл. Помітні збурення від вибуху поширювалися по горизонталі на відстані в кілька тисяч кілометрів. Космічні тіла, подібні Челябінському суперболіду, падають на Землю у середньому з частотою один раз на 65 років.

В підрозділі 3.3 за часовими варіаціями доплерівських спектрів і відносних амплітуд сигналів похилого зондування іоносфери на 6 радіотрасах довжиною від 950 км до 1875 км із частотами від 5 до 9.830 МГц у північно-східному регіоні Китаю виявлені іоносферні збурення, що послідували за прольотом і вибухом 18 грудня 2018 р. Камчатського метеороїда з початковою кінетичною енергією 173 кт ТНТ. Збурення мали 2 – 3 групи часів запізнення. Залежно від відстані між місцем вибуху метеороїда й областю середини радіотраси ці часи змінювалися в межах 24–43 хв, 93–136 хв і 141–183 хв. Їм відповідали удавані швидкості 1.9–2.9 км/с, 620–770 м/с і 310 – 500 м/с. Збурення, що мали удавані швидкості у сотні метрів за секунду, а також періоди близько 10–15 хв, переносяться атмосферними гравітаційними хвилями. Збурення, яким відповідає удавана швидкість 1.9–2.9 км/с, могли бути обумовлені іоносферними процесами, викликаними сейсмічною хвилею від вибуху метеороїда.

Приклад варіацій характеристик сигналу на радіотрасі Chiba/Nagara (Японія) – Harbin (КНР) наведений на рис. 1. Приблизно з 22:00 UT до 23:30 UT 18 грудня 2018 р. доплерівські спектри займали діапазон частот від 0 до 1.3 Гц, мала місце багатопроменевість. Відносна амплітуда сигналу сильно флюктувала. Нове розширення доплерівських спектрів відмічалось з 00:12 UT до 01:00 UT, з 01:21 UT до 02:13 UT і з 02:53 UT до 03:40 UT 19 грудня 2018 р. Відносна амплітуда сигналу помітно змінювалася приблизно з 00:00 UT до 00:25 UT і з 01:27 UT до 02:07 UT 19 грудня 2018 р. Крім того, в інтервалі часу 00:12 – 01:00 UT основна мода варіювала за квазіперіодичним законом з амплітудою доплерівського зміщення частоти (ДЗЧ) $f_{da} \approx 0.20 - 0.25$ Гц і квазіперіодом $T \approx 15$ хв. Приблизно такий же квазіперіод спостерігався і після 01:30 UT, однак $f_{da} \approx 0.15$ Гц.

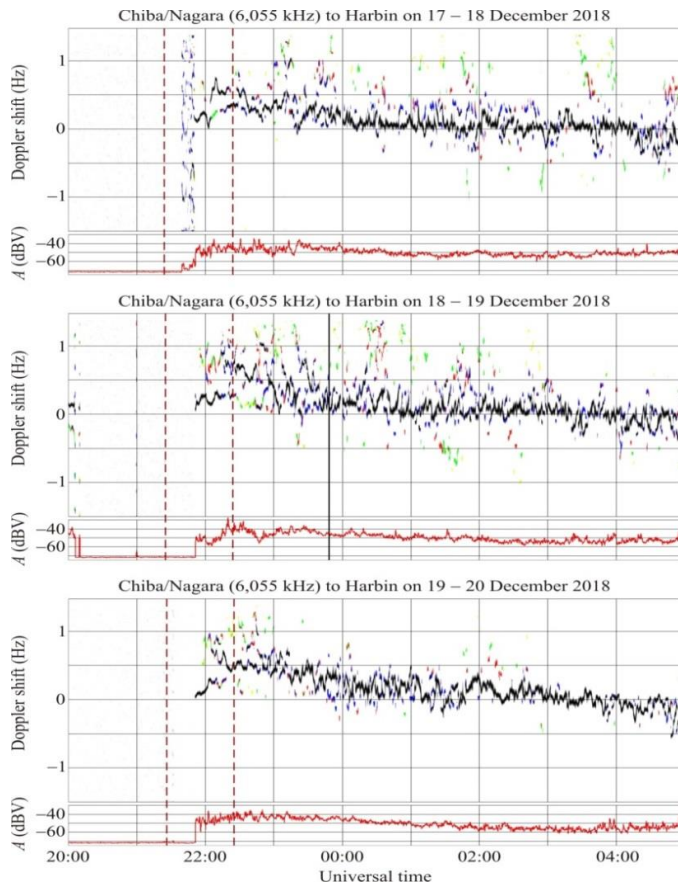


Рис. 1 Часова залежність доплерівського спектру та відносної амплітуди сигналу на радіотрасі Chiba – Harbin 17–20 грудня 2018 р. (панелі згори донизу відповідно). Частота радіохвилі 6055 кГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії 1, 0.8, 0.6, 0.4 та 0.2 у відносному масштабі відповідно. Товста вертикальна лінія на середній панелі відповідає моменту вибуху метеороїда. Пунктирні лінії відповідають моментам сходу Сонця на висотах 100 і 0 км. Амплітуди сигналу з виходу радіоприймача у децибелах відносно рівня 1 В показані під графіками доплерівського спектру на кожній панелі

сезони у 2000–2004 рр. Для визначення параметрів динамічних процесів відбиралися дані, для яких відношення сигнал/завада за потужністю перевищувало 5 дБ, що в основному мало місце в денний час на інтервалі висот 80–95 км. Дослідження параметрів вітру проводилося методом рознесеного

У контрольні дні після 00:00 UT 19 грудня 2018 р. розширення доплерівських спектрів було помітно меншим (не перевищувало 0.5 Гц). Менш чітко виділялись, або були відсутні взагалі, квазіперіодичні коливання. Менше флуктуувала й відносна амплітуда сигналу.

Підрозділ 3.4 присвячено дослідженню динамічних процесів на мезосферних висотах, які проводяться у світі протягом досить тривалого часу з використанням як наземних, так і супутникових зондуючих установок. В даний час функціонує мережа радарів, які здійснюють безперервний моніторинг мезосфери та нижньої термосфери. Вивчалися залежності параметрів переважаючих вітрів, планетарних, припливних і акустико-гравітаційних хвиль, турбулентних рухів від часу доби, сезону, географічного положення пункту спостереження, рівня сонячної та магнітної активності та ін. Однак побудова повної картини динамічних процесів ще далека від свого завершення.

Нами спостереження динамічних процесів проводилися за допомогою єдиного в Центральній Європі радара часткових відбиттів (ЧВ), розташованого в Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Тривалі вимірювання огинаючих звичайної та незвичайної складових ЧВ-сигналів і радіозавад проводилися в різні

прийому з малою базою (110–160 м). Для отримання параметрів неоднорідностей електронної концентрації, вектора спрямованої швидкості вітру, а також статистичних характеристик хаотичної швидкості використовувався модифікований метод повного кореляційного аналізу. На рис. 2 представлені приклади часових залежностей швидкості вітру V , його напрямку Φ і стандартного відхилення σ_{V_s} хаотичної швидкості в мезосфері для різних сезонів. Кут Φ відраховувався за годинниковою стрілкою від напрямку на північ.

Видно, що вектор швидкості вітру зазнавав як аперіодичних, так і квазіперіодичних варіацій протягом часу спостереження (його величина V змінювалася в 2–5 разів, а напрямок Φ – до 180°). Абсолютне значення вектора швидкості 3 жовтня 2002 р. в ранкові години (6–8 год UT) становило 20–30 м/с. Потім воно зменшилося до 5–10 м/с у 11–13 год UT, після чого знову збільшилося до 15–20 м/с. Швидкість вітру в цей день мала південно-східний напрямок о 6–8 год та 13–14 год UT і була спрямована на південний захід в інші

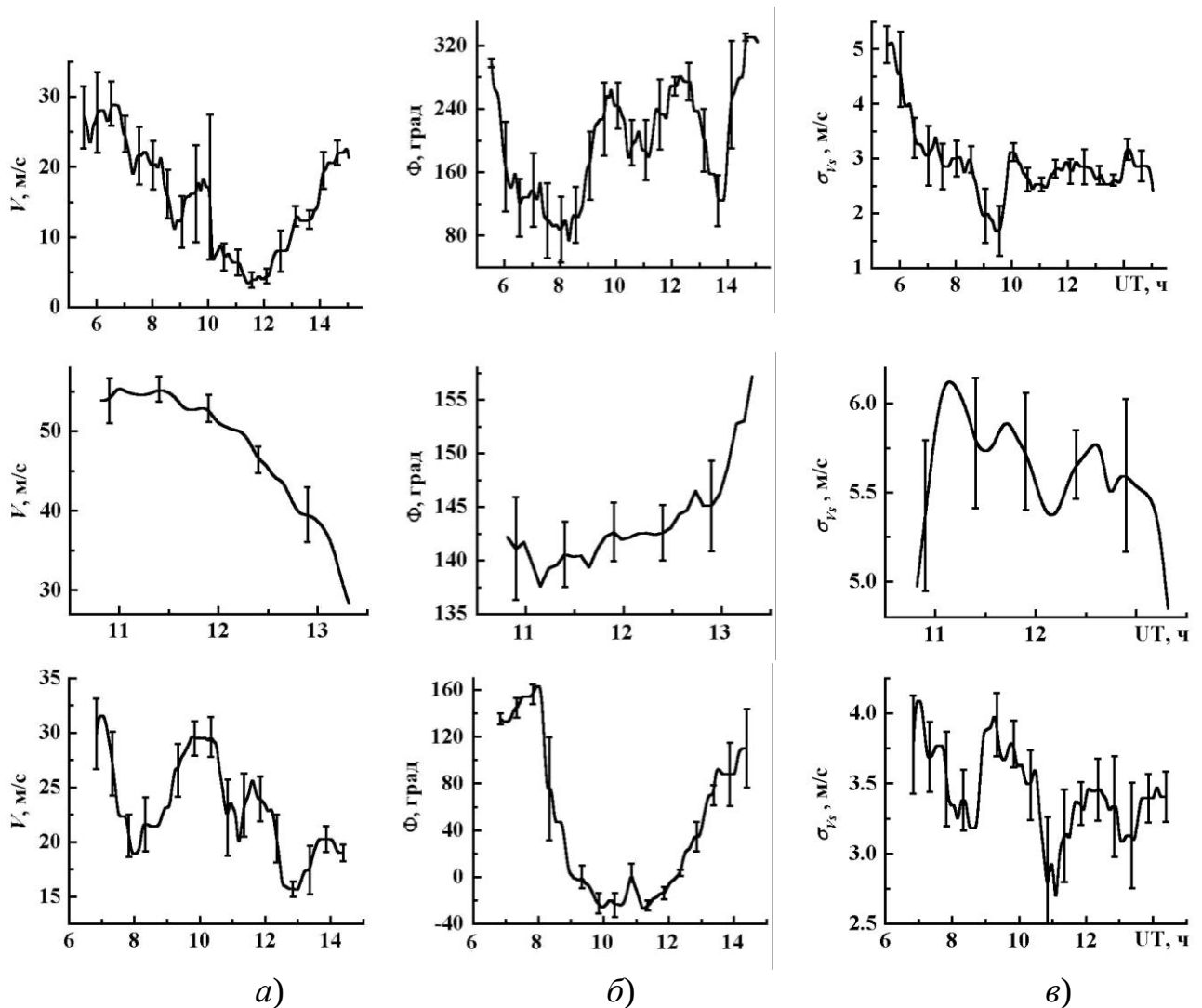


Рис. 2 Приклади часових залежностей величини V (a) і напрямку Φ (б) швидкості вітру, а також стандартного відхилення σ_{V_s} (в) хаотичної швидкості в мезосфері для 3 жовтня 2002 р. (верхні панелі), 9 грудня 2003 р. (середні панелі) і 9 квітня 2003 р. (нижні панелі). Індекс геомагнітної активності $K_p = 3-5$

години спостереження. Величина σ_{V_s} о 6 год UT становила 4–5 м/с, після чого відбулося її зменшення до 2–3 м/с. За час спостереження 9 грудня 2003 р. значення V зменшилося від 60 до 30 м/с. При цьому напрямок швидкості був південно-східним і змінився незначно – менш ніж на 20° . Значення σ_{V_s} у досліджуваній день склало 5–6 м/с. Нарешті, 9 квітня 2002 р. величина швидкості варіювала за квазіперіодичним законом від 15 до 30 м/с. Вектор швидкості при зміні часу від 7 до 12 год UT змінив напрямок з південно-східного на близький до північного, після чого до 14 год UT його напрямок повернувся до початкового. Стандартне відхилення хаотичної швидкості склало 3–4 м/с.

Вивчено добові та сезонні залежності величини, напрямку, зональної та меридіональної складових вектора спрямованої швидкості в мезосфері. Показано, що його значення зазвичай становить 10–80 м/с при абсолютній похибці 3–7 м/с. Виявлені значні варіації модуля швидкості (в 2–5 разів) та її напрямку (на 140 – 180°), викликані, ймовірно, проходженням внутрішніх гравітаційних хвиль і їхніх гармонік. У дні, близькі до весняного й осіннього рівнодення, виявлено підсилення цих варіацій, пов'язане з глобальною перебудовою циркуляції атмосфери на мезосферних висотах, що сприяє підсиленню інтенсивності атмосферних хвиль. Досліджені параметри турбулентної швидкості для різних часів спостереження. Показано, що величина її стандартного відхилення на висотах 85–95 км лежить в межах 2–6 м/с (абсолютна похибка склала 0.3–0.8 м/с). Підтверджений взаємозв'язок характеристик спрямованого та турбулентного руху (коефіцієнт кореляції зазвичай становив 0.5–0.8). Описано причини завищення реальних значень стандартного відхилення хаотичної швидкості при їх визначенні методом повного кореляційного аналізу. Виявлено хвильові варіації зональної та меридіональної складових вектора швидкості вітру з періодами 10–120 хв. Показано, що амплітуди цих коливань зазвичай не перевищують 8 м/с. Варіації амплітуд коливань викликані дисипацією та нелінійною взаємодією атмосферних хвиль з різноманітними періодами. Проаналізовані можливі джерела генерації хвиль і механізми проникнення останніх на мезосферні висоти. Підтверджений динамічний взаємозв'язок підсистем у системах ЗАІМ і СМСМАЗ через хвильові процеси.

На параметри атмосферно-іоносферних радіоканалів суттєво впливає штучна іонізація, яка може бути створена у мезосфері за допомогою потужних радіоімпульсів (підрозділ 3.5). При цьому може бути створена велика кількість нових радіоканалів. Перспективним напрямком для створення штучної іонізації є пробій мезосфери наносекундними радіоімпульсами, який призводить до нагріву електронів і лавиноподібного зростання концентрації електронів. В результаті проведених детальних розрахунків нагріву електронів та додаткової іонізації атмосферного газу на висотах 30–100 км отримано, що нагрів електронів надкоротким радіоімпульсом на висотах 30–60 км суттєвий вже при $\tau = 1$ нс та $P = 1$ ГВт. Пробій атмосфери на висотах 30–60 км наступає вже при $P_{\min} = 0.3$ – 1.3 ГВт і $f \approx 10$ ГГц. При зменшенні частоти до 1 ГГц $P_{\min}$ збільшується до 1–

30 ГВт. Для оптимізації процесу пробую атмосфери на висотах 30–60 км радіоімпульсами $P_{\min}$ необхідно збільшити приблизно в 25–64 рази.

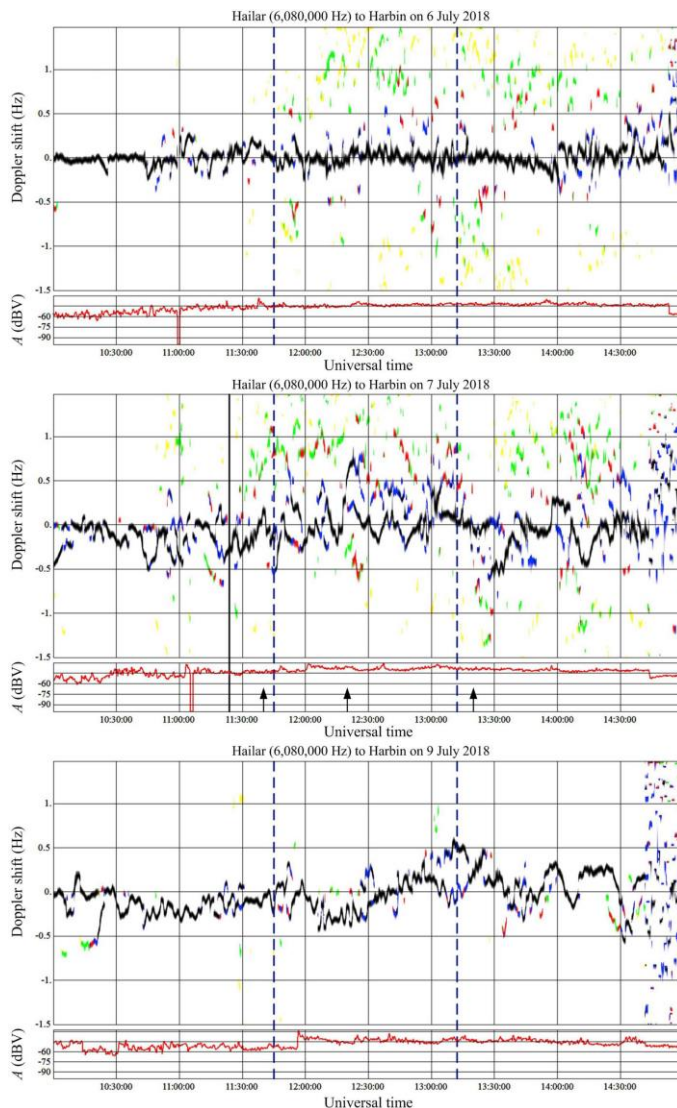


Рис. 3 Часові варіації доплерівських спектрів та амплітуди сигналів уздовж китайської радіотраси Hailar – Harbin 6, 7 та 9 липня 2019 р. (панелі зверху донизу відповідно). Частота радіохвилі 6080 кГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії 1, 0.8, 0.6, 0.4 та 0.2 у відносному масштабі відповідно. Штрихові лінії позначають захід Сонця на висотах 0 і 100 км. Товста вертикальна лінія показує початок іоносферної бурі. На кожній панелі під доплерівським спектром показана амплітуда сигналу A на виході радіоприймача в децибелах відносно 1 В

Розділ 4 присвячено дослідженню сейсмо-іоносферних процесів і варіацій характеристик радіохвиль у діапазоні частот 5–10 МГц, викликаних землетрусами помірної сили. Землетруси являють собою систематично, хоч і випадково, діюче джерело енерговиділення, що призводить до активізації взаємодії підсистем у системі тектоносфера – атмосфера – іоносфера – магнітосфера.

У підрозділі 4.2, продемонстрована можливість спостереження на відстанях ~ 1 –2 тис. км динамічних процесів у іоносфері, супутніх землетрусу помірної сили ($M \approx 5.9$). Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше 1–2 тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів.

Для прикладу, на рис. 3 наведені варіації ДС і амплітуди радіохвилі китайської радіостанції частотою 6080 кГц для 6, 7 і 9 липня 2018 р. Довжина радіотраси 646 км, а відстань від епіцентру землетрусу до середини траси – 2000 км.

Видно, що в день землетрусу варіації суттєво відрізняються від таких у контрольні дні. По-перше, чітко спостерігається декілька мод з

амплітудою, що поступово зменшується. По-друге, у цей день яскраво виражені квазіперіодичні процеси. Перший квазіперіодичний процес спостерігався в інтервалі часу 11:41–13:05 UT. При цьому для основної моди $f_{da} \approx 0.25\text{--}0.30$ Гц, $T \approx 15$ хв, час затримки реакції 17 хв.

Приблизно о 13:20 UT розширення доплерівських спектрів у сторону позитивних значень змінилося розширенням у бік негативних значень. При цьому час затримки склав 114 хв.

О 13:50 UT (час затримки 144 хв) виникло ще одне квазіперіодичне коливання з $T \approx 20$ хв і $f_{da} \approx 0.4$ Гц. Після 14:20 UT спостерігалось зменшення амплітуди та періоду коливань.

Таким чином, виявлено модулюючі концентрацію електронів у іоносфері хвильові збурення як у діапазоні інфразвукових коливань з періодом 4–5 хв, генеровані поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу, так і з періодом 15–30 хв, які могли бути згенеровані поблизу епіцентру та поширювалися від нього у вигляді атмосферних гравітаційних хвиль. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів для перших збурень становила 4.5–9 %, тривалість цуга коливань близько 24–55 хв, а швидкість поширення хвильових збурень була близько 3 км/с. Відносна амплітуда більш довгоперіодних квазіперіодичних збурень концентрації електронів становила 30–55 %. Тривалість хвильового цуга досягала приблизно 100 хв, швидкість – близько 0.3 км/с.

В підрозділі 4.3 проведено аналіз результатів багаточастотного багатотрасового похилого зондування іоносфери та продемонстровано можливість спостереження на відстанях $\sim 1\text{--}2$ тис. км динамічних процесів у іоносфері, супутніх землетрусу помірної сили ($M \approx 5.9$). Сейсмічна активність 7 липня 2018 р. в Японії супроводжувалася аперіодичними процесами, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів. Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період 4–5 хв), згенеровані поверхневою хвилею Релея, та у вигляді атмосферних гравітаційних хвиль (період 15–30 хв), модулюючих концентрацію електронів у іоносфері. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів при цьому становила 4.5–9 та 30–55 %, тривалість цугів коливань – 24–55 та 100 хв, і швидкості – 3 та 0.3 км/с відповідно.

У день помірного ($M \approx 6.6$) землетрусу в Японії 5 вересня 2018 р. і в контрольні дні виявлено, що характер варіацій ДС, ДЗЧ основної моди й амплітуди сигналу в день землетрусу та в контрольні дні помітно відрізнявся. Виявлено дві характерні удавані швидкості поширення збурень: 3.3 км/с і близько 500 м/с. Перша швидкість близька до швидкості сейсмічних хвиль, а друга – до швидкості акустико-гравітаційних хвиль в іоносфері Землі. За оцінками, амплітуда відносних збурень концентрації електронів у полі інфразвукової й атмосферної гравітаційної хвиль була $\sim 0.15\text{--}0.31\%$ і 7–8% відповідно.

На відстанях 1–2 тис. км від епіцентру помірного ($M = 6.0$) землетрусу в Японії 11 квітня 2019 р. виявлена реакція іоносфери на сейсмічну подію. Землетрус супроводжувався розширенням доплерівських спектрів на 1–1.5 Гц

в діапазоні частот 5–9.8 МГц, генерацією АГХ, що мають швидкість 0.5–1 км/с і період 8–20 хв, і генерацією інфразвуку з періодом 2–5 хв, що мають швидкість 0.3–0.4 км/с. Відносні збурення концентрації електронів складали ~1–10%.

У розділі 5 вивчені фізичні процеси в геокосмосі, які супроводжували вплив найсильнішого за останні 60 років супертайфуну Hagibis (номер 201919), який існував з 5 по 13 жовтня 2019 р. в Азійсько-Тихоокеанському регіоні. Тайфуни належать до потужних атмосферних процесів, які виникають в системі океан – суша – атмосфера та можуть відчутно впливати на всю систему ЗАІМ, а отже і на атмосферно-космічні радіоканали.

Аналіз стану космічної погоди показав, що іоносферні умови були сприятливими для пошуку реакції навколишнього середовища на дію тайфуну.

Супертайфун Hagibis ближче за все підійшов до Японії та радіотрас зондування у північно-східному регіоні Китаю 12 і 13 жовтня 2019 р. Однак, до цього часу сила супертайфуну значно зменшилась: дефіцит тиску не перевищував 20–40 гПа, швидкість вітру в ньому складала 90–120 км/год або 20–33 м/с. З цієї причини супертайфун не міг істотно вплинути на іоносферу.

Найбільші варіації ДС на всіх радіотрасах спостерігались 9 жовтня 2019 р. У сусідні дні 8 і 10 жовтня 2019 р. вони були дещо меншими. Протягом 8–10 жовтня 2019 р. супертайфун мав найбільшу енергетику: дефіцит тиску складав біля 95 гПа, а швидкість вітру – 250–260 км/год (або 69–72 м/с). Відстань від супертайфуну 9 жовтня 2019 р. до середини радіотрас складала ~2500–3000 км. Важливо, що подібні варіації у контрольні дні 6, 7, 11, 12 та 13 жовтня 2019 р. відсутні або були значно меншими, ніж 8 або 10 жовтня 2019 р., а особливо 9 жовтня 2019 р.

Для прикладу, на рис. 4 наведені варіації радіосигналу з частотою 6.015 МГц на радіотрасі Hwaseong (Республіка Корея) – Harbin (КНР) довжиною 950 км.

В денний час в усі дні $f_d \approx 0$ Гц, $A \approx -45$ дБВ. У вечірній час ДЗЧ поступово зменшувалося від 0 Гц до $-(0.3-0.4)$ Гц. ДС дещо розширювались. В нічний час протягом усіх днів варіації ДЗЧ були значними: $f_{da} \approx 0.2-0.4$ Гц. Зазвичай ДЗЧ змінювалось квазіперіодично з $T \approx 20 - 80$ хв і $f_{da} \approx 0.1-0.3$ Гц відповідно. Найбільші варіації ДЗЧ спостерігались 7, 8, 9, 11 і 12 жовтня 2019 р. 12 жовтня 2019 р. також реєструвались коливання з $T \approx 15$ хв і $f_{da} \approx 0.05 - 0.10$ Гц. Найменші варіації ДЗЧ ($\sim 0.1 - 0.2$ Гц) відзначались 13 жовтня 2019 р. Найбільші варіації $A(t)$ (до 30 дБВ) у нічний час мали місце 10 і 11 жовтня 2019 р.

Дія супертайфуну супроводжувалась підсиленням хвильової активності в атмосфері. При цьому генерувались хвильові процеси з періодом від 2 до 7 хв і від 12–15 до 60–150 хв. Найбільший вплив на іоносферу виявлявся в ті дні, коли супертайфун мав максимальну енергетику (8, 10 і особливо 9 жовтня 2019 р.). При цьому супертайфун знаходився на відстані ~2500 – 3000 км від середини радіотрас похилого зондування.

Під дією хвильових процесів 9 жовтня 2019 р. висота відбиття радіохвиль коливалась в межах (від $\pm 30-50$ км до $\pm 60-90$ км). Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів у F-області іоносфери

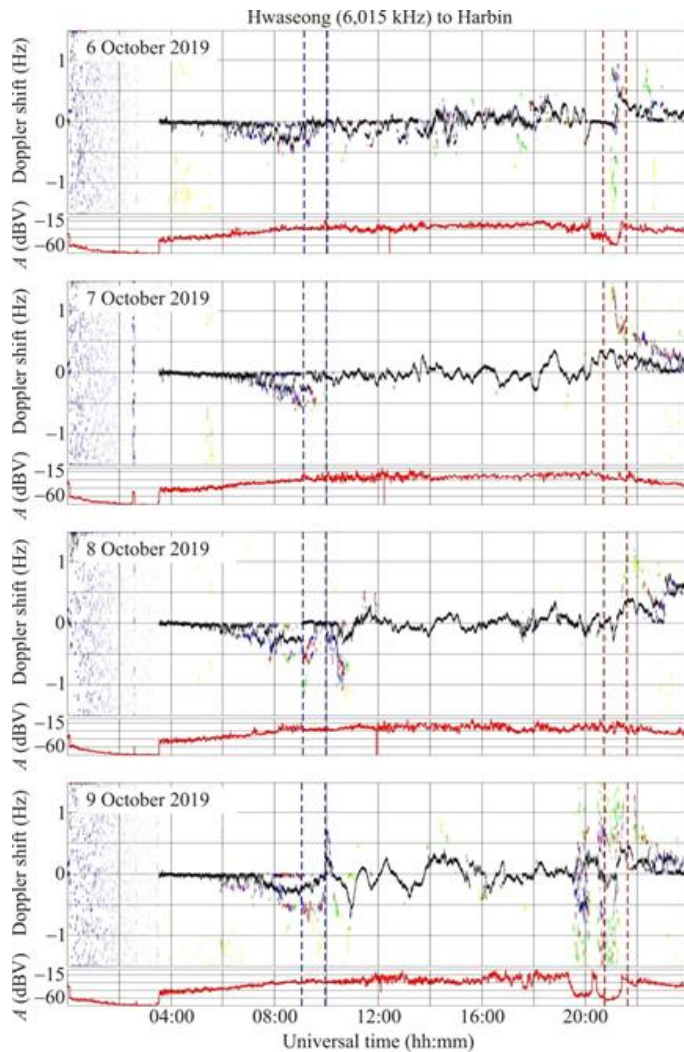


Рис. 4 Часові варіації доплерівських спектрів і амплітуд сигналів уздовж радіотраси Hwaseong–Harbin за 6–9 жовтня 2019 р. Частота радіохвиль становить 6.015 МГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії 1, 0.8, 0.6, 0.4 та 0.2 у відносному масштабі відповідно. Пунктирними лініями вказані заходи та сходи Сонця на висоті 0 і 100 км. Амплітуда сигналу A на виході приймача в децибелах відносно 1 В показана під доплерівським спектром на кожній панелі

флуктуацій H - і D -компонент геомагнітного поля у діапазоні періодів $T = 1\text{--}1000$ с (підрозділ 6.2). Ефекти у середній іоносфері досліджувалися за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу по-хилого зондування іоносфери (підрозділ 6.3). Ефекти у широкому діапазоні висот, які охоплювали середню та

змінювалась від 10–12 % для періодів ~ 20 хв до 30–60 % для періодів $\sim 60\text{--}120$ хв. В іоносфері були виявлені інфразвукові коливання. Період інфразвуку змінювався від 2 до 7 хв, залежно від висоти зондування. Відносна амплітуда квазіперіодичних коливань електронної концентрації була у діапазоні 0.2–0.4 %.

Таким чином, за допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери, розташованого у північно-східному регіоні Китаю, виявлено та досліджено реакцію іоносфери на дію супертайфуну Hagibis.

У розділі 6 розглянуті фізичні процеси у нижній, середній і зовнішній іоносфері, які супроводжують геокоосмічні бурі. Іоносферні, магнітні, атмосферні й електричні бурі є проявом геокоосмічної бурі. Їхні дослідження сприяють більш чіткому розумінню взаємодії між підсистемами в системі Сонце – Земля.

Для дослідження нижньої іоносфери використовувався метод часткових відбиттів (підрозділ 6.2). Магнітометр-флюксометр, розташований у Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна, забезпечував даними про рівень

зовніш-ню іоносферу, досліджувалися методом некогерентного розсі-яння (підрозділ 6.4).

Ефекти геокоосмічної бурі у нижній іоносфері розглянуті на прикладі найсильнішої геокоосмічної бурі 2004 р., яка тривала з 7 по 11 листопада. Аналіз часових варіацій електронної концентрації на висотах 73.5–82.5 км під час дуже сильної геокоосмічної бурі 7–11 листопада 2004 р. виявив збільшення її середніх значень (на 50–100%) та амплітуд її варіацій (у деяких сплесках в 3–5 разів) у магнітозбурені дні. Значення амплітуд хвильових збурень у відносних одиницях протягом бурі зазвичай становили 0.05–0.15, а під час другого магнітного збурення (10 листопада 2004 р.) спостерігалось невелике збільшення їх значень. Чіткого зв'язку між рівнем магнітної активності та параметрами хвильових збурень у нижній іоносфері не виявлено.

Зафіксовано значне (на порядок і більше) збільшення варіацій і стандартних відхилень горизонтальних складових магнітного поля в магнітозбурені періоди 7–14 листопада 2004 р. Спостерігались сплески $Pc5-6$ з амплітудами, що досягали 30 та 50 нТл для H - і D -компонент відповідно. Протягом деяких проміжків часу мав місце взаємозв'язок між пульсаціями $Pc5-6$ та короткочасними (5–15 хв) хвильовими збуреннями електронної концентрації нижньої іоносфери. Ця взаємодія може бути спричинена як стимуляцією магнітними пульсаціями квазіперіодичного середньоширотного висипання електронів з магнітосфери, так і генерацією $Pc5-6$ пульсацій і атмосферних гравітаційних хвиль в полярних районах і їх поширенням до середніх і більш низьких широт.

Ефекти геокоосмічної бурі в середній іоносфері над Китаєм розглянуті на прикладі бурі 14–15 травня 2019 р.

Магнітна буря 14 травня 2019 р. була однією з найсильніших у 2019 р. Очікувалося, що сильна магнітна буря буде супроводжуватися досить унікальною іоносферною бурею. Цим і пояснюється виявлений до неї інтерес.

Індекс геомагнітної активності K_p збільшувався до 5, 6.3 та 3 11 травня, 14 травня та 16 травня 2019 р. відповідно. З 03:00 і до 07:00 14 травня 2019 р. спостерігалось різке падіння D_{st} -індексу від -5 нТл до -65 нТл, що означає настання основної фази магнітної бурі. Фаза відновлення тривала з 07:00 14 травня 2019 р. до 08:00 15 травня 2019 р. Часові варіації параметру Акасофу ϵ_A , геомагнітного індексу K_p та екваторіального індексу D_{st} свідчили про те, що в додаток до магнітної бурі, основна фаза якої протікала з 03:00 до 07:00 UT 14 травня 2019 р., з 15:00 UT до 24:00 UT 14 травня 2019 р. відбувалася суббуря.

Для дослідження іоносферних ефектів цієї геокоосмічної бурі над Китаєм використовувався багаточастотний багатотрасовий програмно-апаратний комплекс похилого зондування іоносфери Харбінського інженерного університету. Для прикладу, на рис. 5 наведені варіації сигналу на радіотрасі довжиною 1610 км Chiba/Nagara (Японія) – Harbin (КНР). Радіостанція випромінює на частоті 6055 кГц з 00:00 UT до 15:00 UT. На відміну від контрольних діб, 14 травня 2019 р. з 05:30 UT до 06:30 UT значення $f_d(t)$ різко зменшувалися від 0 Гц до -1.2 Гц. Доплерівські спектри зазнавали розширення від -1.5 Гц до $+1.5$ Гц. Повторні різкі зменшення f_d спостерігалися близько 08:00

UT і 9:30 UT. Відзначалися квазіперіодичні варіації $f_d(t)$ з $T \approx 20$ хв і $f_{da} \approx 0.20$ – 0.25 Гц.

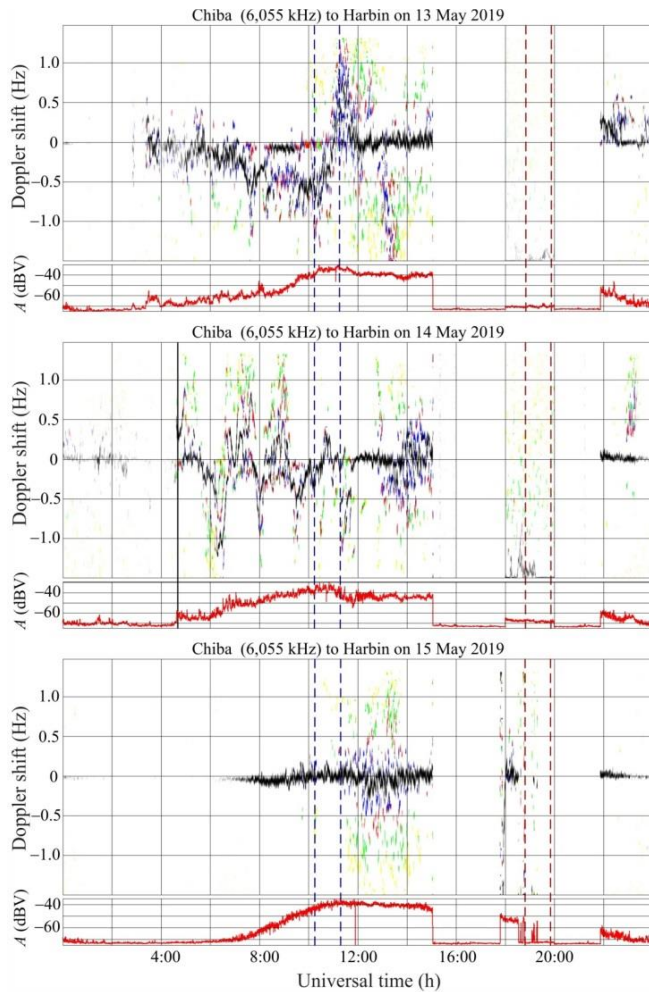


Рис. 5 Часові варіації доплерівських спектрів та амплітуди сигналів уздовж радіотраси Chiba–Harbin 13, 14 та 15 травня 2019 р. (панелі зверху донизу відповідно). Частота радіохвилі 6.055 МГц. Чорно-синьо-червоно-зелено-жовтий кольори показують амплітуду доплерівської лінії 1, 0.8, 0.6, 0.4 та 0.2 у відносному масштабі відповідно. Штрихові лінії позначають захід і схід Сонця на висоті 0 і 100 км. Суцільні вертикальні лінії показують початок іоносферної бурі. На кожній панелі під доплерівським спектром показана амплітуда сигналу A на виході радіоприймача в децибелах дБВ відносно 1 В

хвилі 24 вересня 1998 р. о ~23:00 UT. Сильна негативна іоносферна буря розпочалася незабаром після 01:00 UT 25 вересня 1998 р. і тривала принаймні до

Спостереження за динамікою іоносфери під час іоносферної бурі 14 травня 2019 р. дозволили встановити наступне. В інтервалі часу з 06:00 UT до 11:00 UT мала місце позитивна іоносферна буря. Встановлено, що f_oF_2 при цьому збільшувалася від ~5 до 7–8 МГц. Іоносферна буря призвела до зміщення вгору області відбиття радіохвилі в залежності від радіотраси на ~50–180 км. Протягом бурі спостерігалися прояви атмосферних гравітаційних хвиль з періодом 15 – 30 хв. Амплітуда відносних збурень концентрації електронів становила 4–8 %. Буря супроводжувалася генерацією інфразвуку з періодом близько 5 хв. При цьому амплітуда відносних збурень концентрації електронів була близько 0.7%.

Ефекти геокоосмічної бурі у середній і зовнішній іоносфері проілюстровані на прикладах трьох сильних магнітних бур (25 вересня 1998 р., 29–30 травня 2003 р. і 7–10 листопада 2004 р.) і однієї середньої (20–21 березня 2003 р.). Вимірювання здійснені харківським радаром некогерентного розсіяння.

Сильна магнітна буря 25 вересня 1998 р. ($D_{st} = -200$ нТл, $K_p = 8+$) настала після сонячного спалаху M6/3B 23 вересня 1998 р. і була згенерована приходом міжпланетної ударної

кінця вимірювальної кампанії. Буря супроводжувалася зменшенням електронної концентрації в максимумі іоносферної області F_2 (N_mF_2) під час основної фази бурі в 3–3.5 рази та підняттям шару F_2 на 100 км вночі та на 50 км близько опівдня. Характерною особливістю цієї бурі є незвичне збільшення спрямованої вгору швидкості дрейфу плазми в ранкові години 25 вересня 1998 р. до значення $V_z \approx 50$ м/с, тоді як у спокійний день 23 вересня 1998 р.

$V_z \approx -25$ м/с. Показано, що збурення у V_z є спрямованим до екватору сплеском меридіональної складової нейтрального вітру $V_{nx} \approx 270$ м/с, індукованого атмосферним збуренням, що переміщується, та/або імпульсом електричного поля із зональною складовою, спрямованою на схід $E_y \approx 12$ –13 мВ/м.

Сильна магнітна буря 29–30 травня 2003 р. ($D_{st} = -108$ нТл, $K_p = 8+$) була спричинена приходом двох міжпланетних ударних хвиль від спалахів X1.3 та X3.6 27–29 травня 2003 р. Магнітна буря супроводжувалася зменшенням N_mF_2 у 4 рази, незвичайним нагріванням плазми вночі 29–30 травня 2003 р., підняттям шару F_2 іоносфери на 160 км вночі та на 70 км поблизу опівдня, та зменшення співвідношення $N(H^+)/N_e$ більше, ніж на порядок.

Геомагнітна буря супроводжувалась сильною негативною іоносферною бурею, коли під час головної фази бурі спорожнення N_mF_2 зросло в 4 рази. Незвичайне нагрівання плазми спостерігалось у ніч з 29 на 30 травня 2003 р., коли температура іонів та електронів зросла до денних значень 1200–2400 К на висоті 300 км та 2000–3200 К на висоті 800 км, тоді як за спокійних умов значення цих температур становили близько 800 К вночі.

7–10 листопада 2004 р. послідовно спостерігались два великих магнітних збурення: 7–8 листопада 2004 р. із $D_{st} = -373$, $K_p = 8+$ та 9–10 листопада 2004 р. із $D_{st} = -289$ нТл, $K_p = 9$ –. Основні особливості сильної негативної іоносферної бурі 7–10 листопада 2004 р. включають зменшення електронної концентрації в 6–7 разів, підняття шару F_2 іоносфери на 300 км вночі та на 150–180 км вдень, незвичне нагрівання плазми вночі та зменшення співвідношення $N(H^+)/N$ до 3.5 разів.

Невелика магнітна буря 20–21 березня 2003 р. ($D_{st} = -57$ нТл, $K_p = 5$) відбулася на фоні високої сонячної активності, але геоєфективність спалахів була низькою. Іоносферна буря 20–21 березня 2003 р. сталася на фоні незначної геомагнітної бурі і мала двофазний характер – початкову позитивну фазу (збільшення N_mF_2 у 1.5 рази) та подальшу глибоку негативну фазу (зменшення в N_mF_2 в 5 разів).

На основі аналізу фізичних процесів у середній і зовнішній іоносфері зроблено висновок про доцільність розділення іоносферних бур за силою геомагнітного збурення, яке вони супроводжують.

У розділі 7 розглянуті фізичні процеси в атмосфері, іоносфері та геомагнітному полі, що супроводжували як старти ракет з різних космодромів світу, так і посадки космічних апаратів (КА), а також маневрування КА на орбіті. Увагу приділено експериментальним дослідженням глобальних збурень у нижній

(підрозділ 7.2) і середній (підрозділ 7.3) іоносфері та геомагнітному полі (підрозділ 7.4).

Приклад результатів денних спостережень старту з космодрому Байконур (відстань 2200 км) КА «Союз» 18 жовтня 1999 р. показаний на рис. 6. До старту ракети іоносфера залишалася спокійною. Доплерівські спектри були одномодовими з чітко вираженим максимумом. Приблизно з 12:55 UT до 13:03 UT спостерігалися основна та додаткова моди відбитого сигналу, виник квазіперіодичний процес із періодом $T \approx 10$ хв. Після 13:45 UT амплітуда коливань значно збільшилась (амплітуда доплерівського зміщення частоти досягала $f_{da} = 0.5$ Гц), почало переважати коливання з $T \approx 20$ хв. Це тривало близько 30 хв. З 14:12 UT до 14:40 UT іоносфера залишалася практично незбуреною. В інтервалі часу 14:40 – 14:50 UT, крім основної моди сигналу, реєструвалася додаткова мода, зміщена за частотою на $f_d = -0.3$ Гц. Після 14:50 UT спостерігається зникнення стійкого максимуму у доплерівських спектрах. Це свідчить про появу (або скоріше про підсилення інтенсивності) випадкових неоднорідностей в іоносфері нижче області відбиття радіохвилі (близько 150 км).

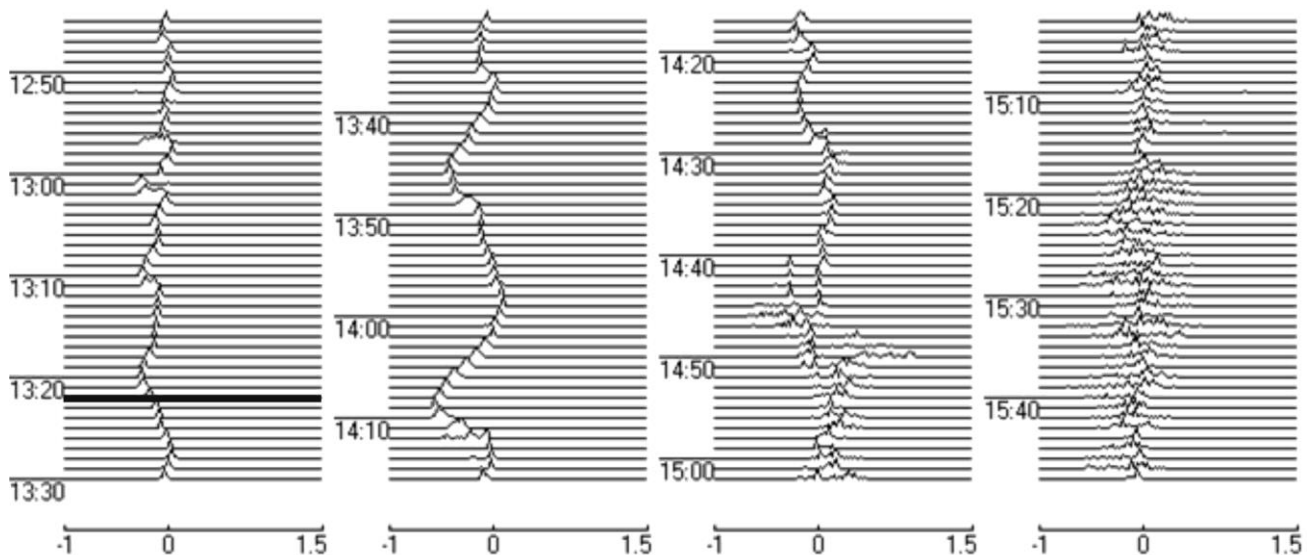


Рис. 6 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при старті КА «Союз» 18 жовтня 1999 р. о 13:22 UT. На цьому й інших рисунках по горизонтальній осі вказано доплерівське зміщення частоти радіосигналу у Гц, а по вертикальній осі – світовий час UT. Товстою лінією відмічений момент старту чи посадки КА

Такого роду збуреність тривала понад 1 год. Додамо, що захід Сонця на рівні Землі в пункті спостереження мав місце близько 15:20 UT, а в області відбиття – приблизно на 1 год пізніше.

Інший приклад старту ракети «Ariane» з космодрому Куру (відстань близько 10000 км) о 23:28 UT у ніч з 21 на 22 березня 2000 р. приведений на рис. 7. З 22:00 UT до 23:00 UT спектр сигналу був переважно багатомодовим, в інтервалі часу 23:10 – 00:20 UT – в основному одномодовим. Лише з 23:32 UT до 23:40 UT спостерігалася його розширення. Після 00:25 UT протягом приблизно 40 хв спостерігається добре виражений квазіперіодичний процес зі змінним періодом і

амплітудою близько 0.4 Гц. Наступні 20 хв іоносфера залишалася спокійною, а після 01:40 UT почали проявлятися ефекти ранкового термінатора.

На рис. 8 показані варіації доплерівських спектрів, що супроводжували посадку КА «Space Shuttle Discovery», яка сталася 7 листопада 1998 р. о 17:04 UT. В інтервалі часу 14:35 – 15:24 UT в іоносфері спостерігався квазіперіодичний процес із $T \approx 10$ хв і $f_{da} \approx 0.2 - 0.4$ Гц, сигнал залишався одномодовим або двомодовим з невеликим відхиленням другої моди по частоті. З 15:24 UT по 16:05 UT виникло різке зменшення f_d на 0.5 – 0.6 Гц, а з 15:46 UT до 15:50 UT – навіть на 1 Гц. Наступне значне падіння f_d зафіксовано в інтервалі часу 16:22 – 16:55 UT, причому з 16:42 UT до 16:55 UT сигнал був двомодовим із різницею доплерівських частот до 1 Гц. Після 17:00 UT іоносфера протягом 1 год залишається слабо збуреною. В інтервалі часу 18:00 – 18:50 UT знову спостерігаються помітні варіації f_d , які не перевищують 0.5 Гц, і двомодовість сигналу. Слід зазначити, що захід Сонця на рівні Землі мав місце приблизно о 14:30 UT, а в нижній частині F-області іоносфери майже на 1 год пізніше.

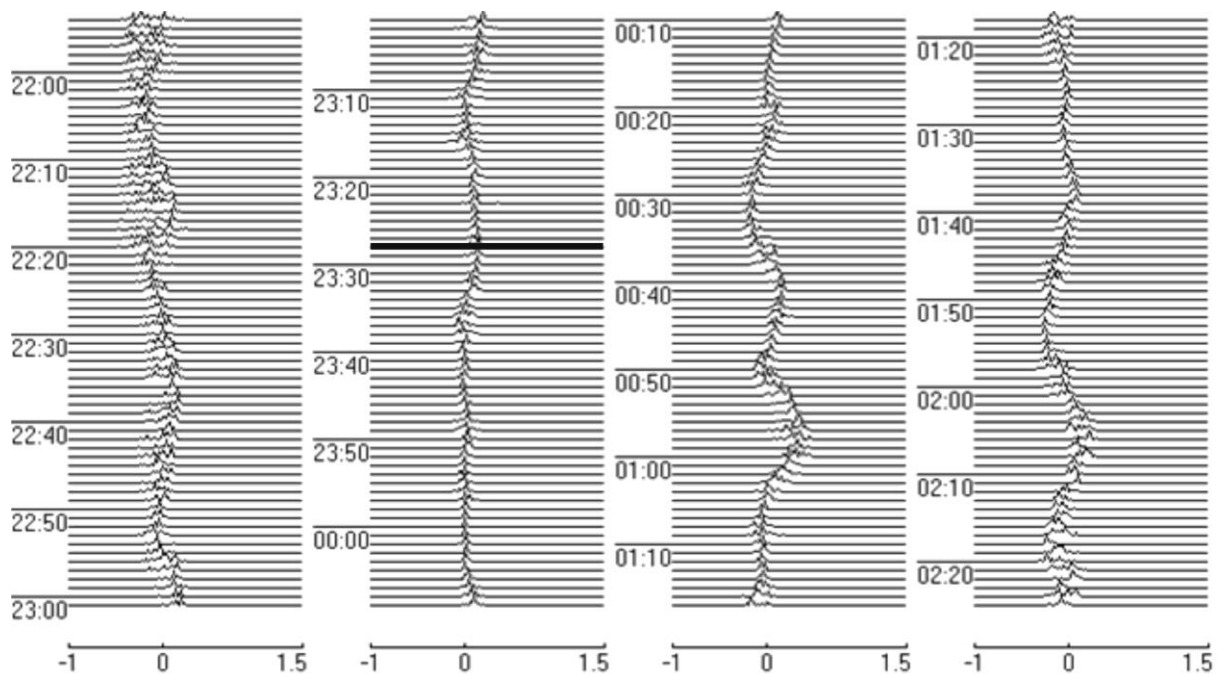


Рис. 7 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при старті КА “Ariane” 21 – 22 березня 2000 р. о 23:28 UT

Крім збурень в атмосфері й іоносфері, збурення від ракет і КА можуть виникати й у магнітному полі Землі. Проаналізовано магнітні ефекти від запусків ракет, які відбулися протягом інтервалу 2014–2017 рр., зокрема для найбільших космічних апаратів – “Союз” і “Протон” масою 297 тонн і 711 тонн відповідно. Зміни характеру варіацій геомагнітного поля пов’язані майже з усіма запусками ракет. Амплітуда коливань найчастіше збільшується в 1.5–2 рази (до 1–2 нТл). Іноді вона зменшувалася, а хвилюподібні коливання, які існували до приходу хвильового збурення внаслідок запуску ракети, руйнувалися. Часова затримка між стартом розгінних ступенів ракет і відгуком у геомагнітному полі дорівнює

приблизно 40–80 хв та 65–130 хв для космодромів Плесецьк і Байконур відповідно. Тривалість квазіперіодичних збурень (із періодом у діапазоні 10–

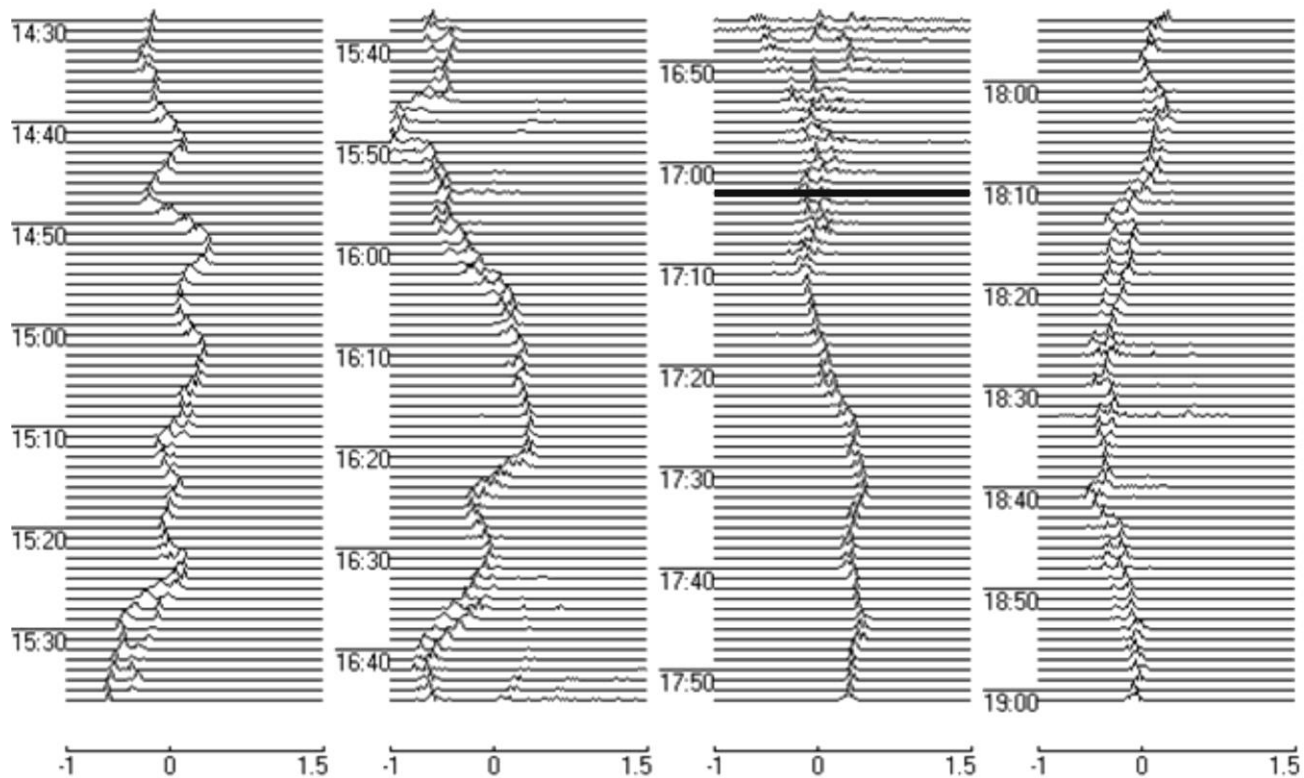


Рис. 8 Варіації ДС на частоті 3.5 МГц при посадці КА “Space Shuttle Discovery” 7 листопада 1998 р. о 17:04 UT

15 хв) дорівнює 30–60 хв і слабо залежить від відстані між космодромами та магнітною обсерваторією.

Знаючи відстань між космодромами та пунктом спостереження, а також часи затримки окремих змін у поведінці параметрів магнітометричних і зондуючих радіосигналів, були оцінені удавані швидкості поширення збурень. Були ідентифіковані хвилі акустичної природи (швидкість 410–800 м/с), акустико-гравітаційні хвилі (кілька сотень м/с) і «швидкі» збурення, пов’язані з повільними магнітогідродинамічними (2–3 км/с) та гіротропними (10–20 км/с) хвилями. У нижній іоносфері хвильові збурення викликані квазіперіодичними висипаннями частинок із магнітосфери.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної проблеми – експериментальному та теоретичному дослідженню впливу високоенергетичних джерел природного та штучного походження на характеристики радіохвиль і атмосферно-космічні радіоканали, які використовуються засобами телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації, тощо.

1. Проведено фізичне моделювання процесів в атмосфері й іоносфері, які були викликані падінням 15 лютого 2013 р. найбільшого за останні 100 років космічного тіла – Челябінського метеороїда масою понад 11 кт і розміром близько

18 м. Теоретично досліджено та зроблено числові оцінки основних параметрів фізичних процесів у системі ЗАІМ, викликаних падінням цього метеороїда. Визначено кількісні значення параметрів збурень, що виникли в системі.

2. За допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу похилого зондування іоносфери досліджені іоносферні збурення, що послідували за падінням 18 грудня 2018 р. Камчатського метеороїда масою 1.41 кт і розміром близько 9.4 м. Виявилось, що зміни у поведінці амплітудно-спектральних параметрів зондуючих радіосигналів мали 2–3 групи часів запізнення. У залежності від відстані між місцем вибуху метеороїда та серединою радіотраси ці часи змінювалися в межах 24–43 хв, 93–136 хв і 141–183 хв. Їм відповідали удавані швидкості 1.9–2.9 км/с, 620–770 м/с і 310–500 м/с.

3. Проведені систематичні спостереження за динамікою мезосфери українського регіону за допомогою радара гектометрового діапазону (частота ~ 2 МГц) і встановлені основні добові та сезонні залежності вектора спрямованої швидкості вітру у мезосфері. Зазвичай його величина знаходиться у межах 10–80 м/с. Проте сам вектор має значні часові варіації як за модулем (у 2–5 разів), так і за напрямком (140 – 180°), пов'язані з проходженням акустико-гравітаційних хвиль. Значення турбулентної швидкості на висотах 85–95 км становило 2–6 м/с. Спектри варіацій обох складових швидкості вітру, в цілому, були подібні. Амплітуда гармонік у діапазоні періодів 10–120 хв не перевищувала 8 м/с.

4. Ґрунтуючись на низці спостережень, виконаних у сейсмічно активному східно-азійському регіоні за допомогою багаточастотного багатотрасового комплексу зондування на похилих трасах, віддалених на відстані ~ 1 – 2 тис. км від епіцентрів землетрусів помірної сили ($M \approx 5.9$ – 6.5), вивчені динамічні процеси в іоносфері, що їх супроводжували. Встановлено, що сейсмічна активність супроводжується аперіодичними процесами в іоносфері на віддаленнях не менше 1–2 тис. км від епіцентру, підсиленням багатомодовості та значним розширенням доплерівських спектрів. Виявлено хвильові збурення в діапазоні інфразвукових коливань (період 4–5 хв) і в діапазоні 15–30 хв, які генеруються поверхневою хвилею Релея, що виникла в результаті землетрусу. За оцінками, амплітуда відносних збурень концентрації електронів у полі інфразвукової й атмосферної гравітаційної хвиль була ~ 0.15 – 0.31 % і 4.5–9 % відповідно. Тривалість цугів коливань була в межах 24–55 хв. Також виявлені квазіперіодичні варіації, пов'язані із поширенням атмосферної гравітаційної хвилі безпосередньо від епіцентру землетрусу. Відносна амплітуда викликаних ними більш довгоперіодних квазіперіодичних збурень концентрації електронів становила 30–55 %. Тривалість хвильового цуга досягала приблизно 100 хв.

5. За допомогою багаточастотного багатотрасового програмно-апаратного комплексу похилого зондування іоносфери виявлена реакція іоносфери на дію супертайфунів в Азійсько-Тихоокеанському регіоні. На прикладі супертайфуну Hagibis (номер 201919) показано, що його дія супроводжувалася підсиленням хвильової активності у середній іоносфері. При цьому фіксувалися хвильові процеси як із періодами інфразвукового діапазону (від 2 до 7 хв), так і в діапазоні періодів гравітаційних хвиль (від 12–15 до 60–150 хв). Найбільший вплив на

іоносферу спостерігався у дні 8–10 жовтня 2019 р., коли супертайфун мав максимальну енергетику. Під дією хвильових процесів висота відбиття радіохвиль коливалася в межах $\pm(30-50)$ км. Відносна амплітуда квазіперіодичних варіацій концентрації електронів в F-області іоносфери змінювалася від 0.2–0.4 % для періодів 2–7 хв до 10–12% для періодів ~ 20 хв і 30–60 % для періодів $\sim 60-120$ хв.

6. Під час геокосмічних бур, поряд із значним (на порядок і більше) збільшенням стандартних відхилень горизонтальних складових геомагнітного поля, суттєвих варіацій зазнавав спектральний склад радіосигналів у діапазоні частот 5–10 МГц. За допомогою багаточастотних багатотрасових (до 14 радіотрас довжиною $\sim 1-2$ тис. км) вимірювань виявлено, що геокосмічні бурі призводять до значного (до 1 Гц і більше) розширення доплерівських спектрів і підсилення багатомодовості, пов'язаних із аперіодичними та квазіперіодичними варіаціями параметрів іоносфери. Відносна амплітуда квазіперіодичних змін концентрації електронів в іоносфері досягала десятків процентів, а їх період становив $\sim 10-120$ хв. Збурення охоплювали всі області іоносфери – від нижньої до зовнішньої, суттєво змінюючи її динаміку й активізуючи взаємодію підсистем у системі ЗАІМ.

7. На основі результатів багаторічних експериментальних спостережень за варіаціями характеристик радіохвиль і геомагнітного поля під час стартів ракет і польотів космічних апаратів встановлено, що в атмосфері та геокосмосі фіксуються збурення на відстанях $\sim 1-10$ тис. км. Від джерела ці збурення поширюються у вигляді акустико-гравітаційних хвиль (швидкість 0.3–0.8 км/с), повільних МГД хвиль (швидкість $\sim 1-10$ км/с) і гіротропних хвиль (швидкість $\sim 10-100$ км/с). Ці хвилі “модулюють” електронну концентрацію плазми на висотах середньої іоносфери та густину електроструму у динамо-області. Також виникають висипання заряджених частинок із радіаційних поясів магнітосфери, що викликає додаткову іонізацію нижньої іоносфери. Тривалість збурень становить від десятків хвилин до декількох годин.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal // Радиофизика и радиоастрономия. — 1998. — Vol. 3, № 2. — С. 181–190. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

2. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 209–226. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у спокійній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

3. Динамические процессы в среднеширотной мезосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. — 2006. — Т. 12, № 2/3. — С. 37–44. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

4. Chernogor L. F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Radio Physics and Radio Astronomy. — 2008. — Vol. 13, N 2. — P. 120–137. *(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

5. Chernogor L. F. The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Problems of Atomic Science and Technology. — 2013. — Vol. 86, N 4. — P. 136–139. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

6. Geomagnetic variations caused by rocket launches from the Plesetsk and the Baikonur cosmodromes / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2017. — Вип. 26. — С. 84–87. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

7. 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 «Радіофізика та електроніка». — 2017. — Вип. 27. — С. 53–56. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

8. Ionospheric processes observed with the passive oblique-incidence HF Doppler radar / Qiang Guo, Yu Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2019. — Вип. 30. — С. 3–15. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

9. Когерентный многочастотный многотрассовый комплекс для радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере / Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, Q. Guo, Yu Zheng, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цимбал // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». — 2018. — Вип. 28. — С. 88–93. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

Наукові праці в зарубіжних наукових виданнях:

10. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities / K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Telecommunications and Radio Engineering. — 1999. — Vol. 53, N 4–5. — P. 6–20. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

11. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation / K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Telecommunications and Radio Engineering. — 1999. — Vol. 53, N 6. — P. 1–22. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

12. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури / К. П. Гармаш, Л. С. Костров, **V. T. Розуменко** О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрномия. — 1999. — Т. 39, № 1. — С. 72–78.

12 a. Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm / K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. — 1999. — Vol. 39, N 1. — P. 69–75. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

13. Martynenko S. I. New possibilities for mesospheric electricity diagnostics / S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Advances in Space Research. — 2001. — Vol. 27, Iss. 6–7. — P. 1127–1132. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

14. Remote earthquake-induced large-scale ionospheric disturbances and strong mesospheric electric fields / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Telecommunications and Radio Engineering. — 2002. — Vol. 57, Is. 10–11. — P. 136–140. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

15. Remote sensing of mesospheric electric fields using MF radars / C. E. Meek, A. H. Manson, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2004. — Vol. 66, N 10. — P. 881–890. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

16. Statistical parameters of nonisothermal lower ionospheric plasma in the electrically active mesosphere / S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov,

A. H. Manson, C. E. Meek // *Advances in Space Research*. — 2005. — Vol. 35, N 8. — P. 1467–1471. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз параметрів плазми в D області. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

17. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений / С. В. Панасенко, **V. T. Rozumenko**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // *Успехи современной радиоэлектроники* — 2005. — № 3. — С. 36–54. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

18. Ionospheric storms associated with geospace storms as observed with the Kharkiv incoherent scatter radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, **V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // *Sun and Geosphere*. — 2008. — Vol. 3, N 2. — P. 81–86. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

19. The Upgraded Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // *Sun and Geosphere*. — 2012. — Vol. 7, N 2. — P. 133–139. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

20. Dynamical processes in the ionosphere following the moderate earthquake in Japan on 7 July 2018 / Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2019. — Vol. 186. — P. 88–103. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

21. Radio Monitoring of Dynamic Processes in the Ionosphere Over China During the Partial Solar Eclipse of 11 August 2018 / Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // *Radio Science*. — 2020. — Vol. 55, Iss. 2. — e2019RS006866. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

22. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // *Advances in Space Research*. — 2020. — Vol. 66, Iss. 2. — P. 226–242. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

23. Ionospheric effects of the Kamchatka meteoroid: Results from multipath oblique sounding / Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, S. N. Shulga, Y. Zheng // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2020. — Vol. 207. — Paper No. 105336. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

24. Studies of Global and Large-Scale Ionospheric Phenomena due to Sources of Energy of Different nature / **V. T. Rozumenko**, L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // Turkish Journal of Physics. — 1994. — Vol. 18, N 11. — P. 1193–1198. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

25. The Radiophysical Observatory for Remote Sounding of the Ionosphere / O. F. Tyrnov, K. P. Garmash, A. M. Gokov, A. I. Gritchin, V. L. Dorohov, L. G. Kontzevaya, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. I. Martynenko, V. A. Misyura, V. A. Podnos, S. N. Pokhilko, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, A. S. Shemet // Turkish Journal of Physics. — 1994. — Vol. 18, N 11. — P. 1260–1265. *(Особистий внесок здобувача: Написання розділу по методу часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

26. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 1. Экспериментальная база и процессы в естественно возмущенной ионосфере / К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Вестник Харьковского университета. Серия «Радиофизика и электроника». — 1998. — № 405. — С. 157–177. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

27. Chernogor L. F. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Радиофизика и радиоастрономия. — 1998. — Vol. 3, N 2. — P. 191–197. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків частинок при стартах ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

28. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений / К. П. Гармаш, А. М. Гоков, Л. С. Костров, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Вісник Харківського університету. Серія «Радиофизика та електроніка». — 1999. — Вип. 1, № 427. — С. 3–22. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

29. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 7. — С. 3–15. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і*

радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

30. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 8. — С. 3–19. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

31. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — Т. 4, № 3. — С. 227–246. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

32. Залюбовский И. И. Система Земля – атмосфера – геокосмос: основные свойства, процессы и явления / И. И. Залюбовский, Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні. 2006–2008. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАНУ-НКАУ. — Київ: Академперіодика, 2008. — С. 19–29.

32 а. Zalyubovsky I. The Earth – Atmosphere – Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena / I. Zalyubovsky, L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine. 2006 – 2008. The Report Prepared by the Space Research Institute of NASU-NSAU. — Kyiv: Akademperiodyka, 2008. — P. 19–29.

(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

33. Черногор Л. Ф. Физические эффекты в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2008 – 2010. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН України та НКА України. — Київ: Академперіодика, 2011. — С. 16–23.

33 а. Chernogor L. Physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine. The Edition Report Prepared by the Space Research Institute of NAS of Ukraine and NSA of Ukraine. — Kyiv: Akademperiodyka, 2011. — P. 22–34.

(Особистий внесок здобувача: Розвиток і обґрунтування окремих положень системної парадигми. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

34. Черногор Л. Ф. Особенности физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2010–2012. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН та ДКА України. — Київ: Академперіодика, 2012. — С. 31–48.

34 a. Chernogor L. Features of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2010–2012. The Report Prepared by Space Research Institute. — Kyiv: Akademperiodyka, 2012. — P. 29–46.

(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

35. Черногор Л. Ф. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Космічні дослідження в Україні 2012–2014. Звіт підготовлений Інститутом космічних досліджень НАН та ДКА України. — Київ: Академперіодика, 2014. — С. 13–20.

35 a. Chernogor L. Study of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2012–2014. The Report Prepared by Space Research Institute. — Kyiv: Akademperiodyka, 2014. — P. 13–20.

(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

36. Черногор Л. Ф. Результаты исследования физических эффектов в геокосмосе в спокойных и возмущенных условиях / Л. Ф. Черногор, **В. Т. Розуменко** // Національна академія наук України. Державне космічне агентство України. — Київ: Академперіодика, 2016. — С. 25–33.

36 a. Chernogor L. Results of the investigation of physical effects in the geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // National Academy of Science of Ukraine. State Space Agency of Ukraine. — Kyiv: Akademperiodyka, 2016. — P. 23–30.

(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

37. Chernogor L. Results of the Investigation of Physical Effects in the Geospace Environment under Quiet and Disturbed Conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2016–2018. Report to COSPAR. — Kyiv: Akademperiodyka, 2018. — P. 41–51.

(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферних ефектів у збурених умовах. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

38. Chernogor L. Physical effects in the atmosphere and geospace environment under quiet and disturbed conditions / L. Chernogor, **V. Rozumenko** // Space Research in Ukraine 2018–2020. Report to COSPAR. — Kyiv: Akademperiodyka, 2020. — P. 61–70. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів у збуреній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

**Список публікацій,
які засвідчують апробацію матеріалів дисертації
(Тези доповідей на наукових конференціях):**

39. Complex radiophysical investigations of ionospheric disturbances caused by launches and flights of spacecraft / A. I. Gritchin, V. L. Dorohov, I. I. Kapanin,

A. I. Karpachev, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. I. Martynenko, N. N. Mashtaler, Yu. B. Milovanov, V. A. Misyura, O. V. Pakhomova, V. A. Podnos, S. N. Pokhilko, E. N. Protopop, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, Yu. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, S. G. Chulakov, O. S. Shemet // Физика космической плазмы: Международный семинар, Национальное космическое агентство Украины, Главная астрономическая обсерватория АН Украины, Киевский университет имени Тараса Шевченко, 6–10 июня 1993 г., Киев, 1995. — С. 161–170. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

40. Influence of global disturbances of the propagation of ionospheric MF and HF radio waves: Technique / L. S. Kostrov, S. I. Martynenko, Yu. B. Milovanov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal // IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1996, 21–26 July 1996. — Baltimore, 1996. — Vol. 3. — P. 2236–2239. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

41. A method for derivation of electric fields in the lower ionosphere from measurements with a partial reflection facility / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2–5 June 1998, Kharkov, Ukraine: MMET Conference Proceedings. — Kharkov, 1998. — Vol. 1. — P. 271–273. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

42. HF Doppler probing of ionospheric perturbations which accompanied the space shuttle Atlantis launch with a geomagnetic storm as a background / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, S. G. Leus, S. N. Pokhilko, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

43. Chernogor L. F. Regularization algorithms for inverse problems in the radiowave probing of the ionospheric plasma / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2–5 June 1998, Kharkov, Ukraine: MMET Conference Proceedings. — Kharkov, 1998. — Vol. 1. — P. 154–156. *(Особистий внесок здобувача: постановка задачі, участь в обговоренні результатів.)*

44. Observations of ionospheric D region perturbations which accompanied the space shuttle orbiter Atlantis launch with a geomagnetic storm as a background by partial reflection technique / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, A. I. Gritchin, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol. 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

45. Chernogor L.F. On the possibility of energetic particle precipitation from the magnetosphere into the middle latitude ionosphere / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Annales Geophysicae. Part III. Space and Planetary Sciences. — 1998. — Supplement I to Vol 16. — P. 839. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

46. Chernogor L. F. Investigations of energetic particle precipitations due to HF Radio heating and rocket launch / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere ISSMI'98, August 26–29, 1998, Suzdal, Russian Federation: Book of Abstracts. — Suzdal, 1998. — P. 35. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

47. Effects in the ionosphere during rocket launch / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Vth international Suzdal URSI Symposium on the modification of ionosphere ISSMI'98, August 26–29, 1998, Suzdal, Russian Federation: Book of Abstracts. — Suzdal, 1998. — P. 84. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

48. Chernogor L. F. Numerical modeling of ionospheric effects of electron gyro-frequency radio emission turn-on / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands: Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1-491. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

49. Chernogor L. F. Numerical simulations of nonlinear interactions of non-stationary high-power electromagnetic waves with the ionospheric plasma / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands: Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1–492. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

50. Chernogor L. F. Geomagnetic micropulsations near Kharkiv stimulated by the "SURA" high-power HF facility / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 24th General Assembly of the European Geophysical Society, April 19 – 23, The Hague, The Netherlands: Geophysical Research Abstracts. — The Hague, 1999. — P. 1–497. *(Особистий внесок здобувача: Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

51. Chernogor L. F. Energetic particle fluxes in the midlatitude lower ionosphere from partial reflection radar measurements / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // XXVIth General Assembly of the URSI, August 13–21, 1999, University of Toronto, Toronto, Canada: Abstracts. — Toronto, 1999. — P. 437. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

52. Chernogor L. F. Variations of partially reflected radio signals after rocket launches / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // XXVIth General

Assembly of the URSI, August 13–21, 1999, University of Toronto, Toronto, Canada: Abstracts. — Toronto, 1999. — P. 467. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

53. Гармаш К. П. Исследование при помощи частично-отраженных радиосигналов параметров потоков энергичных частиц в среднеширотной нижней ионосфере / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // XIX Всероссийская конференция “Распространение радиоволн”, 25 июня 1999 г., Казань, Российская Федерация: Тезисы докладов. — Казань, 1999. — С. 141–142. (*Особистий внесок здобувача: Розрахунок потоків. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

54. Гармаш К. П. Вариации статистических характеристик частично-отраженных радиосигналов после запусков мощных ракет / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // XIX Всероссийская конференция “Распространение радиоволн”, 25 июня 1999 г., Казань, Российская Федерация: Тезисы докладов. — Казань, 1999. — С. 357–358. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

55. Gokov A. M. Large-scale disturbances originating from remote earthquakes in the plasma at mesospheric heights / A. M. Gokov, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // VIIth International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), 12–15 September, Kharkov, Ukraine: Conference Proceedings. — Kharkiv, 2000. — Vol. 2. — P. 655–657. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

56. Chernogor L. F. Radio probing of the perturbations originating in the near-Earth plasma from natural and anthropogenic energy sources / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** // Матеріали конференції «Астрономія в Україні - 2000 и перспектива (влияние международного сотрудничества)», 5–8 червня 2000 р., Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна: Кинематика и физика небесных тел. Додаток 3. — 2000 — Т. 16, № 3. — С. 497–500. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

57. Chernogor L. F. Wave processes, global- and large-scale disturbances in the near Earth plasma / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // Матеріали конференції «Астрономія в Україні - 2000 и перспектива (влияние международного сотрудничества)», 5–8 червня 2000 р., Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, Україна: Кинематика и физика небесных тел. Додаток 3. — 2000 — Т. 16, № 3. — С. 514–516. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

58. Chernogor L. F. HF Doppler probing the disturbances originating in the ionosphere from natural and anthropogenic sources / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko** // VIIth International Conference on Mathematical Methods in

Electromagnetic Theory (MMET), 12–15 September, Kharkov, Ukraine: Conference Proceedings. — Kharkiv, 2000. — Vol. 2. — P. 652–654. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

59. Variations in HF Doppler radar spectra measured at vertical incidence / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, 17 – 24 August 2002, Maastricht, The Netherlands: Poster presentations. — Maastricht, 2002. — P. 0143. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

60. Doppler radar measurements of bottomside ionosphere perturbations associated with space vehicle launch and maneuvering system burns / L. F. Chernogor, L. S. Kostrov, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // XXVII General Assembly of the International Union of Radio Science, 17 – 24 August 2002, Maastricht, The Netherlands: Programme, poster presentations. — Maastricht, 2002. — P. 0142. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

61. Доплеровское радиозондирование средней ионосферы в естественно-возмущенных условиях / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // XX Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 2 – 4 июля 2002 года, Нижний Новгород, Российская Федерация: Труды конференции. — Нижний Новгород, 2002. — С. 42–43. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у спокійній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

62. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е и F-областях ионосферы, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // XX Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 2–4 июля 2002 года, Нижний Новгород, Российская Федерация: Труды конференции. — Нижний Новгород, 2002. — С. 44–45. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

63. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях при стартах и полетах космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 21 – 26 сентября 2002 р., Кацивели, Крым, Украина: Сборник тезисов. — Кацивели, 2002. — С. 45. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

64. Доплеровское радиозондирование ионосферы как средство мониторинга состояния космической погоды / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Друга Українська конференція з перспективних космічних досліджень, 21–27 вересня 2002 р., Київ, Україна: Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 144–151. *(Особистий внесок здобувача:*

Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

65. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Друга Українська конференція з перспективних космічних досліджень, 21–27 вересня 2002 р., Київ, Україна: Космічна наука і технологія. Додаток. — 2002. — Т. 9, № 2. — С. 132–143. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

66. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Третя Українська конференція з перспективних космічних досліджень 15–21 вересня 2003 р., Київ, Україна: Космічна наука і технологія. Додаток. — 2003. — Т. 9, № 5/6. — С. 76–80. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

67. Костров Л. С. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопутствовавших полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Третя Українська конференція з перспективних космічних досліджень 15–21 вересня 2003 р., Київ, Україна: Космічна наука і технологія. Додаток. — 2003. — Т. 9, № 2. — С. 76–81. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

68. Флуктуации геомагнитного поля, сопутствующие грозам / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Е. А. Пахомов, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству, 21–26 сентября 2003 г., Владимир, Российская Федерация: Сборник трудов конференции. — Владимир, 2003. — Т. 1. — С. 193–195. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітних ефектів грозових розрядів в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

69. Результаты исследования динамических процессов в нижней ионосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября 2003 г., Кацивели, Крым, Украина: Сборник тезисов. — Кацивели, 2003. — С. 91. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

70. Костров Л. С. Результаты доплеровских наблюдений возмущений в геокосмосе, сопутствовавших полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Третья Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 15–19 сентября 2003 г., Кацивели, Крым, Украина: Сборник тезисов. — Кацивели, 2003. — С. 133. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

71. Костров Л. С. Доплеровское радиозондирование возмущений в ионосфере, сопутствовавших стартам и полетам космических аппаратов / Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Международная конференция

«Современные проблемы физики и высокие технологии», посвященная 125-летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ, 29 сентября–4 октября 2003 г., Томск, Российская Федерация: Материалы конференции. — Томск, 2003. — С. 464–467. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

72. Динамічні процеси на мезосферних висотах / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тирнов, Л. Ф. Черногор // Міжнародна наукова конференція «Каразінські природознавчі студії», 14–16 червня 2004 р., Харків, Україна: Матеріали конференції. — Харків, 2004. — С. 151–153. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

73. Параметры динамических процессов в мезосфере / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Четвертая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 19–26 сентября 2004 г., Понизовка, Крым, Украина: Сборник тезисов. — Понизовка, 2004. — С. 57. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

74. Движения неоднородностей электронной концентрации в D-области ионосферы / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Международная конференция по физике солнечно-земных связей, 20–25 сентября 2004 г., Иркутск, Российская Федерация: Тезисы докладов. — Иркутск, 2004. — С. 60. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз спрямованої швидкості вітру в мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

75. Statistics on the parameters of nonisothermal ionospheric plasma in large mesospheric electric fields / S. Martynenko, **V. Rozumenko**, O. Tyrnov, A. Manson, C. Meek // 35th COSPAR Scientific Assembly, 18–25 July 2004, Paris, France: 35th COSPAR Scientific Assembly. — Vol. 35 — P. 533. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

76. VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60 – 70 km Altitude Range / A. H. Manson, C. E. Meek, S. I. Martynenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Meeting RTO-MP-IST-056 8 — 1 Characterising the Ionosphere, Neuilly-sur-Seine, France: Meeting Proceedings. — Neuilly-sur-Seine, 2006. — P. 8-1–8-24. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз впливу збурень на поширення радіохвиль. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

77. Комплекс для дистанционного зондирования околоземного космического пространства / О. Ф. Тырнов, К. П. Гармаш, Л. С. Костров, **В. Т. Розуменко**, А. М. Цимбал // 16-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2006), 11–15 сентября 2006 г., Севастополь, Крым, Украина: Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2006. — Т. 2. — С. 954–955. — ISBN 966-7968-90-1. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

78. MF radar studies of wave disturbances in the mesosphere / L. Chernogor, S. Clifford, S. Panasenko, **V. Rozumenko** // 36th COSPAR Scientific Assembly, 16–23 July 2006, Beijing, China: 36th COSPAR Scientific Assembly. — Beijing, 2006. — Vol. 36. — P. C2.2-0083-06. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

79. Ionospheric Storms Associated with Geospace Storms as Observed with the Kharkiv Incoherent Scatter Radar / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, V. N. Lysenko, **V. T. Rozumenko**, V. I. Taran // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences, 02–06 June 2008, Sozopol, Bulgaria: Book of Abstracts. — Sozopol, 2008. — P. 52. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

80. Chernogor L. F. The observational features of the November 7 – 10, 2004 geospace superstorm in the lower ionosphere / L. F. Chernogor, S. V. Panasenko, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // Fourth UN/ESA/NASA/JAXA/BAS Workshop on the International Heliophysical Year 2007 and Basic Space Science «First Results from the International Heliophysical Year 2007». Solar-Terrestrial Influences Laboratory at the Bulgarian Academy of Sciences, 02–06 June 2008, Sozopol, Bulgaria: Book of Abstracts. — Sozopol, 2008. — P. 50–51. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

81. Статистические характеристики параметров ветра в мезосфере над Украиной / С. В. Панасенко, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // 8-я Украинская конференция по космическим исследованиям, 1–7 сентября 2008 г., Евпатория, Крым: Сборник тезисов. — Евпатория, 2008. — С. 41. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

82. Kharkiv V. N. Karazin National University Radiophysical Observatory: Space Research / K. P. Garmash, A. I. Gritchin, S. I. Martynenko, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov, V. N. Fedorenko, Yu. P. Fedorenko, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009), 14–18 сентября 2009 г., Севастополь, Крым, Украина: Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2009 г. — Т. 2. — С. 943–944. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

83. Физические эффекты солнечного затмения 4 января 2011 г. в Харькове / В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, 25–27 сентября 2012 г., Харьков: Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2012. — С. 219–221. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

84. Processes in the bottomside ionosphere accompanied by the January 4, 2011 solar eclipse / L. F. Chernogor, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, O. F. Tyrnov // 9-th International Conference “Problems of Geocosmos”, October 8–12, 2012, St. Petersburg, Petrodvorets: Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2012. — P. 157 – 158. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

85. Geophysical and radio propagation effects of the January 4, 2011 solar eclipse / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. A. Leus, **V. T. Rozumenko** // 9-th International Conference “Problems of Geocosmos”, October 8 – 12, 2012, St. Petersburg, Petrodvorets: Book of Abstracts. — St. Petersburg, 2012. — P. 156–157. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

86. Розуменко В. Т. Магнито-ионосферные эффекты стартов и полетов космических аппаратов / **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // Первая украинская конференция “Электромагнитные методы исследования окружающего пространства”, 25–27 сентября 2012 г., Харьков: Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2012. — С. 224–226. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

87. Martynenko S. I. Temporal variations of electric fields density in the middle atmosphere / S. I. Martynenko, O. F. Tyrnov, **V. T. Rozumenko** // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2013), 9–13 сентября 2013 г., Севастополь, Крым, Украина: Материалы конференции. В 2 т. — Москва–Киев–Минск–Севастополь, 2013. — Т. 2. — С. 1124–1125. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз електричних ефектів у мезосфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

88. Upgrades to the Kharkiv V. N. Karazin National University MF radar antenna / V. L. Dorohov, **V. T. Rozumenko**, V. G. Somov, O. F. Tyrnov // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT’13), September 16–20, 2013, Odessa, Ukraine: Proceedings. — Odessa, 2013. — 2013 — P. 370–372. *(Особистий внесок здобувача: Опис антени радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

89. Розуменко В. Т. Физические процессы, сопровождающие старты и полёты мощных ракет / **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор, В. П. Бурмака // I Украинская конференция, посвященная 100-летию со дня рождения В. А. Мисюры “Радиофизические исследования ионосферы” (РФИИ – 2013), 24 – 25 октября 2013 г., Харьков: Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2013. — С. 32–35. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

90. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина — средство для мониторинга ионосферы в космических и наземных экспериментах и исследования распространения радиоволн различных диапазонов / К. П. Гармаш, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор // I Украинская конференция, посвященная 100-

летию со дня рождения В. А. Мисюры “Радиофизические исследования ионосферы” (РФИИ – 2013), 24–25 октября 2013 г., Харьков: Сборник тезисов докладов. — Харьков, 2013. — С. 89–110. *(Особистий внесок здобувача: Опис радара часткових відбиттів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

91. Ionospheric, atmospheric, and geomagnetic effects of the March 20, 2015 solar eclipse over Kharkiv city / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, S. G. Leus, V. A. Podnos, **V. T. Rozumenko**, A. M. Tsymbal, O. F. Tyurnov // Міжнародна конференція «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті» в рамках IX Всеукраїнського фестивалю науки присвячена 170 річниці Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 110 річниці професора С. К. Всехсвятського, 100 річниці М. А. Яковкіна, 25–29 травня 2015 р., Київ: Збірник тез доповідей. — Київ, 2015. — С. 107–108. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

92. Ионосферный, атмосферный и геомагнитный эффекты частичного солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом / К. П. Гармаш, С. Г. Леус, В. А. Поднос, **В. Т. Розуменко**, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор // 15th Ukrainian conference on space research, 24–28 August 2015, Odesa, Ukraine: Abstracts. — Kyiv, 2015. — P. 145. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

93. Chernogor L. F. Effects of Rocket Engine Burns in Geospace / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // International conference “Astronomy and Space Physics in Kyiv University”, May 24–27, 2016, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomical observatory, Kyiv, Ukraine: Abstracts. — Kyiv, 2016. — P. 95–96. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

94. Detection of Effects from Rocket Launches Employing the System Spectral Analysis / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // XVII International Young Scientists’ Conference on Applied Physics, May, 23–27, 2017, Kyiv, Ukraine: Proceedings. — Kyiv, 2017. — P. 180–181. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

95. Chernogor L. F. Magnetic and Ionospheric Effects of Power Rocket Engine Burns in Geospace / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko** // 17th Ukrainian conference on space research, August, 21–25, 2017, Odesa, Ukraine: Abstracts. — Odesa, 2017. — P. 152. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

96. Using the System Spectral Analysis for Detecting Effects from Rocket Launches from Remote Cosmodromes / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko**, K. O. Smirnova // XIII International Conference “Electronics and Applied Physics”, October 24–27, 2017, Kyiv, Ukraine: Abstracts. — Kyiv, 2017. — P. 217–218. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз результатів фонових*

вимірювань і радіофізичних ефектів стартів ракет. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

97. Characterizing the infrasonic signal generated by the Chelyabinsk celestial body: Global statistics / L. F. Chernogor, Qiang Guo, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених», 23–24 травня 2018 р., Умань, Україна: Програма і тези доповідей. — Умань, 2018. — С. 85–86. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

98. Infrasonic Signals Generated by a Series of Chemical Explosions near Vinnytsia City / L. F. Chernogor, O. I. Liashchuk, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // International conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 29 – June 01, 2018, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. — Kyiv, 2018. — P. 87–88. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів хімічних вибухів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

99. The parameters of the infrasonic waves generated by the Chelyabinsk meteoroid / L. F. Chernogor, G. Qiang, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // International conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 29 – June 01, 2018, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. — Kyiv, 2018. — P. 89–90. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

100. Chernogor L. F. The action of ultra-short super-powerful radio pulses on Earth's atmosphere and ionosphere / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, Yu. B. Mylovanov // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4–7, 2018, Odesa, Ukraine: Conference Program and Book of Abstracts. — Odesa, 2018. — P. 40. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

101. Chernogor L. F. The Action of Ultra-Short Super-Powerful Radio Pulses on Earth's Atmosphere and Ionosphere / L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, Yu. B. Mylovanov // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, September 4–7, 2018, Odesa, Ukraine: Conference Program and Book of Abstracts. — Odesa, 2018. — P. 322–325. *(Особистий внесок здобувача: Розрахунок параметрів радіотехнічної системи. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

102. Гармаш К. П. Геомагнитные эффекты, сопровождавшие старты ракет в 2017 — 2018 годах / К. П. Гармаш, **В. Т. Розуменко**, Л. Ф. Черногор // 18 Українська конференція з космічних досліджень, 17–20 вересня 2018, Київ, Україна: Тези доповідей конференції. — Київ, 2018. — С. 25. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз радіофізичних і геомагнітних ефектів стартів ракет в нижній іоносфері. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

103. Physical Processes Operating in the Ionosphere after the Earthquake of Richter Magnitude 5.9 in Japan on July 7, 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 28 – May 31, 2019, Kyiv, Ukraine: Book

of Abstracts. — Kyiv, 2019. — P. 87–88. (*Особистий внесок здобувача: Дослідження великомасштабних ефектів в іоносфері під дією окремих землетрусів. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

104. Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 28 – May 31, 2019, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. — Kyiv, 2019. — P. 88–90. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

105. Passive HF Doppler Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding / Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, July 2–6, 2019, Lviv, Ukraine: Abstracts. — Lviv, 2019. — P. 88–93. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

106. The Parameters of the Infrasonic Waves Generated by the Chelyabinsk meteoroid: System Statistic Analysis Results / Q. Guo, Y. Zheng, L. F. Chernogor, **V. T. Rozumenko**, M. B. Shevelev // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, July 2–6, 2019, Lviv, Ukraine: Abstracts. — Lviv, 2019. — P. 938–941. (*Особистий внесок здобувача: Розрахунок іоносферних ефектів Челябінського метеороїда. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

107. Physical Effects of the Severe Ionospheric Storm of 26 August 2018 / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // Fifth UK–Ukraine–Spain Meeting on Solar Physics and Space Science, August 26–30, 2019, Kyiv, Ukraine: Programme, Abstracts, Information. — Kyiv, 2019. — P. 33. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

108. Solar flare of September 2017 magnetic effect / Y. Luo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, M. Yu. Holub, S. G. Leus, **V. T. Rozumenko** // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 27–29, 2020, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. — Kyiv, 2020. — P. 76–77. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз космічної погоди. Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

109. Magnetic and ionospheric effects of the 5 — 6 August 2019 geospace storm / Y. Zheng, Q. Guo, L. F. Chernogor, K. P. Garmash, **V. T. Rozumenko** // International Conference “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University”, May 27–29, 2020, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. — Kyiv, 2020. — P. 79–80. (*Особистий внесок здобувача: Аналіз геомагнітної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.*)

110. Passive Radar for Oblique-Incidence Ionospheric Sounding: Observations of Ionospheric Storms / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week: 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), September 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine: Proceedings. — Kharkiv, 2020. — P. 253–258. (*Особистий*

внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)

111. Oblique-Incidence Ionospheric Radio-Sounding: Seismo-Ionospheric Effects / L. F. Chernogor, K. P. Garmash, Q. Guo, Y. Luo, **V. T. Rozumenko**, Y. Zheng // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week: 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), September 21–25, 2020, Kharkiv, Ukraine: Proceedings. — Kharkiv, 2020. — P. 354–359. *(Особистий внесок здобувача: Аналіз іоносферної обстановки. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.)*

АНОТАЦІЯ

Розуменко В. Т. Дія високоенергетичних джерел на атмосферно-космічні радіоканали. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України. – Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної проблеми – експериментальному та теоретичному дослідженню впливу високоенергетичних джерел природного та штучного походження на характеристики радіохвиль і атмосферно-космічні радіоканали, які використовуються засобами телекомунікації, радіолокації, радіонавігації, радіопеленгації, тощо.

Метою дисертаційної роботи є дослідження фізичних процесів в атмосфері та геокосмосі, що супроводжували падіння Челябінського та Камчатського метеороїдів, геокосмічних бур, тайфунів, землетрусів, стартів ракет, польотів космічних апаратів, важливих для поширення радіохвиль і функціонування радіоканалів.

Проведено теоретичні та багаторічні експериментальні дослідження збурень в атмосферно-космічних радіоканалах, характеристик радіохвиль і параметрів атмосфери й іоносфери, викликаних дією потужних природних і штучних джерел. Вперше отримано кількісні характеристики збурень як параметрів радіосигналів, так і атмосфери й іоносфери.

Експериментальні дослідження виконані на технічній базі Радіофізичної обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна та Харбінського інженерного університету (КНР) і радарі некогерентного розсіяння (Інститут іоносфери НАНУ і МОНУ).

Ключові слова: системна парадигма, високоенергетичне джерело, землетрус, тайфун, падіння метеороїда, геокосмічна буря, старт ракети, характеристики радіохвилі, доплерівське зміщення частоти, амплітуда радіосигналу, атмосферно-космічний радіоканал, аперіодичне та квазіперіодичне збурення, іоносфера.

ABSTRACT

Rozumenko V. T. Action of High-Energy Sources on Atmospheric and Space Radio Channels. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Science Degree in Physics and Mathematics Science, Specialty 01.04.03 – Radio Physics. — V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. — Kharkiv, 2021.

The dissertation is concerned with solving a topical problem, the experimental and theoretical study of the impact of high-energy sources of natural and artificial origins on the characteristics of radio waves and on atmospheric and space radio channels that are used in radar, radio navigation, telecommunications, direction-finding radio system, etc.

The goal of the dissertation is to study the main physical processes in the atmosphere and geospace that accompanied the impact of the Chelyabinsk and Kamchatka meteoroids on the environment, the influence of geospace storms, typhoons, earthquakes, launches of large rockets, and of the firing of orbital maneuvering thrusters, as well as the influence of high-power nanosecond radio emissions, which all are important for radio wave propagation and radio channel performance.

The theoretical and experimental studies of disturbances in the atmospheric and space radio channels, radio wave characteristics, as well as in the parameters of the atmosphere and the ionosphere, which arise under the action of powerful natural (earthquakes, typhoons, large meteoroids, and geospace storms) and anthropogenic sources (main engine and orbital maneuvering system engine burns), have been conducted for many years. For the first time, numerical values for the disturbances in both radiowave and atmospheric-ionospheric parameters have been obtained.

The Sun–interplanetary–medium–magnetosphere–ionosphere–atmosphere–Earth and Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere formations are found to be complex open dynamic nonlinear stochastic systems. The basic principles of the systems paradigm have been developed.

The demonstration has been given of the Chelyabinsk celestial body entry and explosion to cause appreciable (or large) disturbances in all geospheres.

Using long-term observational data, local time and seasonal dependences of the magnitude, direction, zonal and meridional components of the wind velocity in the mesosphere have been obtained. Its magnitudes have been shown likely to be 10 – 80 m/s with 3 – 7 m/s error.

The electron heating in the 30 – 60-km altitude range by an ultra-short pulse has been established to be essential even when the pulse length $\tau = 1$ ns and power $P = 1$ GW. The atmospheric breakdown in the 30 – 60-km altitude range begins to occur when $P_{\min} = 0.3\text{--}1.3$ GW and the frequency $f \approx 10$ GHz.

The capability of observing the dynamic processes accompanying a moderate earthquake of Richter magnitude $M \approx 5.9$ has been proved to be successful.

The action of the super typhoon has been shown to be accompanied by enhancements in the wave activity in the atmosphere, when wave processes are generated with periods of 2 to 7 min and of 12–15 to 60–150 min. The coupling occurring in the atmosphere–upper-atmosphere–ionosphere has been confirmed to be carried by acoustic and gravity atmospheric waves. The greatest effect that the typhoon

had on the ionosphere was revealed to occur when it had maximum energetics (8, 10, and especially 9 October 2019).

A new classification of the ionospheric storms vs geomagnetic state has been advanced. The first group is comprised of strong ionospheric storms, which accompany strong magnetic storms ($K_p \geq 8$). The second group is comprised of strong ionospheric storms, which accompany minor magnetic storms. The third group is comprised of moderate ionospheric storms, which accompany strong magnetic storms. Naturally, moderate ionospheric storms accompany moderate magnetic storms.

Experiments conducted for many years have revealed that disturbances exhibit three groups of speeds: 0.5 – 0.7 km/s and smaller, 2 – 3 km/s, and 10 – 25 km/s. They correspond to acoustic and atmospheric gravity waves, slow MHD, and gyrotropic waves, respectively.

The experimental studies used the instrumentation located at the V. N. Karazin Kharkiv National University Radiophysical Observatory (MF radar, ionosonde, HF Doppler radar transmitting at vertical incidence, and fluxmeter magnetometer) and the multi-frequency multiple path HF Doppler radio system for oblique-incidence sounding of the ionosphere, which employs a software defined technology, at the Harbin Engineering University, PRC. In some cases, the incoherent scatter radar was employed (Institute for the Ionosphere of NAS and MES of Ukraine).

Key words: systems paradigm, high-energy source, earthquake, typhoon, meteoroid entry, geospace storm, rocket launch, radio wave characteristics, Doppler frequency shift, radio signal amplitude, atmospheric and space radio channel, aperiodic and quasi-periodic disturbances, ionosphere.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 1.9. Тир. 100 прим. Зам. № 301-21.
Підписано до друку 26.03.2021. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ ®
 **ИЗДАТ**
ТИ ПО Г РА Ф И Я
www.stil-izdat.com