

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

**Дудник Олексій Володимирович**

УДК 523.2:520.6.05:520.662

**ДИНАМІКА РАДІАЦІЙНИХ ПОЯСІВ І ФОНОВОГО  
РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ В НАВКОЛОЗЕМНОМУ ПРОСТОРІ ЯК  
ІНДИКАТОР ПРОЯВІВ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ**

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Гнатик Богдан Іванович,**  
Астрономічна обсерваторія Київського національного  
університету імені Тараса Шевченка,  
провідний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Федоров Юрій Іванович,**  
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,  
старший науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук,  
професор  
**Маслюк Володимир Трохимович,**  
Інститут електронної фізики НАН України,  
завідувач відділу.

Захист відбудеться «17» квітня 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, Київ.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: Головна астрономічна обсерваторія НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, Київ.

Автореферат розіслано « 13 » березня 2015 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01  
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена дослідженням характеристик сплесків надвисокочастотного радіовипромінювання навколоземного космічного простору; впливу сонячної, міжпланетної і геофізичної активності на динаміку потоків заряджених частинок високих енергій на супутникових висотах. Актуальними є питання про пошуки і встановлення нових індексів сонячної і геофізичної активності, які б адекватно відображали процеси, що відбуваються в хромосфері і короні Сонця, в магнітосфері Землі. За останні роки відбувається пошук тих агентів, вплив яких на стан магнітосфери, іоносфери і людську діяльність найбільш ефективний. Все більше уваги приділяється корональним дірам, рентгенівським спалахам, корональним викидам маси, що реєструються у різних ділянках електромагнітного діапазону – від ультрафіолетового до рентгенівського, сонячним радіосплескам у декаметровому, метровому і дециметровому діапазонах довжин хвиль. З іншого боку, земна магнітосфера і її окремі складові частини не завжди реагують на високошвидкісні потоки сонячного вітру, міжпланетні ударні хвилі і сонячні космічні промені.

Одним із показників магнітосферних збурень є високочастотне широкосмугове радіовипромінювання навколоземного простору. У роботі проводиться опис наземної апаратури для реєстрації спорадичного радіовипромінювання на частотах 151.5 і 500 МГц на середніх широтах, проводиться аналіз явищ у радіосплесках фону, що спостерігались протягом 1993–2003 років, розглянуті питання умов, причин і джерел генерації спорадичних радіосплесків навколоземного космічного простору на середніх широтах у широкій смузі частот як одного з параметрів космічної погоди.

Експериментальні дані про радіаційні пояси Землі, які накопичені за останні роки, вказують на значне відхилення просторово-часових і енергетичних розподілів електронів і протонів від стандартних моделей NASA AE-8/AP-8 RADBELT для мінімуму і максимуму сонячної активності. Застосування високочутливих методик реєстрації, накопичення, зберігання і передавання даних з бортової наукової апаратури штучних супутників Землі дозволяє розширити знання про динаміку частинок не тільки всередині радіаційних поясів Землі і в області Бразильської магнітної аномалії, але й в тих областях, де раніше частинки не спостерігали. У роботі проводиться опис українського супутникового телескопа електронів і протонів СТЕП-Ф на борту космічного апарата «КОРОНАС-Фотон», аналізуються експериментальні дані, що були отримані за його допомогою у 2009 році.

**Актуальність теми.** Життя на Землі повністю залежить від енергії Сонця. Тому дослідження змінних потоків сонячної енергії та їх вплив на оточуюче середовище становить безпосередній практичний інтерес. Фундаментальне значення має взаємодія сонячної енергії з атмосферою і магнітосферою Землі. Відомо, зокрема, кореляція авроральних полярних сьйв, геомагнітних збурень, послаблень і завмирань короткохвильового радіозв'язку з сонячними спалахами. У зв'язку з зазначеним є очевидною необхідність вивчення причин впливу, каналів передавання збурень і прогнозування наслідків.

Однією з перспективних методик вивчення і розуміння нестационарних процесів, що відбуваються в навколоземному космічному просторі, є здобутки у напрямку «взаємодія хвиля–частинка». Це обумовлено необхідністю прогнозування радіаційного стану на висотах польотів штучних супутників Землі, впливом іонізуючого випромінювання на конструкційні і оптичні матеріали, електронні прилади орбітальних станцій і здоров'я космонавтів, впливом висипань частинок в атмосферу Землі на короточасні зникання короткохвильового радіозв'язку. Тому задача поглиблення знань про динамічно змінну багатокомпонентну структуру сонячно-земних зв'язків і розробки методик визначення нових індексів космічної погоди залишається актуальною і такою, що постійно уточнюється. Розглянуті у дисертації питання мають безпосереднє відношення до актуальних проблем фізики сонячно-земних зв'язків, космічної погоди, наукового космічного приладобудування, фізики космічних променів і радіаційних поясів Землі.

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

Робота виконувалась у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України в межах держбюджетних тем:

«Моніторинг радіовипромінювання магнітосфери Землі в різних діапазонах довжин хвиль» (1992–1995 рр., номер державної реєстрації ІА01008649Р);

«Дослідження надвисокочастотного радіовипромінювання магнітосфери Землі на початку 23-го циклу сонячної активності» (1996–1997 рр., номер державної реєстрації 0197U008117);

«Дослідження високочастотного радіовипромінювання навколоземного простору перед і під час проведення міжнародного супутникового експерименту «Фотон» з вивчення сонячної активності і сонячно-земних зв'язків» (1998 р., номер державної реєстрації 0198U005319);

«Дослідження тригерного механізму у сонячно-земних зв'язках методами експериментальної ядерної фізики та радіофізики на етапі підготовки космічного експерименту “Фотон”» (1999–2001 рр., номер державної реєстрації 0100U003294);

«Дослідження тригерних магнітосферних явищ та нетрадиційних методів реєстрації космічних випромінювань надвисоких енергій» (2002–2004 рр., номер державної реєстрації 0103U004213);

в рамках госпдоговірних тем:

«Розробка ескізного проекту на створення спектрометра частинок “СТЕП” космічного експерименту “Попередження”» (1995 р., номер державної реєстрації 0195U02730);

«Розробка моделей розподілу потоків іонізуючих випромінювань природного походження і розрахунки дозного розподілу в елементах бортової апаратури при їх впливі» (1993 р., номер державної реєстрації 0194U017505);

в рамках Державного Замовлення «Астрофізичні дослідження за допомогою міжнародних орбітальних обсерваторій» (2005–2007 рр., номер державної реєстрації 0105U003946);

Державного Контракту «Дослідження сонячної активності і сонячно-земних зв'язків за допомогою космічного комплексу “Коронас-Фотон”» та його продовження «Введення в експлуатацію приладу СТЕП-Ф космічного комплексу “Коронас-Фотон”» (2008 р., номер державної реєстрації 0108U009376).

**Мета і задачі дослідження.** *Метою роботи є* дослідження динаміки просторово-часових розподілів потоків електронів високих енергій під радіаційними поясами Землі і високочастотного спорадичного радіовипромінювання навколоземного простору в залежності від різних проявів сонячної активності, умов у міжпланетному просторі і магнітосфері Землі.

*Об'єктами досліджень є* потоки елементарних заряджених частинок високих енергій в магнітосфері Землі і високочастотне та надвисокочастотне радіовипромінювання навколоземного космічного простору.

*Предмет досліджень* – характеристики і динаміка спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору у метровому та дециметровому довжинах хвиль; варіації потоків і просторово-часових розподілів електронів радіаційних поясів Землі в залежності від умов у міжпланетному просторі і сонячної активності в оптичному, рентгенівському і радіодіапазонах в періоди максимуму і мінімуму сонячної активності.

*Задачами досліджень є:*

- розробка нових методів отримання інформації про фізичні процеси, що відбуваються в навколоземному космічному просторі, магнітосфері та під радіаційними поясами Землі;

- створення наземної апаратури і космічного інструменту для реєстрації спорадичного радіовипромінювання в надвисокочастотному радіодіапазоні і потоків енергетичних частинок під радіаційними поясами Землі;

- довготривалі наземні та орбітальні спостереження і накопичення експериментальних даних про варіації потужності спорадичного радіовипромінювання навколоземного простору і динаміку потоків високоенергетичних електронів у магнітосфері Землі, включаючи радіаційні пояси;

- аналіз просторово-часових розподілів потоків електронів високих енергій на висоті 550 км у період мінімуму 11-річного циклу сонячної активності;

- пошук причин, закономірностей і механізмів генерації надвисокочастотного радіовипромінювання навколоземного космічного простору.

*Методи досліджень* – спостереження спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору на частотах 151.5 і 500 МГц стаціонарними наземними антенними решітками і автоматизованою реєструючою установкою; моніторинг потоків електронів у широкому діапазоні енергій на висоті 550 км над рівнем поверхні Землі за допомогою супутникового телескопа електронів і протонів СТЕП-Ф на борту космічного апарата «КОРОНАС-Фотон»; комп'ютерна обробка результатів експериментів із залученням даних про сонячну і геофізичну активність з супутників космічної погоди і наземних обсерваторій.

**Достовірність і обґрунтованість одержаних результатів** підтверджені Протоколами и Актами автономних, стикувальних, тепловакуумних, комплексних і передстартових випробувань лабораторного, технологічного і льотного зразків супутникового телескопа електронів і протонів СТЕП-Ф комплексу наукової апаратури «Фотон».

**Наукова новизна одержаних результатів.** В процесі виконання роботи було вперше отримано такі наукові результати:

1. Вперше показано, що найбільш ймовірними областями генерації сплесків спорадичного радіовипромінювання фону є внутрішні шари магнітосфери Землі, в яких відбуваються варіації потоків високоенергійних електронів, що висипаються з радіаційних поясів в атмосферу Землі.

2. Вперше знайдено потоки електронів проміжних енергій на висоті 550 км поза областями радіаційних поясів, Бразильської магнітної аномалії на всіх географічних широтах в період мінімуму 11-річного циклу сонячної активності, а також у відсутності геомагнітних збурень. Вперше визначено емпіричні значення часів життя електронів з енергіями  $E_e > 180$  кеВ у відроггах внутрішнього і зовнішнього електронних радіаційних поясів Ван Алена.

3. Вперше знайдено третій, додатковий електронний пояс у магнітосфері Землі, розташований під внутрішнім радіаційним електронним поясом Ван Алена. Додатковий пояс спостерігається як поза областю Бразильської магнітної аномалії, так і усередині аномалії; під час слабких проявів геомагнітної активності і за її відсутності. Вперше показано, що енергетичний спектр електронів у додатковому поясі має більш швидко спадаючий характер у порівнянні з енергетичним спектром частинок внутрішнього поясу Ван Алена.

4. Вперше показано, що на висоті  $\approx 550$  км потоки частинок під електронними радіаційними поясами Ван Алена мають анізотропний характер, в той час як в області Бразильської магнітної аномалії частинки рухаються ізотропно.

5. Розроблено і реалізовано нові методи автоматизованої реєстрації потоків заряджених частинок високих енергій на висотах штучних супутників Землі і потужності сплесків спорадичного радіовипромінювання навколосемного космічного простору на середніх широтах на частотах 151.5 і 500 МГц.

6. Розроблено нові методи визначення інструментальних характеристик напівпровідникових і сцинтиляційних детекторів заряджених частинок, вузлів аналогової і цифрової обробки сигналів, що дозволили отримати абсолютні і відносні калібрувальні дані, необхідні для інтерпретації результатів.

7. Розроблено нову методику досліджень спорадичних радіосплесків, що містить комплексний аналіз наземних і супутникових даних: про сонячні радіосплески, рентгенівське радіовипромінювання; сонячний вітер і потоки енергетичних частинок у міжпланетному просторі за даними супутників космічної погоди; про потоки електронів і варіації геомагнітного поля на геостаціонарній орбіті; про потоки частинок високих енергій на висотах до 1000 км; наземні дані про варіації геомагнітного поля і спектральну потужність сплесків радіовипромінювання навколосемного простору на різних частотах, включаючи такі, що одночасно спостерігаються в пунктах спостереження, віддалених один від одного на сотні кілометрів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у такому:

– метод реєстрації сплесків спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору на різних частотах за допомогою антенних наземних решіток дозволив ідентифікувати різні прояви сонячної і геофізичної активності, фази геомагнітних збурень і варіації потоків субрелятивістських електронів під радіаційними поясами Землі. Метод відкриває можливість введення і використання нового індексу космічної погоди без розробки і виготовлення витратних технічних засобів, що встановлюються на високо орбітальних космічних апаратах;

– метод реєстрації заряджених частинок проміжних енергій за допомогою позиційно-чутливих кремнієвих багатоелементних матричних детекторів з великою активною площею і високою чутливістю приладу СТЕП-Ф дозволив отримати інформацію про напрямки приходу частинок і про мінімальні потоки електронів у тих областях магнітосфери, де раніше вважалось, що вони відсутні. Метод застосування сегментованих детекторів з великою активною площею і з окремими каналами аналогової обробки сигналів дозволить знаходити, реєструвати і визначати варіації заряджених частинок з мінімальною щільністю потоків у невивчених областях космічного простору;

– розроблені сцинтиляційні детектори на основі монокристалів йодистого цезію, активованих талієм, і кремнієвих фотодіодів великої площі, дозволили забезпечити спектрометрію приладу СТЕП-Ф за енергіями, знайти неоднорідну структуру радіаційного поясу Землі в області Бразильської магнітної аномалії, підвищити чутливість приладу в області високих енергій частинок. Використання кристалічних сцинтиляційних детекторів в комбінації з кремнієвими р-і-n фотодіодами великої активної площі в сонячних, космофізичних і лабораторних дослідженнях космічних променів дозволить зменшити ваго-габаритні характеристики, спростить інтерпретацію отриманих даних, підвищить надійність і тривалість експериментів через високу радіаційну стійкість монокристалів CsI(Tl);

– метод комплексного аналізу супутникових даних про сонячні хромосферні, рентгенівські і протонні спалахи, сонячні радіосплески і корональні викиди маси, сонячний вітер, заряджені частинки високих енергій у міжпланетному просторі, на геостаціонарній орбіті і низьких полярних орбітах під час обробки і інтерпретації даних з приладу СТЕП-Ф дозволив отримати недосягну раніше детальну інформацію про динаміку електронів проміжних і релятивістських енергій на висотах  $\leq 1000$  км від поверхні Землі. Цей метод відкриває можливість подальшого удосконалення параметрів бортових телескопів у частині спостереження процесів у магнітосфері Землі і в міжпланетному просторі;

– метод залучення даних про частинки і їхнє вторинне електромагнітне випромінювання, що отримані від сонячного рентгенівського фотометра SphinX, встановленого на тому самому космічному апараті, що і прилад СТЕП-Ф, для спільної обробки і інтерпретації даних, дозволив знайти анізотропію потоків електронів під радіаційними поясами, цілковиту всеспрямованість частинок в області Бразильської магнітної аномалії на малих

висотах, різницю в енергетичних спектрах електронів в області аномалії, зовнішнього і внутрішнього електронних радіаційних поясів. Метод спільного аналізу даних з космічних рентгенівських фотометрів і детекторів заряджених частинок високих енергій дозволить не тільки вірно ідентифікувати сплески від рентгенівських астрофізичних джерел, але й вирішити прикладну задачу попередження і захисту чутливих сенсорів фотометрів при підвищених дозах зарядженої радіації у космосі.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувач сформулював мету, задачі, основні положення і висновки. У роботах [5–8, 31] автор обґрунтував вибір частот для прийому високочастотних радіошумів магнітосфери; запропонував конструкцію, розробив методику налаштування антен, приймав участь у виготовленні і налагодженні антен та радіоприймальних пристроїв, розробив методику вимірювань амплітудно-частотних характеристик радіоприймальних трактів для прийому радіовипромінювання на частотах 151.5 і 500 МГц, запропонував модернізацію установки, методику автоматизації запису рівня спектральної густини потужності шуму.

У роботах [2, 9, 15, 28–30, 35, 38] здобувач дослідив процеси генерації спорадичних радіосплесків під час геомагнітної бурі 29 вересня 1993 р.; обґрунтував два підходи до обробки даних; показав, що високоенергетичні частинки, прискорені у міжпланетному просторі, і магнітосферні процеси на оболонці  $L > 6.6$  не є джерелом спорадичних радіосплесків.

Автор дослідив процеси генерації спорадичних радіосплесків під час геомагнітної бурі 22 жовтня 1999 р. і їхній зв'язок з міжпланетною і геофізичною активністю; спільно з А.В. Дмитрієвим і Л.Ф. Черногором у роботах [7, 19, 44] показав, що під час раптових імпульсів SC і бурі з магнітудою  $D_{st} = -237$  нТл підвищення числа спорадичних радіосплесків на середніх широтах має магнітосферне походження.

Спільно з Ю.Ф. Юровським автор організував і здійснив експеримент з вивчення спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору на 4-х частотах поблизу м. Харкова і в Криму під час сонячного спалаху великої потужності 4 листопада 2001 р.; спільно з Ю.Ф. Юровським і І.М. Мягковою здійснив аналіз радіосплесків, що одночасно спостерігались у пунктах реєстрації, розташованих на відстані 700 км один від одного (роботи [18, 36, 40, 42]); здійснив аналіз взаємозв'язку спорадичних радіосплесків з висипаючими потоками електронів невеликих енергій за даними приладу UVI на борту полярного низькоорбітального супутника POLAR.

Здобувач у роботах [1, 3, 4, 17, 27, 42, 43] здійснив комплексний аналіз взаємозв'язку спорадичних радіосплесків на двох частотах з сонячними радіосплесками, частинками в міжпланетному просторі, на геостаціонарній орбіті та під радіаційними поясами; запропонував механізм генерації радіосплесків; зробив оцінку синхротронного випромінювання висипаючих електронів у дипольному геомагнітному полі.

Автор запропонував конструкцію і структуру складових частин супутникового телескопа електронів і протонів СТЕП-Ф, здійснював загальне керівництво розробкою, виготовленням і тестуванням зразків приладу СТЕП-Ф.



Спільно з Т.В. Малихіною здійснив комп'ютерне моделювання відгуків телескопічної системи приладу на перетинання заряджених частинок високих енергій крізь матеріали детекторів; спільно з А.В. Спаським і Т. Гока здійснив калібрувальні вимірювання блоку детектування СТЕП-ФД на прискорювачах частинок RIKEN (Японія), НДІ ядерної фізики Московського університету, і самостійно – в Інституті електронної фізики НАН України (м. Ужгород), що відображено у роботах [10–14, 16, 20, 23, 24, 32–34, 37, 39, 41, 45].

У роботах [21, 22] здобувач здійснив обробку даних, узагальнив розподіли потоків частинок на висоті 550 км у різних енергетичних діапазонах; визначив емпіричні значення часів життя електронів зовнішнього і внутрішнього радіаційних поясів; знайшов явище випереджуючих варіацій електронів внутрішнього поясу у початковій фазі геомагнітної бурі.

У роботах [25, 26, 46, 48] автор здійснив порівняльний аналіз даних з рентгенівського спектрофотометра SphinX і приладу СТЕП-Ф під час геомагнітної бурі 5–8 травня 2009 р.; показав, що сенсори спектрофотометра SphinX реєструють переважно гальмівне випромінювання від первинних електронів; показав, що на висоті 550 км просторові розподіли високоенергійних електронів мають анізотропний характер поза областю Бразильської магнітної аномалії; визначив, що енергетичні спектри електронів в області Бразильської магнітної аномалії та за її межами сильно відрізняються один від одного.

Здобувач довів існування додаткового внутрішнього радіаційного поясу на широтах, менших за ті, на яких спостерігається внутрішній пояс Ван Алена; у роботах [21, 22, 25, 26, 46–48] показав, що основний і додатковий пояси реєструються на довготах, які не співпадають з довготами розташування Бразильської магнітної аномалії; обґрунтував висновок про різницю енергетичних спектрів електронів внутрішнього поясу Ван Алена і додаткового поясу на  $L$ -оболонці  $L \approx 1.6$ .

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Результати, отримані в дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались на таких наукових конференціях і семінарах:

Всесоюзному семінарі з ДНЧ-випромінювання (Москва, Росія, 1991 р.);

Міжнародних конференціях з космічних променів ("International Cosmic Ray Conference") (Дублін, Ірландія, 1991 р.; Калгарі, Канада, 1993 р.; Рим, Італія, 1995 р.; Гамбург, Німеччина, 2001 р.);

Міжнародному робочому семінарі "Space Radiation Environment: Empirical and Physical Models" (Дубна, Росія, 1993 р.);

Міжнародній конференції "Physics in Ukraine" (Київ, Україна, 1993 р.);

З'їздах Української Астрономічної Асоціації (Київ, Україна, 1993 р.; 1995 р.);

Наукових Асамблеях COSPAR (Бірмінгем, Велика Британія, 1996 р.; Варшава, Польща, 2000 р.; Х'юстон, США, 2002 р.; Місоре, Індія, 2012 р.);

Міжнародній конференції "Programmable Devices and Systems" (PDS'98) (Глівіце, Польща, 1998 р.);

16-й Європейській конференції з космічних променів (Алкала, Іспанія,

1998 р.);

Спільній 7-й Європейській і 65-й щорічній Чеській Астрономічній конференції JENAM–98 (Прага, Чехія, 1998 р.);

Міжнародному симпозиумі «From solar corona through interplanetary space, into Earth's magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites, and ground-based observations» (Київ, Україна, 2000 р.);

Конференції “Asia–Pacific Radio Science Conference” (Токіо, Японія, 2001 р.);

Наукових сесіях Московського інженерно-фізичного інституту (Москва, Росія, 2003, 2007, 2009, 2011 рр.);

Спільній Асамблеї Європейського і Американського геофізичних товариств (“EGS–AGU–EUG Joint Assembly”) (Ніца, Франція, 2003 р.);

Українських конференціях з космічних досліджень (Кацівели, Крим, Україна, 2003 р.; Євпаторія, Крим, Україна, 2009; 2012; 2013 рр.);

28-й Всеросійській конференції з космічних променів (Москва, Росія, 2004 р.);

Міжнародному Симпозиуму “International Symposium on Solar Extreme Events of 2003” (Москва, Росія, 2004 р.);

Міжнародній конференції “«Коронас-Ф»: три года наблюдений активности Солнца, 2001–2004 г.” (Троїцьк, Росія, 2005 р.);

11-му Міжнародному Симпозиумі “International Symposium on Equatorial Aeronomy” (Тайпей, Тайвань, 2005 р.);

4-му міжнародному робочому семінарі “4<sup>th</sup> International workshop on High Energy Particle Precipitation in the Atmosphere / SOLAR Influences for Stratospheric Processes and their Role in Climate (HEPPA / SOLARIS–2012)” (Боулдер, Колорадо, США, 2012 р.);

Конференції “Progress in Extreme Ultra Violet (EUV)&X–ray spectroscopy and imaging” (Вроцлав, Польща, 2012 р.);

на наукових семінарах фізико-технічного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна і Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України (2009 р.); Інституту Астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна (2009 р.); Інституту космічних досліджень НАН України і Державного космічного агентства України (2009, 2013 рр.); Головної астрономічної обсерваторії НАН України (2009 р.); Радіоастрономічного інституту НАН України; Інституту ядерних досліджень імені Д.В. Скобельцина Московського державного університету імені М.В. Ломоносова (2009 р.); Інституту Астрономії Вроцлавського університету, Польща (2010, 2012, 2013 рр.); Обсерваторії Туорла Університету м. Турку, Фінляндія (2012 р.); на засіданнях Ради з космічних досліджень при Президії НАН України (2010, 2012 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано протягом 1991–2013 рр. у 48 роботах: 27 статей у фахових журналах [1–27] і 21 робота у збірниках праць конференцій [28–48].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 9 розділів, в яких проведено огляд стану проблеми та викладені результати дослідження, висновків, списку використаних джерел, який містить 223 найменування, і додатків. Загальний обсяг дисертації – 296 сторінок; робота містить 84 рисунки, 16 таблиць, 9 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ**

У **Вступі** дається загальна характеристика роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості стосовно апробації роботи і публікацій результатів досліджень.

**Розділ 1. Заряджені частинки високих енергій і високочастотне радіовипромінювання магнітосфери Землі.** Перший розділ має оглядовий характер. В ньому коротко сформульовано уявлення про космічну погоду, індекси сонячної, міжпланетної геомагнітної і магнітосферної активності [49]. Увага приділяється сучасним уявленням про причини генерації спорадичних радіосплесків навколоземного космічного простору у високочастотному і надвисокочастотному діапазонах довжин хвиль на середніх широтах. Дано опис різних класифікацій сплесків радіовипромінювання навколоземного простору за часовими і амплітудними характеристиками, за часовими затримками і випередженнями відносно сонячного спалаху.

Всі явища у спорадичному радіовипромінюванні поділяються на: а) поодинокі сплески тривалістю близько десятків і сотень секунд на фоні шумів апаратури; б) шумові бурі при загальному значному підвищенні флуктуацій; в) тривалі зміни середнього рівня випромінювання, що не супроводжуються змінами флуктуацій. Сплески радіовипромінювання у дециметровому діапазоні довжин хвиль і шумові бурі є наслідком спорадичного радіовипромінювання іономагнітосфери, а не індустріальними завадами; вони породжуються різними проявами сонячної активності [50].

Спостерігається взаємозв'язок між групами сплесків спорадичного радіовипромінювання у метровому діапазоні довжин хвиль і хромосферними спалахами на Сонці в оптичному діапазоні, імпульсною складовою ультрафіолетового і рентгенівського випромінювань Сонця. Прояви впливу сонячних спалахів у радіовипромінюванні навколоземного простору на середніх широтах поділено на такі явища: а) ефекти, які спостерігаються навколо моменту початку спалаху; б) дія сонячних енергійних частинок, прискорених під час спалаху, на іономагнітосферу; в) прихід ударної хвилі і наступні за нею збурення магнітного поля [51]. Комплексні спостереження радіошумів іоносфери, критичних частот іоносферних шарів F-області і E<sub>s</sub> спорадичного шару, висотної структури іоносфери встановили співпадання короткотривалих викидів радіошумів на довжині хвилі  $\lambda = 2$  м і моменту створення тонкого спорадичного шару E<sub>s</sub> на висотах 85–90 км [52]. Дослідження спорадичного радіовипромінювання на частотах 38 і 325 МГц

показали, що радіосплески спостерігаються, як правило, після приходу високошвидкісних потоків сонячного вітру, під час геомагнітних збурень [53].

В першому розділі коротко сформульовано уявлення про радіаційні пояси в магнітосфері Землі, джерела поповнення частинок і механізми їхніх втрат. Рух частинок у дипольному полі є суперпозицією трьох незалежних рухів: а) ларморівського обертання частинки навколо силової лінії в площині, перпендикулярній магнітному полю; б) коливання миттєвого центра обертання (ведучого центра) вздовж силових ліній, і в) дрейфу ведучого центра навколо Землі. Плазмосфера Землі містить два електронних радіаційних пояси, перший з яких, внутрішній, розташований нижче  $L$ -оболонки  $L \approx 2$ ; другий пояс, зовнішній, розташований вище  $L \approx 3.5$ . Заряджені частинки з більш високими енергіями розташовані на  $L$ -оболонках з меншими значеннями. Потоки електронів зовнішнього поясу відрізняються значними коливаннями, рівень яких залежить від сонячної і геомагнітної активності, в той час як електрони внутрішнього поясу відрізняються більшою стабільністю як за щільністю потоків, так і за радіальним положенням [54].

В земній магнітосфері діють різні механізми прискорення електронів, з них взаємодія «хвиля-частинка» є найбільш перспективним [55]. Розсіюванням на широкосмуговій вістлерній моді низькочастотних магнітосферних випромінювань і втратами електронів з області  $2 \leq L \leq 3$  пояснюється проміжок між внутрішнім і зовнішнім поясами, що характеризується відсутністю енергійних електронів [56]. Проміжок між поясами може заповнюватись електронами на різні періоди від декількох діб до декількох місяців в залежності від потужності сонячного спалаху, параметрів сонячного вітру і ступеня геомагнітної збуреності [57]. Під радіаційними поясами на  $L < 2$  на висотах до 1000 км спостерігаються підвищені спорадичні потоки електронів. Ці потоки розподілені нерівномірно, існують три характерні зони за широтою: а) приекваторіальна область ( $L < 1.2$ ); б) низькі широти ( $1.2 < L < 1.4$ ); в) середні широти ( $1.6 < L < 2$ ) [58]. Природа цих потоків досі невідома.

У першому розділі дано перелік невивчених і нез'ясованих явищ, базуючись на огляді публікацій: невідомо про внесок електронів і протонів, прискорених у короні Сонця і в міжпланетному просторі, в генерування спорадичного радіовипромінювання магнітосфери Землі; недослідженими залишились явища одночасної реєстрації: а) спорадичних радіосплесків у пунктах, рознесених один від одного на сотні кілометрів, б) варіацій потоків субрелятивістських електронів на висоті 500 км над поверхнею Землі, і в) полярних сьйв за даними супутникових вимірювань у діапазоні довжин хвиль від 130 нм до 190 нм ультрафіолетового діапазону. Не з'ясовано питання щодо ключової ролі висипаючих з радіаційних поясів електронів у генеруванні спорадичних радіосплесків.

Досі не з'ясовано наявність і значення потоків частинок високих енергій поза зоною Бразильської магнітної аномалії і поза зонами стаціонарних радіаційних поясів на висоті 550 км. Не проводились комплексні дослідження впливу потоків енергійних частинок сонячного і міжпланетного походження на динаміку радіаційних поясів із залученням супутникових даних з космічних

апаратів, розташованих на далеких відстанях у міжпланетному просторі. Немає підтвердження про наявність більше ніж двох стаціонарних електронних радіаційних поясів; відсутній аналіз даних про анізотропію пучків частинок на висотах  $\leq 1000$  км; не проводились спільні вимірювання потоків високоенергійних частинок приладами прямої реєстрації і рентгенівськими спектрофотометрами, розташованими на одному космічному апараті.

**Розділ 2. Методика проведення експерименту зі спостереження сплесків фонових високочастотного радіовипромінювання.** В розділі дано опис технічних характеристик виготовлених антенних систем для реєстрації спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору на частотах  $f_1 = 151.5$  МГц і  $f_2 = 500$  МГц. Обґрунтовано вибір частот для приймання радіошумів. Дано опис конструкції антенних систем: у якості антенної системи на частоту  $f_1 = 151.5$  МГц побудовано антенну решітку з чотирьох антен ( $2 \times 2$ ), кожна з яких являє собою семиелементну директорну антену (рис. 1).

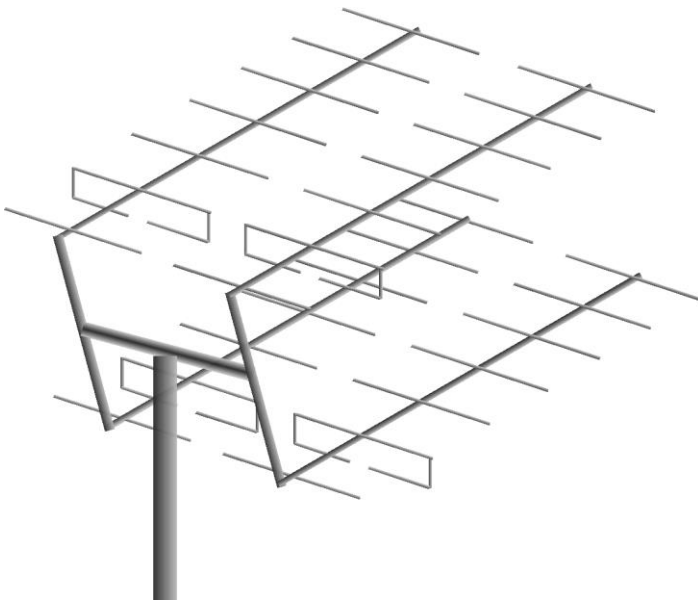


Рис. 1. Загальний вигляд антенної решітки для прийому радіошумів на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц.

той час як в  $H$ -площині антенна решітка має сильні бокові пелюстки прийому на  $\theta \approx \pm 127^\circ$ . Калібрувальні вимірювання показали, що повний коефіцієнт підсилення антенної решітки складає  $\approx 15$  дБ, ефективна площа реєстрації складає  $\approx 9.7$  м<sup>2</sup> [5–8, 31].

Антенна система для прийому сплесків радіовипромінювання навколоземного простору на частоті  $f_2 = 500$  МГц є синфазною антенною решіткою з чотирьох 13-елементних директорних антен, закріплених у верхівках квадрата на відстані  $\lambda/2$  одна від одної. Коефіцієнт підсилення антени відносно півхвильового вібратора у смузі частот  $\Delta f = 500\text{--}540$  МГц не менше 10 дБ. Завадозахищеність антени у смузі частот  $\Delta f = 470\text{--}638$  МГц не менше -20 дБ. Елемент решітки є ширококутовий варіант антени типу «хвильовий

В другому розділі описано методику, принципи і послідовність налагодження антен, з яких складається антенна решітка. Обґрунтовано, розроблено і представлено методику вимірювань діаграми спрямованості і коефіцієнта підсилення антенної решітки. Вимірювання показали, що повна ширина в  $E$ -площині складає  $2\theta_{0.71} \approx 34^\circ$ ; в  $H$ -площині –  $100^\circ$ . На рис. 2 наведено діаграму спрямованості антенної решітки на частоту  $f_1 = 151.5$  МГц для двох значень амплітуд високочастотних сигналів випромінюючої антени в  $E$ -площині. Бокові пелюстки в  $E$ -площині практично відсутні, в

канал» і складається з 11 директорів, петлевого півхвильового вібратора і рефлектора. Довжина антени складає 1500 мм, ширина – 350 мм і висота – 314 мм. Підключення кабелю до вібратора здійснюється через ширококутовий узгоджувач типу трансформатора Рутрофа.

Представлено методику і послідовність вимірювань наскрізних амплітудно-частотних характеристик радіочастотних трактів для прийому радіовипромінювання на частотах  $f_1 = 151.5$  МГц і  $f_2 = 500$  МГц.

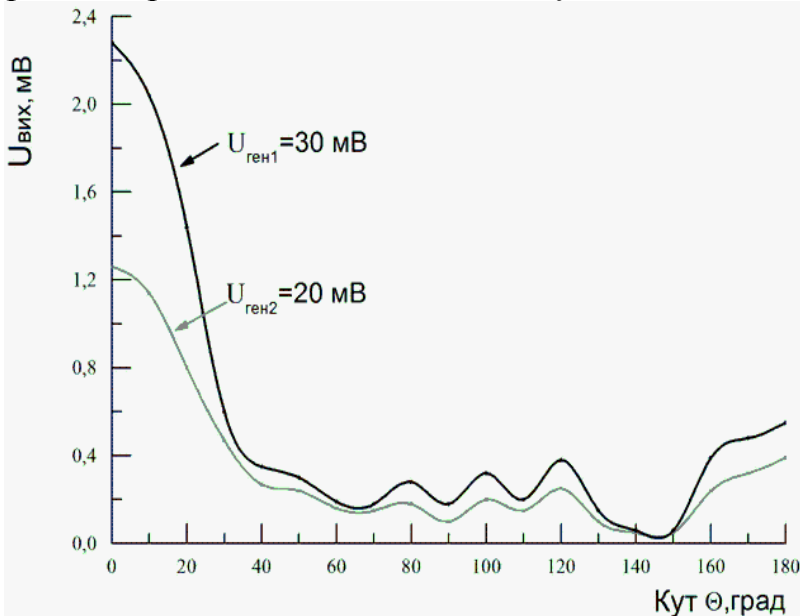


Рис. 2. Діаграма спрямованості антенної решітки на частоту  $f_1 = 151.5$  МГц для двох значень амплітуд сигналів випромінюючої антени в  $E$ -площині.

ну напругу  $U_{\text{макс}} \approx 2.5$  В, коефіцієнт шуму –  $K_{ш} \approx 2.3 kT_0$ . Наскрізні смуги пропускання трактів – на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц  $\Delta f_{151} \approx 3$  МГц; на частоті  $f_2 = 500$  МГц  $\Delta f_{500} \approx 2.4$  МГц. Лінійність характеристики відгуку радіочастотного тракту на частоті  $f_2 = 500$  МГц і діапазоні амплітуд вхідних сигналів зберігається від 2–4 мкВ до  $\approx 90$  мкВ.

Під час вимірювань проводились регулярні калібрування трактів шляхом підключення до входів антенних підсилювачів лавинно-пролітного діодного генератора шуму, який має спектральну потужність шуму на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц  $P_{151.5} = 78.5 kT_0 = 3.2 \times 10^{-19}$  Вт/Гц; на частоті  $f_2 = 500$  МГц  $P_{500} = 83.2 kT_0 = 3.4 \times 10^{-19}$  Вт/Гц.

У другому розділі дано опис етапів перевірки дієздатності, модернізації радіоприймальних трактів і реєструючих пристроїв спектральної густини потужності шуму на двох частотах. Представлено опис системи автоматизованого цифрового запису радіовипромінювання фону. На рис. 3 наведено приклад візуалізації сплесків спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору на обох частотах системою цифрового автоматизованого запису рівня радіочастотного фону.

Кожен з ідентичних приймальних трактів складається з малошумливого підсилювача, закріпленого на конструкції антенної решітки; радіочастотного кабелю типу РК-75-9-13 довжиною 31.5 м; радіоприймача з подвійним зниженням несучої частоти; квадратичного детектора; низькочастотного підсилювача; інтегруючого пристрою і підсилювача постійного струму.

Налагоджені антенні підсилювачі мають смугу пропускання  $\Delta f = 16$  МГц, коефіцієнт підсилення  $\approx 20$  дБ, максимальну вихід-

### Розділ 3. Зв'язок сплесків фонового високочастотного радіовипромінювання з сонячним вітром і варіаціями геомагнітного поля.

Досліджено процеси генерації спорадичних радіосплесків на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц під час геомагнітної бурі 29 вересня 1993 року. Оскільки спорадичне радіовипромінювання є переважно серіями короткочасних (від декількох секунд до декількох десятків секунд) сплесків з амплітудами від  $\approx 10^{-23}$  Вт/(м<sup>2</sup>×Гц) до  $10^{-21}$  Вт/(м<sup>2</sup>×Гц), у якості індексу високочастотного випромінювання було обрано число сплесків вище порогу  $3 \times 10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>×Гц). При цьому повільна складова середнього рівня фону залишалась постійною. Однак в окремі проміжки часу ця повільна складова ставала вище обраного порогу. Тому далі аналізувався хід рівня повільної складової фону. В дисертації показано, що високоенергійні електрони і протони, прискорені в короні і міжпланетному просторі, не є джерелом високочастотного радіовипромінювання магнітосфери Землі. Генерація радіосплесків пов'язана з процесами всередині земної магнітосфери [7, 30].

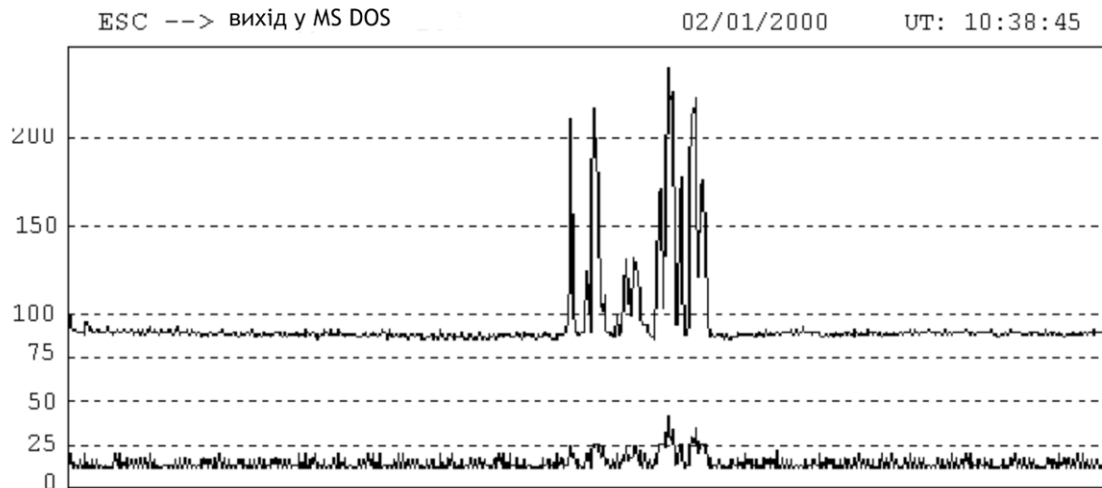


Рис. 3. Типовий вигляд запису сплесків спорадичного радіовипромінювання навколоземного простору на частотах  $f_1 = 151.5$  і  $f_2 = 500$  МГц на моніторі персонального комп'ютера системи автоматизованого запису радіочастотного фону.

В третьому розділі проводиться аналіз взаємозв'язку радіосплесків з параметрами сонячного вітру, вимірними в точці лібрації L1 у системі Земля–Сонце, і з потоками електронів на геостаціонарній орбіті на прикладі події 30 липня 1999 року, коли було помічено значне підвищення кількості короткотривалих радіосплесків [35]. Показано, що після приходу ударного фронту високошвидкісного потоку сонячного вітру зовнішня кромка зовнішнього радіаційного поясу Землі змістилась вглиб магнітосфери, в той час як максимальне число спорадичних радіосплесків на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц спостерігалось через  $t = 8$ – $10$  годин. Отже, висипання електронів з L-оболонок  $L > 6.6$  не можуть бути джерелом високочастотних радіосплесків.

З метою підтвердження висновку про те, що варіації потоків релятивістських

електронів з енергіями  $E_e > 2$  MeV на геостационарній орбіті не є безпосереднім джерелом генерації спорадичних радіосплесків, в дисертації проводиться аналіз події 9 серпня 1999 року з генерації підвищеного числа радіосплесків [9, 35, 38]. В цій події підвищення числа радіосплесків, підвищення рівня повільно змінної компоненти радіофону відбулося після приходу високошвидкісного потоку сонячного вітру і через  $\approx 15$  годин після реєстрації різкого зниження потоку електронів на геостационарній орбіті [15] (рис. 4).

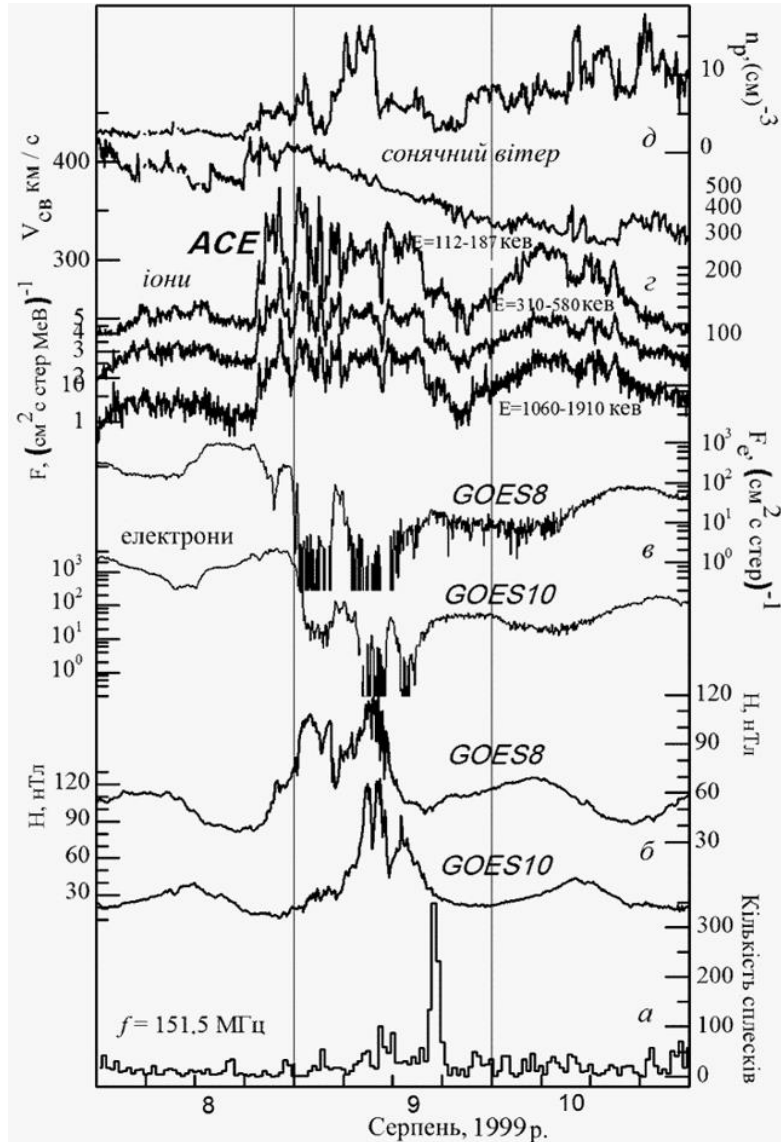


Рис. 4. Часовий хід параметрів сонячного вітру, заряджених частинок і спорадичного радіовипромінювання в період з 8 до 10 серпня 1999 року: а – кількості спорадичних радіосплесків магнітосфери Землі на частоті 151.5 МГц; б – вертикальної складової (спрямованої до Землі) геомагнітного поля; в – потоків електронів на геостационарній орбіті з енергіями  $E_e > 2$  MeV; г – потоків іонів у міжпланетному просторі поблизу головної ударної хвилі; д – щільності і швидкості сонячного вітру.

В дисертації досліджено процеси генерації спорадичних радіосплесків на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц під час сильної геомагнітної бурі 22 жовтня 1999 року і



їхній зв'язок з потоками частинок, параметрами сонячного вітру, міжпланетного і земного магнітних полів, отриманих на космічних апаратах ACE, SOHO, GOES8, GOES10, LANL1997, SAMPEX, а також на магнітній обсерваторії Москва (ИЗМИРАН) [19, 44].

Розглядається поведінка електронів з енергіями  $E_e > 0.6$  MeV на висоті 600 км, які детектувались на супутнику SAMPEX. У роботі показано, що під час раптових імпульсів SC 21 і 22 жовтня 1999 року і самої бурі ( $D_{st} = -237$  нТл) спостерігалось збільшення числа спорадичних радіосплесків на середніх широтах. Збурення міжпланетного магнітного поля, наявність ударних хвиль і коливань параметрів сонячного вітру 21–22 жовтня не супроводжувались змінами потоків сонячних космічних променів поблизу магнітосфери Землі. Тому варіації потоків енергійних електронів у десятки-сотні разів на геостаціонарній орбіті в ці дні пов'язані з розвитком в магнітосфері механізмів прискорення і втрат частинок.

Аналіз поведінки електронів з енергіями  $E_e > 0.6$  MeV на висоті 500 км за даними супутника SAMPEX показав, що в період 2–6 годин світового часу 21 жовтня 1999 року спостерігалось посилення висипань електронів в області зазору між поясами на  $L \approx 2-2.5$ , що характерно для динаміки високоенергійних електронів під час магнітних збурень. На рис. 5 наведено часовий хід інтенсивності електронів з енергіями  $E_e > 0.6$  MeV за вимірами на низькоорбітальному супутнику SAMPEX. Отже, генерація спорадичних радіосплесків на середніх широтах пов'язана з перерозподілом енергійних частинок за пітч-кутами, їхньою радіальною дифузією і прискоренням.

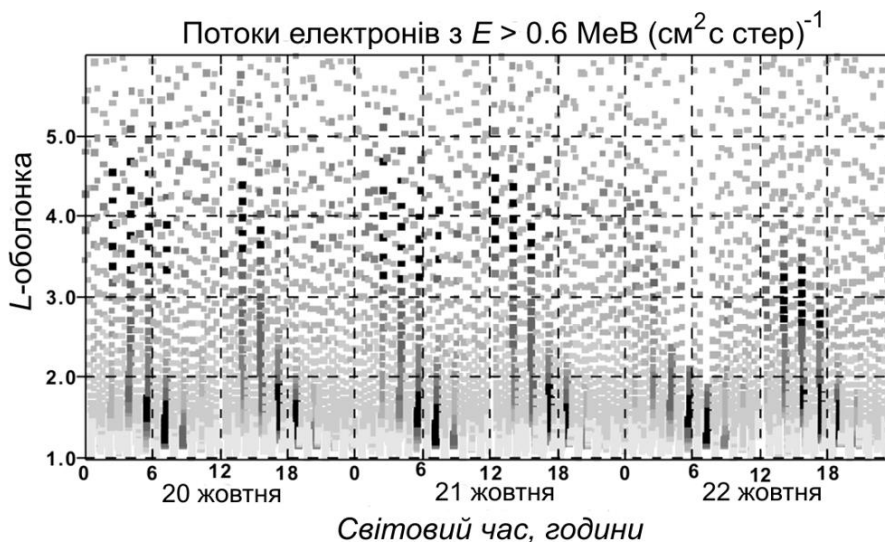


Рис. 5. Динаміка інтегральних потоків електронів з енергіями  $E > 0.6$  MeV на різних L-оболонках, виміряна на супутнику SAMPEX в період з 20 до 22 жовтня 1999 року.

**Розділ 4. Пошук взаємозв'язку навколоземних радіосплесків і динаміки енергійних частинок за даними приладу МКЛ на ШСЗ КОРОНАС-Ф.** На прикладі сонячного спалаху великої потужності 4 листопада 2001 року балу X1/3В проводиться аналіз причин виникнення інтенсивних радіосплесків фону,

зв'язок з енергійними частинками магнітосферного і сонячного походження.

З цією метою в роботі дано опис проявів сонячної активності в різних діапазонах електромагнітного випромінювання, від радіочастотних хвиль декаметрового діапазону до рентгенівської ділянки спектру [42]. Зміни потоків частинок представлені на основі даних різних приладів, встановлених на космічних апаратах: геостационарному GOES-8; ACE, що знаходиться в точці лібрації L1 у системі Сонце–Земля, і низькоорбітальному КОРОНАС-Ф. Представлено результати синхронних спостережень спорадичних радіосплесків у діапазоні частот від 151.5 до 500 МГц у м. Харкові і в Криму [18] (рис. 6).

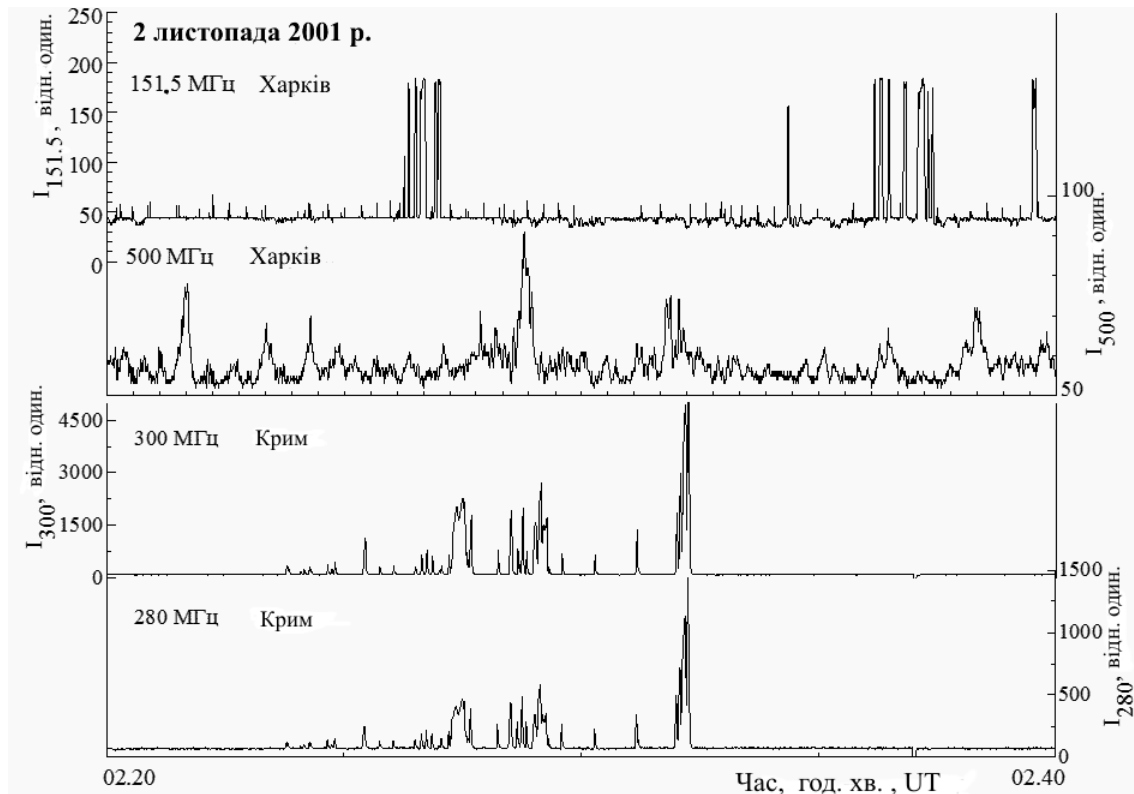


Рис. 6. Приклад нічного запису одночасних спостережень радіосплесків магнітосферного походження 2 листопада 2001 року на частотах 151.5, 500, 280 і 300 МГц у Харкові і в Криму.

Записи рівня фону в пунктах, розташованих один від одного на відстані 700 км, показав, що на частоті  $f_3 = 280$  МГц спостерігається менше спорадичних радіосплесків, ніж на частоті  $f_1 = 151.5$  МГц, що обумовлено більш вузькою діаграмою спрямованості антени Кримської обсерваторії і меншим значенням проекції  $L$ -оболонки на пункт спостереження в Криму [36, 40, 42]. Радіосплески на частоті  $f_3 = 280$  МГц реєструвалися як основною пелюсткою, так і боковими діаграми спрямованості антени, що свідчило про рух джерела генерації, або про короткотривале існування одночасно декількох джерел. На рис. 7 представлено результат запису радіошумів на 4-х частотах в Харкові і в Криму в період з 16 год. до 21 год. 4 листопада 2001 року за світовим часом.

З метою перевірки гіпотези про генерацію спорадичних радіосплесків короткочасними і інтенсивними висипаючими потоками релятивістських

електронів [59] у розділі проаналізовано поведінку потоків електронів з енергіями  $E_e = 0.3\text{--}0.6$  MeV на висоті 500 км за даними приладу МКЛ на супутнику «КОРОНАС-Ф». Показано, що потоки захоплених електронів суттєво зменшувались у нічному секторі північної півкулі Землі саме в проміжки часу реєстрації спорадичних радіосплесків на різних частотах у Харкові і в Криму (рис. 8). Зменшення інтенсивності електронів в обох поясах

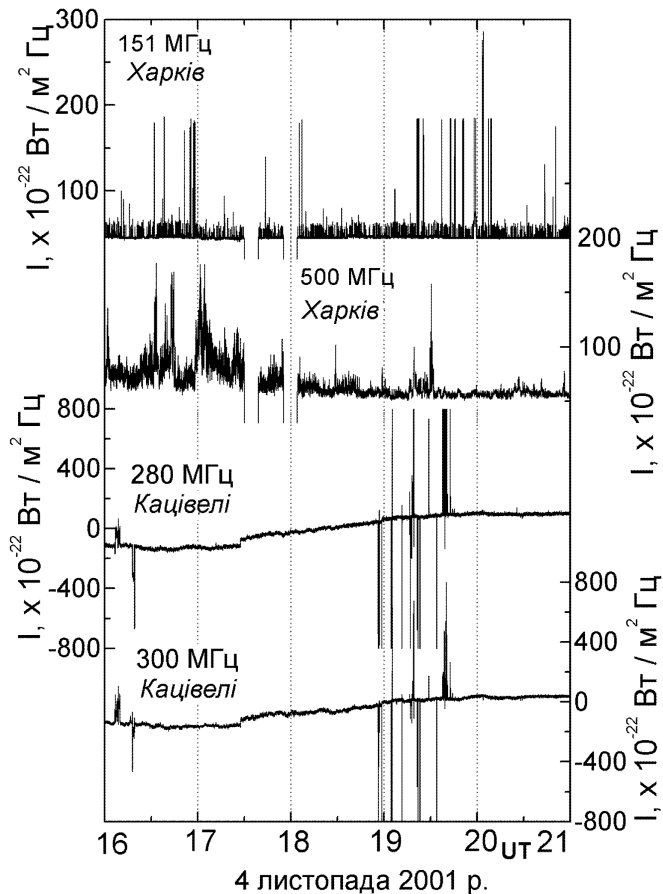


Рис. 7. Результат запису радіошумів у Криму і в Харкові в період з 16 до 21 годин за світовим часом

частинок з зовнішніх зон магнітосфери і генерації сплесків спорадичного радіовипромінювання.

**Розділ 5. Радіовідгук магнітосфери Землі на фазі зростання сонячної активності у жовтні 2003 року.** Спорадичне радіовипромінювання навколоземного простору розглядається у контексті параметра космічної погоди [49, 51, 52]. У розділі здійснюється співставлення радіошумів на частоті  $f_2 = 500$  МГц (наземні спостереження) з даним приймача RAD2 на космічному апараті WIND (супутникові спостереження) про сонячні радіосплески в декаметровому діапазоні довжин хвиль [61]. До аналізу додано дані про потоки енергійних заряджених частинок у міжпланетному просторі і на

пов'язане з їхнім висипанням і частковим спустошенням стаціонарних поясів.

Для додаткового підтвердження присутності висипаючих потоків частинок у проміжках часу реєстрації спорадичних радіосплесків у Харкові і в Криму в дисертації дано опис зображення високоширокої частини магнітосфери Землі у далекому ультрафіолетовому діапазоні за допомогою приладу UVI на борту низькоорбітального полярного супутника POLAR. Зображення показали раптове збільшення густини плазми і підсилення висипаючих потоків частинок у північній полярній шапці та у внутрішній частині геомагнітного «хвоста» в проміжки часу, коли спостерігались групи спорадичних радіосплесків на всіх частотах у Криму і в Харкові [40, 42]. Результати спостережень указали, з одного боку, на наявність неоднорідностей у потоках частинок, що досягли магнітосфери Землі за 3–4 години після спалаху. З іншого боку, певна доля частинок одразу попала в конус втрат або сприяла висипанню

геостаціонарній орбіті в період підвищеної сонячної і магнітосферної активності з 14 до 26 жовтня 2003 року. В роботі під час аналізу [17, 27, 43] використовуються результати спостережень потоків заряджених частинок приладами 3DP і ERACT на космічному апараті WIND, приладом EPS на геостаціонарному супутнику GOES-12, монітором SEM на полярному супутнику NOAA-15; виміри напруженості міжпланетного магнітного поля приладом MFI на борту супутника WIND.

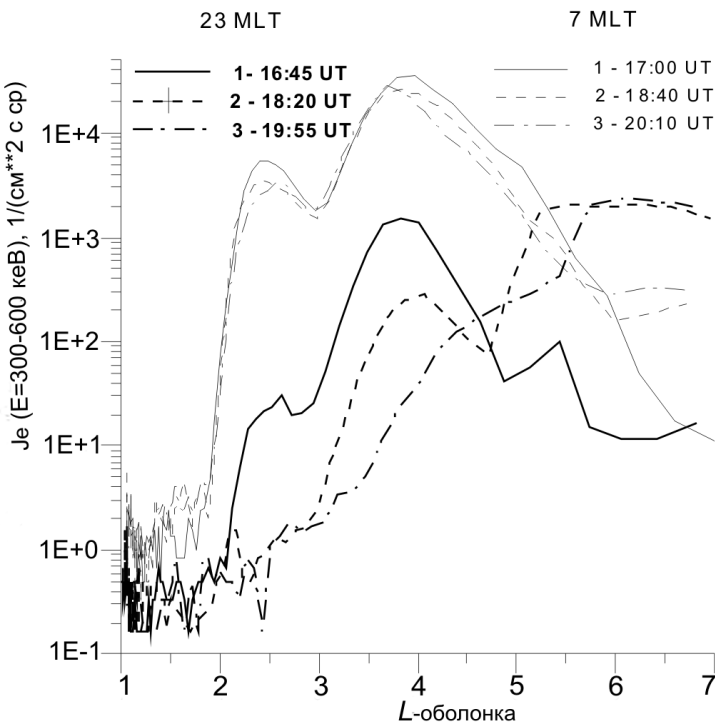


Рис. 8. Потіки електронів з енергіями  $\Delta E = 0.3\text{--}0.6\text{ MeV}$  на різних  $L$ -оболонках на висоті  $\approx 500\text{ км}$  в нічному і вранішньому секторах місцевого часу у північній півкулі Землі в інтервалі часу від 16 до 21 годин світового часу 4 листопада 2001 року.

всередині магнітосфери. В роботі показано, що заряджені частинки в міжпланетному просторі і на висотах геостаціонарних супутників не могли бути прямими джерелами підвищення радіофону на частоті  $f_2 = 500\text{ МГц}$ . Одночасно спостерігалась відповідність часового ходу поведінки повільної компоненти радішумів на середніх широтах поведінці потоків субрелятивістських електронів у північній полярній шапці на висоті  $800\text{ км}$ . На рис. 9 наведено часовий хід потоків частинок у міжпланетному просторі, на геостаціонарній орбіті та на висоті  $800\text{ км}$  у приполярній зоні і в радіаційних поясах у порівнянні з інтенсивністю спорадичного радіовипромінювання навколоземного простору на частоті  $500\text{ МГц}$  у період з 20 до 26 жовтня 2003 року.

На рис. 9 *а* – електрони з енергіями  $\Delta E = 38\text{--}53\text{ кеВ}$  за даними приладу ЕРАМ/АСЕ; *б* – електрони з енергіями  $\Delta E_e = 90\text{--}176\text{ кеВ}$  за даними приладу

Період другої половини жовтня 2003 року дозволив скласти перелік сонячних радіосплесків III-го типу у смузі частот  $1.075\text{--}13.825\text{ МГц}$  і відповідних їм сплесків радіовипромінювання на частоті  $f_2 = 500\text{ МГц}$  із зазначенням різниці  $\Delta t$  у часі початків сплесків обох типів. В дисертації показано, що за  $\Delta t \approx 0.4\text{--}2$  години після сонячних радіосплесків у декаметровому діапазоні спостерігались короткочасні підвищення рівня надвисокочастотного радіофону, що мали місце як в денний час, так і в передопівнічні години місцевого часу.

У розділі детально розглянуто період з 20 до 26 жовтня 2003 року, коли низка сонячних спалахів 21–23 жовтня спричинила появу збільшених потоків частинок у міжпланетному просторі і

3DP/WIND;  $\epsilon$  – електрони з енергіями  $E_e > 0.6$  MeV за даними GOES12;  $\zeta$  – електрони з енергіями  $E_e > 2$  MeV за даними GOES12;  $\delta$  – електрони з енергіями  $E_e > 0.3$  MeV у північній півкулі Землі на  $L > 20$  за даними SEM/NOAA-15;  $e$  – електрони з енергіями  $E_e > 0.3$  MeV у північній півкулі Землі за даними SEM/NOAA-15 на  $2 < L < 5$ ;  $\mathcal{J}$  – інтенсивність навколосезного радіофону на частоті 500 МГц.

Короточасні радіосплески від потоків електронів, що реєструвались на відкритих силових лініях магнітного поля на низьких висотах, не могли досягти пункту реєстрації радіовипромінювання на частоті  $f_2 = 500$  МГц. У розділі показано, що радіосплески спричиняються тією частиною сонячних і міжпланетних космічних променів, яка попадає в конус втрат при вході в магнітосферу. Спорадичні радіосплески з'являються також як результат висипань електронів з радіаційних поясів Землі після прискорення, швидкої радіальної і пітч-кутової дифузії сонячних частинок усередині магнітосфери.

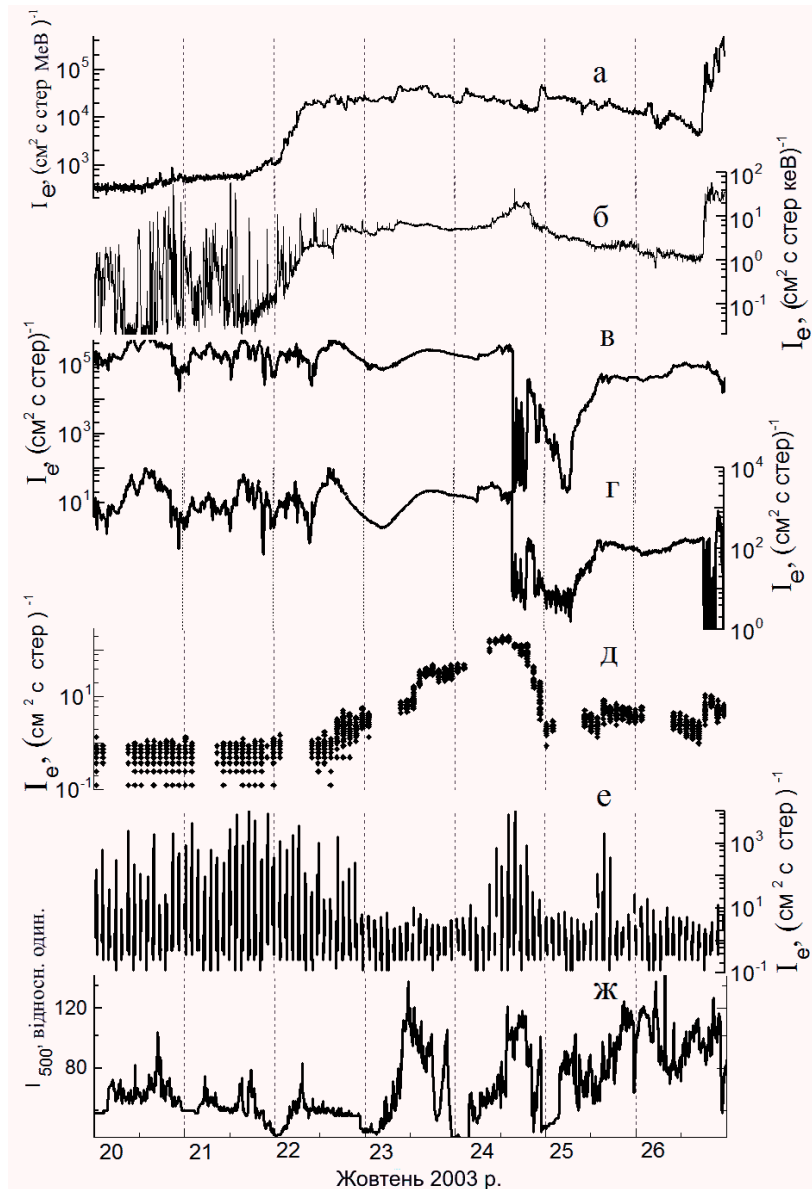


Рис. 9. Часовий хід заряджених частинок у міжпланетному просторі і на геостаціонарній орбіті в період з 20 до 26 жовтня 2003 р. Пояснення до рисунку наведено в тексті.

В дисертації зроблено оцінки спектральної густини потужності шуму синхротронного випромінювання релятивістських електронів на частотах 38 і 325 МГц у дипольному магнітному полі земної магнітосфери з урахуванням місцезнаходження приймальних антен. Спектральна густина синхротронного радіовипромінювання визначається з рівняння [3, 57, 62]:

$$I_f = k(n)A(\gamma) \frac{kM^2}{R^2 f^2} \cdot J_{r_e} \cdot J(\gamma, n) \text{ ерг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}, \quad (1)$$

де функція  $k(n)$  визначається з функції розподілу енергійних електронів у радіаційному поясі [63]:

$$N = KE^{-\gamma} \cdot \exp\left(-\frac{q^2}{a^2}(r_e - r_0)^2\right) h^{-\frac{n}{2}} \times \sin^n \alpha k(n) \text{ см}^{-3} \text{ ерг}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}.$$

Розраховані згідно рівняння (1) значення спектральної щільності потужності шуму на частотах 38 і 325 МГц  $I_{f\Omega}^{38}$  і  $I_{f\Omega}^{325}$  представлено в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1

**Розраховані величини  $I_{f\Omega}^{38}$  як функція  $\gamma$  і  $n$  в одиницях  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{Гц})$**

$\gamma$	$n$			
	3	4	5	6
1.5	$2.1 \cdot 10^{-21}$	$2.1 \cdot 10^{-20}$	$2.2 \cdot 10^{-19}$	$2.3 \cdot 10^{-18}$
2.0	$6.7 \cdot 10^{-22}$	$6.0 \cdot 10^{-21}$	$6.2 \cdot 10^{-20}$	$6.5 \cdot 10^{-19}$
3.0	$7.9 \cdot 10^{-23}$	$7.5 \cdot 10^{-22}$	$7.6 \cdot 10^{-21}$	$8.0 \cdot 10^{-20}$

$\gamma$	$n$			
	3	4	5	6
1.5	$3.6 \cdot 10^{-22}$	$3.6 \cdot 10^{-21}$	$3.7 \cdot 10^{-20}$	$4.0 \cdot 10^{-19}$

Таблиця 2

**Розраховані величини  $I_{f\Omega}^{325}$  як функція  $\gamma$  і  $n$  в одиницях  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{Гц})$**

2.0	$6.7 \cdot 10^{-23}$	$6.0 \cdot 10^{-22}$	$6.1 \cdot 10^{-21}$	$6.5 \cdot 10^{-20}$
3.0	$2.7 \cdot 10^{-24}$	$2.6 \cdot 10^{-23}$	$1.2 \cdot 10^{-21}$	$2.7 \cdot 10^{-21}$

В ході експериментів рівень спектральної потужності спорадичного радіовипромінювання навколоземного простору в окремих сплесках досягав величин на частоті 38 МГц  $\approx 10^{-21}$ – $10^{-20}$  Вт/(м<sup>2</sup> × Гц), а на частоті 325 МГц  $\approx 10^{-22}$ – $10^{-21}$  Вт/(м<sup>2</sup> × Гц) [1, 4, 56]. З таблиць 1 і 2 помітно, що розраховані величини потужності сплесків відповідають таким, що спостерігаються в експериментальних дослідженнях для значень показників в енергетичних і пітч-кутових розподілах електронів  $n = 4$ – $5$  і  $\gamma = 1.5$ – $3$ , що добре узгоджуються з супутниковими вимірюваннями розподілів частинок високих енергій у магнітосфері Землі.

**Розділ 6. Супутниковий експеримент з приладом «СТЕП-Ф» на борту космічного апарата «КОРОНАС-Фотон».** В роботі представлено опис міжнародного проекту «КОРОНАС-Фотон»; мету, задачі і відмінності від попередніх супутникових проектів серії «КОРОНАС»; роль супутникового телескопа електронів і протонів СТЕП-Ф у складі комплексу наукової апаратури «Фотон» космічного апарата [5, 6, 8, 34]. Дається перелік цілей проведення експерименту з приладом СТЕП-Ф на борту [32, 33, 37]. В дисертації описано конструкцію приладу СТЕП-Ф, його складові частини, принципи функціонування, засоби обробки інформації і архітектуру спілкування зі службовими системами космічного апарата [11, 12, 20, 23, 24, 45]. Представлено результати комп'ютерного моделювання методом Монте-Карло з використанням бібліотеки GEANT4 процесів проходження частинок крізь матеріали детекторів [10, 13, 14, 39]. Дано опис етапів і послідовність наземних випробувань зразків приладу.

Настроювання електричних параметрів проводилось за допомогою спеціальної контрольно-випробувальної апаратури, що дозволила не тільки відрегулювати 69 каналів аналогової обробки сигналів від детекторів, але й перевірити правильність формування вихідних інформаційних масивів за

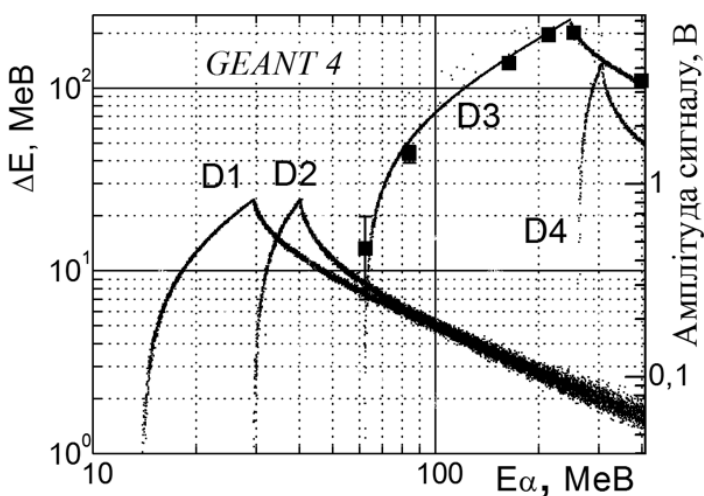


Рис.10. Співставлення результатів моделювання за допомогою GEANT4 з результатами експериментів на прискорювачі RIKEN.

різними інтерфейсами зв'язку з бортовими системами космічного апарата. Калібрування телескопа відбулося на прискорювачах заряджених частинок: іонному циклотроні Інституту фізичних і хімічних проблем RIKEN (Токіо, Японія), де були використані альфа-частинки з енергіями 400 MeV і іони водню з енергією 140 MeV [16, 41]. На рис. 10 представлено результати моделювання поглинених енергій у кремнієвих позиційно-чутливих

детекторах D1 і D2, в сцинтиляційному детекторі D3 в одиницях енергії, і в амплітудах сигналів на виході формувача каналу D3 від енергії альфа-частинок на циклотронному прискорювачі RIKEN. Квадратами позначено результати вимірів з використанням пучку альфа-частинок з первинною енергією 400 MeV.

Градування детекторних каналів приладу СТЕП-Ф було здійснене також на іонному циклотроні Інституту ядерної фізики імені Д.В. Скобельцина Московського державного університету імені М.В. Ломоносова, де були задіяні пучки дейтронів з енергією 15.3 MeV і альфа-частинок з енергією 30 MeV; на іонному мікротроні Інституту електронної фізики НАН України (м. Ужгород) з використанням електронів у діапазоні енергій 2–17 MeV.

У шостому розділі представлено технічні і наукові параметри приладу СТЕП-Ф. В табл. 3 вказані діапазони енергій і геометричні фактори для електронів і каналів змішаної реєстрації.

Таблиця 3

**Діапазони енергій і геометричні фактори приладу СТЕП-Ф для електронів і каналів змішаної реєстрації**

Енергетичний діапазон, MeV	Геометричний фактор, $\text{см}^2 \times \text{стер}$	Енергетичний діапазон, MeV	Геометричний фактор, $\text{см}^2 \times \text{стер}$
Електрони		Канали змішаної реєстрації	
0.35–0.95	19.5	e ( $E_e = 0.18\text{--}0.51$ MeV) + p ( $E_p = 3.5\text{--}3.7$ MeV)	21.7
1.2–2.3	17.4	p ( $E_p = 3.7\text{--}7.4$ MeV) + e ( $E_e = 0.55\text{--}0.95$ MeV)	21.7
$\geq 2.3$	16.2	$\alpha$ ( $E_\alpha = 15.9\text{--}29.8$ MeV) + p ( $E_p = 7.4\text{--}10.0$ MeV)	21.7

В роботі показано результати оцінки якості наукової інформації, що була отримана з приладу СТЕП-Ф у ході начального етапу льотних випробувань комплексу наукової апаратури «Фотон». У магніто-спокійний період з 3 березня до 1 квітня 2009 року потоки протонів були нанесені на умовну мапу Землі для співставлення з результатами радіаційного картографування навколосемного простору аналогічними приладами на інших супутниках. Усереднені результати, отримані з приладу СТЕП-Ф, добре узгоджуються з даними попередніх вимірів у періоди мінімуму сонячної активності.

**Розділ 7. Динаміка потоків електронів у внутрішній магнітосфері Землі.** У розділі дається загальна характеристика потоків електронів у різних енергетичних діапазонах на висоті 550 км над поверхнею Землі з урахуванням характерних особливостей орбіти космічного апарата «КОРОНАС-Фотон» і розташування блока детекторів СТЕП-ФД на космічному апараті [21, 22].



Рис. 11 демонструє наявність незначних потоків субрелятивістських електронів всюди в плазмосфері Землі, в тому числі на низьких широтах і в приекваторіальних областях.

В дисертації визначено емпіричні значення часів життя електронів зовнішнього і внутрішнього радіаційних поясів Землі за відгуками потоків частинок у максимумах їхніх розподілів по  $L$ -оболонках на дію двох геомагнітних збурень. Спадання темпу підрахунку електронів у максимумах їхніх розподілів в обох радіаційних поясах на фазах відновлення геомагнітних збурень характеризується функцією:

$$J = K \times \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

де  $\tau$  – час життя електронів у радіаційному поясі.

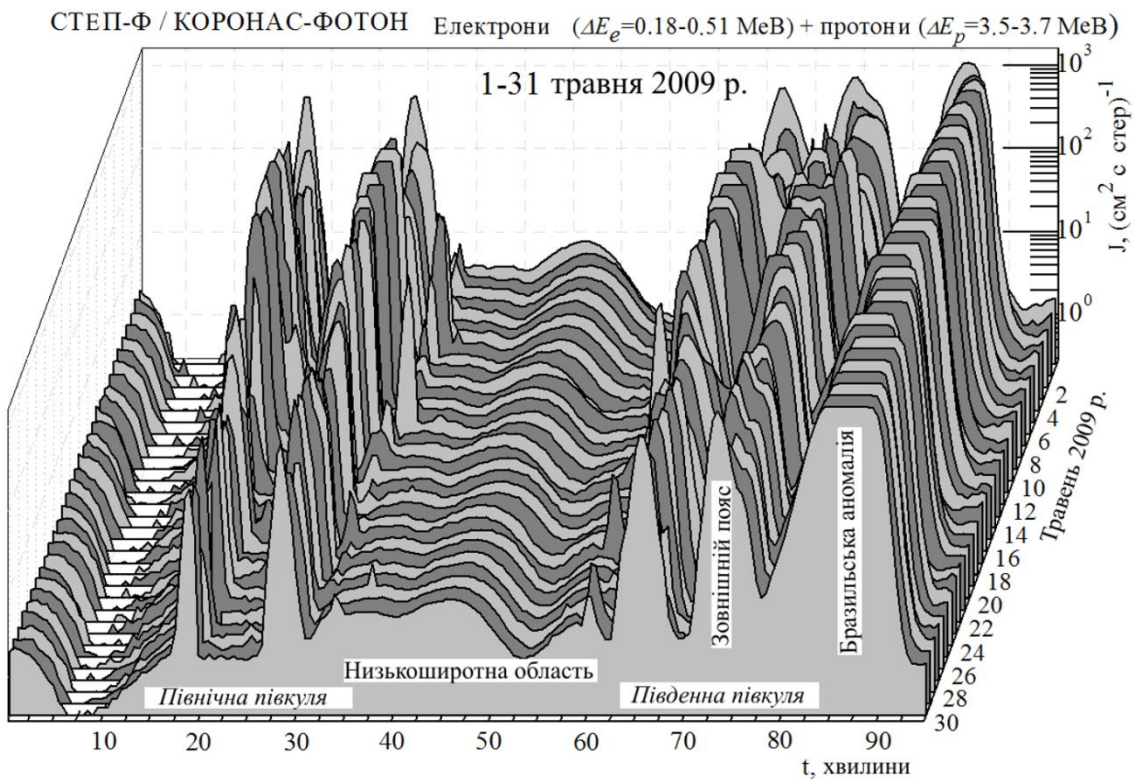


Рис. 11. Часовий хід потоків частинок каналу реєстрації електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.18\text{--}0.51$  MeV і протонів з енергіями  $\Delta E_p = 3.5\text{--}3.7$  MeV у період з 1 до 31 травня 2009 року на 1-му з початку доби оберті супутника з даними СТЕП-Ф.

Використовуючи формулу (2), отримано емпіричні значення часів життя електронів зовнішнього поясу з енергіями  $\Delta E_e = 0.18\text{--}0.51$  MeV:  $\tau_1 \approx 4.1 \pm 1.1$  доби; з енергіями  $\Delta E_e = 0.35\text{--}0.95$  MeV:  $\tau_2 \approx 4.4 \pm 0.9$  доби. Емпіричний час життя електронів внутрішнього поясу з енергіями  $\Delta E_e = 0.18\text{--}0.51$  MeV за даними вимірювань приладу СТЕП-Ф склав  $\tau_3 \approx 1.5 \pm 0.8$  доби; отже, співвідношення часів життя електронів зовнішнього і внутрішнього поясів  $\approx 3$ . На рис. 12 показано динаміку потоків частинок у

внутрішньому поясі в максимумах темпів підрахунку у північній півкулі в каналі реєстрації електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.18\text{--}0.51$  MeV і протонів з енергіями  $\Delta E_p = 3.5\text{--}3.7$  MeV; і в каналі реєстрації електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.35\text{--}0.95$  MeV, де показано характерне спадання потоків з 8 до 11 травня, і з 17 до 20 травня 2009 року.

У роботі обговорюються варіації потоків електронів у зовнішніх шарах магнітосфери перед початком, у максимумі розвитку і на фазі відновлення бурі початку травня 2009 року у порівнянні з даними про електрони в міжпланетному просторі з даних супутників SOHO, STEREO-A і STEREO-B; з залученням даних про параметри сонячного вітру з супутників ACE і SOHO. 5 травня приладом СТЕП-Ф було зареєстроване збільшення потоків частинок у десятки разів під час перетинання супутником зони з  $L \approx 7.5$  у південній півкулі. Відмінною рисою події є збільшення потоків за 7-8 годин до приходу електронів міжпланетного походження до кордонів магнітосфери. За часом сплеск інтенсивності на  $L \approx 7.5$  співпав зі зростанням величини  $V_x/V$ , де  $V_x$  – одна з компонент швидкості сонячного вітру,  $V$  – середнє значення швидкості сонячного вітру.

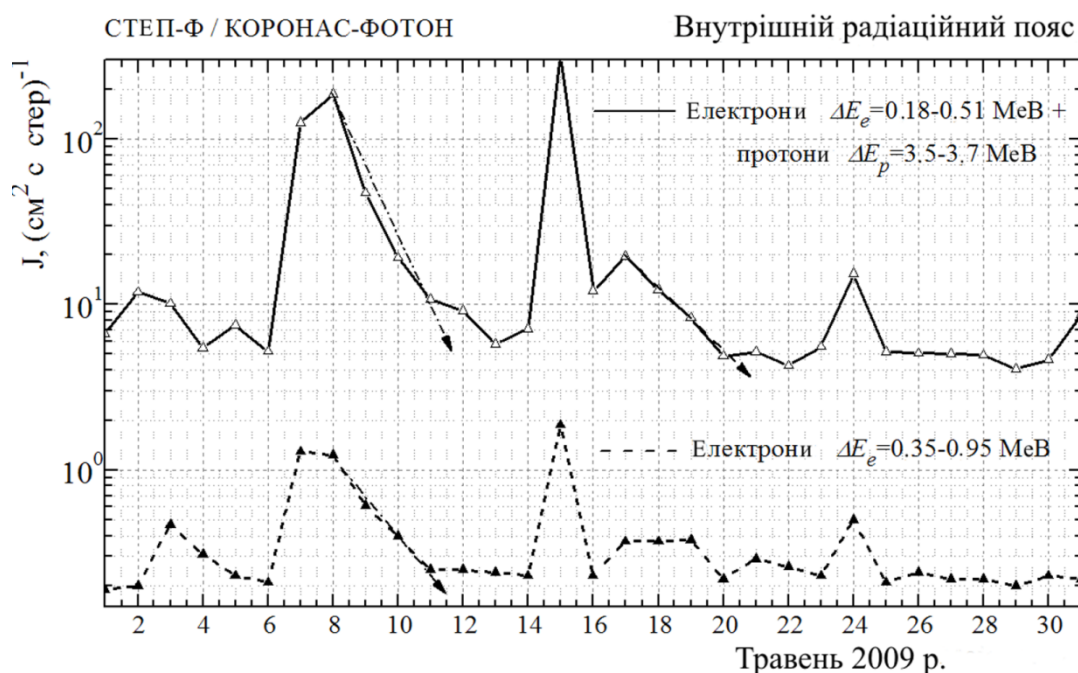


Рис. 12. Часовий хід потоків частинок у внутрішньому радіаційному поясі Землі в північній півкулі Землі в максимумах темпу підрахунку у травні 2009 року в двох енергетичних каналах приладу СТЕП-Ф.

У разі не радіальної стосовно сонячного напрямку спрямованості міжпланетного магнітного поля поблизу магнітопаузи Землі слід очікувати спочатку приходу турбулентності хвиль, а потім з деяким запізненням – підвищення щільності і швидкості сонячного вітру [64]. Хвилі після проникнення вглиб магнітосфери взаємодіють з частинками зовнішньої оболонки зовнішнього радіаційного поясу, змінюючи їхній пітч-кутовий розподіл, що призводить до розсіювання у конус втрат і появи електронів на

висоті 550 км і нижче.

У роботі показано, що на початковій фазі магнітної бурі збільшення потоків електронів спочатку спостерігалось у внутрішньому поясі, в той час як у зовнішньому поясі змін у темпах підрахунку не зафіксовано. Під час головної фази бурі потоки електронів на зовнішній кромці зовнішнього поясу за даними обох електронних каналів приладу СТЕП-Ф зросли більше ніж у 10 разів одночасно зі зростанням інтенсивності електронів з  $E_e > 2$  MeV на геостаціонарній орбіті за даними супутників серії GOES. В той же час, у максимумі зовнішнього поясу потоки стрімко зменшились під час головної фази магнітної бурі, що відповідає раніше проведеним спостереженням на інших супутниках [65]. Джерелами збільшень потоків електронів на низьких висотах в обох поясах на різних фазах магнітних збурень є підсилення взаємодій типу «хвиля–частинка».

**Розділ 8. Дослідження радіаційних поясів за допомогою приладу СТЕП-Ф і рентгенівського спектрофотометра SphinX на борту космічного апарата «КОРОНАС-Фотон».** В розділі представлено результати спільного аналізу експериментальних даних, отриманих за допомогою приладу СТЕП-Ф і польського сонячного рентгенівського фотометра SphinX про потоки заряджених частинок у навколосемному просторі. Спектрофотометр SphinX розробки Центру космічних досліджень Польської академії наук, який був складовою частиною комплексу наукової апаратури «Фотон», призначений для вивчення рентгенівського випромінювання Сонця в діапазоні енергій  $\approx 1$ –15 keV [66]. Розподіл темпів підрахунку фотометра в енергетичних каналах з найбільшими амплітудами імпульсів відображає зони радіаційних поясів Землі і область Бразильської магнітної аномалії, характерні для розподілів частинок високих енергій [25, 26]. Темп підрахунку датчика Det1 приладу SphinX був вище темпу підрахунку датчика Det2 в  $\approx 5$ -10 разів за рахунок меншої активної площі останнього всюди, окрім області Бразильської магнітної аномалії, де темпи підрахунку були майже однаковими. Отже, покази двох сенсорів приладу SphinX виявилися чутливими до зміни характеру енергетичного спектру первинних частинок у різних областях внутрішньої магнітосфери.

В дисертації обґрунтовано висновок про реєстрацію приладом SphinX змішаної компоненти з первинних електронів проміжних енергій і гальмівного випромінювання електронів від конструкційних матеріалів детекторної голівки, обсерваторії «ТЕСИС» і супутника; введено поняття ефективних порогових енергій  $E_{пор1}$  і  $E_{пор2}$  детекторами Det1 і Det2 відповідно, приладу SphinX, які є змінними в залежності від нахилу енергетичного спектру первинних електронів. Вузька спрямованість кутів зору детекторів рентгенівського фотометра і вузькоспрямовані пучки електронів на висоті 550 км обумовили значну різницю в темпах підрахунку частинок при перетинанні одного й того самого поясу в одній півкулі Землі на висхідному і низхідному вузлах орбіти супутника. Висновок про вузькоспрямований характер руху електронів у поясах підтверджено різним часом реєстрації максимумів темпів підрахунку в каналах приладів СТЕП-Ф і SphinX, осі спрямованості сенсорних частин яких були взаємно перпендикулярні.

В роботі дано опис методів визначення ефективних порогових енергій  $E_{nop1}$  і  $E_{nop2}$  в інтегральних спектрах електронів, що реєструвались в останніх каналах 256-каналних енергетичних спектрах рентгенівського випромінювання корони Сонця, які були записані з двох кремнієвих PIN фотодіодів приладу SphinX. Розподіл співвідношень темпів підрахунків  $n_{Det1}/n_{Det2}$  детекторів Det1 і Det2 приладу SphinX за географічними координатами в межах від 0.7 до 1.5 співпадає з контурами Бразильської аномалії, а в межах від 7 до 30 – з широким максимумом в околі 10-18, співпадає з контурами зовнішнього радіаційного поясу [25, 26, 46, 48]. Тобто, в кожен момент часу, і відповідно, в кожній точці простору співвідношення  $n_{Det1}/n_{Det2}$  характеризує нахил енергетичного спектру електронів, і зміна  $n_{Det1}/n_{Det2}$  від  $\approx 1$  до  $\approx 15$  вказує на значну різницю в енергетичних спектрах частинок в області аномалії і зовнішнього поясу.

В роботі показано, що при одному й тому самому діапазоні співвідношень  $n_{Det1}/n_{Det2} \approx 7-13$  абсолютні величини  $n_{Det1}$  і  $n_{Det2}$  у північній півкулі Землі значно перевищують такі самі величини в південній півкулі, що є ще одним підтвердженням висновку про те, що напрямки руху частинок у радіаційних поясах на висоті 550 км мають анізотропний характер.

У восьмому розділі визначено значення  $E_{nop1}$  і  $E_{nop2}$  в області Бразильської магнітної аномалії для детекторів Det1 і Det2 приладу SphinX, виходячи з залежності  $L$ -оболонки, на яких спостерігались максимуми потоків частинок, від енергії електронів з прив'язуванням до енергетичних каналів D2e і D1p приладу СТЕП-Ф:

$$L = (1.586 \pm 0.001) - (5.429 \pm 0.03) \times 10^{-4} \times E \text{ (кеВ)}$$

Ефективні порогові енергії реєстрації електронів склали  $E_{nop1} \approx 420$  кеВ і  $E_{nop2} \approx 405$  кеВ відповідно.

Співставлення темпу підрахунку від детектора Det2 приладу SphinX з темпом підрахунку каналу D4e приладу СТЕП-Ф, відповідального за реєстрацію гальмівного випромінювання первинних електронів, дозволило зробити висновок, що внесок вторинних гамма-квантів у темп підрахунку кожного з детекторів приладу SphinX зростає зі зменшенням величини  $B/B_0$ , тобто з наближенням до центра магнітної аномалії. Отже, нахил падаючого спектру електронів в області аномалії суттєво зменшувався у порівнянні з енергетичними спектрами частинок у радіаційних поясах.

В дисертації визначено емпіричну залежність величини зміщення  $\Delta L$   $L$ -оболонки у зовнішньому радіаційному поясі, на яких спостерігались максимуми розподілів потоків частинок у каналах запису обох приладів у процесі радіальної дифузії електронів відносно первинного розподілу у період перед збуренням, від енергії електронів:

$$\Delta L = (0.783 \pm 0.028) - (0.0014 \pm 0.947 \times 10^{-4}) \times E, \quad (3)$$

Залежність (3) дозволила визначити величини  $E_{nop1}$  і  $E_{nop2}$  сенсорів приладу SphinX для електронів зовнішнього радіаційного поясу:  $E_{nop1} \approx 5$  кеВ і  $E_{nop2} \approx 40$  кеВ. Значення  $E_{nop2}$  для зовнішнього радіаційного поясу і

Бразильської магнітної аномалії відрізняються майже в 10 разів, що вказує на різко падаючий енергетичний спектр у поясі.

В цілому, канали реєстрації рентгенівського спектрофотометра SphinX доповнили і розширили енергетичний діапазон реєстрації каналів приладу СТЕП-Ф у бік менших енергій поза зоною Бразильської магнітної аномалії.

**Розділ 9. Додатковий внутрішній електронний радіаційний пояс у магнітосфері Землі.** У розділі дано опис і вказано характерні риси знайденого за допомогою приладу СТЕП-Ф додаткового внутрішнього електронного радіаційного поясу Землі, розташованого на широтах, менших за ті, на яких спостерігається внутрішній пояс Ван Алена. Третій радіаційний пояс спостерігався приладом в обох півкулях Землі [21, 22, 47]; ймовірність його детектування на висоті 550 км і інтенсивність електронів у ньому майже не залежать від рівня геомагнітної збуреності: навіть під час мінімальної активності земного магнітного поля на межі її відсутності пояс реєструвався приладом СТЕП-Ф у низькоенергетичному діапазоні електронів. У всіх випадках обидва внутрішніх пояси реєструються на довготах, які не співпадають з довготами розташування Бразильської магнітної аномалії.

На рис. 13 показано часовий хід інтенсивності частинок на 4-й – 44-й хв. від початків висхідних вузлів орбіти космічного апарата протягом 5–8 травня 2009 року в каналі реєстрації електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.18\text{--}0.51$  MeV і протонів з енергіями  $\Delta E_p = 3.5\text{--}3.7$  MeV та в каналі реєстрації електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.35\text{--}0.95$  MeV.

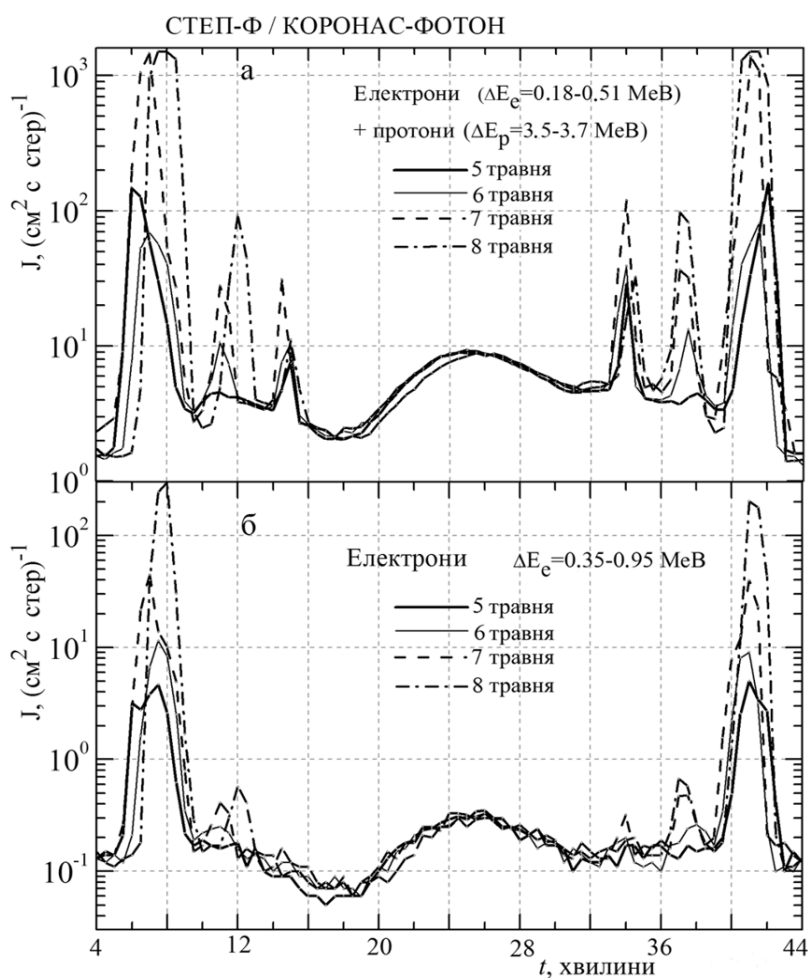


Рис. 13. Часовий хід інтенсивності частинок на 4-й – 44-й хв. від початків висхідних вузлів орбіти космічного апарата «КОРОНАС-Фотон» протягом 5–8 травня 2009 року в двох енергетичних каналах приладу СТЕП-Ф.

На рис. 14 представлено часовий хід інтенсивності електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.18-0.51$  MeВ на 0-й – 48-й хв. від початків висхідних вузлів орбіти космічного апарата протягом 1–31 травня 2009 року. Дані, представлені на рис. 13 і 14, оброблено для дев'ятих щодобових витків орбіти супутника.

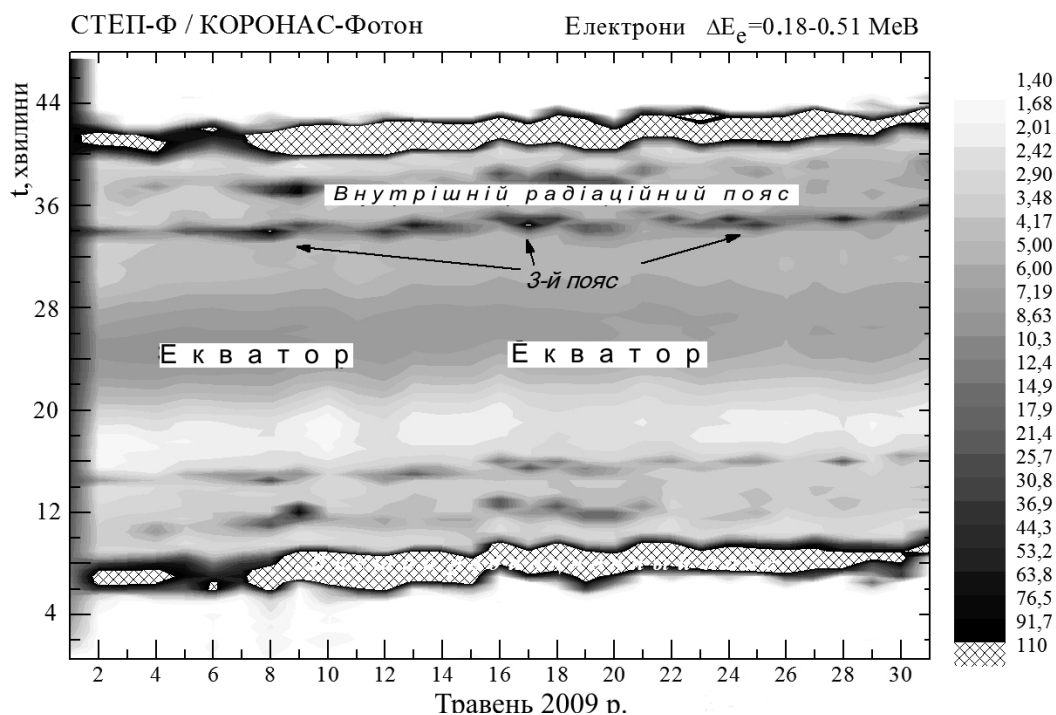


Рис. 14. Часовий хід інтенсивності електронів з енергіями  $\Delta E_e = 0.18-0.51$  MeV на 0-й – 48-й хв. висхідних вузлів орбіти протягом 1–31 травня 2009 року.

В дисертації показано, що збільшення потоків частинок у внутрішньому поясі Ван Алена і в додатковому поясі відбувається на різних магнітних оболонках, про що свідчать різні величини відношень напруженостей магнітного поля  $B/B_0$  у моменти спостереження максимумів потоків частинок в обох поясах. В табл. 4 наведено часи реєстрації, положення максимумів потоків електронів у діапазоні енергій  $\Delta E_e = 0.18-0.51$  MeV в обох внутрішніх поясах Землі для висхідних вузлів у північній півкулі 8.05.2009 р. З табл. 4 помітно, що в енергетичному діапазоні  $\Delta E_e = 0.18-0.51$  MeV параметр  $L$  для основного поясу складає  $L \approx 2.28$ , а для додаткового –  $L \approx 1.61$ , часовий інтервал між реєстрацією максимальних інтенсивностей у поясах склав усього  $\Delta t \approx 2-4$  хв. з урахуванням швидкості руху супутника з обраними орбітальними параметрами.

У розділі зроблено порівняльний аналіз потоків, що були зареєстровані на дев'ятих щодобових витках у північній півкулі в максимумах темпу підрахунку у період з 1 до 31 травня 2009 року. Відношення інтенсивностей в додатковому і основному поясах перевищило одиницю у 25 випадках з 31 для енергетичного діапазону  $\Delta E_e = 0.18-0.51$  MeV і менше одиниці в 26 випадках з 31 для енергетичного діапазону  $\Delta E_e = 0.35-0.95$  MeV. Отже, енергетичні спектри в обох поясах відрізняються один від одного: в основному поясі спостерігається більш жорсткий спектр у порівнянні з додатковим електронним радіаційним поясом, в якому бракує електронів з енергіями вище декілька сотень кеВ.

Таблиця 4

**Часи реєстрації, координати максимумів інтенсивності електронів у діапазоні енергій  $\Delta E_e = 0.18-0.51$  MeV в основному і додатковому внутрішньому радіаційних поясах Землі для висхідних вузлів у північній півкулі з 6-го по 15-й витки 8 травня 2009 року**

№ вит-ку	Внутрішній радіаційний пояс Ван Алена					Додатковий внутрішній радіаційний пояс				
	Час реєстрації максимуму, UT, год.: хв.	Широта, град.	Довгота, град.	$L$ -оболонка	Відношення $V/B_0$	Час реєстрації максимуму, UT, год.: хв.	Широта, град.	Довгота, град.	$L$ -оболонка	Відношення $V/B_0$
6	08:16	33.7	-81.5	2.16	12.9	-	-	-	-	-
7	09:52	36.5	-105.1	2.18	13.8	-	-	-	-	-
8	11:29	41.3	-128.4	2.18	13.3	11:26	28.3	-130.1	1.50	3.7
9	13:07	47.8	-151.2	2.33	15.9	13:03	34.8	-153.4	1.57	4.1
10	14:43	50.6	-174.6	2.24	13.9	14:41	41.4	-176.5	1.67	5.1
11	16:20	53.5	162.1	2.29	15.8	16:17	44.3	159.9	1.68	5.57
12	17:55	52.7	137.8	2.19	14.4	17:53	43.5	135.7	1.61	5.45
13	19:31	53.7	114.1	2.34	19.4	-	-	-	-	-
14	21:07	52.8	89.8	2.34	19.6	-	-	-	-	-
15	22:43	53.8	66.0	2.52	23.2	-	-	-	-	-

Дані, отримані з приладів СТЕП-Ф і SphinX поза областю Бразильської магнітної аномалії в обох півкулях, показали, що: а) прилад СТЕП-Ф реєстрував три електронних пояси у двох енергетичних каналах, електрони 3-го додаткового поясу мають м'який енергетичний спектр, оскільки їхня інтенсивність для  $E \geq 0.55$  MeV швидко спадає; б) прилад SphinX також реєстрував внутрішні радіаційні пояси, про що свідчить укрупнення ходу інтенсивності при  $L = 1.6$  і його спадання при  $2.5 \leq L \leq 2.8$  в каналі сенсору Det1 [25, 26, 46, 48]. Причинами, через які не були помітні внутрішні пояси сенсорами Det1 і Det2 приладу SphinX у явному вигляді, були: а) менша чутливість у порівнянні з приладом СТЕП-Ф; б) різниця в кутах зору, їхня взаємна перпендикулярність і, як наслідок, попадання вузькоспрямованих пучків електронів у різні проміжки часу. У розділі зроблено висновок, що реєстрація внутрішнього радіаційного поясу Ван Алена і додаткового внутрішнього радіаційного поясу на  $L \approx 1.6$  підтверджена двома різними приладами, що працювали поруч у складі комплексу наукової апаратури «Фотон» космічного апарата «КОРОНАС-Фотон».

### ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розвинено напрями дослідження закономірностей генерації сплесків спорадичного радіовипромінювання навколоземного космічного простору на середніх широтах; просторово-часових і енергетичних розподілів зарядженої радіації високих енергій в радіаційних поясах Ван Алена,



в області Бразильської магнітної аномалії і в областях поза поясами.

В дисертації розвинено експериментальні методи наземної реєстрації сплесків спорадичного радіовипромінювання навколоземного простору; супутникового моніторингу потоків заряджених частинок високих енергій; методи комплексного аналізу супутникової інформації і наземних даних; спільного аналізу даних про частинки з детекторів прямої реєстрації і гальмівного випромінювання з даних рентгенівського спектрофотометра.

У ході проведених досліджень були вирішені раніше поставлені задачі і досягнута мета роботи. Були отримані нові результати:

1. Вперше показано, що генерація спорадичних радіосплесків навколоземного космічного простору в широкій смузі радіодіапазону пов'язана з низкою процесів у внутрішніх шарах земної магнітосфери, найбільш важливими з яких є радіальна і пітч-кутова дифузія субрелятивістських електронів радіаційних поясів Ван Алена з подальшим висипанням в атмосферу Землі. На основі синхронних спостережень інтенсивних фонових спорадичних радіосплесків на різних частотах у діапазоні частот від 151.5 до 500 МГц у середньоширотних наземних пунктах прийому, розташованих один від одного на відстані  $\approx 700$  км, вперше показано, що джерело генерації не є ані точковим, ані існуючим протягом тривалого часу.

2. Вперше проведено оцінки потужності синхротронного випромінювання електронів радіаційних поясів Землі в магнітному полі Землі на частотах 38 і 325 МГц з урахуванням місцезнаходження і параметрів приймальних радіоантен. Порівняння з експериментальними даними про амплітуди радіосплесків дало задовільне узгодження з розрахованими величинами за умовою, що показники степеня в степеневих розподілах електронів радіаційних поясів знаходяться в межах, що задовольняють таким, які спостерігаються під час супутникових спостережень.

3. В умовах низької сонячної активності 2009 року на висоті 550 км вперше знайдено потоки електронів високих енергій на всіх географічних широтах і довготах аж до  $L$ -оболонки, які відповідають зовнішній кромці зовнішнього радіаційного поясу Землі. Новим результатом є виявлення значних коливань потоків електронів субрелятивістських і низьких енергій під радіаційними поясами і на середніх широтах поза зоною радіаційних поясів як відгук на слабкі суббури з  $D_{st} \leq -30$  нТл у магнітосфері Землі.

4. Вперше виявлено регулярний характер спаду інтенсивності електронів в області максимумів їхніх розподілів при перетинанні відрогів зовнішнього і внутрішнього радіаційних поясів у ході фази відновлення слабких суббур. За допомогою функції апроксимації вперше визначено емпіричні часи життя електронів у поясах у двох енергетичних діапазонах. Отримано, що час життя електронів у зовнішньому радіаційному поясі приблизно в 3 рази довший, ніж у внутрішньому поясі Ван Алена.

5. Вперше показано, що потоки електронів під радіаційними поясами і поблизу їхніх відрогів мають анізотропний характер, в той час як виділених напрямків руху частинок високих енергій в області Бразильської магнітної аномалії не спостерігається. Вперше показано, що енергетичні спектри

електронів в області магнітної аномалії мають більш жорсткий характер, ніж спектри частинок у відроггах поясів, збіднілих релятивістськими електронами.

6. В умовах низької сонячної і геомагнітної активності 2009 року між 23-м і 24-м 11-річними циклами сонячної активності вперше виявлено додатковий внутрішній електронний радіаційний пояс Землі на  $L \approx 1.6$ , розташований під внутрішнім радіаційним поясом Ван Алена поза зоною Бразильської магнітної аномалії. Знайдено вперше, що в основному внутрішньому радіаційному поясі енергетичний спектр електронів має більш жорсткий спектр у порівнянні зі спектром електронів у додатковому поясі.

7. Розроблено, виготовлено, випробувано, відградуьовано і вдосконалено у ході проведення тривалих експериментів наземну автоматизовану установку для реєстрації рівня спектральної густини потужності шуму на частотах 151.5 і 500 МГц, за допомогою якої в період з 1993-го по 2003-й роки проведено тривалі сеанси реєстрації радіофону, які охоплюють періоди високої сонячної і геомагнітної активності.

8. Розроблено, виготовлено і пройшов всі необхідні види наземного відпрацювання, випробувань і калібрувальних вимірювань високочутливий супутниковий телескоп електронів, протонів і альфа-частинок СТЕП-Ф комплексу наукової апаратури «Фотон» низькоорбітального космічного апарата «КОРОНАС-Фотон». Новим є застосування позиційно-чутливих кремнієвих детекторів заряджених частинок, які дозволили підвищити відношення корисного сигналу до шуму за рахунок секціонування детектора, а також застосування «товстих» сцинтиляційних детекторів для розширення енергетичного діапазону реєстрації заряджених частинок.

9. У 2009 році на борту космічного апарата «КОРОНАС-Фотон» за допомогою приладу СТЕП-Ф успішно проведено супутниковий експеримент з моніторингу потоків електронів, протонів і альфа-частинок високих енергій в магнітосфері Землі і в областях відкритих силових ліній магнітного поля Землі.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ:**

### **в наукових журналах:**

1. Абросимов А. Т. Динамика захваченных частиц и спорадического радиоизлучения Земли после вспышки 20 ноября 1986 г. / А.Т.Абросимов, А.А.Гусев, А.В.Дудник, В.М.Карташев, А.В.Лазарев, Ю.В.Минеев, Г.И.Пугачева, Е.С.Шматко // Известия Академии наук СССР, серия физическая. – 1991. – Т. 55, № 10. – С. 1915–1919.

2. Martin I. M. Dynamics of Inner Radiation Belt Electrons and the Sporadic Space Radio Emission / I.M.Martin, A.A.Gusev, G.I.Pugacheva, A.V.Dudnik // Brazilian Journal of Geophysics. – 1995. – Vol. 13, No. 1. – P. 25–29.

3. Dudnik O. V. Precipitating Radiation Belt Electrons as a Source of High-Frequency Radio Emission / O.V.Dudnik // Radiation Measurements. – 1996. – V. 26, No. 3. – P. 395–397.

4. Дудник А. В. Динамика энергичных электронов и их связь с

высокочастотным радиоизлучением магнитосферы Земли / А.В.Дудник, Ю.В.Минеев // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, № 1. – С. 93–102.

5. Залюбовский И. И. Международный проект «Фотон» для комплексного изучения солнечной активности и солнечно–земных связей / И.И.Залюбовский, А.В.Дудник, Ю.Д.Котов, В.Н.Юров // Известия РАН, серия физическая. – 1997. – Т. 61, № 6. – С. 1173–1176.

6. Dudnik O. V. The Ukrainian Instruments Set for the Ground Accompaniment of the Joint Ukrainian–Russian Satellite Project "PHOTON" to Study the Hard Radiation of the Sun and Solar–Earth's Magnetosphere Connections / O.V.Dudnik, I.I.Zalyubovsky // Advances in Space Research. – 1998. – V. 21, No. 1/2. – P. 343–345.

7. Dudnik O. V. Observation of HF Radio Emission Bursts of Magnetospheric Origin at Mid Latitudes / O.V.Dudnik // Advances in Space Research. 1999. – V. 24, No. 1. – P. 117–120.

8. Дудник А. В. Научные задачи международного космического эксперимента «КОРОНАС–ФОТОН» / А.В.Дудник, И.И.Залюбовский // Космічна наука і технологія. – 2000. – Т. 6, № 2/3. – С. 3–12.

9. Дудник О. В. Спорадичне радіовипромінювання навколоземного простору напередодні максимуму 23-го циклу сонячної активності / О.В.Дудник // Кинематика и физика небесных тел. – 2000. – Т. 16, № 5. – С. 410–417.

10. Дудник А. В. Моделирование прохождения заряженных частиц через спутниковый спектрометр–телескоп СТЭП–Ф / А.В.Дудник, Т.В.Малыхина // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна №529, серія фізична «Ядра, частинки, поля». – 2001. – Випуск 3/15. – С. 53–60.

11. Frolov O. S. Position–Sensitive Silicon Matrices For A Satellite Charge Particles Spectrometer–Telescope “Step–F” / O.S.Frolov, O.V.Dudnik, A.A.Sadovnichiy, V.A.Shevchenko, S.P.Fabrikov, et al. // The Journal of Kharkiv National University. – Vol. 541, Physical Series “Nuclei, Particles, Fields”. – 2001. – Issue 4/16. – P. 19–27.

12. Фролов О. С. Детектори і багатоканальна електроніка для супутникових спектрометрів космічного випомінювання / О.С.Фролов, О.В.Дуднік, В.А.Шевченко, А.А.Садовничий, І.Л.Зайцевський, В.С.Рисін, Д.О.Фролов, С.П.Фабриков // Вісник Київського Університету, Серія: Фізико–математичні науки. – 2001. – Вип. 3. – С. 479–487.

13. Дудник А. В. Компьютерное моделирование поглощенной энергии и пробегов частиц в спектрометре «СТЭП» космического проекта «Попередження» / А.В.Дудник, Т.В.Малыхина // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, № 1. – С. 15–21.

14. Dudnik O. V. Computer simulation and calibration of the charge particle spectrometer–telescope «STEP–F» / O.V.Dudnik, T.Goka, H.Matsumoto, M.Fujii, V.K.Persikov, T.V.Malykhina // Advances in Space Research. – 2003. – Vol. 32, No. 11. – P. 2367–2372.

15. Dudnik O. V. Bursts of HF radio noises after irregularities of solar wind / O.V.Dudnik, T.V.Malykhina // Advances in Space Research. – Special issue: “Streamers, Slow Solar Wind, and the Dynamics of the Magnetosphere”. – Edited by

Esser R., R. von Steiger, Lui A.T.Y., Newell P.T. and Troshichev O.A. – 2004. – Vol. 3, No. 5. – P. 807–811.

16. Dudnik O. Accelerator Test of Charge Particle Detectors for a Satellite Instrument STEP-F / O.Dudnik, T.Goka, H.Matsumoto, M.Fujii, V.Persikov, T.Malykhina, H.Kaou // RIKEN Accelerator Progress Report. – 2004. –V. 37. – P. 168–169.

17. Дудник А. В. ВЧ-радиоотклик магнитосферы Земли на фазе роста солнечной активности в октябре 2003 года / А.В.Дудник, М.Л.Кайзер // Известия РАН. Серия физическая. – 2005. – Т. 69, № 6. – С. 884–886.

18. Дудник А. В. Поиск взаимосвязи СВЧ-радиовсплесков фона и динамики энергичных частиц по данным прибора МКЛ на ИСЗ КОРОНАС-Ф / А.В.Дудник, И.Н.Мягкова, Е.А.Муравьева, Ю.Ф.Юровский // Астрономический вестник. Москва. – 2008. – Т. 42, № 1. – С. 75–85.

19. Дудник А. В. Магнитосферный источник УВЧ радио всплесков на средних широтах во время магнитной бури 22 октября 1999 года // А.В.Дудник, А.В.Дмитриев // Астрономический вестник. – 2008. – Т. 42, № 3. – С. 195–205.

20. Valtonen E. Radiation Tolerance Tests of Small-Sized CsI(Tl) Scintillators Coupled to Photodiodes / E.Valtonen; J.Peltonen; O.V.Dudnik; A.M.Kudin; H.Andersson, Yu.A.Borodenko, T.Eronen, et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2009. – Vol. 56, No. 4. – P. 2149–2154.

21. Дудник А. В. Вариации потоков электронов в радиационных поясах Земли в мае 2009 года по наблюдениям с помощью прибора «СТЭП-Ф» / А.В.Дудник // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна №916. – серія фізична «Ядра, частинки, поля». – Випуск 3/47. – 2010. – С. 56–66.

22. Дудник А. В. Исследование радиационных поясов Земли в мае 2009 года на низкоорбитальном спутнике с помощью прибора СТЭП-Ф / А.В.Дудник / Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 5. – С. 12–28.

23. Кудин А. М. Сцинтилляционные сборки “CsI(Tl)+фотодиод” для регистрации гамма-квантов и протонов / А.М.Кудин, Ю.А.Бороденко, Б.В.Гринева, А.В.Диденко, А.В.Дудник, Б.Г.Заславский, и др. // Приборы и техника эксперимента. – 2010. – № 1. – С. 45–51.

24. Дудник А. В. Высокочувствительный спектрометр-телескоп высокоэнергетических частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-ФОТОН / А.В.Дудник, В.К.Персиков, И.И.Залюбовский, Т.Г.Тимакова, Е.В.Курбатов, Ю.Д.Котов, В.Н.Юров // Астрономический вестник. – 2011. – Т. 45, № 3. – С. 219–227.

25. Дудник А. В. Исследования электронных поясов в земной магнитосфере с помощью рентгеновского спектрофотометра SphinX и спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф: предварительные результаты / А.В.Дудник, П.Подгурски, Я.Сильвестер, Ш.Гбурек, М.Ковалински, М.Сиарковски, С.Плоциеньяк, Я.Бонкала // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 14–25.

26. Дудник А. В. Рентгеновский спектрофотометр SphinX и спектрометр частиц СТЭП-Ф спутникового эксперимента КОРОНАС-ФОТОН –

предварительные результаты совместного анализа данных / А.В.Дудник, П.Подгурски, Я.Сильвестер, Ш.Гбурек, М.Ковалински, М.Сиарковски, С.Плоциеньяк, Я.Бонкала // *Астрономический Вестник*. – 2012. – Т. 46, № 2. – С. 173–183.

27. Dudnik O. V. VHF Radio Response of the Near Earth Space During Solar Activity Growth in October 2003 / O.V.Dudnik, M.L.Kaiser // *Advances in Space Research*. – 2013. – Vol. 51. – Issue 3. – P. 350–355.

#### **в материалах та тезах конференцій:**

28. Abrosimov A. T. Dynamics of Inner Radiation Belt Electrons and the Sporadic Space Radio Emission / A.T.Abrosimov, A.V.Dudnik, Yu.V.Mineev, G.I.Pugacheva // *22<sup>nd</sup> International Cosmic Ray Conference (Dublin, Ireland, 11–23 August, 1991)*. – Proceedings. – Vol. 3. – P. 640-643.

29. Dudnik A. V. The Radial Diffusion and the High Frequency Radio Emission of Energetic Electrons of Inner Radiation Belt During Geomagnetic Storm With  $D_{st} = -110$  nT / A.V.Dudnik, Yu.V.Mineev // *24<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, (Rome, Italy, 28 August-8 September 1995)*. – Proceedings. – Vol. 4. – P. 1058–1061.

30. Dudnik O. V. The Connection Between High Frequency Radio Emission Bursts of Magnetospheric Origin and the Parameters of Solar and Geophysics Activity / O.V.Dudnik, O.N.Shekhovcova // *31<sup>st</sup> Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR), (Birmingham, England, 14–21 July, 1996)*. – Abstracts. – P. 246

31. Dudnik O. V. The Ukrainian instruments set for the ground accompaniment of the joint Ukrainian–Russian satellite project “PHOTON” to study the hard radiation of the Sun and solar-Earth’s magnetosphere connection / O.V.Dudnik, I.I.Zalyubovsky // *31<sup>st</sup> Scientific Assembly of COSPAR (Birmingham, England, 14–21 July, 1996)*. – Abstracts. – P. 305.

32. Dudnik O. V. The experiment STEP at the Ukrainian Satellite “Poperedzennja” for the Registration of Energetic Particles Precipitating from Earth's Radiation Belts Into Magnetosphere Before Earthquakes / O.V.Dudnik, M.P.Gopych // *31<sup>st</sup> Scientific Assembly of COSPAR (Birmingham, England, 14–21 July 1996)*. – Abstracts. – P. 95.

33. Dudnik O. The Satellite "STEP" instrument for registration of energetic particle on board the Ukrainian spacecraft "Warning" / O.Dudnik, T.Malykhina // *16<sup>th</sup> European Cosmic Ray Symposium (Alcala de Henares, Spain, 20–25 July 1998)*. – Proceedings. – P. 223–226.

34. Dudnik O. V. The Experiment «STEP–F» for Solar Cosmic Rays Measurements on the Board of Ukrainian–Russian Satellite «PHOTON» / O.V.Dudnik, T.V.Malykhina // *Joint 7<sup>th</sup> European and 65<sup>th</sup> Annual Czech Astronomical Conference JENAM–98 (Prague, Czech Republic, 9–12 September 1998)*. – Abstracts. – P. 29.

35. Dudnik O. V. Bursts of HF Radio Noises After Irregularities of Solar Wind / O.V.Dudnik, T.V.Malykhina // *33<sup>rd</sup> Scientific Assembly of the Committee on Space*

Research (COSPAR) (Warsaw, Poland, 16-23 July, 2000). Book of Abstracts. – Vol. D. – P. 676.

36. Dudnik O. V. Simultaneous Observation of HF Near Earth Space Electromagnetic Emission At a Distance 700 km / O.V.Dudnik, Yu.F.Yurovsky // 33<sup>rd</sup> COSPAR Scientific Assembly (Warsaw, Poland, 6-23 July, 2000). – Book of Abstracts. – Vol. C. – P. 326.

37. Dudnik O. V. Development of Energetic Charge Particle Telescope for on Board Measurements / O.V.Dudnik, O.S.Frolov // 33<sup>rd</sup> COSPAR Scientific Assembly (Warsaw, Poland, 16–23 July 2000). – Abstracts. – Vol. F. – P. 398.

38. Dudnik O. V. HF Radio Noise Bursts and Energetic Electrons at Geosynchronous Orbit / O.V.Dudnik // Asia–Pacific Radio Science Conference (Tokyo, Japan, August 1–4, 2001). – Abstracts. – P. 373.

39. Dudnik O. Computer simulation and results of calibration the charge particle spectrometer–telescope “STEP” / O.Dudnik, T.Goka, H.Matsumoto, M.Fujii, V.Persikov, T.Malykhina // 34<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly (Houston, USA, 10–19 October, 2002). – Abstracts. – paper No. 00189

40. Dudnik O. Simultaneous observations of magnetospheric HF radio emission after solar flare X1 / 3b at November 4, 2001 by use of different radio telescopes / O.Dudnik, Yu.Yurovsky // 34<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly (Houston, USA, 10–19 October, 2002) – Book of Abstracts. – paper No. 00190.

41. Dudnik O. Laboratory and accelerator test of the charge particle detectors for a satellite instrument “STEP–F” / O.Dudnik, T.Goka, H.Matsumoto, H.Fujii, O.Golovash, T.Malykhina // EGS–AGU–EUG Joint Assembly (Nice, France, 6–11 April, 2003). Abstracts. – Vol. 5. – No. 05157.

42. Dudnik O. V. “Wind” spacecraft ground observation of solar and near Earth high–frequency radio bursts during strong solar activity at November 4, 2001 / O.V.Dudnik, M.L.Kaiser, Yu.F.Yurovsky // EGS-AGU-EUG Joint Assembly (Nice, France, 6–11 April 2003) – Geophysical Research Abstracts. – 2003. – Vol. 5. – No. EAE03-A-05446.

43. Dudnik O. V. VHF radio response of the Earth magnetosphere during solar activity growth in October 2003 / O.V.Dudnik // International Symposium on Solar Extreme Events of 2003 (Moscow State University, Moscow, Russia, 12–14 July, 2004). – Programme and Abstract Book. – P. 45.

44. Dudnik O. V. UHF radio splashes at middle latitudes during geomagnetic storm on October 22–23, 1999 / O.V.Dudnik, A.V.Dmitriev // 11<sup>th</sup> International Symposium on Equatorial Aeronomy (Taipei, Taiwan, 9–14 May, 2005). – Book of Abstracts. – P. 5–20.

45. Valtonen E. Radiation Tolerance Tests of Small-Sized CsI(Tl) Scintillators Coupled to Photodiodes / E.Valtonen, J.Peltonen, O.V.Dudnik, A.M.Kudin, H.Andersson, Yu.A.Borodenko, T.Eronen, J.Huovelin, H.Kettunen, E.V.Kurbatov, J.Lehti, S.Nenonen, M.Rossi, R.Vainio, A.Virtanen // 8<sup>th</sup> European Workshop on Radiation Effects on Components and Systems,, (Jyvaskyla, Finland. September 10-12, 2008). – Proceedings. – P. 350–354.

46. Podgorski P. Joint analysis of SphinX and STEP-F instruments data on magnetospheric electron flux dynamics at low Earth orbit / P.Podgorski, O.V.Dudnik,

J.Sylwester, S.Gburek, M.Kowalinski, M. Siarkowski, S.Plocieniak, J.Bakala // 39<sup>th</sup> Scientific Assembly of the Committee on Space Research. (Mysore, India, 14–22 July, 2012). – Abstracts. – Panel PSW.3: “Space Weather Data: Observations and Exploitation for Research and Applications”. – STW-C 119 PSW.3 – 0028-12. – P. 112.

47. Dudnik O. Unexpected behavior of subrelativistic electron fluxes under Earth radiation belts / O.Dudnik // 4<sup>th</sup> International workshop NEPPA/SOLARIS–2012 (Boulder, Colorado, USA, 9–12 October 2012). – Abstract book. – P. 15.

48. Dudnik O. Radiation belts of the Earth: overview, methods of investigations, recent observations on the CORONAS–Photon spacecraft / O.Dudnik, J.Sylwester, P.Podgórsi, S.Gburek // Conference “Progress on EUV&X–ray spectroscopy and imaging” (Wroclaw, Poland, 20–22 November, 2012). – Abstract book. – P. 3.

### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

49. Cole D. G. Space weather: its effects and predictability / D.G.Cole // Space Science Review. – 2003. – Vol. 107. – P. 295–302.

50. Троицкий В. С. Поиск спорадического радиоизлучения из космоса / В.С.Троицкий, Л.Н.Бондарь, А.М.Стародубцев // Успехи физических наук. – 1974. – Т. 113, Вып. 4. – С. 719–723.

51. Мусатенко С. И. Радиоизлучение околоземного космического пространства как результат воздействия солнечных вспышек на магнитосферу и ионосферу Земли / С.И.Мусатенко // Геомагнетизм и аэрономия. – 1980. – Т. 20, № 5. – С. 884–888.

52. Мусатенко С. И. Высыпания потоков дрейфующих частиц в среднеширотную ионосферу / С.И.Мусатенко, Е.В.Курочка, В.Я.Чолий, В.Н.Решетник // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 480–486.

53. Дудник А. В. Спорадические радиовсплески как проявление солнечной активности в околоземном космическом пространстве // А.В.Дудник, В.М.Карташев, А.В.Лазарев, и др. / Известия Академии наук СССР, серия физическая. – 1987. – Т. 51, № 10. – С. 1839–1841.

54. Baker D. N. Signatures of the substorm recovery phase at high altitude spacecraft / D.N.Baker, T.I.Pulkkinen, E.W.Hones, et al. // Journal of Geophysical Research. – 1994. – Vol. 99, No. A6. – P. 10967–10979.

55. Horne R. B. Plasma astrophysics: acceleration of killer electrons / R.B.Horne // Nature: Physics. – 2007. – Vol. 3. – P. 590–591.

56. Meredith N. P. Energetic outer zone electron loss timescales during low geomagnetic activity / N.P.Meredith, R.B.Horne, S.A.Glauert, et al. // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111, No. A05212. – P. 1–13.

57. Hudson M. K. Relationship of the Van Allen radiation belts to solar wind drivers / M.K.Hudson, B.T.Kress, H.-R.Mueller, et al. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2008. – Vol. 70. – P. 708–729.

58. Садовничий В. А. Исследования космической среды на микроспутниках «Университетский–Татьяна» и «Университетский–Татьяна–2» / В.А.Садовничий, М.И.Панасюк, И.В.Яшин, и др. // Астрономический Вестник.

– 2011. – Т. 45, № 1. – С. 5–31.

59. Lorentzen K. R. Observations of relativistic electron microbursts in association with VLF chorus / K.R.Lorentzen, J.B.Blake, U.S.Inan, J.Bortnik // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – Vol. 106, No. A4. – P. 6017–6027.

60. Østgaard N. Global scale electron precipitation features seen in UV and X ray during substorms / N.Østgaard, J.Stadsnes, J.Bjorndal, et al. // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104, No. A5. – P. 10,191–10,204.

61. Reiner M. J. Radio signatures of the origin and propagation of coronal mass ejections through the solar corona and interplanetary medium / M.J.Reiner, M.L.Kaiser, J.-L.Bougeret // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – Vol. 106, No. A12. – P. 29,989–30,000.

62. Корчак А. А. О синхротронном излучении заряженных частиц в дипольном магнитном поле / А.А.Корчак // *Астрономический журнал*. – 1963. – Т. 40, № 6. – С. 994–1006.

63. Akasofu S. I. The magnetic field of a model radiation belt, numerically computed / S.I.Akasofu, I.C.Cain, S.Chapman // *Journal of Geophysical Research*. – 1961. – Vol. 66. – P. 4013–4026.

64. Narita Y. Wave-Vector Dependence of Magnetic-Turbulence Spectra in the Solar Wind / Y.Narita, K.H.Glassmeier, F.Sahraoui, M.L.Goldstein // *Phys. Rev. Lett.* – 2010 – Vol. 104, Issue 17 – P. 171101-1–171101-4.

65. Obara T. Main-phase creation of “seed” electrons in the outer radiation belt, Nagatsuma T. / T.Obara, M.Den, Y.Miyoshi, A.Morioka // *Earth Planets Space*. – 2000. – Vol. 52. – P. 41–47.

66. Gburek S. Soft X-ray variability over the present minimum of Solar activity as observed by SphinX / S.Gburek, M.Siarkowski, A.Кепа, et al. // *Solar System Res.* — 2011. — Vol. 45, No. 2. — P. 182—187.

## АНОТАЦІЯ

**Дудник О.В. Динаміка радіаційних поясів і фонового радіовипромінювання в навколосемному просторі як індикатор проявів сонячної активності.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальностями 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія; 05.07.12 – дистанційні аерокосмічні дослідження. - Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2015.

В дисертації йдеться про дослідження спорадичного радіовипромінювання навколосемного космічного простору; потоки заряджених частинок високих енергій в плазмосфері Землі. В роботі розвинено експериментальні методи наземної реєстрації високочастотних спорадичних радіосплесків, супутникового моніторингу високоенергійних заряджених частинок, а також методи комплексного аналізу супутникової інформації і наземних даних.

Вперше показано, що генерація спорадичних радіосплесків пов'язана з прискоренням, радіальною і пітч-кутовою дифузією електронів радіаційних поясів Землі. Оцінки потужності синхротронного випромінювання електронів



у дипольному магнітному полі Землі узгоджуються з даними спостережень, що прогнозує показники степеня в степеневих розподілах електронів за енергією і за пітч-кутами.

Вперше виявлено потоки електронів високих енергій на висоті 550 км поза радіаційними поясами Ван Алена; змінні електронні потоки під радіаційними поясами на середніх широтах як відгук на суббурі з  $D_{st} \leq -30$  нТл. Визначено емпіричні часи життя електронів у поясах у двох енергетичних діапазонах.

Доведено анізотропний характер руху електронів під радіаційними поясами, в той час як в області Бразильської магнітної аномалії потоки мають ізотропний характер. Енергетичні спектри частинок в області аномалії більш збагачені електронами високих енергій, ніж спектри у відроггах радіаційних поясів. Вперше виявлено додатковий внутрішній електронний радіаційний пояс Землі на  $L \approx 1.6$ , розташований під внутрішнім радіаційним поясом Ван Алена поза зоною Бразильської магнітної аномалії.

**Ключові слова:** радіаційний пояс, магнітосфера, Бразильська магнітна аномалія, електрони, радіовипромінювання, супутник, міжпланетний простір, моніторинг, висхідний вузол орбіти, прискорювач заряджених частинок.

## АННОТАЦИЯ

**Дудник А.В. Динамика радиационных поясов и фонового радиоизлучения в околоземном пространстве как индикатор проявлений солнечной активности.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.03.02 – астрофизика, радиоастрономия; 05.07.12 – дистанционные аэрокосмические исследования. - Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2015.

В диссертации идет речь об исследованиях высокочастотного спорадического радиоизлучения околоземного космического пространства; о потоках заряженных частиц высоких энергий в плазмосфере Земли. В работе развиты экспериментальные методы наземной регистрации всплесков высокочастотного спорадического радиоизлучения околоземного космического пространства; спутникового мониторинга потоков заряженных частиц высоких энергий с помощью позиционно-чувствительных кремниевых многоэлементных матричных детекторов большой площади и сцинтилляционных детекторов на основе радиационно-стойких монокристаллов йодистого цезия, активированных таллием. В работе также развиты методы комплексного мультиспектрального анализа спутниковой информации с бортовых научных приборов космического базирования различного назначения, с одной стороны, и наземных данных геомагнитных и радиоастрономических обсерваторий, с другой стороны.

Впервые показано, что генерация спорадических радиовсплесков околоземного космического пространства в широком диапазоне частот сверхвысокочастотного радиодиапазона связана с рядом процессов во внутренних слоях земной магнитосферы, наиболее важными из которых

являются радиальная и питч-угловая диффузии субрелятивистских электронов радиационных поясов Ван Аллена с дальнейшим их высыпанием в атмосферу Земли. Оценки мощности синхротронного излучения высыпающихся электронов в дипольном магнитном поле Земли согласуются с данными наблюдений, что позволяет прогнозировать величины показателей степени степенных распределений частиц по энергии и по питч-углам.

Впервые разработан, изготовлен, прошел наземную отработку, испытания и калибровочные измерения высокочувствительный спутниковый телескоп электронов, протонов и альфа-частиц СТЭП-Ф, с помощью которого в 2009 году на борту космического аппарата «КОРОНАС-Фотон» проведен научный эксперимент по мониторингу частиц высоких энергий в магнитосфере Земли и в областях открытых силовых линий магнитного поля.

В условиях очень низкой солнечной активности 2009 года на высоте 550 км впервые обнаружены потоки электронов высоких энергий вне радиационных поясов Ван Аллена вплоть до  $L$ -оболочек, соответствующих внешней кромке внешнего радиационного пояса Земли; выявлены значительные колебания потоков электронов субрелятивистских и низких энергий под радиационными поясами и на средних широтах вне зоны радиационных поясов как отклик на слабые суббури (с  $D_{st} \leq -30$  нТл) в магнитосфере Земли.

Впервые обнаружен регулярный характер спада интенсивности электронов в области максимумов их распределений при пересечении отрогов внешнего и внутреннего поясов в ходе фазы восстановления слабых суббурь. Определены эмпирические времена жизни электронов в поясах в двух энергетических диапазонах. Получено, что время жизни электронов во внешнем поясе в среднем в  $\approx 3$  раза дольше, чем во внутреннем электронном поясе Ван Аллена.

Впервые показано, что потоки электронов под радиационными поясами и вблизи их отрогов носят анизотропный характер, в то время как внутри Бразильской магнитной аномалии движение частиц высоких энергий изотропно. Энергетические спектры электронов внутри аномалии носят более жесткий характер, чем спектры частиц вблизи отрогов электронных радиационных поясов, где они обеднены частицами высоких энергий.

В условиях минимальной солнечной и геомагнитной активности 2009 года между 23-м и 24-м циклами солнечной активности впервые обнаружен дополнительный внутренний электронный радиационный пояс Земли на  $L$ -оболочке  $L \approx 1.6$ . Дополнительный пояс наблюдается вне зоны Бразильской магнитной аномалии под внутренним радиационным поясом Ван Аллена в диапазоне низких энергий электронов. Найдено впервые, что во внутреннем радиационном поясе Ван Аллена энергетический спектр электронов имеет более жесткий спектр в сравнении со спектром электронов в дополнительном внутреннем поясе.

**Ключевые слова:** радиационный пояс, магнитосфера, Бразильская магнитная аномалия, электроны, радиоизлучение, спутник, межпланетное пространство, мониторинг, восходящий узел орбиты, ускоритель заряженных частиц.

## ANNOTATION

**Dudnik O.V. Dynamics of radiation belts and noise radio emission in the near Earth space as an indicator of the solar activity manifestation.** – Manuscript.

The thesis for Doctor's degree on physical and mathematical sciences, speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy; 05.07.12 – remote aerospace research. - Main Astronomical Observatory, Kyiv, 2015.

The thesis refers to research of sporadic radio emission of the near Earth space, investigation of high energy charge particle fluxes in the Earth's plasmasphere. The experimental methods of high frequency sporadic radio bursts ground registration, and of satellite monitoring of high energy charge particles are developed in the work. The methods of complex analysis of satellite information and ground-base data are developed too.

It is shown for the first time that generation of sporadic radio bursts is connected with the acceleration, radial and pitch-angle drifts of electrons inhabiting radiation belts of the Earth. Estimations of synchrotronous emission power by electrons in the dipolar magnetic field of the Earth are conformed with the observing data, that predict the exponent of power function of electron's distribution on the energy and on the pitch-angles.

For the first time it is revealed the high energy electron fluxes on the altitude of 550 km outside Van Allen radiation belts; it was detected too variable electron fluxes under radiation belts on the middle latitudes as a response on substorms with  $D_{st} \leq -30$  nT. It is defined empiric lifetimes of electrons in the belts in 2 energy ranges.

It is proved an anisotropic character of the electron's motion under radiation belts while in the South Atlantic Anomaly the fluxes have isotropic character. The particle energy spectra inside the Anomaly region are enriched with high energy electrons more than the spectra at radiation belt's spurs. For the first time it is revealed additional inner electron radiation belt of the Earth at  $L \approx 1.6$  located below the Van Allen inner radiation belt beyond the Brazil magnetic anomaly zone.

**Key words:** radiation belt, magnetosphere, Brazil magnetic anomaly, electrons, radio emission, satellite, interplanetary space, monitoring, ascending node of the orbit, charge particle accelerator.