

Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

КОЛОСКОВ ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК: 537.876.23

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЯВИ НИЗЬКОЧАСТОТНИХ ПРОЦЕСІВ У
ГЕОКОСМОСІ

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків–2016

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Радіоастрономічному інституті Національної академії наук України, м. Харків

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук,
член-кореспондент НАН України
Ямпольський Юрій Моїсійович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
головний науковий співробітник відділу “Радіофізики геокосмосу”

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Чорногор Леонід Феоктистович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
професор кафедри космічної радіофізики

доктор фізико-математичних наук, член-кореспондент НАН України
Федоров Олег Павлович,
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,
директор

доктор технічних наук, професор
Пуляєв Валерій Олександрович,
Інститут іоносфери НАН України і МОН України,
заступник директора з наукової роботи

Захист відбудеться “ 3 ” листопада 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Академіка Проскури, 12.

Автореферат розісланий “ 29 ” вересня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена розробці нових підходів і методів для електромагнітної діагностики низькочастотних процесів у геокосмосі, спрямованих на вивчення явищ у навколосемному космічному оточенні Землі, що характеризуються найбільшою потужністю.

Актуальність теми. В другій половині ХХ-го століття людство почало активну експансію у космічний простір. Починаючи з цього часу, сотні наземно-космічних систем безперервно забезпечують користувачів послугами радіозв'язку, глобальної навігації, Інтернет комунікації, телемовлення, моніторингом атмосфери, надр, поверхні суші і світового океану, прогнозуванням катастрофічних явищ і іншими життєво важливими потребами. Таким чином, геокосмос став середовищем існування земної цивілізації. Очевидно, що функціонування вже існуючих і створення нових космічних технологій потребують удосконалення наших знань про геокосмос. Одним з провідних наукових напрямків ХХІ-го століття міжнародним науковим співтовариством проголошена концепція космічної погоди (КП), що спрямована на візуалізацію стану навколосемного плазмового оточення і побудову прогностичних моделей його поведінки в залежності від зовнішніх чинників, найголовнішим з яких є сонячна активність.

Дуже важливим мотивом для розвитку досліджень іоносфери та магнітосфери нашої планети є також фундаментальний науковий аспект сонячно-земної взаємодії. Геокосмос є гігантською природною "лабораторією", що дозволяє досліджувати явища, які неможливо відтворити в земних умовах. Для реалізації цієї концепції необхідна наявність адекватних уявлень про навколосемний простір і розуміння механізмів поведінки плазмового оточення нашої планети. На теперішній час докладно вивчена та добре моделюється взаємодія земної атмосфери та магнітного поля з регулярними корпускулярним і радіаційним потоками сонячної енергії у незбурених умовах. У той же час флуктуаційні процеси, які спричинені спорадичною активністю Сонця - викидами корональних мас, радіаційними потоками та спалахами різних типів, вивчені далеко не повно.

Очевидно, що головну роль у розвитку досліджень геокосмосу та створенні образу космічної погоди відіграє його дистанційна діагностика. Безумовні переваги тут мають дистанційні радіофізичні методи зондування іоносфери та магнітосфери, засновані на використанні в якості "сенсорів" електромагнітних полів і сигналів. У зв'язку зі зростаючим енергоспоживанням і, як наслідок, електромагнітним забрудненням навколишнього середовища, більш плідними вважаються такі методи, які не потребують створення спеціальних передавальних систем, а використовують вже існуючі природні та штучні види електромагнітного випромінювання.

У зв'язку з цим актуальною та перспективною є розробка нового оригінального підходу дистанційного зондування геокосмосу – застосування глобальних електромагнітних резонаторів як "індикаторів" стану космічної погоди. У якості таких природних систем в дисертації використані шуманівський резонатор Земля – іоносфера (ШР) та іоносферний альфвенівський резонатор

(IAP). З їх допомогою досліджені електромагнітні прояви низькочастотних процесів в геокосмосі, які стимульовані регулярною геліофізичною циклічністю, спорадичною активністю Сонця, потужними збуреннями в магнітосфері, тропосфері та на поверхні Землі. До першої групи відносяться: 11-річний цикл сонячної активності, сезонні й добові варіації. Другу групу складають спалахи на Сонці, геокосмічні бурі, висипання енергійних частинок, глобальна грозова активність, акустико-гравітаційні хвилі, потужні тропосферні погодні фронти, землетруси і техногенні впливи на іоносферну плазму.

Вивчені в роботі явища носять планетарний характер, тому для їх діагностики була створена глобальна мережа автономних, постійно діючих радіофізичних комплексів діагностики геокосмосу з використанням електромагнітних полів і сигналів ультранизькочастотного (УНЧ), наднизькочастотного (ННЧ), високочастотного (ВЧ) і ультрависокочастотного (УВЧ) діапазонів, що розміщені в Антарктиці, Арктиці, Європі, Азії та Африці. Комплекси за допомогою мережі Інтернет об'єднані у єдину систему. Дослідження, що проведені в дисертації, дозволили вивчити ряд нових фізичних явищ і процесів, таких як 11-ти річний тренд в поведінці ШР і IAP, реакцію резонаторів на спорадичну сонячну активність, розщеплення спектрів IAP, радіальний дрейф стимульованих іоносферних неоднорідностей, "проникнення" штучного електромагнітного випромінювання в Антарктику та інші. Розроблено ряд нових оригінальних моделей щодо відтворення реакції іоносфери на сонячні та приповерхневі збурення.

Наведені вище аргументи і факти свідчать про актуальність, затребуваність і перспективність проблематики дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. У дисертації наведено узагальнені результати досліджень, виконані автором самостійно або при його визначальній участі, в період 1999-2016 рр., згідно з науковими планами і науково-дослідними роботами Радіоастрономічного інституту НАН України (РІ НАНУ). Основні з виконаних НДР це: "Дослідження хвильових процесів у космічному просторі та космічна погода" ("Ямб-2", 0103U007921, виконавець); "Дослідження електромагнітних процесів в геокосмосі методами дистанційного зондування" ("Ятаган", 0107U000029, виконавець); "Дослідження збурень у геокосмосі та розробка нових дистанційних методів їх зондування" ("Ятаган-2", 0111U000063, відповідальний виконавець); "Дослідження електромагнітних резонансних процесів у навколоземному просторі" ("Ятаган-3", 0116U000035, відповідальний виконавець); "Розроблення, створення та удосконалення науково-дослідної апаратури для фундаментальних досліджень земної поверхні та навколоземного середовища" ("Зонд-3", 0113U002045, виконавець); "Двопозиційні (Антарктика-Україна) дослідження глобальних електромагнітних резонаторів - шуманівського (ШР) та іоносферного альфвенівського (IAP)" ("Шіар", 0110U004535, науковий керівник); "Дослідження електромагнітних проявів геокосмічних та погодних збурень в Антарктиці" ("Геліомакс", 0111U007683, "Геліомакс-2012", 0112U007280с, науковий керівник); "Дослідження взаємодії космічної та атмосферної погодних систем за

даними моніторингових спостережень електромагнітних обсерваторій на УАС та в Україні" ("Антеї", 0113U004571, науковий керівник).

Значна частина результатів була отримана в рамках міжнародних проектів: "Дослідження динамічних процесів в іоносфері Землі методом багатопозиційної доплероскопії" ("Збурення", 0111U003979, відповідальний виконавець); "Багатопозиційні радарні дослідження іоносферних неоднорідностей в середніх і високих широтах над євразійським регіоном" ("Сізіф", 0113U000703, відповідальний виконавець); "Дослідження природних і штучно стимульованих іоносферних процесів та розробка дистанційних методів тривимірної діагностики плазмових неоднорідностей" ("Шпіцберген-2014", 0114U002820, заст. наукового керівника); проекти УНТЦ - "Розробка методів зондування та візуалізації хвильових збурень для створення світової КХ мережі моніторингу іоносфери" (№ 827, виконавець); "Дослідження впливу природних та техногенних збурень в атмосфері Північної півкулі на електромагнітне оточення в Антарктиці" (P-072, виконавець); "Використання "ефекту саморозсіювання" для діагностики іоносферних неоднорідностей, стимульованих КХ випромінюванням за допомогою DPS систем" (P-330, виконавець); "Визначення характеристик іоносферного хвилеводного поширення за даними моніторингу ВЧ випромінювання стану HAARP в Антарктиці" (P-524, виконавець); INTAS проект "Non-linear structuring of the ionospheric plasma under the action of powerful electromagnetic waves" (№ 03-51-5583, виконавець); проекти SPEASMS 2011/10047 "Atmospheric-space weather system interaction in Arctic and mid-latitude regions", координатор проекту від PI НАНУ; SPEA-2012/10021 "Norwegian-Ukrainian cooperation aimed to sustainable development of the education process in geospace researches", координатор проекту від PI НАНУ; SPEALA 2014/10001 "Harmonization of the Norwegian-Ukrainian educational activities in geospace researches", координатор проекту від PI НАНУ.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у *розробці оригінальних підходів і нових методів для електромагнітної діагностики низькочастотних процесів в геокосмосі.*

Для досягнення поставленої мети необхідне розв'язання наступних *задач:*

- Розробка методичного, апаратного та програмного забезпечення оригінальних систем моніторингу сигналів УНЧ, ННЧ, ВЧ і УВЧ діапазонів в Україні, Антарктиці, Арктиці, Африці та Сибіру для діагностики низькочастотних процесів у геокосмосі та стану космічної погоди. Забезпечення безперервної роботи цих систем.
- Створення баз даних систематичних багаторічних багатопозиційних спостережень електромагнітних полів і сигналів УНЧ, ННЧ, ВЧ і УВЧ діапазонів.
- Дослідження регулярних закономірностей поведінки електромагнітних низькочастотних процесів в геокосмосі, таких як: 11-ти річні, сезонні, тижневі та добові циклічності.
- Дослідження реакції резонаторів та іоносфери на спалахову активність Сонця, геокосмічні бурі, тропосферні фронти, землетруси, планетарну грозову і техногенну активності.

- Розробка спрощених фізичних моделей, що пояснюють зв'язок між характеристиками глобальних електромагнітних резонаторів і структурними складовими геокосмосу - іоносферою та магнітосферою.

Об'єкт дослідження - навколоземне космічне середовище (геокосмос).

Предмет дослідження - низькочастотні процеси в геокосмосі.

Методи дослідження. У дисертації застосовані традиційні та оригінальні, розроблені за участю автора, радіофізичні методи дистанційної діагностики геокосмосу. Реалізована нова концепція використання електромагнітних резонаторів Землі в ролі "індикаторів" стану космічної погоди. Характеристики УНЧ, ННЧ, ВЧ і УВЧ радіосигналів аналізувалися спектральними і поляризаційними методами. Застосовувалися методи статистичної обробки та кореляційний аналіз великих масивів експериментальних даних. Для інтерпретації результатів використано методи числового й аналітичного моделювання в рамках вже існуючих і оригінальних фізичних моделей. Первинні дані вимірювань та їх обробка проводилися відповідно до стандартизованих рекомендацій міжнародних наукових організацій URSI, INTERMAGNET і IAGA. Інсталяція нових апаратно-програмних засобів та їх апробація здійснювалися автором особисто на обсерваторіях в Україні, Антарктиді, Арктиці.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- Вперше реалізовано новий підхід щодо використання електромагнітних резонаторів Землі в якості індикаторів стану космічної погоди. Встановлені реакції ШР і ІАР на регулярну і спорадичну активність Сонця. Розроблені спрощені фізичні моделі, які пояснюють механізми взаємодії потоків сонячної енергії з плазмовим оточенням Землі.
- Для дистанційної діагностики іоносфери і глобальної грозової активності побудовано та введено в експлуатацію глобальну мережу Інтернет - керованих приймальних систем УНЧ, ННЧ і ВЧ діапазонів, які розміщено в Україні, Антарктиді, Арктиці, Африці і в Сибіру. Створено унікальну багаторічну базу даних багатопозиційних спостережень, що використовується для моделювання геокосмічних процесів вченими України, США та Європи.
- Проведено картографування надпотужних блискавичних розрядів із застосуванням поляризаційної методики, новизна якої полягає у врахуванні гіротропії іоносфери. Застосовано дані синхронного трипозиційного моніторингу ННЧ шумів на двох антарктичних станціях і на обсерваторії в Японії. Дані картографування верифіковано шляхом їх порівняння з результатами глобального супутникового моніторингу блискавичних розрядів у оптичному діапазоні.
- Вперше зареєстровано і вивчено новий ефект "розщеплення" спектральних максимумів ІАР, визначено його властивості та запропоновано можливі механізми виникнення ефекту. Розроблено та апробовано нову методику оцінки критичної частоти іоносферного шару F2 за поведінкою спектральних характеристик ІАР, яка може застосовуватися у будь-якому регіоні земної кулі.
- Розроблено та реалізовано нову методику спектрально-поляризаційної діагностики в Антарктиді рівнів "паразитного" випромінювання енергосистем промислово розвинених регіонів земної кулі. Вперше здійснено реєстрацію сигналів з частотою 60 Гц від електромереж Північної Америки та вивчено

особливості їх поведінки: “weekend” ефект континентального енергоспоживання, реакція характеристик сигналу на значну аварію енергосистеми США - Канада. Вперше оцінено рівень забруднення електромагнітного оточення Антарктики техногенним випромінюванням з північної півкулі.

- Вперше використана для керованого живлення міжшарового іоносферного хвилеводу між областями E та F область штучної іоносферної турбулентності, яку створено потужним ВЧ нагрівом. Шляхом аналізу спектру стимульованого випромінювання іоносфери поблизу нагрівного стенду (НС), та сигналів HAARP в Антарктиці встановлено залежність між неоднорідностями метрових-декаметрових масштабів і спектральною структурою стимульованої електромагнітної емісії іоносфери.
- Вперше дана фізична інтерпретація низькочастотного ефекту "розщеплення" спектра пробного ВЧ сигналу, розсіяного на штучній іоносферній турбулентності. Розроблено модель радіального дрейфу стимульованих неоднорідностей від центру до периферії нагрітої області. Відтворено динаміку дрейфу в умовах стаціонарного нагріву іоносферної плазми і на стадії релаксації.
- Розроблено та реалізовано нову методику побудови карт варіацій повного електронного вмісту за даними приймачів регіональних мереж глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС), що дозволяє контролювати і візуалізувати низькочастотні збурення в іоносфері.
- Створено та введено в експлуатацію апаратно-програмне забезпечення для "Комплексу електромагнітного зондування навколишнього середовища" Низькочастотної обсерваторії РІ НАНУ, який є об'єктом національного надбання України. Забезпечено безперервне функціонування Комплексу в режимі Інтернет - доступу, обробки і відображення даних в реальному часі на WEB - сайті <<http://geospace.com.ua>>.

Практичне значення одержаних результатів полягає в здатності застосування представлених в дисертації нових систем, методик, апаратних засобів і фізичних моделей для моніторингу стану космічної погоди, діагностики процесів, що відбуваються в геокосмосі і на поверхні Землі, а також аналізу і прогнозу глобальних кліматичних змін. Важливим практичним результатом роботи є продемонстрована можливість використання в якості пробних вже існуючих природних і техногенних сигналів для діагностики навколосемного простору за допомогою автоматизованих, інтернет-керованих компактних приймальних систем. Фундаментальний і практичний інтерес представляє нова концепція застосування природних електромагнітних резонаторів як “індикаторів” геокосмічних і наземних збурень щодо стану плазмового оточення Землі. Цей підхід розвиває ідею використання навколосемного плазмового оточення у вигляді природної лабораторії, в якій роль сенсорів відіграють електромагнітні поля і сигнали.

Необхідно відзначити, що розробки дисертаційної роботи вже було використано при виконанні геокосмічних досліджень в рамках: "Державних

цільових науково-технічних програм проведення досліджень в Антарктиці на 2002-2010 і на 2011-2020", "Програми спільних досліджень Національної академії наук України та Європейської асоціації іоносферного розсіяння EISCAT на 2012-2015". Методики і апаратно-програмне забезпечення, розроблені автором, вже впроваджені на обсерваторіях в Україні, Антарктиді, Арктиці і у Сибіру. Треба також відмітити, що "Комплекс електромагнітного зондування навколишнього середовища" РІ НАНУ обладнано методиками, алгоритмами і програмами, розробленими автором.

Практична значимість і високий рівень отриманих в дисертації результатів підтверджені включенням більшості з них до циклу робіт "Структура і динаміка геофізичних полів як відображення еволюції і взаємодії геосфер в Антарктиці", який було висунуто на здобуття і рекомендовано до присудження Державної премії України в галузі науки і техніки за 2015 рік.

Слід також зазначити, що розроблені в дисертації методики і програмно-апаратні засоби заплановані для втілення в системі Національної служби космічної погоди, що створюється в інтересах Державного космічного агентства України.

Особистий внесок здобувача. У роботах, присвячених вивченню ШР [1-3], автору належить модельне розв'язання пеленгаційної задачі, отримання та обробка даних і інтерпретація результатів, а в статтях [4, 5] - проведення експериментів і обробка даних, накопичених в Антарктиці, а також участь в їх інтерпретації. У статтях [6, 27] автор брав участь у постановці задач, а в публікаціях [7-10] йому належать: розробки алгоритмів обробки, організація експериментів та інтерпретації даних. У статтях, присвячених розв'язанню зворотних задач поширення радіохвиль, автору належать: побудова алгоритмів, чисельне моделювання і розрахунки характеристик іоносферних радіосигналів [11-13]. У роботах [14-22, 28, 29] автор брав участь в проведенні експериментів, розробці алгоритмів, обробці даних та інтерпретації результатів. У роботах, присвячених реалізації нових методів радіодіагностики, автору належать: постановка задачі [23], моделювання та обробка даних натурних експериментів, що виконані під його керівництвом в статтях [24, 25, 30, 31]. У публікаціях [26, 32, 33], що описують вимірювальні комплекси УНЧ, ННЧ, ВЧ діапазонів, автору належать: концепція побудови мережі, розробка методично-програмного забезпечення, інсталяція пристроїв, обробка та візуалізація даних. Результати комплексної діагностики геокосмосу і стану космічної погоди, отримані в дисертації, доповідались на численних міжнародних і національних конференціях, симпозіумах і молодіжних наукових школах [34-38]. Автор неодноразово виступав у ролі запрошеного доповідача і лектора на престижних наукових форумах. Роботи [27, 32] надруковані без співавторства.

Автор особисто здійснював установку обладнання, інсталяцію методик, апаратного і програмного забезпечення на електромагнітній обсерваторії УАС "Академік Вернадський" під час двох українських антарктичних експедицій (7-ї

та 10-ї УАЕ), брав участь в 4-ій морській експедиції в Антарктику. Здобувачем було створено і експлуатується методичне і програмне забезпечення шести сенсорів "Комплексу електромагнітного зондування навколишнього середовища", розташованого на Низькочастотній обсерваторії РІ НАНУ, і установок в Північній Скандинавії і на арх. Шпіцберген (Норвегія).

Апробація результатів дисертації. Представлені в роботі результати доповідалися на 38 національних і міжнародних конференціях, симпозіумах і наукових школах. Основними з них є:

- Міжнародні антарктичні конференції, Київ, 2004, 2009 2011, 2013, 2015;
- International Antarctic Conference IAC 2009, May 22-24, 2009 Kharkiv, Ukraine;
- Міжнародні Байкальські молодіжні наукові школи з фундаментальної фізики, Іркутськ, 2005, 2007, 2011;
- Українські конференції з космічних досліджень, 2007, 2009, 2010, 2015;
- Друга Всеукраїнська конференція "Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2010". м Київ, 14-17 червня 2010;
- Перша українська конференція "Электромагнитные методы исследования окружающего пространства", Харків, 25-27 вересня 2012;
- Всеросійські наукові конференції "Глобальная электрическая цепь" 2013 і "Распространение радиоволн" 2014;
- RF Ionospheric Interactions Workshops, 1999, 2001, 2005, 2008 (USA);
- URSI, General Assemblies, 2002, 2008, 2014;
- 16th International EISCAT symposium, 12-16 August 2013, Lancaster UK;
- Remote Radio Sounding of the Ionosphere (ION - 2013, 2014);
- XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, USA;
- AGU Fall Meeting, 15-19 December 2014, San Francisco, USA;
- 14th International Ionospheric Effects Symposium IES-2015: 12-14 May 2015, USA;
- EUREF 2016 Symposium, Donostia San Sebastian, May 25th - 27th, 2016.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 26 статтях в міжнародних і українських фахових наукових журналах, а також у 12 тезах і працях конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із переліку скорочень та умовних позначень, вступу, 6 розділів, висновків та списку використаних джерел. Повний обсяг роботи складає 382 сторінку. Дисертація містить 117 рисунків і 12 таблиць (з них 39 на окремих сторінках), список використаних джерел на 42 сторінці нараховує 372 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Вступі** обґрунтовано необхідність проведення досліджень за темою дисертації й актуальність роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, висвітлено новизну та практичне значення отриманих результатів.

Розділ 1 “Аналітичний огляд” містить опис сучасного стану досліджень навколоземного космічного простору, методів і комплексів для його дистанційної радіофізичної діагностики. Обґрунтовано вибір проблематики досліджень, необхідність і перспективність розв’язання задач дисертаційної роботи.

У підрозділі 1.1 введені основні визначення і викладені сучасні уявлення про геокосмос, магнітосферу (пункт 1.1.1), іоносферу (пункт 1.1.2), атмосферу та літосферу (пункт 1.1.3). Підрозділ 1.2 присвячено опису низькочастотних процесів і явищ, діагностика яких є предметом дисертаційної роботи.

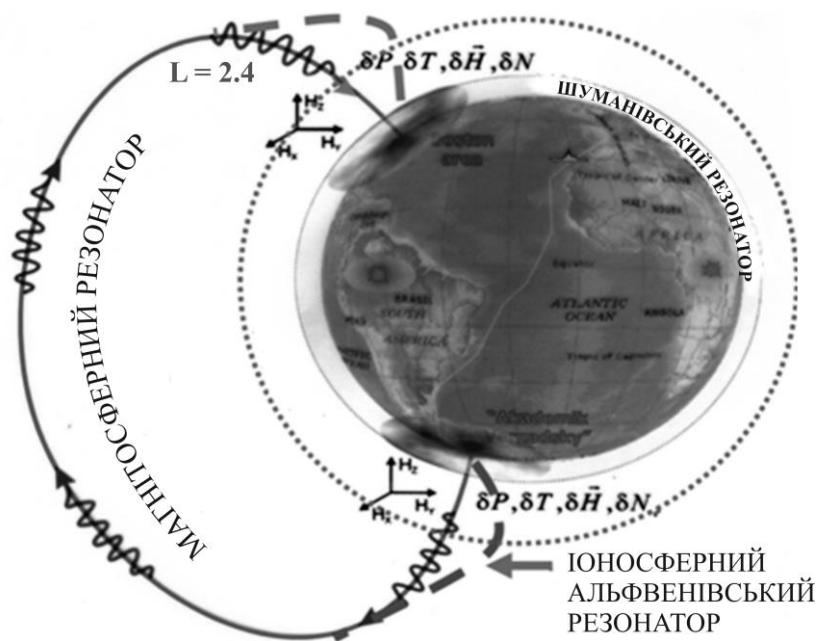


Рисунок 1 - Схема формування ШР, ІАР та МР

електромагнітних резонаторів Землі: шуманівського (ШР), іоносферного альфвенівського (ІАР) та магнітосферного (МР) (див. Рис. 1). Обґрунтовано новий підхід застосування природних електромагнітних резонаторів в ролі “індикаторів” низькочастотних процесів у геокосмосі. Інтерес до вивчення цих процесів обумовлено їх високою енергетикою, завдяки якій вони суттєво впливають на стан космічної погоди. Низькочастотні процеси визначені в роботі як явища, характерні частоти яких істотно менші частот плазмових коливань (ленгмюрівських, гірорезонансних, зіткнень). В підрозділі наведено класифікацію процесів, що досліджуються в роботі. Вони включають: 11-річний цикл сонячної активності, сезонні та добові періодичності, вікенд-ефект, реакції на спорадичну сонячну активність, відгуки на енерговиділення від поверхні і тропосфери та інші. В підрозділі також охарактеризовано акустико-гравітаційні хвилі, які є важливим індикатором низькочастотних збурень і суттєво впливають на динаміку геокосмосу.

У **Розділі 2 “Вимірювальні комплекси і методики дослідження низькочастотних електромагнітних полів і процесів”** представлені вимірювальні комплекси і методики обробки даних, що послужили інформаційною основою дисертаційної роботи. Велика частина даних отримана

У ньому представлені основні індекси сонячної та магнітної активності, а також розглянуті космічні і наземні радіофізичні методи і комплекси, що використовуються для діагностики стану геокосмосу. Проаналізовано типи даних і індексів, що їх одержано за допомогою вже існуючих систем. Показана доцільність доповнення цих систем оригінальними розробками РІ НАНУ, що створені в рамках роботи та експлуатуються за участю автора. Наведено основні характеристики глобальних

на установках, розроблених за участю автора в РІ НАНУ. До них відносяться електромагнітні сенсори Низькочастотної обсерваторії РІ НАНУ, мережі магнітометричних станцій УНЧ-ННЧ діапазону і когерентних ВЧ приймачів. Крім того, для обробки залучалися дані вимірювальних комплексів організацій-партнерів РІ НАНУ, інсталяція яких була реалізована за участю автора. Пакети прикладних програм Інтернет - керування, обробки і візуалізації даних у реальному часі також були розроблені під керівництвом автора. Розташування пунктів спостереження показано на рис. 2.

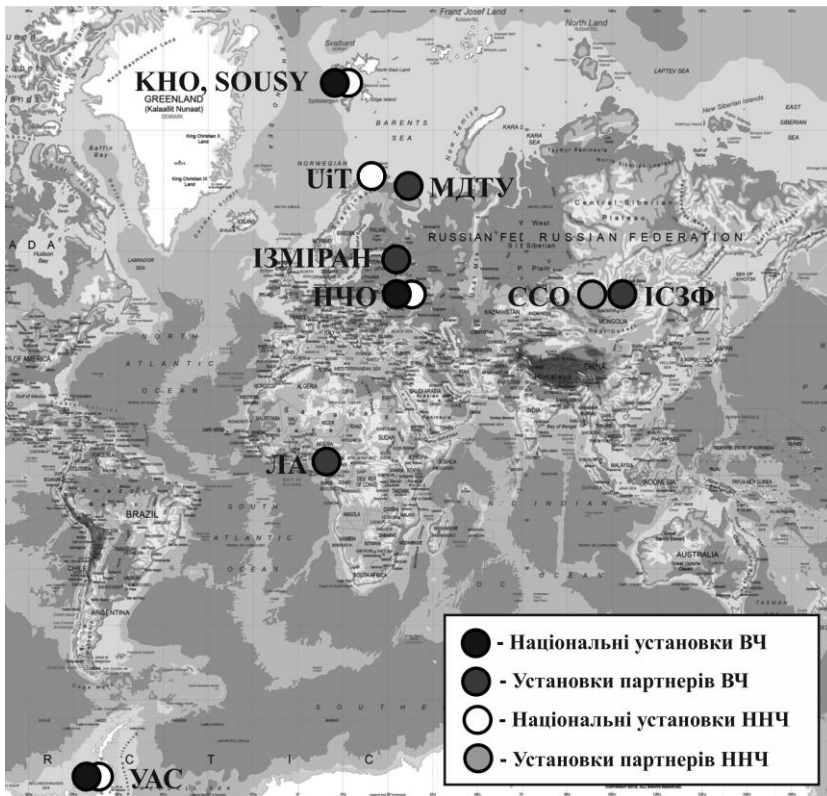


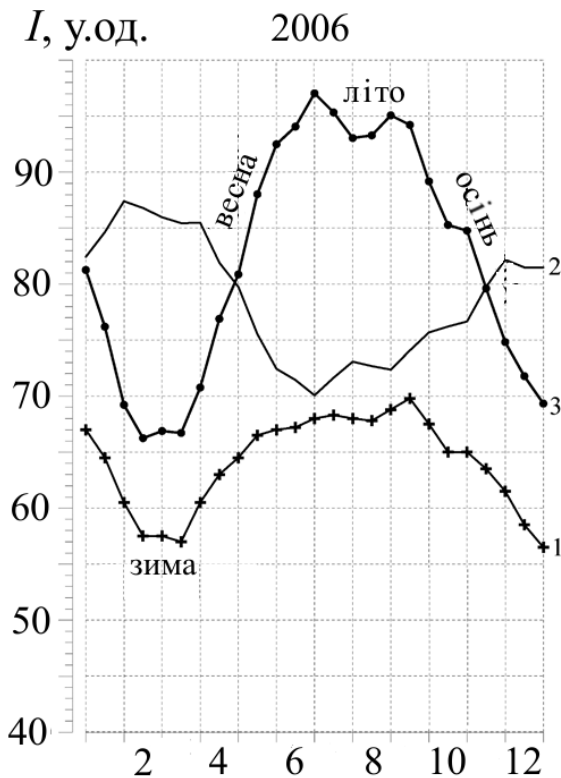
Рисунок 2- Карта розміщення ННЧ і ВЧ вимірювальних установок

В підрозділі 2.1 представлені вимірювальні системи РІ НАНУ, які розміщені в полярних широтах. Значна частина оригінальних результатів роботи була отримана на основі аналізу даних, зареєстрованих на Українській антарктичній станції (УАС), яка є однією з найстаріших електромагнітних обсерваторій в Антарктиці. Висока якість даних УАС обумовлена рядом причин: віддаленістю від техногенних та природних джерел випромінювання, що забезпечує рекордно низький рівень активних завад; вдале розташування станції щодо центрів світової грозової

активності, що спрощує їх селекцію; магнітна спряженість зі східним узбережжям США; наявність на станції магнітної обсерваторії (AIA), іонозонда, спектрофотометра Добсона, ГНСС приймача та інших пристроїв. Безперервні ряди даних цих спостережень є одними з найдовших в Антарктиці. В підрозділі 2.2 описані УНЧ-ННЧ та ВЧ приймальні комплекси, що їх було впроваджено на УАС, в Україні, у Північній Скандинавії, на арх. Шпіцберген та у Східному Сибіру. В підрозділі 2.2 представлено склад та принципи роботи "Комплексу електромагнітного зондування навколишнього середовища", що розташований на Низькочастотній обсерваторії РІ НАНУ. До його складу входять: індукційний магнітометр УНЧ-ННЧ діапазону, автоматична метеомагнітна станція Lemi-017m для вимірювання варіацій магнітного поля і атмосферного тиску, двочастотний ГНСС приймач для відтворення повного електронного вмісту іоносфери, когерентний приймальний ВЧ комплекс на базі цифрового приймача WinRadio

G313i, мюонний монітор, цифрова метеорологічна станція і сонячний фотометр CIMEL CE318N системи AERONET. Підрозділ 2.3 присвячено принципам побудови мережі багатопозиційної доплерівської діагностики іоносфери у ВЧ діапазоні з інтернет-керуванням, трансляцією, автоматичною обробкою і візуалізацією даних спостережень. На сьогодні створена мережа з дев'яти просторово-рознесених приймальних ВЧ комплексів на базі уніфікованих цифрових приймальних модулів, розташованих в високих, середніх і низьких широтах, чотири з яких працюють в режимі дистанційного інтернет-керування. Працездатність мережі комплексів продемонстрована на результатах декількох експериментальних кампаній, спрямованих на реалізацію задач дисертації. В підрозділі 2.4 надано опис оригінальної спектрально-поляризаційної методики обробки і візуалізації даних УНЧ-ННЧ спостережень. Методика впроваджена в якості базової на всі приймальні пункти мережі УНЧ-ННЧ установок РІ НАНУ і використовується для отримання інформації про стан шуманівського і іоносферного альфвенівського резонаторів, а також джерел їх збудження. Тривалість стандартного одиночного запису становить одну добу. Добові реалізації розбиваються на 144 десятихвилинні інтервали, для кожного з яких обчислюються усереднені енергетичні S_{xx} , S_{yy} , і взаємні S_{xy} спектри, з частотною роздільною здатністю 1, 0,1 та 0,01 Гц (остання величина розраховується лише в Антарктиді для моніторингу випромінювання силових мереж Північноамериканського континенту). Для розрахунку поляризаційних параметрів розраховуються у якості допоміжних величин параметри Стокса: $I(f) \equiv S_{xx}(f) + S_{yy}(f)$, $Q(f) \equiv S_{xx}(f) - S_{yy}(f)$, $U(f) \equiv 2 \operatorname{Re} S_{xy}(f)$, $V(f) \equiv 2 \operatorname{Im} S_{xy}(f)$. Потім обчислюються поляризаційні параметри поля: r - коефіцієнт еліптичності; Ψ - позиційний кут еліпса поляризації (орієнтація - велика піввісь еліпса, відраховується від напрямку на північ за годинниковою стрілкою); I_p - інтенсивність поляризованої компоненти випромінювання; P - ступінь поляризації. Крім того, при аналізі параметрів ІАР за допомогою оригінального програмного забезпечення для кожного десятихвилинного інтервалу оцінюються: вірогідність збудження ІАР, частотний хід резонансних ліній в каналах "південь-північ" і "захід-схід", середня різниця резонансних частот – dF . Для вивчення загальних закономірностей поведінки світових грозових центрів, їх сезонних і триваліших варіацій використовуються характеристики резонансних полів на добових інтервалах, усереднених за місяць. При усередненні виключаються з розгляду фрагменти реєстрацій з сильними завадами. Всі спектри, для яких значення потужності в обраній частотній смузі перевищують заданий поріг, вважаються зіпсованими і виключаються з подальшого аналізу. Таким чином, для кожного пункту спостереження формується база даних спектральних і поляризаційних параметрів ШР і ІАР, які зберігаються на файл-сервері відділу радіофізики геокосмосу РІ НАНУ. Наявні спостереження використовувалися для отримання результатів, описаних в наступних розділах. Доступ до спектральних характеристик ШР і ІАР реалізовано у реальному часі в мережі Інтернет за посиланням: <http://geospace.com.ua/data.html>.

Розділ 3 “Варіації параметрів шуманівських резонансів” присвячено дослідженню властивостей природних ННЧ шумів в діапазоні частот шуманівського резонансу.



Рисунком 3 - Сезонні зміни повної інтенсивності першого моду ШР: крива 1 - дані спостережень на УАС; крива 2 - розрахункові варіації за даними про зміну дистанції; крива 3 - оцінка інтенсивності глобальної грозової активності за даними УАС)

Мм (більш 20°). Дистанційні варіації для компоненти захід-схід, яка здебільшого формується американським і азіатським центрами, менш виражені і складають близько 1,5 Мм (або 13°). Рис. 3 демонструє сезонні варіації інтенсивності першого моду ШР. Інтенсивність резонансних сигналів (крива 1) має максимум в літні місяці (для північної півкулі) і мінімум взимку. Якщо не враховувати змін відстаней до джерела випромінювання, модельна сезонна поведінка інтенсивності (крива 2) протирічить даним спостережень, демонструючи мінімум в літні місяці. Протиріччя знімається шляхом введення джерела змінної інтенсивності. Крива 3 зображує величину світової грозової активності. З рисунка видно, що інтенсивність світових гроз змінюється протягом року в 1,5 рази. Це добре узгоджується з даними, отриманими на інших ШР обсерваторіях. Тривалість "електромагнітного літа" становить близько 120 днів, в той час як "зима" продовжується близько 60 днів. Весняний період приблизно в два рази менше, ніж

В підрозділі 3.1 аналізуються і інтерпретуються добово-сезонні залежності інтенсивності та пікових частот ШР. Для пояснення їх поведінки використано модель одного точкового джерела, що розроблена професором О.П. Ніколаєнком. На першому етапі розраховувалися спектри потужності горизонтального магнітного поля в залежності від дистанції. Потім підбиралися такі параметри джерела і характеристики нижньої іоносфери, які забезпечують сезонні зміни спектральної інтенсивності та пікових частот, подібних спостережуваним. При виконанні розрахунків передбачалося, що порожнина Земля-іоносфера є однорідною по кутових координатах, а іоносферна плазма ізотропною. Висотний профіль провідності нижньої іоносфери задавався моделлю "коліна". Для аналізу були використані дані 2006 року для середнього рівня сонячної активності в 11-ти річному циклі. Варіації частоти виникають через наявність сезонного дрейфу грозового центру. Сезонний дрейф на північ чітко простежується в літні для північної півкулі місяці. Відстань від спостерігача в Антарктиці до африканського центру грозової активності оцінюється як 14 Мм. Річний дрейф цього джерела сягає 2,4

восени. В підрозділі 3.2 введена модель трьох екваторіальних джерел в гіротропній порожнині Земля-іоносфера. Модель була розроблена В.Г. Безродним і націлена на розв'язання прямої та зворотної задач поляризаційної діагностики полів шуманівських резонансів. На основі розроблених модельних алгоритмів були досліджені добові та сезонні варіації поляризаційних характеристик ННЧ полів. Вперше виявлено та проаналізовано особливості поведінки ступеня поляризації, коефіцієнта еліптичності і позиційного кута еліпса поляризації резонансних полів, фізична природа яких пояснена з залученням уявлень про гіротропію ШР. Побудовані усереднені добові залежності поляризаційних характеристик резонансних полів, які відповідають чотирьом основним періодам річного сонячного циклу в південній півкулі. На підставі зіставлення експериментальних оцінок величин "уявних" довготних зсувів джерел і їх гарної відповідності теоретичним розрахункам підтверджена адекватність розробленої моделі резонансної порожнини з урахуванням гіротропії.

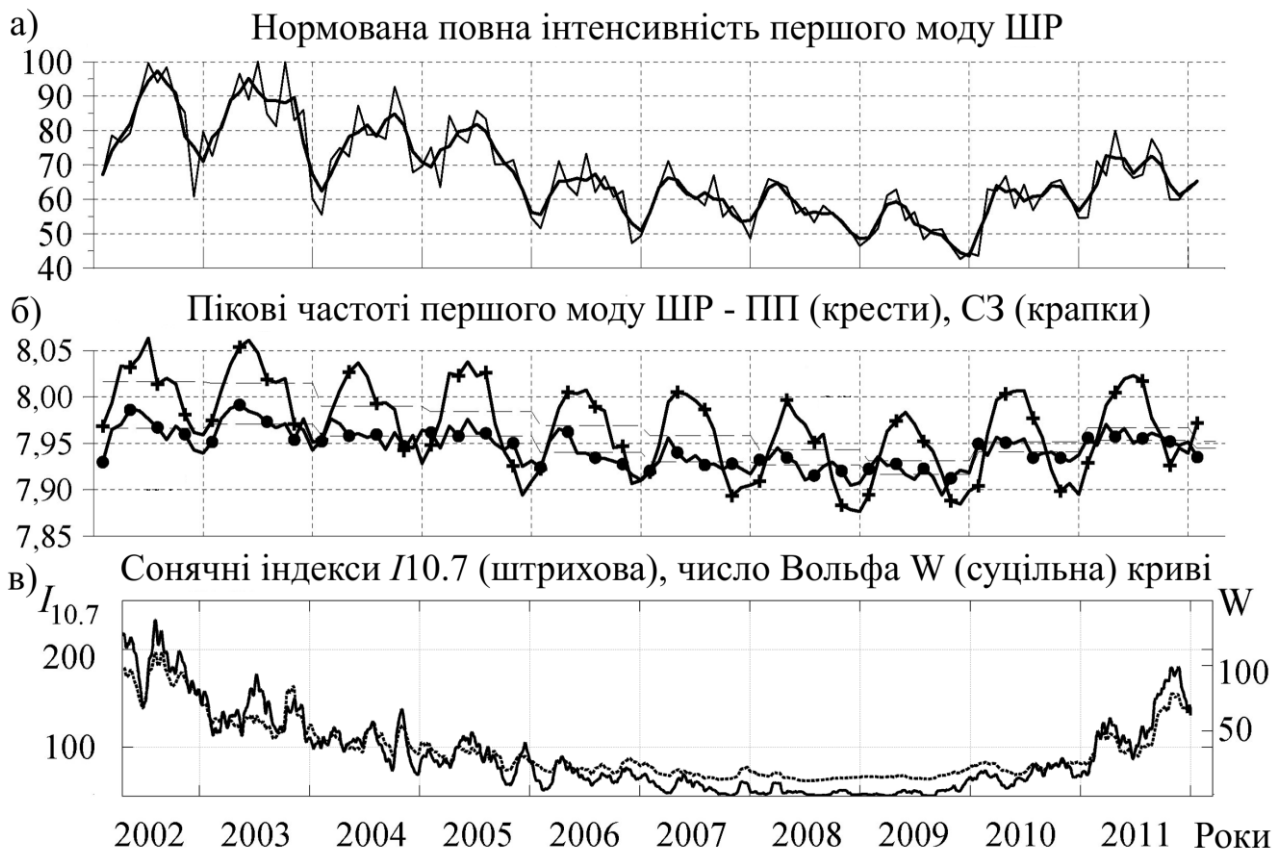


Рисунок 4 - Варіації за час сонячного циклу: а) нормованої інтенсивності повної горизонтальної компоненти магнітного поля для першого моду ШР за даними УАС; б) пікових частот першого моду ШР для магнітних компонент ПП (хрести) і ЗС (крапки) за даними УАС; в) сонячних індексів $I_{10.7}$ (штрихова) і числа Вольфа W (суцільна) криві

Застосування цієї моделі дозволило пояснити деякі важливі особливості варіацій поляризаційних характеристик ШР, отримані в експерименті (позитивний знак коефіцієнта еліптичності та його наближення до одиниці у час між кульмінаціями джерел, тощо). Це підтверджує необхідність врахування гіротропії резонансної порожнини. В підрозділі 3.3 експериментально досліджено поведінку параметрів ШР протягом повного 11-ти річного циклу сонячної активності. Її аналіз показав, що сезонні закономірності для різних років досить добре збігаються, вказуючи, тим самим, на високу повторюваність середньосезонних умов. В ході довготривалих безперервних вимірювань також проаналізовано поведінку активностей світових грозових центрів. Вперше оцінено часи кульмінації світових грозових центрів і величини їх сезонних просторових дрейфів. Виявлена стабільність сезонних міграцій джерел гроз незалежно від фази сонячного циклу. Вперше виконані безперервні вимірювання багаторічного ходу інтенсивності 1-го максимуму ШР і продемонстрована його синфазність з активністю Сонця в 11-ти річному циклі (Рис. 4). В підрозділі 3.4 розглянуто можливі механізми довгострокових варіацій пікових частот і інтенсивностей, а також розроблені феноменологічні моделі, які пояснюють виявлені в експерименті зміни параметрів ШР. Найбільш ймовірна причина змін частот і інтенсивностей ШР пов'язана з іонізацією іоносфери поблизу її нижньої електричної характеристичної висоти. Як відомо, іонізація на цій висоті підтримується переважно за рахунок галактичних космічних променів. При збільшенні активності середня швидкість сонячного вітру також збільшується, і він "відхиляє" галактичне випромінювання у міжпланетному просторі (Форбуш – ефект). Таким чином, активне Сонце сприяє зменшенню іонізації в нижній іоносфері в діапазоні висот, важливого для формування ШР. Багаторічні спостереження на УАС надають можливість для уточнення механізмів, що приводять до довгострокових змін інтенсивності і пікових частот резонатора. Для інтерпретації їх поведінки використана модель ізотропного резонатора Земля – іоносфера. При моделюванні характеристик ШР джерела випромінювання задавалися реалістичним розподілом інтенсивності світових гроз, отриманим космічною обсерваторією OTD. У результаті визначено три незалежні оцінки висоти "коліна", які відповідають різним значенням іоносферної границі резонатора. Величини, що були отримані по піковим частотам різних компонент, добре співпадають, відхилення від середньої "висоти" коліна не перевищує 1%. У той же час варіації, оцінені за інтенсивністю, знаходяться за межами реалістичних змін. Це протиріччя може бути усунене, якщо припустити, що зменшення інтенсивності ШР пов'язано як зі зменшенням висоти коліна на 1 км (що відповідає розрахункам за варіаціями пікових частот), так і з падінням інтенсивності світових гроз в мінімумі сонячного циклу. Можна припустити, що змінна складова сонячного випромінювання здатна привести до варіації температури поверхні планети. Згідно з розрахунками, така варіація повинна сягати всього $\sim 0,3^{\circ}\text{C}$. Дана тенденція не має зв'язку з глобальним потеплінням або похолоданням, і являє собою регулярні глобальні зміни температури ґрунту в тропіках, пов'язані з 11-річним циклом сонячної активності, які ще потребують експериментального підтвердження. Іншою можливою причиною значних змін інтенсивності ШР, отриманих за даними вимірювань на

УАС, можуть бути локальні варіації характеристичних висот, пов'язані з висипаннями заряджених частинок в авроральній області. В підрозділі 3.4 викладена методика локації надпотужних блискавичних розрядів за даними магнітометричних ННЧ спостережень.

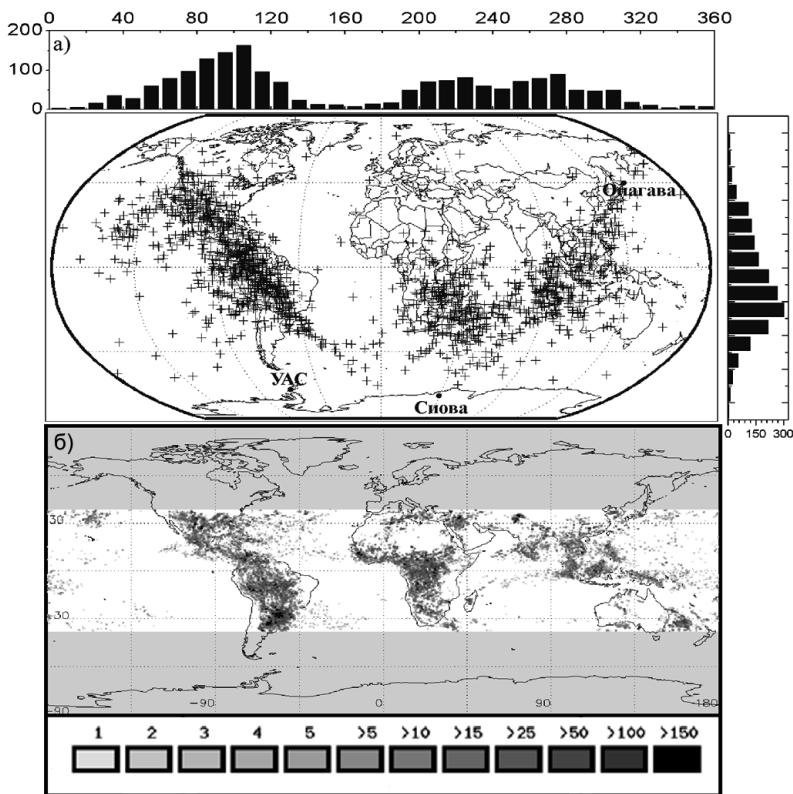


Рисунок 5 - Просторові розподіли блискавичних розрядів: а) за даними ННЧ спостережень 27-30 жовтня 2002; б) супутникові спостереження в оптичному діапазоні, жовтень 2002, LIS (Lightning Imaging Sensor)

горизонтальної компоненти магнітного поля перевищувала заданий пороговий рівень, а самі сплески в різних пунктах були рознесені в часі не більше ніж на 0,08 сек. (час поширення ННЧ сигналу між найбільш віддаленими пунктами спостереження). Для визначення координат джерела сплеску розраховувався пеленг на джерело. Вважалося, що він відповідає нормалі до еліпса поляризації сигналу з урахуванням поправки, обумовленої гіротропією резонатора Земля-іоносфера. З її урахуванням істинний пеленг джерела α_j може бути визначений на

підставі формули: $\alpha_j(f) = \Psi_j(f) \pm \frac{\pi}{2} + r_j(f)$, де $\Psi_j(f)$ - позиційний кут еліпса поляризації, а $r_j(f)$ - коефіцієнт еліптичності i -го джерела. Для кожного пункту спостережень відновлювалися дуги великого кола, що відповідають напрямкам на джерело. Через наявність фонових шумів лінії пеленга на джерело, як правило, не перетинаються в одній точці. Тому оцінювалося найбільш вірогідне положення джерела у трикутнику їх перетину. В силу властивостей сферичної геометрії, кожному положенню джерела відповідає його симетричний антипод. Вибір справжнього положення з пари джерело-антипод проводився виходячи з різниці

Для ідентифікації положень джерел використовувались поляризаційні характеристики і часи приходу ННЧ сплесків, виміряні в трьох просторово-рознесених пунктах. Основний масив даних був накопичений на Українській антарктичній станції "Академік Вернадський". В роботі також використані синхронні реєстрації на японській станції "Сіова" в Антарктиці і на обсерваторії Онагава (Японія), люб'язно надані автору японськими колегами. Для синхронної обробки були обрані дані спостережень з 27 по 30 жовтня 2002 р. З усієї сукупності даних було відібрано такі, для яких повна амплітуда гори-

часів приходу переднього фронту імпульсу в приймальні пункти. На рис. 5 показані відтворені положення джерел сплесків та відповідні їм гістограми розподілу числа джерел за широтою та довготою. Видно, що джерела групуються поблизу основних світових грозових центрів. Для дослідженого інтервалу найбільш активним виявився Американський центр (50,4% від усіх сплесків), за ним слідує Африканський – 26,6%, і Азіатський - 23%. Оскільки спостереження здійснювалися при переході від літніх до зимових для північної півкулі умов, спостерігалось широтне зміщення центрів максимальної активності в південну півкулю. Як видно з рис. 5, максимальне число розрядів реєструвалося для діапазону широт 20° - 30° Півд.ш., а широтний пояс, на який припадає основна кількість джерел, відповідає діапазону (-50° + 40°) від екватора. Аналіз просторово-часових розподілів джерел показав, що положення областей переважної локалізації сплесків змінюються відповідно до змін активностей світових грозових центрів. Так, кількість розрядів максимальна в Азіатському регіоні з 6 UT до 12 UT, в Африканському з 12 UT до 18 UT і в Американському з 18 UT до 24 UT. Серед інших особливостей розташування джерел сплесків можна відзначити широтне зміщення активних зон в Азіатському і Африканському регіонах на південь від екватора. У той же час для Американського регіону, при деяких перевагах Південної Америки, активна область спостерігається і в Північній Америці.

Розділ 4 “Іоносферний альфвенівський резонатор” присвячений результатам досліджень цієї резонансної системи впродовж повного 11-ти річного циклу сонячної активності, отриманих за допомогою мережі УНЧ-ННЧ комплексів, розташованих в обох півкулях планети. В підрозділі 4.1 представлена теоретична модель поширення магнітогідродинамічних хвиль в іоносфері і магнітосфері, що дозволяє оцінювати параметри зв'язаних резонансних систем - ІАР та МР. Власними хвилями обох резонаторів є магнітогідродинамічні (МГД) коливання в УНЧ-ННЧ діапазонах. Границями ІАР є області іоносфери, в яких формуються різкі градієнти альфвенівської швидкості МГД хвиль. Вони розташовані в нижній іоносфері (Е-шар) і в зовнішній іоносфері на висотах 1000-2000 км. Власні моди МР формуються альфвенівськими хвилями і швидким магнітним звуком (ШМЗ), які поширюються уздовж силових ліній магнітного поля Землі (МПЗ). Об'ємна резонаторна система МР (cavity resonance) обмежена всією порожниною внутрішньої магнітосфери. Структура МР формується при відбитті МГД хвиль від іоносферних границь в магнітосполучених областях Південної і Північної півкуль. Обидва резонатора, ІАР та МР, структурно поєднані спільними границями, розташованими на висотах іоносферного "динамо струму". В цих областях МГД хвилі обох резонансних систем перетворюються на електромагнітні, які спостерігаються наземними магнітометрами у вигляді коливань на частотах від десятків мілігерц до десятків герц. Представлена у підрозділі модель, яка розроблена у співавторстві з В.Г. Синициним, описує ІАР та МР як зв'язану систему. Для аналізу спектру власних коливань використано напіваналітичний підхід, при якому профіль коефіцієнта заломлення хвиль апроксимується функціями, які допускають замкнуте рішення хвильового

рівняння. Отримана в результаті система розпадається на два незалежних рівняння для альфвенівської та ШМЗ хвиль. Ці рівняння проаналізовані чисельно. За їх допомогою розраховані власні частоти обох резонансних систем для двох "базових" (денної та нічної) моделей іоносфери, в яких за літературними даними використані табличні профілі електронної концентрації, маси іонів і частот зіткнень, а також частково наведені реалістичні дані, отримані шляхом іоносферного зондування. Результати оцінок зіставлені з даними спостережень ІАР, отриманих на УАС при різних рівнях геомагнітної активності. Показано, що модель дозволяє якісно пояснити всі особливості поведінки спектрів ІАР, які виявлені в експерименті. В підрозділі 4.2 вивчені характерні особливості поведінки ІАР на добовому, сезонному і міжрічному інтервалах, а також досліджено поведінку резонансів в залежності від сонячної і геомагнітної активності. Основна база даних безперервних спостережень накопичена на УАС. Іншими пунктами спостережень є Низькочастотна обсерваторія (НЧО) РІ НАНУ (Україна) і Саянська сонячна обсерваторія (ССО, Росія). В середніх широтах резонансна структура спектра (РСС) ІАР спостерігається переважно в зимовий час і в перехідні за освітленням періоди (ранкові та вечірні години) та зникає вдень. В Антарктиці відзначені випадки підвищеної стабільності явища, коли лінії ІАР реєструвалися безперервно протягом кількох діб. На міжрічних інтервалах часу ІАР демонструють чіткий антикореляційний зв'язок з геомагнітною активністю. Коефіцієнт кореляції між середньорічними значеннями К-індексів і ймовірністю реєстрації ІАР на УАС за період з 2002 р. по 2013 р. (повний сонячний цикл) становить -0,87. Співставлення ймовірності реєстрації ІАР з величиною потоку рентгенівського випромінювання і числами Вольфа впродовж сонячного циклу також дає явну зворотну залежність. Значення коефіцієнтів кореляції становлять -0,90 і -0,85 відповідно. Ймовірність реєстрації резонансів істотно залежить від критичної частоти F2 шару іоносфери - f_0F_2 . Ця залежність проявляється на будь-якому часовому інтервалі: добовому, сезонному, міжрічному. Коефіцієнти кореляції становлять -0,63, -0,81 і -0,81, відповідно. Наявність такої залежності дала можливість розробити оригінальний метод діагностики f_0F_2 за даними спостережень ІАР, який представлено у підрозділі 4.5. Підрозділ 4.3 містить аналіз залежності властивостей ІАР від географічного положення пунктів спостережень. В ньому зокрема експериментально досліджено невідомий раніше ефект "високодобротного" ІАР, коли резонансні спектральні лінії високого порядку реєструвалися в широкому діапазоні аж до частот п'ятого моду ШР (близько 32 Гц). Аналіз безперервних синхронних записів ІАР, виконаних впродовж року на УАС, НЧО та ССО, показав, що частота появи таких подій різна для усіх пунктів спостережень. Навіть на НЧО і ССО, незважаючи на подібну сезонну поведінку, "високодобротні" РСС синхронно спостерігаються менш ніж в 20% випадків. Таким чином, отримано кількісне підтвердження того, що характеристики ІАР залежать, в більшій мірі, не від глобальних іоносферних умов, а від локального стану іоносфери над пунктом спостереження.

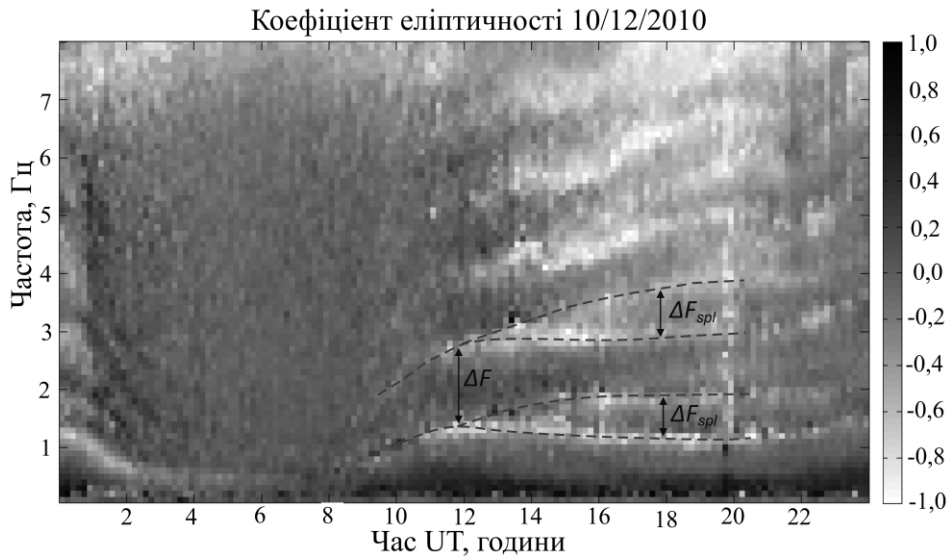


Рисунок 6 – Розщеплення ліній ІАР в коефіцієнті еліптичності. Дані ССО для 10/12/2010

В підрозділі 4.4 представлено новий ефект "розщеплення" нижчих мод ІАР, який вперше зареєстровано на УАС та ССО. Найбільш контрастно він проявляється в залежностях для коефіцієнта еліптичності від частоти та часу (див. Рис. 6). Ефект чітко простежується для 3-х перших мод ІАР, причому зі збільшенням номера резонансного моду ІАР момент виникнення розщеплення незначно зсувається в нічні години. Обидва "сателіта" і нерозщеплені ділянки ліній ІАР мають практично кругову поляризацію з напрямком обертання за годинниковою стрілкою. Аналіз спостережень в обох пунктах показав, що добові, сезонні та міжрічні залежності появи ефекту розщеплення відповідають аналогічним кривим ймовірності реєстрації ІАР, однак для розщеплення вони виражені більш чітко. В роботі виконана класифікація фаз розщеплення: розвиток, стаціонарна ділянка і релаксація, а також розглянуті можливі механізми появи ефекту. Ними можуть бути: виникнення резонансів одночасно для альфвенівської і магнітозвукової мод, або "просочування" резонансних полів з магнітосполученої області. В підрозділі 4.5 досліджено зв'язок характеристик ІАР з критичною частотою іоносферного шару F2, що оцінювалась безпосередньо за даними іоносферного зондування. В рамках спрощеної феноменологічної моделі розроблена оригінальна методика оцінки критичної частоти іоносферного шару F2 за величиною середньої різниці частот між сусідніми резонансними модами dF . Згідно з введеною моделлю ІАР dF визначається як: $dF = c/(2n_A L)$, де c – швидкість світла; L - лінійний розмір резонатора; n_A - показник заломлення альфвенівської моди. Останні два параметри вважаються незмінними. При розрахунках враховується, що: $n_A = c\sqrt{4\pi\rho}/B_0 \propto \sqrt{M_{eff} \cdot N_{e\max}}/B_0$, де: B_0 - індукція магнітного поля Землі; ρ і $N_{e\max}$ - щільність плазми і електронна концентрація в максимумі шару F2; M_{eff} - ефективна маса іонів. З огляду на те, що електронна концентрація є квадратичною функцією від плазмової частоти $f_p - N_{e\max} = 0,0124 \cdot f_p^2$, та припускаючи, що плазма

В підрозділі 4.4 представлено новий ефект "розщеплення" нижчих мод ІАР, який вперше зареєстровано на УАС та ССО. Найбільш контрастно він проявляється в залежностях для коефіцієнта еліптичності від частоти та часу (див. Рис. 6). Ефект чітко простежується для 3-х перших мод ІАР,

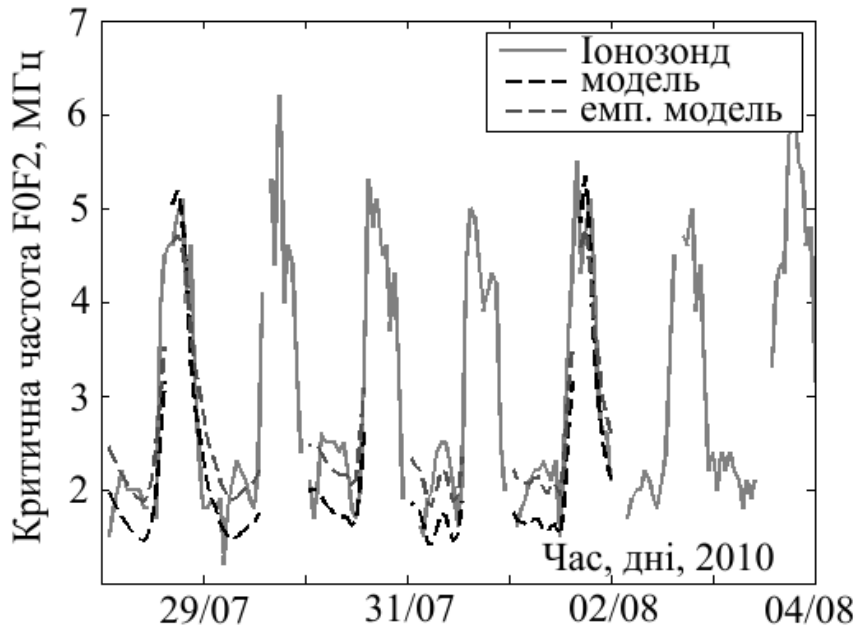


Рисунок 7 - Графіки критичних частот шару F2 за даними іонозонда і відновлені згідно з модельними наближеннями за кілька днів спостережень на УАС

даним спостережень ІАР на УАС. Добрий збіг результатів розрахунків з реальними оцінками критичних частот за даними вертикального зондування іоносфери на УАС (див. Рис. 7) підтверджує правомочність розробленої методики. Аналогічні результати, згідно з (1) та урахуванням локального значення B_0 , були отримані також для Саянської обсерваторії. Середньоквадратичні відхилення різниці модельних та експериментальних величин f_0F_2 не перевищують сотні кілогерц, що підтверджує придатність розробленої методики щодо будь-якого пункту спостережень. Для покращення точності розрахунків критичної частоти також була використана емпірична модель, в якій експериментальна залежність від dF представлялася у вигляді полінома п'ятого ступеня (штрихова чорна крива на рис. 7). Застосування апроксимуючої кривої покращує відповідність оцінок f_0F_2 , проте не дозволяє застосовувати методику для довільного пункту.

Розділ 5 “Глобальні електромагнітні резонатори, як індикатори природних і техногенних процесів” демонструє результати практичної реалізації запропонованого підходу використання природних резонаторів в якості “індикаторів” геокосмічних процесів. В підрозділі 5.1 детально проаналізовані ефекти впливу геокосмічної бурі жовтня-листопада 2003 року (подія “Хеллоуїн”) на параметри електромагнітних резонаторів. Дана буря є однією з найпотужніших за всю новітню історію спостережень. Так, потік рентгенівського випромінювання в діапазоні 0,1-0,8 нм збільшився більш ніж на два порядки на інтервалі близько двох тижнів з 18 жовтня по 4 листопада, що є безпрецедентним збільшенням за весь час існування супутників GOES. Потік сонячних протонів з енергіями

є однокомпонентною, отримано формулу для розрахунку критичної частоти f_0F_2 :

$$f_0F_2 = \alpha / dF. \quad (1)$$

Зазначимо, що коефіцієнт пропорційності $\alpha \sim B_0$ залежить від величини індукції магнітного поля Землі. Для його визначення була знайдена експериментальна залежність критичної частоти від dF на УАС. Модельна залежність (1) була відтворена при розрахунках f_0F_2 по

> 10 MeV збільшився більш ніж на чотири порядки з 10^{-1} до 10^3 протонів / ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{рад}^{-1}$) з максимальним значенням 29 жовтня. Подія "Хеллоуїн" для розглянутих діапазонів частот являє собою скорочену в часі і збільшену по амплітуді копію 11-ти річної варіації. На рисунку 8 показані варіації пікових частот двох ортогональних горизонтальних компонент варіацій магнітного поля для першого моду ШР на УАС.

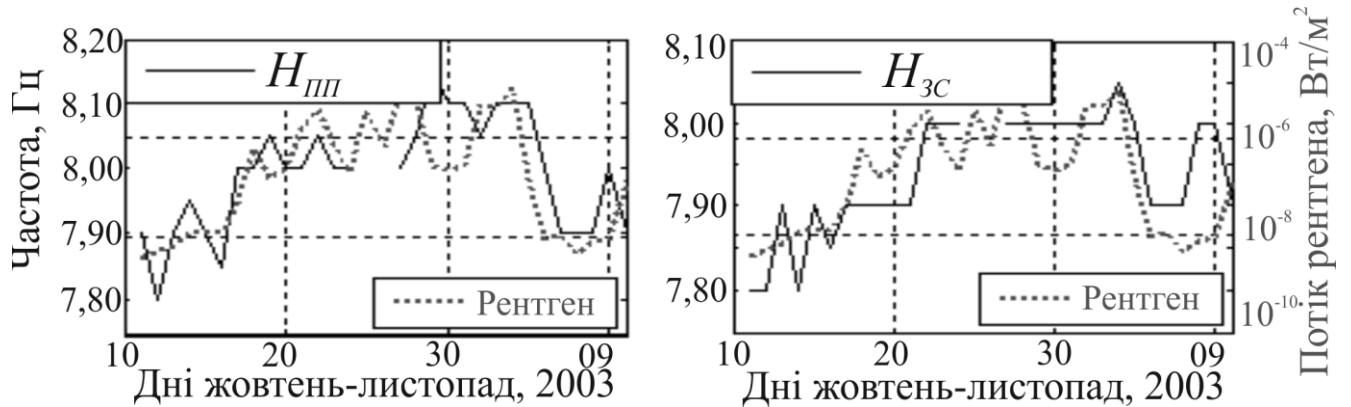


Рисунок 8 - Середньодобові значення пікових частот максимумів ШР (суцільна крива) спільно з потоком рентгенівського випромінювання 0,1-0,8 нм (пунктирна лінія) в період з 10 жовтня по 10 листопада 2003, для УАС

Видно, що пікові частоти обох компонент добре узгоджуються між собою і відповідають змінам рентгенівського потоку від Сонця. Аналогічні результати отримані на шуманівських обсерваторіях Mitzpe Ramon (Ізраїль), Parkfield (Каліфорнія) та Nagycenk (Угорщина). Синхронний характер змін пікових частот для значно рознесених пунктів спостереження, що знаходяться в різних півкулях, підтверджує глобальний характер явища. Відзначимо також, що варіація потоку сонячних протонів під час бурі має іншу динаміку, що дозволяє вважати рентгенівську активацію головною причиною варіацій частот ШР. Зміни ширини спектра шуманівських максимумів, які обернено пропорційні добротності Q , доступні для обсерваторій УАС і Parkfield. Видно, що їх поведінка якісно узгоджується як для обох магнітних компонент, так і для двох пунктів спостереження, рознесених на ~ 12 Мм. Спостерігається збільшення ширини спектра (зменшення добротності), яке збігається з максимумом потоку протонів, зареєстрованого 29 жовтня. В цей же час має місце мінімум інтенсивності першого моду ШР як для електричної компоненти поля, за даними обсерваторії Nagycenk, так і горизонтального магнітного поля на УАС. Аналіз поведінки коефіцієнта еліптичності виявив ефект зменшення його середньодобової величини під час зростання потоку сонячного рентгенівського випромінювання. Під час протонного спалаху коефіцієнт еліптичності залишався на незбуреному рівні, не дивлячись на збільшений потік рентгенівського випромінювання. Можна припустити, що під час рентгенівської події коефіцієнт еліптичності зменшується за рахунок збільшення провідності в області магнітної характеристичної висоти, а протонний спалах компенсує це зниженням характеристичної висоти і зростанням

втратах в резонаторі. Таким чином, виконаний в підрозділі аналіз показує, що пікові частоти, ширини спектрів, інтенсивності і коефіцієнти еліптичності сигналів ШР досить сильно змінюються під час екстремальних сонячних збурень. Аналізуючи характер змін параметрів ШР, можна оцінити тип збурень і визначити переважний частотний діапазон (протонний або рентгенівський спалахи). Беручи до уваги, що надпотужні геокосмічні бурі, подібні "події Хеллоуїн", трапляються вкрай рідко, в підрозділі 5.2 систематично розглянуті реакції ШР на менш потужні протонні і рентгенівські сонячні спалахи. Досліджено характеристики ННЧ сигналів, зареєстрованих на УАС, які відповідають потужним сонячним збуренням, що відбулися з березня 2002 по березень 2012 року. Для проведення аналізу відібрано протонні спалахи з енергіями більше 10^3 протонів/(см² с⁻¹ рад⁻¹) і рентгенівські спалахи X класу і вище. Всього розглянуто 8 протонних подій і 79 рентгенівських сплесків. Результати аналізу довели, що реакція параметрів ШР на протонні спалахи не є однозначною і повинна досліджуватися індивідуально для кожного протонного випадку. У той же час при аналізі рентгенівських спалахів явна реакція на рентгенівську активацію виявлена у 29 випадках (36,8% від усіх спалахів). Вона проявлялася виключно у збільшенні пікових частот. Для решти 50 рентгенівських подій також спостерігалися лише позитивні варіації частоти, проте їх величина не перевищувала стандарт флуктуацій пікових частот за добу. Наявність реакції на рентгенівську подію залежала від потужності спалаху. При підвищенні класу рентгенівського спалаху відносна частка подій, для яких відзначалися збільшення пікових частот, зростала. Так, в виділений інтервал часу відбулося 39 подій класу вище X2 і для 19 з них (48,7%) спостерігалася реакція. Для подій класу X3 і вище ці величини були 23 і 16 (69,6%), відповідно. Таким чином, результати спостережень вказують на те, що рентгенівські події завжди призводять до збільшення пікових частот, що найімовірніше пов'язано зі зниженням висоти верхнього характеристичного шару іоносфери і збільшенням провідності цієї області. Шуманівський резонатор відгукується не тільки на космічні, а й на потужні наземні збурення, наприклад, землетруси. Для ілюстрації в підрозділі 5.3 продемонстрована реакція ШР на потужний землетрус магнітудою у 7,1 бали за шкалою Ріхтера, який відбувся поблизу Антарктичного півострова. Показано, що в діапазоні шуманівських і іоносферних альфвенівських резонансів в процесі підготовки і під час землетрусу реєструвалися зміни спектральних і поляризаційних параметрів сигналів, які можуть використовуватися в якості індикаторів сейсмічних подій. У поляризаційних параметрах напередодні землетрусу чітко спостерігалися зростання шумів в низькочастотній області. Слід зауважити, що геомагнітна обстановка була спокійною. Ймовірно, що цей ефект пов'язано з підготовкою землетрусу. Під час землетрусу зареєстровано аномальну поведінку спектральних характеристик резонатора. Різко зменшилася пікова частота і сильно зросла інтенсивність максимуму першого резонансного моду. Можливою причиною такої реакції є додаткова іонізація в нижній іоносфері. В підрозділі 5.4 проаналізовані результати безперервного річного моніторингу випромінювання енергосистем північноамериканського континенту на частоті 60 Гц, які вперше зареєстровані на Українській антарктичній станції "Академік Вернадський". Аналіз спектрограм сигналу показав, що лінія 60 Гц реєструвалася

цілодобово і перевищувала шумовий фон на 2-5 дБ. Максимальний рівень сигналу спостерігався в каналі "захід-схід". Ширина спектральної лінії за рівнем половинної потужності не перевищувала однієї десятої герца. Середнє за рік значення позиційного кута дорівнювало $70,1^\circ \pm 11^\circ$, відповідно азимут на джерело

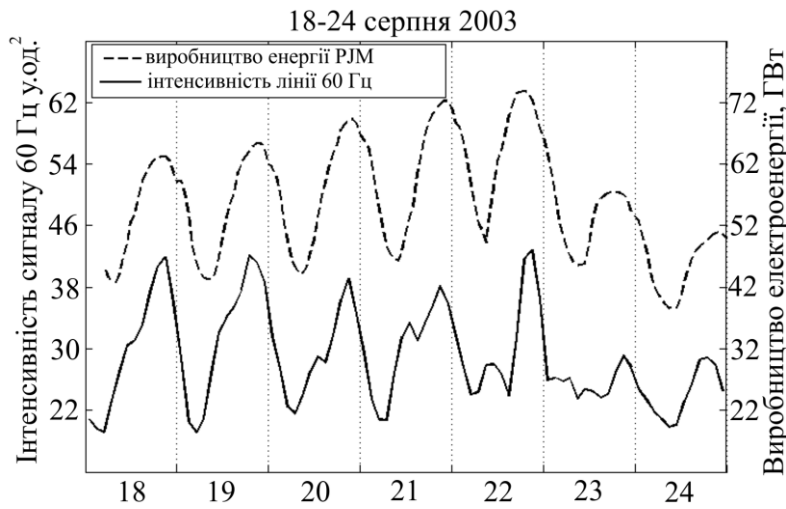


Рисунок 9 - Хід інтенсивності лінії 60 Гц за даними спостережень на УАС (суцільна крива) спільно з залежністю виробництва електроенергії енергосистемою PJM (штрихова крива) для тижневого інтервалу 18-24 серпня 2003

варіювався в межах $19,9^\circ \pm 11^\circ$ протягом всього року. Ця величина відповідає напрямку на східну частину північноамериканського континенту, де розташовано понад 80% потужностей об'єднаної енергосистеми США – Канади. На рисунку 9 інтенсивність лінії 60 Гц (суцільна крива) співставлена з потужністю виробництва електроенергії в об'єднаній енергосистемі Сходу США – Канаді (штрихова крива) на тижневому інтервалі. Обидві залежності демонструють високу подібність. Величина коефіцієнта взаємної кореляції між інтенсивністю лінії і кривою енерговиробництва

дорівнює 0,92, що свідчить про правильність ідентифікації області випромінювання. У встановленій залежності чітко спостерігається зменшення інтенсивності в суботу і неділю в порівнянні з робочими днями тижня, що обумовлено зниженням виробництва і споживання електроенергії ("weekend" ефект). Також за даними УАС були проінспектовані: велика техногенна аварія в енергосистемі США - Канада 14 серпня 2003 р і динаміка її ліквідації. Відключення електромереж почалися близько 18-ї години, аварія тривала майже добу. За даними синхронних спостережень на УАС 14 серпня відбулося різке зменшення інтенсивності випромінювання на частоті 60 Гц. Стандартний добовий хід було відновлено лише у наступну добу 15-го серпня. Таким чином, в даному підрозділі показана можливість використання даних ННЧ моніторингу для контролю електромагнітного "забруднення" Антарктики випромінюванням електромереж з промислово розвинених регіонів земної кулі.

Розділ 6 "Багатопозиційна радіодіагностика низькочастотних процесів в іоносфері" присвячений аналізу взаємодії ВЧ сигналів з областю штучної іоносферної турбулентності (ШТ), яку створює в іоносфері випромінювання спеціальних потужних ВЧ передавачів - нагрівних стендів. Відомі локалізація збуреної області і час її існування дозволяють використовувати ШТ в якості "маркера" для вивчення природних і стимульованих низькочастотних процесів в іоносферній плазмі. До них відносяться: сонячний термінатор, внутрішні хвилі -

АГВ/РІН, магнітогідродинамічні коливання плазми, термосферні вітри, колективні дрейфи плазми в схрещених електричному і магнітному полях. Слід зауважити, що характерний просторовий масштаб цих явищ значно перевищує розмір самого "маркера", який як "ціле" повторює динаміку збурень. До другої групи низькочастотних процесів слід віднести специфічні прояви динаміки плазми в самій "нагрітій" області, які відмінні від фонових властивостей незбуреної іоносфери. Предметом досліджень є різного виду плазмові нестійкості, часи розвитку і релаксації штучної іоносферної турбулентності, стимульовані дрейфи неоднорідностей, прискорення іонно-звукових хвиль, що викликано примусовим нагріванням плазми, тощо. В підрозділі 6.1 вивчено нове явище "розщеплення" доплерівських спектрів сигналів, розсіяних ШТ. Для ототожнення механізму розщеплення було виконано спеціальний експеримент по зондуванню іоносферної турбулентності за допомогою багатопозиційного когерентного ВЧ радара РІ НАНУ. Багатоканальна когерентна приймальна система радара дозволяла здійснювати одночасну реєстрацію пробних імпульсних і квазібезперервних сигналів спеціального передавача. Дані обробки показали, що "двомодовий" спектр реєструвався з дистанцій, для яких інтенсивність ракурсного розсіяння була максимальною. У більшості випадків максимум розсіювання відповідав дистанції безпосередньо над нагрівним стендом. У спектрах сигналів від ближнього і дальнього по відношенню до спостерігача "країв" області був присутній тільки один сателіт з більшим і меншим значенням доплерівського зсуву частоти (ДСЧ), відповідно. Дані чисельного моделювання довели, що така поведінка спектрів відповідає радіальному дрейфу розсіювачів від центру до периферії ШТ, що дозволило вперше ідентифікувати механізм розсіяння. Оцінки, проведені за даними спостережень, дають величину дрейфу порядку 2-4 м/с. Пошук особливих режимів нагріву або іоносферних умов, які б викликали розщеплення спектрів розсіяних сигналів (виконаний для близько 800 сеансів нагріву), не дав позитивних результатів. У той же час розщеплення спектрів реєструвалося більш ніж в 50% відібраних для статистичного аналізу сеансів нагріву. Таким чином, радіальний дрейф неоднорідностей від центру до периферії нагрітої області іоносфери існує в більшості сеансів нагріву і, ймовірно, не вимагає спеціальних умов для свого виникнення. В підрозділі 6.2 розглянуто методики використання даних ракурсного розсіяння ВЧ сигналів для ідентифікації та оцінки параметрів іоносферних неоднорідностей різних масштабів - регулярних дрейфових рухів, рухомих іоносферних неоднорідностей (РІН) і магнітогідродинамічних хвильових процесів. Розроблено та апробовано нові методики діагностики цих процесів, що використовують дані багатопозиційного і багаточастотного прийому ВЧ сигналів, ракурсно розсіяних на природних та штучних іоносферних неоднорідностях. Ці методики дозволили оцінювати швидкості плазмових збурень і варіацій електричних полів на іоносферних висотах, а також ідентифікувати джерела генерації неоднорідностей. В підрозділі 6.3 представлена оригінальна методика картографування іоносферних збурень з використанням даних "густих" регіональних мереж ГНСС приймачів. Її відмінною рисою є використання для іоносферної діагностики даних одного супутника ГНСС. В такій постановці взаємне розташування

підіоносферних точок зберігається при варіюванні висоти ефективного іоносферного екрану (тонкого шару), проте змінюється положення центру картини і її масштаб залежно від зенітного кута супутника. Алгоритм передбачає відмову від моделі тонкого шару і оцінювання повного електронного вмісту (ПЕВ) відтворюється тільки у вертикальному напрямку, завдяки використуванню супутників, що знаходяться поблизу зеніту. В цьому випадку ПЕВ вимірюється безпосередньо над приймачами, а просторова роздільна здатність відповідає відстані між ними. Побудова карт відбувається без усереднення, тому роздільна здатність у часі визначається виключно інтервалом між даними, що накопичуються в приймачах. Залежно від мережі, він варіюється від однієї до тридцяти секунд. Розрахунки були проведені для ряду добових циклів спостереження, виконаних при різних рівнях геомагнітної активності. На рис. 10, у якості прикладу, показана карта варіацій ПЕВ, отримана для 6:17 UT в магнітоспокійний день 28 вересня 2015 ($K_p = 0$). Наведені дані можуть бути

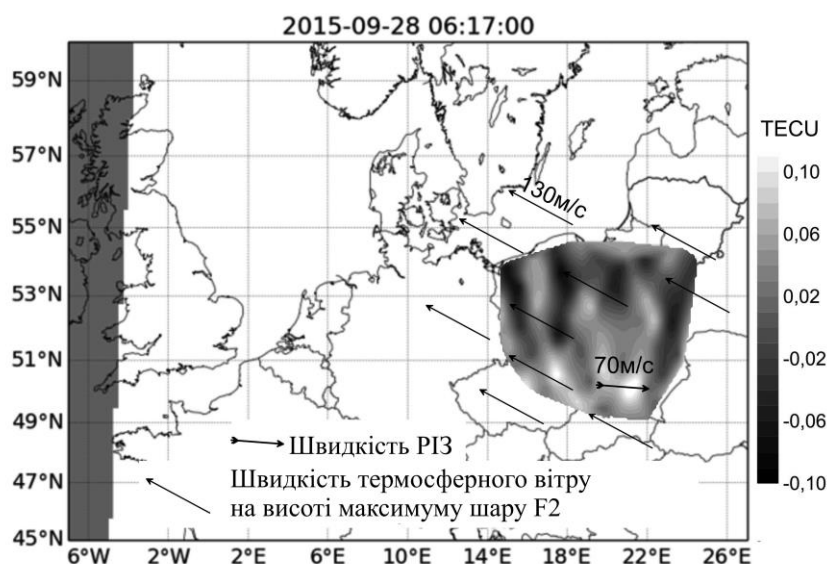


Рисунок 10 - Карта варіацій ПЕВ над Польщею відновлена для 28 вересня 2015 року, 6:17 UT. Стрілками зображені вектори швидкості РІН і термосферного вітру на висоті максимуму шару F2, оціненого відповідно до моделі НWM-07

інтерпретовані як поширення в іоносфері РІН зі швидкістю близько 70 м/с в східному напрямку (вектор швидкості зображений на рисунку стрілкою) протягом більше півгодини із середнім просторовим періодом близько 200 км. Оцінені параметри РІН відповідають іншим теоретичним і експериментальним результатам. Аналіз карт ПЕВ, подібних зображеним на рис. 10, дозволяє висловити кілька гіпотез про природу джерела іоносферного збурення. Перша - це генерація РІН сонячним термінатором. На користь такого припущення свідчить близькість напрямку руху РІН по відношенню до нормалі для ранкового термінатора. Інша гіпотеза пов'язана з можливістю генерації РІН термосферними вітрами. Як видно з рисунку, РІН рухається проти напрямку термосферного вітру. Слід відзначити, що рух хвильових збурень в протилежному напрямку, по відношенню до термосферного вітру, описано в великій кількості експериментальних робіт. Для визначення, який із запропонованих механізмів генерації РІН переважає, необхідне проведення додаткових досліджень та отримання більшого обсягу даних спостережень. У період значних геокоосмічних збурень реєструється інша картина поведінки іоносферних неоднорідностей. Наприклад, під час значної бурі 17 березня 2015

інтерпретовані як поширення в іоносфері РІН зі швидкістю близько 70 м/с в східному напрямку (вектор швидкості зображений на рисунку стрілкою) протягом більше півгодини із середнім просторовим періодом близько 200 км. Оцінені параметри РІН відповідають іншим теоретичним і експериментальним результатам. Аналіз карт ПЕВ, подібних зображеним на рис. 10, дозволяє висловити кілька гіпотез про природу джерела

року (подія “Св. Патрика”, $K_p = 8$) величина варіацій ПЕВ збільшилася майже на порядок, а іоносферні неоднорідності переміщалися з уявною надзвуковою швидкістю близько 1200 м/с. Таким чином, ефект швидше за все пов'язаний з просторово-часовими змінами потоку іонізуючого агента, який створював додаткову, порівняно зі спокійними умовами, концентрацію електронів. В підрозділі 6.3 показана можливість використання ШТ для керованого збудження міжшарового іоносферного хвилеводу між E та F шарами іоносфери. Для цього було ініційовано кілька вимірювальних кампаній з використанням найпотужнішого в світі нагрівного стенду HAARP, розташованого на Алясці. Прийом сигналів проводився на УАС. Крім того, поблизу НС контролювалися параметри стимульованого випромінювання іоносфери (СВІ), а поблизу радіотраси HAARP-УАС працювало декілька іонозондів. Під час першої кампанії проводилося сканування частот НС поблизу четвертої гірогармоніки електронів. Треба зазначити, що форма спектра СВІ залежить від масштабу іоносферних турбулентностей, що генеруються НС. Ширококутний зсунутий вгору максимум (ШЗВМ) характеризує генерацію неоднорідностей сантиметрових масштабів, а зсунутий вниз максимум (ЗВМ) – метрових та

06/06/2014 Нормована потужність ШПІ та ВЧ на УАС

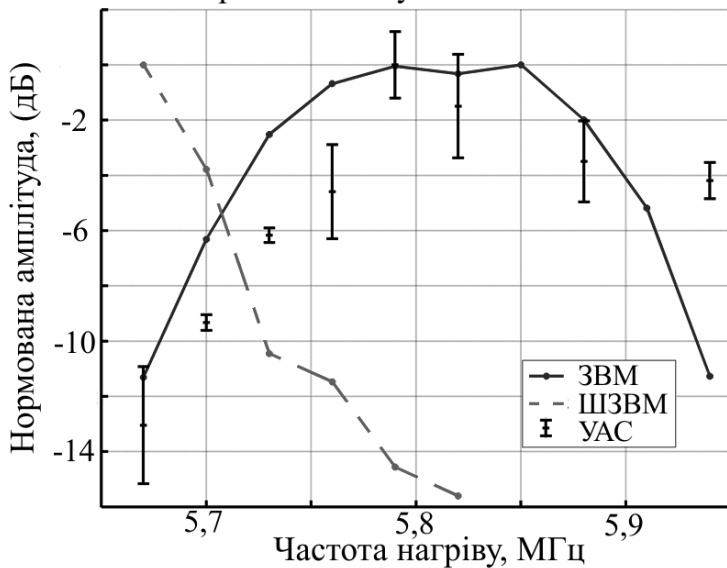


Рисунок 11 - 06/06/2014. Нормовані на максимум амплітуди компонент СВІ поблизу HAARP спільно з відносними амплітудами ВЧ сигналу на частоті НС, які спостерігалися на УАС (довірчі 95% інтервали показані чорними вертикальними відрізками)

передавальний і приймальний пункти. Синхронно було зареєстровано значне збільшення рівня сигналу на УАС, який також з великою ймовірністю поширювався в міжшаровому хвилеводі. Додатковим підтвердженням каналізації пробного сигналу послужило числове моделювання умов поширення на контрольній радіотрасі в моделі IRI, яке показало наявність явно вираженої

декаметрових. З рисунку 11 видно, що з наближенням частоти НС до четвертої гірогармоніки амплітуда ЗВМ підвищувалася, а ШЗВМ знижувалася. Рівень ВЧ сигналу на УАС змінювався синхронно з ЗВМ. Таким чином, коли НС ефективно збуджував декаметрові неоднорідності (збільшення амплітуди ЗВМ), вони розсіювали сигнали НС та "збуджували" хвилеводний канал, що приводило до збільшення інтенсивності сигналу на контрольній наддалекій радіолінії HAARP-УАС. Інший експеримент проводився при проходженні лінії сонячного термінатора одночасно через

долини між областями E та F у всіх контрольних точках вздовж радіолінії HAARP-УАС під час проходження термінатора. Таким чином, шляхом модельних оцінок і зіставлення даних багатопозиційного і багаточастотного прийому сигналів НС підтверджена можливість поширення ВЧ сигналів на глобальні відстані уздовж іоносферного хвилеводу. Поведінка рівня пробного сигналу на наддовгій радіолінії дозволяє відстежувати динаміку штучної іоносферної турбулентності в залежності від близькості частоти нагріву до частоти гірогармоніки електронів.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в дисертаційній роботі отримано такі основні результати:

1. Вперше реалізовано оригінальний підхід щодо використання природних електромагнітних резонаторів Землі в ролі "індикаторів" стану космічної погоди. В рамках цього підходу встановлено реакції шуманівського і іоносферного альфвенівського резонаторів на регулярну і спорадичну активність в повному 11-ти річному сонячному циклі. Розроблено спрощені фізичні моделі, що пояснюють механізми взаємодії радіаційних і корпускулярних потоків сонячної енергії з навколоземною плазмою. Діагностовано збурення в навколоземному просторі, стимульовані спорадичною сонячною активністю.

2. Побудовано та введено в експлуатацію глобальну мережу Інтернет - керованих приймальних систем УНЧ, ННЧ і ВЧ діапазонів для дистанційної діагностики іоносфери і глобальної грозової активності. Приймальні комплекси розміщені в Україні, Антарктиді, Арктиці, Африці і в Сибіру та працюють в безперервному режимі. Створено унікальну багаторічну базу даних багатопозиційних спостережень, яка використовується для моделювання процесів у навколоземному плазмовому оточенні Землі вченими України, США та Європи.

3. Проведено картографування надпотужних блискавичних розрядів з використанням даних синхронних трипозиційних спостережень ННЧ шумів на двох антарктичних станціях і обсерваторії в Японії. При виконанні картографування розроблено та застосовано оригінальну методику поляризаційної пеленгації джерел з урахуванням гіротропії іоносфери. Показано, що найбільшу кількість екстремально сильних розрядів зосереджено поблизу екваторіальних центрів світової грозової активності. Дані такого картографування верифіковано шляхом їх порівняння з результатами глобального супутникового моніторингу блискавичних розрядів.

4. Експериментально виявлено і досліджено новий ефект "розщеплення" спектральних максимумів іоносферного альфвенівського резонансу, визначено умови його виникнення, запропоновано можливі механізми, що пояснюють збагачення модового складу резонатора. Встановлено і апробовано в різних регіонах земної кулі нову методику, що дозволяє розраховувати критичну частоту іоносферного шару F2 за даними моніторингу характеристик IAP у будь-якому регіоні планети.

5. Розроблено та реалізовано нову методику спектрально-поляризаційної діагностики в Антарктиді рівнів "паразитного" випромінювання систем, які генерують, споживають і транспортують електроенергію в промислово розвинених регіонах земної кулі. На річному масиві даних безперервних

вимірювань потужності випромінювання ліній електропередач з частотою 60 Гц продемонстрований "weekend" ефект в поведінці рівнів континентального енергоспоживання. Зареєстрована велика аварія найпотужнішої енергомережі США - Канада і проаналізована динаміка її розвитку. Оцінено рівень забруднення електромагнітного оточення Антарктики випромінюванням енергомереж інших континентів.

6. Вперше використана для керованого живлення міжшарового (E - F) іоносферного хвилеводу область штучної іоносферної турбулентності, яку створено потужним ВЧ нагрівом на частоті поблизу четвертої гірогармоніки електронів. Просторово-часові властивості штучної іоносферної турбулентності контролювалися змінами рівня сигналу "накачки" в Антарктиді і динамікою спектру стимульованого електромагнітного випромінювання поблизу нагрівного стелю НАARP, розташованого на Алясці. Встановлено залежність між неоднорідностями метрових-декаметрових масштабів і спектральною структурою стимульованої електромагнітної емісії іоносфери.

7. Вперше дана фізична інтерпретація низькочастотного ефекту "розщеплення" спектра пробного ВЧ сигналу, розсіяного на штучній іоносферній турбулентності. Побудована модель радіального дрейфу стимульованих неоднорідностей від центру до периферії нагрітої області, оцінені швидкості їх руху в умовах стаціонарного нагріву іоносфери і на стадії релаксації.

8. Розроблено та реалізовано оригінальну методику побудови регіональних карт варіацій повного електронного вмісту за даними "регіональних" мереж ГНСС приймачів, яка дозволила виявляти і наочно відобразити природні низькочастотні збурення в геокосмосі на іоносферних висотах, такі як атмосферні гравітаційні хвилі, та дослідити джерела їх збудження: сонячний термінатор, магнітні бурі і супроводжуючі їх висипання енергійних частинок з радіаційних поясів Землі.

9. Створено і впроваджено в експлуатацію апаратно-програмне забезпечення для шести радіофізичних сенсорів "Комплексу електромагнітного зондування навколишнього середовища " Низькочастотної обсерваторії РІ НАНУ, що є об'єктом національного надбання України. Забезпечено безперервне багаторічне функціонування Комплексу в режимі Інтернет - доступу, обробки і відображення даних в реальному часі на WEB - сайті < <http://geospace.com.ua>>

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в міжнародних та українських наукових фахових журналах

1. Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов / А.В. Колосков, О.В. Буданов, В.Г. Безродный Ю.М. Ямпольский // Радиопизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 10, № 4. – С. 391–403.
2. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности / А.В. Колосков, В.Г. Безродный, О.В.Буданов, В.Е. Пазнухов, Ю.М. Ямпольский // Радиопизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, № 1. – С. 11–29.

3. The ELF Band as a Possible Spectral Window for Seismo-Ionospheric Diagnostics / V. Bezrodny, O. Budanov, A. Koloskov, M. Hayakawa, V. Sinitsin, Y. Yampolski, V. Korepanov // *Sun and Geosphere*. – 2007. – V. 2, № 2. – P. 34–39.
4. 11-year solar cycle in Schumann resonance data as observed in Antarctica / A.P. Nickolaenko, A.V. Koloskov, M. Hayakawa, Yu.M. Yampolski, O.V. Budanov, V.E. Korepanov // *Sun and Geosphere*. – 2015. – Т. 15, № 1. – P. 39–49.
5. Effects of Energetic Solar Emissions on the Earth–Ionosphere Cavity of Schumann Resonances / G. Satori, E. Williams, C. Price, R. Boldi, A. Koloskov, Y. Yampolski, A. Guha, V. Barta // *Surv Geophys*, Published online: 28 March 2016. – P. 1–33. DOI 10.1007/s10712-016-9369-z
6. Observations and analysis of the Ionospheric Alfvén resonance mode structure in a complete 11-year solar cycle / N.A. Baru, A.V. Koloskov, Y.M. Yampolsky, R.A. Rakhmatulin // *Sun and Geosphere*. – 2016. – Т. 16, № 1. – P. 49–54.
7. Колосков А.В. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 367–376.
8. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенноскандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент “FENICS”) / А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов, Т.Г. Короткова, Ю.А. Копытенко, В.С. Исмагилов, М.С. Петрищев, Б.В. Ефимов, М.Б. Баранник, В.В. Колобов, П.И. Прокопчук, М.Ю. Смирнов, С.А. Вагин, М.И. Пертель, Е.Д. Терещенко, А.Н. Васильев, М.Б. Гохберг, В.И. Трофимчик, Ю.М. Ямпольский, А.В. Колосков, А.В. Федоров, Т. Корья // *Физика Земли*. – 2011. – № 1. – С. 1–23.
9. Study of Interaction of ELF–ULF Range (0.1–200 Hz) Electromagnetic Waves with the Earth’s Crust and the Ionosphere in the Field of Industrial Power Transmission Lines (FENICS Experiment) / A.A. Zhamaletdinov, A.N. Shevtsov, E.P. Velikhov, A.A. Skorokhodov, V.E. Kolesnikov, T.G. Korotkova, P.A. Ryazantsev, B.V. Efimov, V.V. Kolobov, M.B. Barannik, P.I. Prokopchuk, V.N. Selivanov, Yu.A. Kopytenko, E.A. Kopytenko, V.S. Ismagilov, M.S. Petrishchev, P.A. Sergushin, P.E. Tereshchenko, B.V. Samsonov, M.A. Birulya, M.Yu. Smirnov, T. Korja, Yu.M. Yampolski, A.V. Koloskov, N.A. Baru, S.V. Poljakovi, A.V. Shchennikovi, G.I. Druzhink, W. Jozwiakl, J. Redal, Yu.G. Shchors // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2015. – Vol. 51, № 8. – P. 826–857. ISSN 0001-4338.
10. Вариации СДВ радиосигналов при восходе солнца в Антарктиде / Р.С. Шубова, В.Г. Безродный, А.В. Колосков, П.В. Силин, Ю.М. Ямпольский // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 337–347.
11. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs / V.G. Galushko V.S. Beley, A.V. Koloskov, Y.M. Yampolski, V.V. Paznukhov, B.W. Reinisch, J.C. Foster, P. Erickson // *Radio Science*. – Vol. 38, №. 6. – 2003. – P. 1102–1112. doi: 10.1029/2002/RS002861.

12. О возможном механизме «эффекта саморассеяния» мощных ВЧ сигналов в ионосфере / В.Г. Галушко, В.Г. Безродный, А.В. Колосков, А.В. Зализовский // Радиопизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 2. – С. 112 – 124
13. HF wave scattering by field-aligned plasma irregularities considering refraction in the ionosphere / V.G. Galushko, V.G. Bezrodny, A.V. Koloskov, V.V. Paznuhkov, B.W. Reinisch // Radio Science. – 2013. – V 48. – P. 180 – 189. DOI: 10.1029/2012RS005072.
14. Optical and RF diagnostics of the ionosphere over the Sura facility: Review of results / L.M. Kagan, M.J. Nicolls, M.C. Kelley, V.L. Frolov, V.V. Belikovich, N.V. Bakhmet'eva, G.P. Komrakov, D.I. Nedzvetski, Yu.M. Yampolski, V.G. Galushko, A.V. Koloskov, A.V. Zalizovski, S.B. Kasheev, N.F. Blagoveshchenskaya, V.A. Kornienko, T.D. Borisova, A.V. Gurevich, G.G. Vertogradov, V.G. Vertogradov, T.S. Trondsen, E. Donovan // Радиопизика и радиоастрономия. – 2006. – Т. 11, № 3. – 221 – 241
15. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula / V.G. Galushko, A.S. Kashcheyev, S.B. Kashcheyev, A.V. Koloskov, I.I. Pikulik, Y.M. Yampolski, V.A. Litvinov, G.P. Milinevsky, S. Rakusa-Suszczewski // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2007. – № 69. – P. 403 – 410.
16. Self-Scattering of the HF Heater Emissions Observed at Geographically Dispersed Receiving Sites / V.G. Galushko, A.V. Koloskov, V.V. Paznuhkov, B.W. Reinisch, G.S. Sales, Y.M. Yampolski, A.V. Zalizovsky // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2008. – V. 50, № 6. – P. 155 – 161.
17. Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах / С.Б. Кащеев, А.В. Колосков, А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, И.И. Пикулик, Ю.М. Ямпольский, В.И. Куркин, Г.И. Литовкин, А.И. Орлов, П.В. Петько // Радиопизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 12 – 25.
18. Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP / A. Najmi, G. Milikh, Y.M. Yampolski, A.V. Koloskov, A.A. Sopin, A. Zalizovski, P. Bernhardt, S. Briczinski, C. Siefiring, K. Chiang, Y. Morton, S. Taylor, A. Mahmoudian, W. Bristow // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2015. – V. 120, № 8. – P. 6646–6660. doi:10.1002/2015JA021341.
19. Двухпозиционное КВ рассеяние взволнованной морской поверхностью. Часть 2, эксперимент / А.С. Кащеев, С.Б. Кащеев, А.В. Колосков, И.И. Пикулик, А.С. Брюховецкий, Ю.М. Ямпольский // Радиопизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 242 – 252.
20. Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах / А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, А.С. Кащеев, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, И.Б. Егоров, А.В. Попов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 674 – 684.
21. О форме пространственного спектра искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых мощным КВ радиоизлучением / Е.Н. Мясников, Н.В. Муравьева, Е.Н. Сергеев, В.Л. Фролов, А.М. Насыров, И.А. Насыров, В.С. Белей, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, К.М. Гровс // Известия ВУЗОВ Радиопизика. – 2001. – Т. 44, № 11. – С. 903 – 917.

22. Probing of medium-scale traveling ionospheric disturbances using HF-induced scatter targets / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, V.A. Kornienko, I.V. Moskvina, M.T. Rietveld, V.L. Frolov, V.P. Uryadov, L.M. Kagan, Y.M. Yampolsky, V.G. Galushko, A.V. Koloskov, S.B. Kascheev, A.V. Zalizovsky, G.G. Vertogradov, V.G. Vertogradov, M.C. Kelley // *Annales Geophysicae*. – 2006. – № 2. – P. 2333 – 2345.
23. Методика оценки критической частоты слоя F2 по разности собственных частот ионосферных альфвеновских резонансов / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, А.Ю. Пашинин // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 151 – 159.
24. Радиальный дрейф искусственной ионосферной турбулентности поперек геомагнитного поля / А.В. Колосков, В.С. Белей, Т.Б. Лейзер, Ю.М. Ямпольский // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 247 – 260.
25. HF pump-induced scale radial drift of small scale magnetic field-aligned density striation / A.V. Koloskov, T.B. Leiser, Yu.M. Yampolski, V.S. Beley // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – V. 107, № A7. – P. 1726 – 1735.
26. Сеть Интернет-управляемых ВЧ приемников для ионосферных исследований / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, А.С. Кащеев, С. Ла Хоз, А. Брекке, В.С. Белей, М.Т. Ритвелд // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2014. – Т. 19, № 4. – С. 324 – 335.

Публікації в матеріалах конференцій

27. Koloskov O. Using the electronic geophysical database from station Akademik Vernadsky for the analysis of Alfvén resonance observations / O. Koloskov // *Україна в Антарктиці - національні пріоритети і глобальна інтеграція, ІАС 2008: міжнародна наукова конференція, 23-25 травня 2008 р.:* Тези. – м. Київ, 2008. – С. 58.
28. A New Approach to HF Sounding and Visualization of Wavelike Ionospheric Disturbances / V.S. Beley, V.G. Galushko, A.V. Koloskov, V.G. Sinitsin, Yu.M. Yampolski // *XXV General Assembly of URSI, August 17-24, 2002:* – Maastricht, 2002. – P. 109.
29. Spatial features of Doppler spectra from HF heaters / V.G. Galushko, K. Groves, A.V. Koloskov, V.V. Paznukhov, B.W. Reinisch, Y. M. Yampolski, A.V. Zalizovsky // *XXIX URSI General Assembly, August 7-16, 2008: Abstracts.* – Chicago, Illinois, USA, 2008. – P. 263.
30. Measurements of TIDs parameters based on dense national GNSS networks in Central Europe [electronic resource]/ G. Nykiel, M. Figurski, A.V. Koloskov, A.Y. Olijnyk, Y.M. Zanimonskiy // *EUREF 2016 Symposium, May 25th – 27th, 2016: Abstracts of contributed papers.* – Donostia San Sebastian, 2016 – 1 p.
31. Electromagnetic pump-excited large scale motion of small scale magnetic field-aligned density irregularities transverse to the magnetic field in the ionosphere / A.V. Koloskov, T.B. Leyser, Yu.M. Yampolski, V.S. Beley // *2000 International Congress on plasma physics, October 23-27, 2000: Abstracts of contributed papers.* – Quebec City, Canada, 2000. – P. 96.

32. Koloskov A. Internet controlled HF receiver for ionospheric research in polar regions / A. Koloskov // International Polar Year in Ukraine: results and horizons: international Antarctic Conference IAC2009, May 22-24, 2009: Abstracts of contributed papers. – Kharkiv, 2009. – P. 24.
33. Диагностика полярных ионосферных неоднородностей на станции Академик Вернадский с использованием сверхдальних ВЧ радиолоний / Ю.М. Ямпольский, А.В. Колосков, А.В. Зализовский, Н.А. Бару, О.В. Буданов, В.Н. Лисаченко, А.В. Пазнухов, А.А. Сопин // Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети: VII Міжнародна антарктична конференція, 12-14 травня 2015 р.: Тези. – Київ. – 2015. – С. 24 – 27.
34. Низкочастотная обсерватория РИ НАН Украины – полигон для исследования электромагнитного климата Земли / А.В. Колосков, А.С. Кашеев, Л.Н. Литвиненко, В.Е. Пазнухов, Ю.М. Ямпольский // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2010: Друга Всеукраїнська конференція з запрошенням закордонних учасників, 14-17 червня 2010 р.: матеріали доповідей. – Київ, 2010. – С. 80 – 81.
35. Колосков А.В. Низкочастотные электромагнитные поля в околоземном пространстве. (Лекция) / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Взаимодействие полей и излучения с веществом: Международная байкальская молодежная научная школа по Фундаментальной физике. БШФФ-2011, 19-24 сентября 2011 г.: тезисы докладов. – Иркутск, 2011. – С. 6.
36. Koloskov A.V. Long-term monitoring of the Schumann resonance signals from Antarctica [electronic resource] / A.V. Koloskov, O.V. Budanov, Yu. M. Yampolski // XXXI General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science Union Radio Scientifique Internationale, August 17-23, 2014: Beijing, China, (CIE), 2014. – 4 p, 978-1-4673-5225-3/14/\$31.00 ©2014 IEEE,
37. Global Circuit Response to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? [electronic resource] / E. Williams, A. Guha, R. Boldi, G. Satori, R. Markson, A. Koloskov, Yu.M. Yampolski // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014: Norman, Oklahoma, USA, 2014. – 12. p.
38. Investigations of HAARP emission on super long radio paths (review) [electronic resource] / Y. Yampolski, A. Zalizovski, A. Koloskov, A. Sopin, G. Milikh // Bridging the gap between applications and research involving ionospheric and space weather disciplines: 14th International Ionospheric Effects Symposium IES-2015: 12-14 May 2015: Proceedings. - Alexandria, VA, USA, –8 p.

АНОТАЦІЯ

Колосков О. В. Електромагнітні прояви низькочастотних процесів у геокосмосі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, Харків, 2016 р.

Реалізовано новий підхід радіодіагностики, в якому глобальні електромагнітні резонатори Землі розглядаються в ролі "індикаторів" стану космічної погоди. В рамках цього підходу встановлено реакції шуманівського

(ШР) і іоносферного альфвенівського (ІАР) резонаторів на регулярну і спорадичну активність Сонця в 11-ти річному циклі. Створено глобальну мережу Інтернет-керованих приймальних систем УНЧ, ННЧ і ВЧ діапазонів в Україні, Антарктиді, Арктиці, Африці і в Сибіру. Проведено картографування надпотужних блискавичних розрядів за даними синхронних трипозиційних спостережень ННЧ шумів. Експериментально виявлено і досліджено новий ефект "розщеплення" спектральних максимумів ІАР. Встановлено і апробовано емпіричну закономірність, що дозволяє відновлювати критичну частоту іоносферного шару F2 з поведінки спектральних характеристик ІАР. Розроблено та реалізовано методику спектрально-поляризаційної діагностики в Антарктиді рівнів випромінювання енергосистем промислово розвинених регіонів планети. Дана фізична інтерпретація ефекту "розщеплення" спектрів ВЧ сигналів, розсіяних на штучній іоносферній турбулентності (ШТ). Вперше область ШТ, яку створено потужним ВЧ нагрівом на частоті поблизу четвертої гірогармоніки, використано для керованого збудження міжшарового іоносферного хвилеводу. Розроблено нову методику побудови регіональних карт варіацій повного електронного вмісту за даними мережі ГНСС приймачів.

Ключові слова: іоносфера, шуманівський резонанс, іоносферний альфвенівський резонанс, магнітогідродинамічні хвилі, штучна іоносферна турбулентність, рухомі іоносферні збурення.

АННОТАЦИЯ

Колосков А. В. Электромагнитные проявления низкочастотных процессов в геокосмосе. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика. – Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков, 2016 г.

Реализован новый подход радиодиагностики, в котором глобальные электромагнитные резонаторы Земли рассматриваются в роли "индикаторов" состояния космической погоды. В рамках этого подхода установлена реакция шумановского (ШР) и ионосферного альфвеновского (ИАР) резонаторов на регулярную и спорадическую активности Солнца в 11-ти летнем цикле. Создана глобальная сеть Интернет-управляемых приемных систем УНЧ, СНЧ и ВЧ диапазонов в Украине, Антарктиде, Арктике, Африке и в Сибири. Проведено картографирование сверхмощных молниевых разрядов по данным синхронных трехпозиционных наблюдений ННЧ шумов. Экспериментально обнаружен и исследован новый эффект "расщепления" спектральных максимумов ИАР. Установлена и апробирована эмпирическая закономерность, позволяющая восстанавливать критическую частоту ионосферного слоя F2 по поведению спектральных характеристик ИАР. Разработана и реализована методика спектрально-поляризационной диагностики в Антарктиде уровней излучения энергосистем промышленно развитых регионов планеты. Дана физическая интерпретация эффекта "расщепления" спектров ВЧ сигналов, рассеянных на искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Впервые область ИИТ, созданная мощным ВЧ нагревом на частоте вблизи четвертой гиросгармоніки,

использована для управляемого возбуждения межслоевого ионосферного волновода. Разработана новая методика построения региональных карт вариаций полного электронного содержания по данным сети ГНСС приемников.

Ключевые слова: ионосфера, шумановский резонанс, ионосферный альфвеновский резонанс, магнитогиродинамические волны, искусственная ионосферная турбулентность, перемещающиеся ионосферные возмущения.

SUMMARY

Koloskov, A. V. Electromagnetic signatures of low-frequency processes in the geospace. – The manuscript.

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, specialty 01.04.03, Radiophysics. A. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2016.

A new approach to remote radio sounding of geospace within which the global electromagnetic Earth's resonators are considered as "indicators" of the space weather conditions. Using this approach, response of the Schumann (SR) and ionospheric Alfvén (IAR) resonators to the regular and sporadic solar activity during a 11-year cycle has been established. A global network of internet-accessible ULF, ELF and HF receiving systems located in Ukraine, Antarctic, Arctic, Africa and Siberia has been developed. Mapping of super powerful lightning discharges has been performed using data of synchronous three-position observations of ELF noise. A new effect of splitting of the spectral maxima of the IAR has been discovered and investigated. An empirical dependence has been established and verified which allows estimating the critical frequency of the F2 ionospheric layer from the IAR spectral characteristics. Based on the analysis of spectrum and polarization parameters, a technique is suggested to monitor in Antarctic the radiation from electrical supply networks of industrial regions of the Globe. A physical explanation has been developed for the effect of spectrum splitting of HF signals scattered by Artificial Ionospheric Turbulence (AIT). The AIT region produced by powerful HF heating at a frequency close to the fourth gyroharmonic has been first used for controllable excitation of the interlayer ionospheric duct. A new technique has been developed for constructing regional maps of variations in the Total Electron Content using data from a GNSS-receiver network.

Keywords: ionosphere, the Schumann resonance, the Ionospheric Alfvén resonance, magnetohydrodynamic waves, the Artificial Ionospheric Turbulence, Travelling Ionospheric Disturbances.