

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

**ПОПОВ ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ**



УДК. 621.371+537.86

**ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З  
ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАНЬ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ  
СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертація на правах рукопису

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
Національної академії наук України

**Науковий керівник:**

доктор фізико-математичних наук, старший  
науковий співробітник

**Луценко Владислав Іванович,**  
Інститут радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків,  
старший науковий співробітник відділу  
радіофізичної інтроскопії

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, доцент  
**Лазоренко Олег Валерійович,**  
Харківський національний університет імені  
В. Н. Каразіна, м. Харків, завідувач кафедри  
загальної фізики

доктор технічних наук, професор  
**Волосяк Валерій Костянтинівич,**  
Національний аерокосмічний університет  
імені М. Є. Жуковського «Харківський  
авіаційний інститут», м. Харків,  
професор кафедри проектування  
радіоелектронних систем літальних апаратів

Захист відбудеться " 16 " травня 2017 р. о 15:00 годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків,  
61085.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту радіофізики та  
електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України за адресою:  
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085.

Автореферат розісланий " 4 " квітня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



І. В. Іванченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дисертацію присвячено розв'язанню задачі моніторингу та діагностики атмосферних процесів за допомогою випромінювань глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), а також урахуванню їхнього впливу для поліпшення точності та стабільності при визначенні координат.

На даний момент у різноманітних сферах життєдіяльності, таких, як геодезія, картографія, аерофотозйомка, прогнозування погоди, авіаційний, автодорожній та залізничний транспорт, широко використовують навігаційні супутникові системи для вирішення різноманітних задач. Це обумовлено високою частотною стабільністю сигналу, широким покриттям та високою точністю траєкторних параметрів супутників. Зважаючи на широкий спектр задач, для яких на даний момент використовуються ГНСС, та постійно зростаючі вимоги до них, для роботи цих систем необхідне точне врахування впливу середовища на поширення сигналів ГНСС. Точні геодезичні вимірювання за допомогою ГНСС на сьогоднішній день дозволяють використовувати цю інформацію для прогнозування погоди та кліматичних досліджень ближньої дії. Подібні можливості стали доступними при оцінюванні тропосферних затримок на трасах поширення сигналів ГНСС як побічних продуктів геодезичних рішень. Водяна пара, яка присутня в тропосфері, відіграє вирішальну роль в атмосферних процесах, що діють у широкому просторово-часовому діапазоні, у масштабах від глобального клімату до мікрометеорології. При певних припущеннях і з використанням додаткових даних про метеопараметри можна перетворити оцінену затримку в тропосфері в інтегральну міру вологості повітря. Його розподілення найбільш тісно пов'язано з розподіленням хмар та опадів, а також відіграє велику роль у вертикальній стійкості атмосфери, тому вивчення тропосферних затримок у просторово-часовій області може бути використано для моделювання поширення електромагнітних сигналів. Наявність різноманітних метеорологічних утворень, наприклад дощів, може обумовлювати погіршення якості каналу зв'язку, тому оперативний моніторинг атмосфери необхідний для оцінювання її рефракційного стану, який визначає параметри радіолокаційних систем, такі як, дальність дії, точність та ін. Раніше для діагностики атмосфери використовувались спеціально розроблені для цього системи. У дисертаційній роботі запропоновано використання вже існуючих систем глобальної супутникової навігації з метою розширення їх функціональних можливостей. Використання саме існуючих систем дозволить створити глобальне інформаційне поле, яке значно розширить можливості глобального моніторингу.

Слід зазначити, що при проведенні діагностики атмосфери необхідно розуміти основні фізичні принципи, які відносяться до впливу тропосфери та іоносфери на ГНСС вимірювання. Атмосферні ефекти при проходженні електромагнітної хвилі доволі різноманітні та обумовлені складною структурою земної атмосфери. У загальному випадку атмосфера Землі може бути представлена як середовище, яке складається з двох областей: електрично-

нейтральної, що знаходиться біля земної поверхні (тропосфера, стратосфера), і розташованої вище електрично-зарядженої області – іоносфери. У більшості підходів прийнято розглядати вплив цих областей окремо одна від одної.

Проаналізувавши коефіцієнт заломлення атмосфери в цих областях можна виділити регулярні та випадкові (варіаційні) складові. У випадку з іоносферою, де фазовий коефіцієнт заломлення в радіодіапазоні менше одиниці та залежить від частоти, виникають групове запізнення та фазове випередження радіосигналів. Саме завдяки цьому ефекту з'являється можливість вилучення іоносферної затримки при проведенні вимірювань на різних несучих частотах. У випадку тропосфери показник заломлення не залежить від частоти в діапазоні ГНСС сигналів, тому моделювання тропосферної затримки залишається доволі складною задачею. Тропосферну затримку прийнято розділяти на гідростатичну та вологу компоненти, для яких створено емпіричні моделі, що мають ряд недоліків, пов'язаних з неврахуванням реальної метеорологічної обстановки.

Таким чином, актуальність теми дисертаційної роботи обумовлена необхідністю розробки методів діагностики тропосферних процесів і методів описання коефіцієнта заломлення за допомогою існуючих систем глобальної навігації, що дозволить проводити оперативний моніторинг стану атмосфери.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** У дисертації наведено узагальнені результати досліджень, отримані автором у період 2012 – 2016 рр., які базуються на програмах, планах і держбюджетних темах наукових досліджень Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України:

"Розроблення методів та технологій зниження впливу умов поширення радіохвиль на точність визначення координат приймачами систем глобальної навігації", шифр "Тропосфера" (2011 – 2012 рр.), № Державної реєстрації 0111U005998 (виконавець), яка виконувалась відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 22.06.2011 р. № 673 «Про державне замовлення на закупівлю товарів, виконання робіт, надання послуг та державних потреб у 2011 році» та Постанови Кабінету Міністрів України від 01.09.2012 р. № 689 «Про державне замовлення на закупівлю товарів, виконання робіт, надання послуг для державних потреб у 2012 році»;

«Використання випромінювань штучних супутників Землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів», шифр «Діагностика» (2013 – 2014 рр.), № Державної реєстрації 0113U002976 (виконавець), яка виконувалась відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 – 2016 рр. за розпорядженням Президії НАН України від 01.02.13 № 56 (1-й етап) та від 04.03.14 № 140 (2-й етап);

«Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС технологій», шифр «Кут» (2013 – 2014 рр.), № Державної реєстрації 0113U002977 (відповідальний виконавець), яка виконувалась відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012 – 2016 рр., за розпорядженням Президії НАН України від 01.02.13 №56 (1-й етап) та від 04.03.14 № 140 (2-й етап).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка радіофізичних методів моніторингу та діагностики атмосферних процесів за допомогою випромінювань глобальних навігаційних супутникових систем, а також урахування їхнього впливу на точність і стабільність при визначенні координат.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було розв'язати наступні задачі:

- розробити методику вимірювань і визначити вимоги до комплексу вимірювальної апаратури, призначеної для вивчення особливостей прийнятих сигналів навігаційних штучних супутників Землі (ШСЗ);
- розробити і створити вимірювальні комплекси;
- теоретично та експериментально дослідити добові й сезонні зміни флуктуацій вимірюваних параметрів навігаційних супутників Землі та їх взаємозв'язок з різноманітними метеоявищами;
- створити модель функції відображення тропосферної затримки, яка враховує сферичність тропосфери;
- розробити методи діагностики зон опадів за змінами сигналів ГНСС;
- розробити методику знаходження областей віддзеркалення на земній поверхні при прольоті супутників;
- провести аналіз впливу сонячної радіації на зміни вимірюваних координат;
- розробити методи опису коефіцієнта заломлення тропосфери;
- розробити методики корекції вимірюваних координат на основі особливостей поширення супутникових сигналів в атмосфері.

*Об'єкт дослідження* – процеси поширення і розсіяння радіохвиль у неоднорідній атмосфері.

*Предмет дослідження* – параметри прийнятого випромінювання навігаційних супутників Землі та їх взаємозв'язок з характеристиками тропосфери та підстилаючої поверхні.

**Методи досліджень** – теоретичні методи статистичної радіофізики, дистанційного зондування атмосферних процесів, статистичної радіотехніки, математичної статистики, застосування теорії статистичних рішень і експериментальні методи вивчення особливостей поширення радіохвиль в тропосфері.

**Наукова новизна одержаних результатів** дослідження полягає у тому, що вперше:

1. Створено методи опису коефіцієнта заломлення тропосфери з використанням напівмарківських процесів та фінітних атомарних функцій. Показано можливість урахування нестационарності поведінки коефіцієнта заломлення шляхом окремого опису його статистичних характеристик гаусовими функціями впродовж сезонів або функціями Кравченка – Рвачова. Запропоновано новий підхід щодо перевірки гіпотез про закон розподілу випадкової величини.

2. Запропоновано підхід для виявлення зон дощу на основі ГНСС вимірювань. Виявлено особливості поведінки сигналів ГНСС при наявності на

трасі зон опадів. Експериментально показано, що за наявності опадів відбуваються зміни шляху проходження сигналу за рахунок змін діелектричної проникності повітря. Уперше запропоновано використання флуктуацій вимірюваних координат для оцінювання просторово-часових змін коефіцієнта заломлення навколо вимірювального пункту.

3. Розроблено модель функції відображення тропосферної затримки, яка на відміну від емпіричних моделей, що використовують статистичну інформацію про метеорологічні параметри для різних регіонів, дає можливість корекції даних через урахування сферичності тропосфери, тобто градієнта коефіцієнта заломлення.

4. Запропоновано методику діагностики підстилаючої поверхні та знаходження областей віддзеркалення за допомогою випромінювань ГНСС.

5. Запропоновано інтерполяційну методику корекції похибок визначення координат для підвищення точності та стабільності вимірювань координат на базах середньої довжини.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в наступному.

1. Створено велику експериментальну базу даних навігаційної інформації з ШСЗ з різних міст України, яка може використовуватись для розробки методик та дослідження просторово-часових характеристик атмосферних процесів. Розроблені методи діагностики тропосфери та підстилаючої поверхні можуть використовуватись при побудові систем глобального моніторингу атмосферних процесів або для корекції існуючих систем навігаційного забезпечення.

2. Розроблена модель функції відображення тропосферної затримки може використовуватись для розв'язання оберненої задачі визначення градієнта коефіцієнта заломлення на підставі реальних даних про тропосферну затримку на трасі поширення супутникових сигналів.

3. Розроблено інтерполяційну методику введення диференційної поправки щодо вимірювань координат та псевдовідстаней за рахунок використання трьох опорних станцій, які знаходяться навколо точки корекції. Запропонована методика дозволяє знизити дисперсію похибок визначення координат до 40 %. Запропоновано емпіричний коефіцієнт корекції зенітної тропосферної затримки, який можна використовувати за відсутності реальних значень метеорологічних параметрів. Використання цього коефіцієнта дозволяє знизити середньоквадратичне значення похибки координат на 4...9 %.

4. Показана необхідність постійного відстеження амплітуд сигналів супутників для усунення аномально високих викидів при оцінюванні вимірюваних координат. Запропоновано використання додаткового інформаційного каналу похідної при фільтрації результатів навігаційних вимірів для усунення аномально високих викидів без зачіпання корисної інформації.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертаційній роботі викладені результати досліджень, виконаних автором самостійно і в співавторстві з колегами. Особистий внесок дисертанта полягає у наступному.

У роботах [7, 8, 19, 20, 21, 22, 25, 27] автор запропонував методи діагностики атмосферних процесів та знаходження зон опадів, провів

експериментальні дослідження та аналіз отриманих даних. У роботах [3, 4, 13, 14, 15, 16] брав участь у створенні моделі описання нестационарних процесів за допомогою функцій Кравченка – Рвачова, та підходу щодо перевірки гіпотези про закон розподілення випадкової величини. У роботах [10, 24] запропонував ідею просвічування підстилаючої поверхні для трас ШСЗ з метою знаходження точок відбиття, провів експериментальні дослідження, обробку та аналіз даних. У роботах [1, 26] запропонував модель функції відображення тропосферної затримки, виконав експериментальні дослідження, аналіз і обробку результатів. У роботах [2, 6, 11, 17] брав участь у розробленні інтерполяційної методики введення диференційної корекції координат і псевдовідстаней, а також у створенні бази даних навігаційної інформації, обробці й аналізі отриманих результатів. В роботах [5, 9, 12, 18, 23] брав участь у розробці методик корекції вимірюваних координат та зниження впливу атмосферних процесів на навігаційні вимірювання, а також у створенні вимірювальних комплексів, на яких виконувались експерименти та дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися на 11 міжнародних і вітчизняних конференціях та симпозиумах (всього 17 доповідей), у тому числі:

1. 4 доповіді на міжнародних конференціях за кордоном: ISC: Geophysics – Cooperation and sustainable development (Ханой, В'єтнам, 2012), XII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов» (Москва, Росія, 2014), SSF- 2014 «Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития» (Мінськ, Біларусь, 2014).

2. 13 доповідей на міжнародних та вітчизняних конференціях: EMES-2012 «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства» (Харків, 2012), IV, V Міжнародні науково-практичні конференції «Обработка сигналов і негаусових процесів» (Черкаси, 2013, 2015), The Eight International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and SubMillimeter Waves MSMW'13 (Харків, 2013), 23rd, 24th, 25th Int. Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology” (Севастополь, 2013-2015), V міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харків, 2014).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 10 статтях у наукових закордонних і вітчизняних виданнях, з них 8, які належать до переліку фахових видань України за спеціальністю радіофізика, та в 17 тезах міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, переліку умовних позначень, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і 1 додатку. Її повний обсяг становить 222 сторінки. Дисертація містить 65 рисунків (з них 22 на окремих сторінках) і 24 таблиці (з них 7 на окремих сторінках). Список використаних джерел на 24 сторінках містить 202 найменування. Додаток займає 19 сторінок.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету й задачі, об'єкт, методи і предмет дисертаційного дослідження. Викладено зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві, проведено апробацію результатів і наведено відомості про публікації за темою дисертації.

У **розділі 1** дисертації проведено огляд існуючих методів та аналіз робіт, присвячених дослідженню характеристик тропосферних процесів контактними і неконтактними методами. Проаналізовано існуючі методи врахування тропосферного та іоносферного впливу на сигнали навігаційних супутників. Сформульовано задачі, які необхідно вирішити для діагностики атмосферних процесів з використанням випромінювань ШСЗ.

У **розділі 2** запропоновано модель опису коефіцієнта заломлення за допомогою фінітних функцій Кравченка – Рвачова та функцій Гауса. Створено моделі описання коефіцієнта заломлення, які необхідні для оцінювання умов поширення радіосигналів. Для вивчення статистичних характеристик коефіцієнта заломлення тропосфери в різних типах місцевості було використано дані для 10 областей України. Для кожної області було вибрано 4 населені пункти.

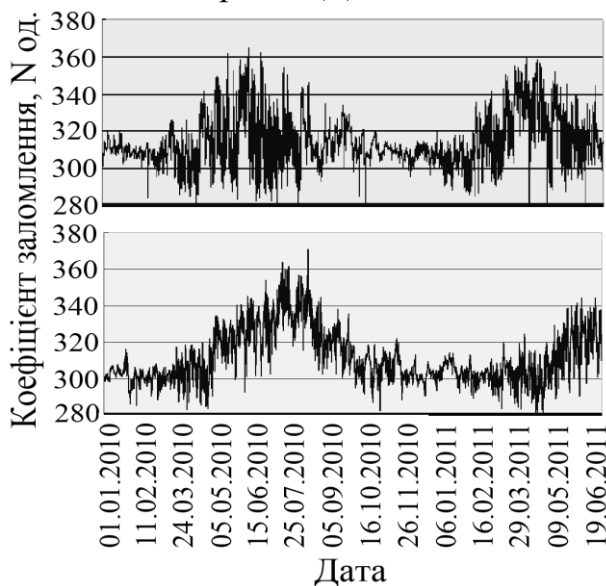


Рисунок 1 – Сезонна залежність коефіцієнта заломлення тропосфери для м. Харків (зверху) та м. Львів (знизу)

значень, так і дисперсій (середньоквадратичних відхилень). Найбільші значення дисперсій характерні для літнього періоду, найменші – для зими. Для весни та осені середньоквадратичні значення мають приблизно однакову величину. Проведений аналіз показав необхідність використання полігаусового розподілу. Статистичне описання поведінки коефіцієнта заломлення може базуватись на використанні вкладених двокомпонентних випадкових процесів  $\{\vec{S}(t), \theta(t)\}$ , в яких

З використанням даних метеорологічних станцій, які вимірювали стандартні набори метеорологічних параметрів, було обчислено значення коефіцієнта заломлення та вивчено його поведінку впродовж двох років для різних регіонів України. Установлено, що протягом року коефіцієнт заломлення є суттєво нестаціонарною величиною. Взимку, незалежно від регіону, він становить близько 310 N од., у той час як в інші сезони має суттєво більші значення на 40...60 N од. (рис. 1). Видно, що для сезонів характерна суттєва відмінність числових характеристик як середніх



одна компонента  $\overline{S(t)}$  – неперервна, а друга  $\theta(t) = v_i$  – дискретна. Ці компоненти є залежними і в загальному випадку не марківськими. В експериментальних дослідженнях визначалась можливість використання локально-гаусового розподілу для описання статистики коефіцієнта заломлення в межах сезону. На відміну від математичних моделей, які використовують для описання щільності розподілу коефіцієнта заломлення полігаусові моделі, його реальні значення фінитні. Це є передумовою використання для їх опису атомарних функцій (АФ). На рис. 2 показана щільність розподілу коефіцієнта заломлення для м. Полтава протягом року, а також її апроксимація функцією Кравченка – Рвачова (рис. 2А) з таким же середнім і середньоквадратичним значенням та функціями Гауса (рис. 2Б).

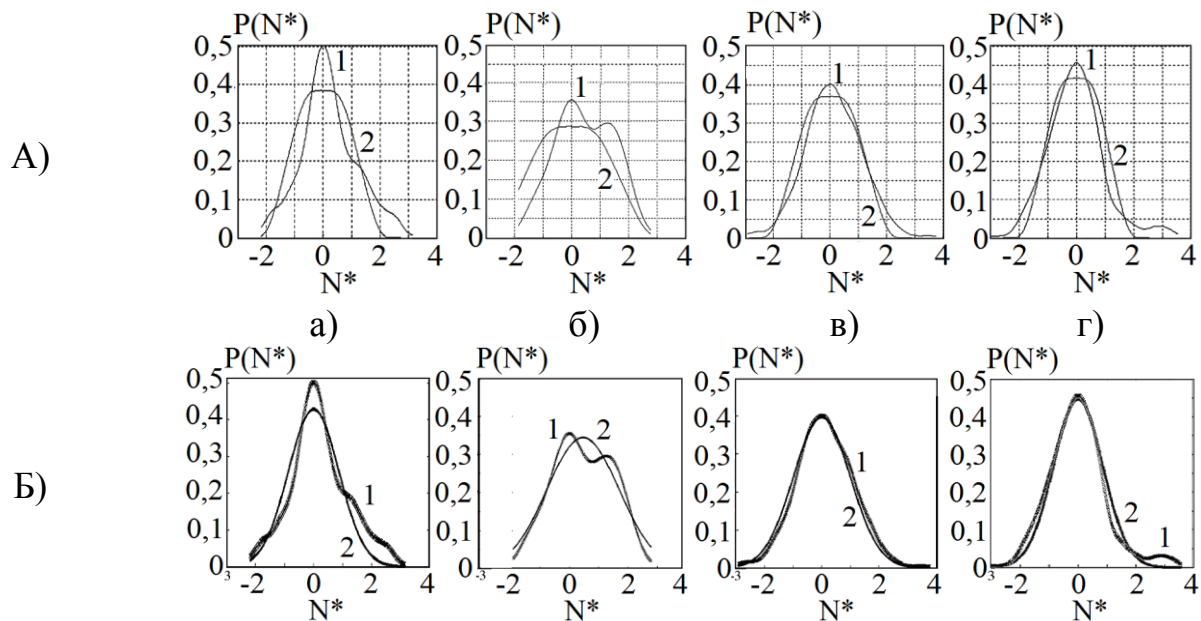


Рисунок 2 – Щільність розподілу коефіцієнта заломлення для м. Полтава при різних сезонах, де  $N^* = (N - \bar{N}) / \sigma_N$ : а) весна, б) літо, в) осінь, г) зима (1 – експеримент; 2 – апроксимація функцією Кравченка – Рвачова (А) / Гауса (Б))

Показано, що для опису нестационарної поведінки коефіцієнта заломлення протягом сезону можна використовувати функції Кравченка – Рвачова для літа та функції Гауса для інших сезонів. Запропоновано новий підхід для перевірки гіпотез про закон розподілу випадкової величини. Він базується на порівнянні величини розходження між інтегральною функцією експериментальних даних, які перетворені оберненою функцією апроксимаційної моделі, та лінійною функцією. Оцінювання значущості цього відхилення для різних гіпотез здійснюють за допомогою критерію Фішера.

У розділі 3 показано можливість використання сигналів навігаційних ШСЗ для діагностики тропосфери та підстилаючої поверхні. Експериментально показано, що вимірювані координати, отримані за допомогою систем глобальної навігації, можуть використовуватись для оцінювання наявності зон опадів на трасі від супутника до точки прийому. За наявності дощу на трасі поширення сигналів унаслідок значно більшої діелектричної проникності води, що

призводить до збільшення коефіцієнта заломлення тропосфери, відбувається зростання псевдовідстані. Оскільки у ГНСС використовується псевдодально-мірний метод при розрахунку координат, збільшення псевдовідстаней у напрямку проходження дощу призводить до зниження вимірюваної висоти, а також змін площинних координат, які не характерні для добових варіацій (рис. 3).

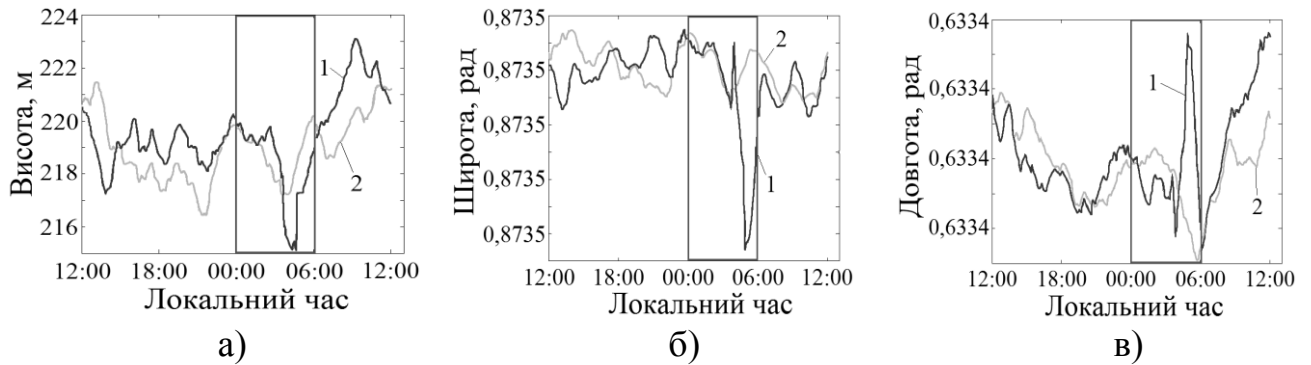


Рисунок 3 – Зміна координатної інформації під час дощу (1) та за його відсутності (2): а) висота, б) широта, в) довгота

Показано, що зміни у вимірах довготи та широти можуть використовуватись для оцінювання поведінки коефіцієнта заломлення навколо точки проведення вимірювань. Було проведено порівняння змін площинних координат для трьох часових інтервалів зі змінами коефіцієнта заломлення у 10 містах навколо вимірювального пункту і виявлено обернену залежність між змінами цих параметрів. Запропонований підхід дозволяє виконувати дистанційну діагностику метеорологічної ситуації, а також робити просторові оцінки положення метеорологічних утворень на основі розрахунку приросту псевдовідстаней під різними азимутальними кутами та кутами місця.

Запропонована модель функції відображення (ФВ) тропосферної затримки, яка на відміну від існуючих аналогів у моделі сферично-шаруватої атмосфери, враховує її сферичність через введення градієнта коефіцієнта заломлення:

$$m_e = \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \beta} \left( \frac{2h_e}{a_e} + \frac{h_e^2}{a_e^2} \right)} \right) \frac{a_e}{h_e} \sin \beta.$$



Рисунок 4 – Відхилення експериментальних даних від розрахованих ФВ: 1 – запропонована ФВ; 2 – ФВ Black&Eisner

Проведено експериментальне порівняння запропонованої функції відображення з функцією Black&Eisner і реальними тропосферними затримками (рис. 4). Показано, що запропонована функція відображення дозволяє більш точно корегувати вплив тропосфери на низьких кутах візування, а також дає можливість оцінювати градієнт коефіцієнта заломлення на основі мінімізації розходження модельних і експериментальних даних про тропосферну затримку. Встановлено, що зміна активності протягом 11-річного

циклу доволі добре корелює зі змінами трендової складової коефіцієнта заломлення тропосфери. Проведено експериментальні дослідження впливу сонячного затемнення, яке відбулось 20.03.2015, на зміни вимірюваних координат навігаційних приймачів. Побудовано іоносферні карти повної

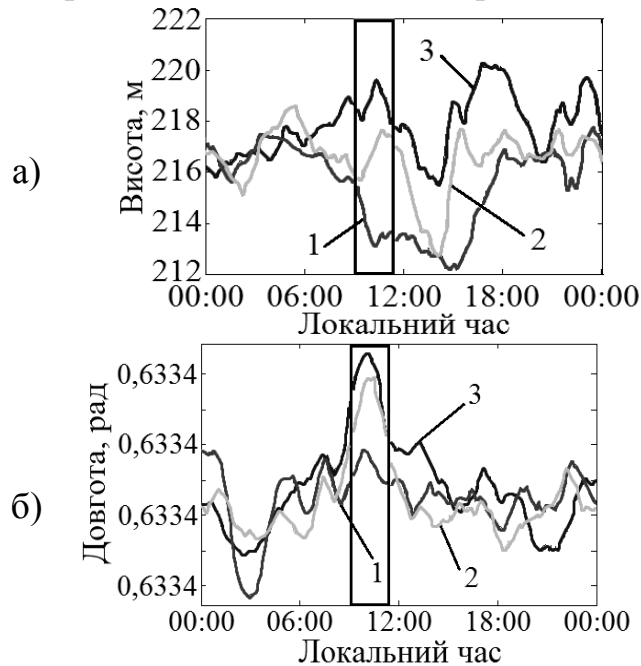


Рисунок 5 – Флуктуації вимірюваної висоти (а) та довготи (б) у періоді: 1 – 20–21.03.2015, 2 – 21–22.03.2015, 3 – 22–23.03.2015

електронної концентрації, а також оцінено геомагнітну обстановку та розрахований коефіцієнт заломлення з метою аналізу динамічних процесів, які можуть відбуватись під час затемнення. Виконаний аналіз показує, що в іоносфері спостерігається зниження концентрації електронів упродовж проходження затемнення, в той час як тропосфера реагує значно повільніше, за рахунок чого на чотирьох приймачах, які використовувались в експерименті, зареєстровано нехарактерне поведіння вимірюваної висоти та довготи в порівнянні з сусідніми днями (рис. 5). Це свідчить про необхідність посиленої уваги до координатних вимірювань під час проходження сонячного затемнення.

Запропоновано підхід для оцінювання типу підстилаючої поверхні, а також знаходження областей відбиття на ній за допомогою систем глобальної навігації. Показано, що при наявності областей відбиття на підстилаючій поверхні в отриманих співвідношеннях сигнал/шум від окремих супутників проявляються характерні флуктуації, утворені за рахунок інтерференції прямого та відбитого сигналів (рис. 6).

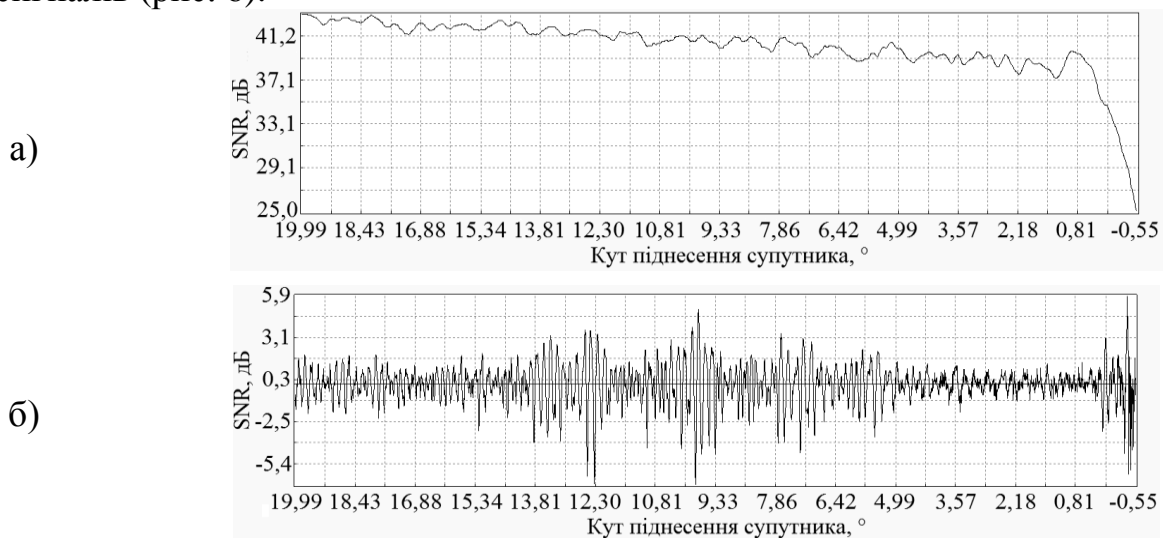


Рисунок 6 – Трендові (а) та флуктуаційні (б) складові амплітуди сигналів GPS 10 (24.02.2012)

Продемонстровано, що характерні флуктуаційні ділянки, які відповідають областям відбиття, мають стабільний характер для усіх сезонів (зими, літа), а також для супутників, які мають таку ж орбіту, тобто сканують земну поверхню під тими ж кутами. Показано, що при скануванні поверхні, на якій має місце забудова, дисперсія флуктуаційної компоненти приблизно в три рази більша, ніж при скануванні території без будівель, що може використовуватись як класифікаційний критерій для оцінювання типу поверхні, а також для визначення кутових координат областей відбиття та придушення відбитих від них сигналів, що дозволить зменшити похибки визначення координат унаслідок багатопроменевості.

У розділі 4 запропоновано методики зниження похибок визначення координат системами глобальної навігації. Запропоновано інтерполяційну методику введення диференційної корекції на основі даних похибок вимірювання, отриманих у пунктах, розташованих навколо точки корекції. Показано, що запропонована методика корекції дозволяє отримати більш стабільні поправки, ніж звичайний диференційний метод, який, як показали проведені експерименти, може при невдало вибраній станції корекції вносити додаткові похибки вимірювання. Проаналізовано півторарічні навігаційні дані, отримані з 4-х міст України за допомогою розгорнутих у місцях вимірювання одночастотних вітчизняних приймачів СН-4719 (виробництва ООО «Навіс-Україна») (рис. 7). Вибір опорних точок заснований на використанні коефіцієнтів парної кореляції, обчислених за метеоданими коефіцієнтів заломлення.



Рисунок 7 – Схематичне розташування прогнозованого та опорних (базових пунктів) та їх відстань від м. Полтава: 1 – м. Харків – 130,9 км; 2 – м. Суми – 147,5 км, 3 – м. Сміла – 197 км, 4 – м. Полтава

Показано, що запропонована методика порівняно зі стандартним методом диференційної корекції, як правило, зменшує дисперсію похибок координат на 20...25 %. Причому менший виграш отримано в зимній період, коли тропосферні зміни незначні і стандартний метод дає непоганий результат. У літній період використання інтерполяційної методики дає виграш до 40 %. Запропонована методика дозволяє прогнозувати не лише похибки вимірюваних координат, але й псевдовідстаней, при цьому отримані прогнозовані результати мають високий ступінь кореляції з реальними даними (рис. 8). З отриманих результатів видно, що дисперсія залишкової похибки

при введенні корекції не перевищувала 1,26, коли при використанні однієї опорної точки це значення могло збільшуватись до 2,5 разів.

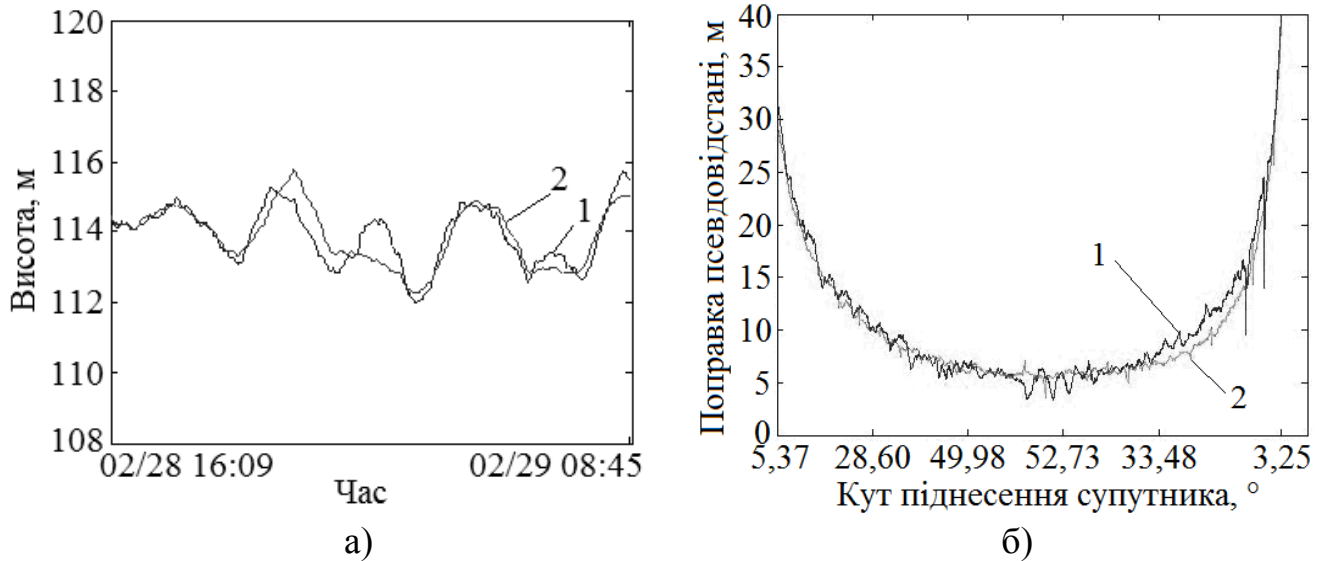


Рисунок 8 – Реальні (1) та прогнозовані (2) дані по висоті (а) та псевдовідстані (б)

Крім використання реальних значень метеорологічних параметрів для обчислення зенітних тропосферних затримок або використання запропонованих емпіричних добових залежностей зенітної тропосферної затримки є доцільним введення емпіричних коефіцієнтів корекції. Проведено експерименти з виявлення регресійних залежностей цього коефіцієнта від рівня коефіцієнта заломлення тропосфери й оцінки впливу цих корекцій на точність визначення координат. Запропонований коефіцієнт  $\alpha$  дозволяє проводити корекцію обчислюваних зенітних тропосферних затримок  $R_T$ :

$$\hat{R}_T = \alpha R_T,$$

які можна використовувати для корекції псевдовідстаней і подальшого обчислення координат. Проведений аналіз показав, що взимку оптимальні значення зенітної тропосферної затримки у більшості випадків практично збігаються з їх теоретичними значеннями. Зміщення оптимальних значень від теоретичних оцінок не перевищує 5...10% ( $\alpha \leq 1,05 \dots 1,1$ ). Влітку оптимальні значення затримки для координат по площині та висоті приблизно на 10...25% більші, ніж теоретичні значення. Таким чином, поліпшення точності може бути досягнуто завдяки введенню сезонної та добової корекції зенітної затримки.

Аналіз навігаційних даних, отриманих в результаті багаторічних накопичень, показав, що при проведенні регулярних ГНСС вимірювань мають місце аномально високі викиди. Ці викиди можуть суттєво перевищувати середній рівень помилок визначення координат і фіксуватися декілька разів за добу з певною періодичністю. Подібні викиди можуть становити від 10 до 20 м і, незважаючи на їх відносно великий період повторення, можуть становити загрозу, особливо при використанні приймачів ГНСС в авіації. Проаналізовано фільтрацію координатних вимірювань із використанням звичайних фільтруючих алгоритмів і зроблено висновок про необхідність введення додаткових інформаційних параметрів для виділення аномально високих викидів.

Запропоновано новий підхід для їх зменшення з використанням розрахунку першої похідної з метою усунення аномально високих викидів вимірювань

координат. Показано, що використання середнього ковзного з додатковим каналом похідної дозволяє знизити величину викидів на рівні забезпеченості 0,99 до 0,44...0,54 від рівня початкового процесу (в нормованих координатах) та до 0,235...0,325 на рівні 0,9. Для медіанного фільтра на рівні 0,99 досягається зниження похибки до 0,489...0,66 та до 0,563...0,746 на рівні 0,9. Таким чином, доповнення інформаційного каналу дозволяє покращити фільтрацію та видалити аномально високі викиди, не впливаючи на корисну інформацію.

Проведено аналіз змін у координатній інформації за наявності супутників, які заходять за горизонт. Експериментально показано поліпшення точності вимірювання координат при виключенні з навігаційного рішення супутників з малим рівнем сигналу та великими флуктуаціями (рис. 9). Проведено аналіз поведінки рівня сигналів усіх супутників, які беруть участь у розв'язанні навігаційної задачі. Виконаний аналіз показав, що на появу аномально високих викидів мають вплив супутники, які сходять і заходять. Супутники, які пролітають над лінією горизонту, несуттєво впливають на викиди.

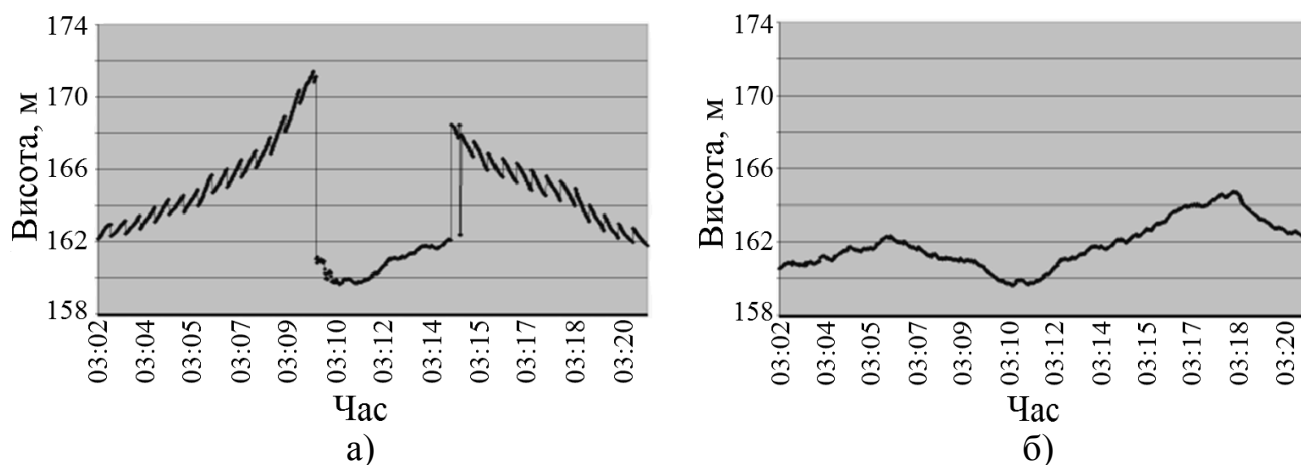


Рисунок 9 – Результати навігаційного рішення з використанням усіх доступних супутників (а) і з режекцією супутників (б)

Показано, що викиди можуть провокуватись супутниками з кутом підвищення  $\leq 3^\circ$ , однак можливі випадки, коли у сигналів супутників з більшими кутами візування можуть спостерігатися зниження якості зв'язку, що може призводити до аналогічних помилок. Як наслідок, необхідно постійно контролювати рівень сигналів супутників, щоб уникнути спотворення результатів рішення навігаційної задачі.

У Додатку А наведено методику вимірювання та описані створені вимірювальні комплекси та їх основні характеристики. Для проведення експериментальних робіт було створено вимірювальні комплекси на основі приймачів сигналів ГНСС, реєстрації сигналів метеорологічних супутників NOAA, метеостанції та рефрактометра, які знаходились у місці реєстрації навігаційної інформації. Це дозволило проводити експериментальні дослідження з урахуванням усієї необхідної інформації про метеорологічний стан середовища поширення сигналів у точці вимірювань.

## ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано задачу діагностики атмосферних процесів за допомогою систем глобальної навігації та врахування їх особливостей для підвищення точності вимірюваних координат. В процесі розв'язання цих задач проведено експериментальні дослідження з визначення змін характеристик сигналу протягом року за рахунок сезонних змін метеорологічних параметрів, а також при наявності метеорологічних утворень на трасах поширення сигналів.

**I. Експериментально показано, що річні коливання коефіцієнта заломлення мають суттєво негаусовий характер закону розподілу і запропоновано модель його описання.**

За результатами багаторічних спостережень змін коефіцієнта заломлення, розрахованого за основними метеорологічними параметрами, за даними метеоцентрів отримано статистичну інформацію про його сезонні зміни для різних регіонів України. Установлено, що річні зміни коефіцієнта заломлення тропосфери мають суттєво нестационарний характер. Визначено характерні значення коефіцієнта заломлення для всіх сезонів у різних регіонах України (зима – 310 N од., літо – 350...370 N од.) та показано, що для сезонів характерна суттєва відмінність числових характеристик (середніх значень, дисперсії).

Показано, що математичною моделлю системи, яка описує сезонну поведінку коефіцієнта заломлення, є вкладені напівмарківські процеси. Проведено порівняльний аналіз апроксимації сезонних змін коефіцієнта заломлення за допомогою функцій Гауса та фінітних атомарних функцій Кравченка – Рвачова. На підставі проведеного аналізу встановлено, що для літнього сезону кращі результати дає використання функцій Кравченка – Рвачова, коли спостерігається найбільше розходження експериментальних даних з Гаусовою моделлю.

Запропоновано новий підхід для перевірки гіпотез про закон розподілу випадкової величини. Перевірка гіпотези основана на порівнянні величини розходження між інтегральною функцією експериментальних даних, які перетворені оберненою функцією апроксимаційної моделі, та лінійною функцією. Для оцінки якості апроксимації при використанні різних моделей можна використовувати порівняння дисперсій відхилення експериментальних розподілень за допомогою критерію Фішера. Показано, що функції Кравченка – Рвачова при заданих рівнях значущості коефіцієнта заломлення, отримані за моделлю його оцінювання (окрім літнього сезону), будуть дещо нижчі відносно реальних значень. При цьому функції Гауса практично для всіх сезонів будуть давати завищені щодо реальних значення.

**II. Запропоновано методи діагностики тропосфери за допомогою сигналів навігаційних супутників глобальної навігації.**

На підставі багаторічних досліджень змін сигналів ГНСС під час опадів запропоновано метод визначення наявності дощу на трасах поширення сигналу. Установлено, що збільшення значення псевдовідстаней за наявності дощу на трасі залежить від його інтенсивності і може досягати декількох метрів.

Показано, що висновки про наявність дощу на трасі можна робити за нехарактерними або перевищуючими характерні для добових перепадів змінами висоти та координат. При короткочасних інтенсивних дощах додатковий перепад по висоті може сягати декількох метрів при кодових одночастотних вимірюваннях. Показано, що дані про зміни вимірюваних координат (довготи та широти) можуть використовуватись для оцінювання змін коефіцієнта заломлення навколо опорного пункту.

Запропоновано використання моделі функції відображення тропосферної затримки, яка враховує сферичність тропосфери для більш точного врахування змін тропосферної затримки на малих кутах візування супутників. Показано, що використання запропонованої моделі дозволяє робити приблизне оцінювання рефракційної обстановки на трасі поширення сигналу за допомогою розв'язання оберненої задачі, що забезпечує мінімізацію розходження експериментальних і модельних даних тропосферної затримки.

Установлено, що сонячне затемнення може призводити до викривлення координатної інформації, отриманої системами глобальної супутникової навігації. Показано, що нехарактерні для сусідніх днів зміни координатної інформації складно описати стандартними методами врахування добових флуктуацій за рахунок різної швидкості реакції іоносфери та тропосфери, яка є більш інерційною.

Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість знаходження областей відбиття від підстилаючої поверхні за допомогою аналізу змін сигналів окремих супутників. На основі даних з трьох міст України встановлено, що для територій забудов дисперсія отриманих ГНСС-сигналів в 2–3 рази більша, ніж для рівнинних територій. Показано, що за оцінками частоти флуктуаційних компонент, утворених за рахунок інтерференції прямого та відбитого сигналів, можна виконувати приблизне оцінювання висоти знаходження області відбиття, а за траєкторією супутника – її кутове положення та відстань відносно точки прийому.

### **III. Запропоновано методики корекції отриманої навігаційної інформації для поліпшення точності визначення координат у системах ГНСС.**

Запропоновано та експериментально обґрунтовано інтерполяційну модель введення диференційної корекції. Показано, що стандартна диференційна корекція, яка використовує найближчу базову станцію для корекції координатної інформації, може призводити до збільшення похибки. Експериментально підтверджено, що запропонована модель введення корекції дозволяє знизити похибку вимірювання координат в 1,39 – 4,24 рази, особливо у літній сезон, коли мають місце значно динамічніші порівняно з іншими сезонами зміни коефіцієнта заломлення.

Експериментально підтверджено, що супутники з малими рівнями сигналу та великим рівнем флуктуацій можуть призводити до появи аномально високих похибок вимірювання координат. Установлено, що супутники, які пролітають уздовж горизонту, не впливають на появу викидів, але можливі випадки



зниження рівня сигналу на кутах більше  $3^\circ$ . Показано необхідність постійного відстеження рівнів сигналів для усіх супутників, які беруть участь у розв'язанні навігаційної задачі. Запропоновано методику усунення аномально високих викидів вимірних координат за допомогою фільтрації з додатковим інформаційним параметром в якості першої похідної.

Запропоновано емпіричний коефіцієнт корекції тропосферної затримки. Установлено, що для зими зміщення значень відносно теоретичних оцінок не перевищує 5...10 %, а влітку – 10...25 %. Показано, що введення сезонних та добових корекцій зенітної затримки за допомогою запропонованого підходу дозволяє підвищити точність вимірювання координат.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

1. Simulation of the mapping function for calculation of tropospheric zenith delay / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, A.G. Laush, V.N. Gudkov // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – 73 (5). – P. 413-424.
2. The three-point method of differential correction of coordinates and pseudo-range in GPS / V.F. Kravchenko, A.G. Laush, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, Wang Jianyuan // *(JMSI) Journal of measurement science and instrumentation*. – 2014. – Vol.5, №1. – P. 41-45.
3. Statistical Models of the Troposphere Refractive Index / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // *Universal Journal of Physics and Application*. – 2014. – Vol. 2(4). – P. 206-212.
4. Description and analysis of non-stationary signals by nested semi-Markov processes / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // *(JMSI) Journal of measurement science and instrumentation*. – 2014. – Vol. 5, No. 3. – P. 25-32.
5. Empirical model of correction for zenith tropospheric delay / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, A.G. Laush, V.N. Gudkov // *(JMSI) Journal of measurement science and instrumentation*. – 2014. – Vol. 5, No. 4. – P. 20-28.
6. Интерполяционный метод формирования дифференциальных поправок при определении координат и измерении псевдодальностей в системах глобальной навигации / В.Н. Гудков, Ван Джаньян, А.Г. Лауш, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // *Физические основы приборостроения*. – 2014. – Том 3. №1. – С. 42-57.
7. Usage of global navigation systems for detection of dangerous meteorological phenomena / V.F. Kravchenko, O.V. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov // *(JMSI) Journal of Measurement Science and Instrumentation*. – 2015. – Vol. 6, No. 1. – P. 68-74.
8. Використання випромінювань штучних супутників землі та телевізійних центрів для дослідження атмосферних процесів / О.В. Кривенко, А.Г. Лауш, В.І. Луценко, Д.О. Попов, І.В. Попов, О.В. Соболяк // *Космічна наука і технологія*. – 2015. – Т.21, №3. – С. 83-90.

9. Визначення орієнтації, координат, взаємного положення та параметрів руху об'єктів у космосі з використанням ГНСС-технологій / В.І. Луценко, Д.О. Попов, А.Г. Лауш, В.О. Яценко, О.О. Жаліло, І.В. Діцький, Є.А. Безсонов // *Космічна наука і технологія*. – 2015. – Т.21, №3. – С. 83-90.
10. Луценко В.И. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной и спутниковой системы / В.И. Луценко, Д.О. Попов, И.В. Луценко // *Радиофизика и электроника*. – 2016. – Т. 7 (21), №1. – С. 31-39.
11. The interpolation method of the introduction of differential corrections in the measurement of the coordinates in the GNSS / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, V.N. Gudkov, A.G. Laush, N.X. Anh, Yuanyn, Hoang Hai Son // *Geophysics – Cooperation and sustainable development: International scientific conference*. – 17–21 November: conf. proc. – Vietnam, Hanoi, 2012. – P. 49-53.
12. Modernization of accounting models of zenith tropospheric delays in estimation of GPS coordinate systems / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, N. X. Anh, Hoang Hai Son, Ya.N. Dolzhenko // *Geophysics – Cooperation and sustainable development: International scientific conference*. – 17–21 November: conf. proc. – Vietnam, Hanoi, 2012. – P. 43-48.
13. Описание статистик негауссовых процессов с использованием финитных атомарных функций / В.И.Луценко, И.В.Луценко, Д.О. Попов, Вей Чень // «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП 2013): 4 Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 22–24 травня 2013 р.: зб. праць. – Черкаси, 2013. – С. 24-26.
14. Луценко В.И. Статистические модели коэффициента преломления тропосферы / В.И.Луценко, И.В.Луценко, Д.О. Попов // «Обробка сигналів і негауссівських процесів» (ОСНП 2013): 4 Міжнародна науково-практична конференція пам'яті професора Ю.П. Кунченка, 22–24 травня 2013р.: зб. праць. – Черкаси, 2013. – С. 26-28.
15. Use finite functions Kravchenko-Rvachev to describe the distribution statistics of refractive index / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, Chen Wei, S.A. Masalov // *Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13): International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves*, 23-28 June 2013: conf. proc. – Kharkiv, 2013. – P.614-616.
16. Statistics based on the finite atomic functions Kravchenko-Rvachev and their use for the description of scattered sea signal / V.F. Kravchenko, V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, Yang Ti, S.A. Masalov // *Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'13): International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves*, 23-28 June 2013: conf. proc. – Kharkiv, 2013. – P. 617-619.
17. Интерполяционный метод введения дифференциальных поправок в измерения координат и псевдодальностей в системах глобальной навигации / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов, В.Н. Гудков, А.Г. Лауш // “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2013): 23rd Int.

Crimean Conference, 8-14 September 2013: conf. proc. – Sevastopol, Crimea, 2013. – P. 302-303.

18. Устранение аномально-высоких ошибок определения координат в приемниках глобальных навигационных спутниковых систем / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов, В.Н. Гудков, А.Г. Лауш // “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo’2013): 23rd Int. Crimean Conference, 8-14 September 2013: conf. proc. – Sevastopol, Crimea, 2013. – P. 308-309.
19. Использование излучений ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования окружающей среды / Б.Г. Кутуза, В.Ф. Кравченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов»: XII Всероссийская Открытая конференция, 10–14 ноября 2014 г. – Москва, 2014.
20. Мониторинг атмосферы и поверхности океана при помощи приемников систем глобальной спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС / С.А. Левченко, В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // «Наука и технология как основы модернизации для будущего устойчивого развития (SSF-2014)», 18-21 сентября 2014: сб. трудов. – Минск, Беларусь, 2014. – С. 26-30.
21. Луценко В.И. Влияние метеообразований на изменение координат потребителей в ГНСС / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // 24-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, 7–13 сентября 2014 г.: Материалы конференции. – Севастополь, Крым, 2014. – С. 1125-1126.
22. Луценко В.И. Обнаружение метеорологических образований при помощи систем глобальной навигации / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // «Прикладной радиоэлектроники. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014): 5-ый международный радиоэлектронный форум, 14–17 октября 2014 г.: сб. трудов. – Харьков, 2014. – С. 207-210.
23. Латюк А.Ф. Прием сигналов ГНСС в условиях действия преднамеренных помех / А.Ф. Латюк, А.Г. Лауш, Д.О. Попов // «Прикладной радиоэлектроники. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014): 5-ый международный радиоэлектронный форум, 14–17 октября 2014 г.: сб. трудов. – Харьков, 2014. – С. 211-215.
24. Луценко В.И. Исследование подстилающей поверхности при помощи ГНСС / В.И. Луценко, И.В. Луценко, Д.О. Попов // «Обробка сигналів і негаусівських процесів»: Праці V Міжнародної науково-практичної конференції, 20–22 травня 2015 р.: тези допов. – Черкаси, 2015. – С. 113-115.
25. Луценко В.И. Влияние солнечного затмения 20.03.2015 на характеристики ГНСС сигналов / В.И. Луценко, Д.О. Попов, И.В. Луценко // 25-я международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo’2015), 6–12 сентября 2015 г.: сб. трудов. – Севастополь, Крым, 2015. – С. 1100-1101.

26. Model of mapping function for the calculation of zenith tropospheric delay / V.I. Lutsenko, I.V. Lutsenko, D.O. Popov, A.G. Laush, V.N. Gudkov // "Millimeter and Submillimeter Waves" (MSMW'13): International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, 23-28 June 2013: conf. proc. – Kharkiv, 2013. – P. 349-351.
27. Обнаружение опасных метеорологических явлений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем / В. И. Луценко, И. В. Луценко, Е.В. Кривенко, Д.О. Попов // «Электронные методы исследования окружающего пространства»: Первая украинская конференция, 25-27 сентября 2012г.: сб. тез. докл. – Харьков, 2012. – С. 253-255.

## АНОТАЦІЯ

**Попов Д. О. Дистанційне зондування навколишнього середовища з використанням випромінювань глобальних навігаційних супутникових систем – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2017.

Дисертацію присвячено розв'язанню задачі діагностики атмосфери з використанням випромінювань ШСЗ систем глобальної навігації та врахуванню особливостей поширення сигналів скрізь атмосферу для підвищення точності визначення координат.

Запропоновано модель опису коефіцієнта заломлення тропосфери за допомогою функцій Гауса та атомарних функцій Кравченка – Рвачова. Запропоновано нові методи діагностики метеорологічної обстановки, рефракційного стану тропосфери та підстилаючої поверхні на основі особливостей поведінки навігаційних сигналів. Проаналізовано сезонні та добові зміни вимірюваних координат протягом року та їх зміни під час проходження сонячного затемнення та наявності різних метеорологічних явищ на трасі поширення сигналу. Запропоновано модель функції відображення, яка враховує сферичність тропосфери і дозволяє більш точно описувати реальні значення тропосферної затримки. Запропоновано інтерполяційну методику диференційної корекції координат та псевдовідстаней, яка забезпечує більшу стабільність і точність, ніж стандартний диференційний метод корекції. Запропоновано методики вилучення аномально високих викидів координат на основі фільтрації з додатковим інформаційним каналом першої похідної та вилучення супутників з малим рівнем сигналів із навігаційного рішення. Запропоновано емпіричний коефіцієнт корекції тропосферної затримки для покращення точності визначення координат.

**Ключові слова:** поширення радіохвиль, тропосферна рефракція, коефіцієнт заломлення, добова і сезонна змінність, глобальна навігаційна супутникова система, сонячне затемнення, підстилаюча поверхня.

## АННОТАЦИЯ

Попов Д. О. **Дистанционное зондирование окружающей среды с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2017.

Диссертация посвящена решению задачи диагностики атмосферы с использованием излучений ИСЗ систем глобальной навигации и учета особенностей распространения сигналов через атмосферу для повышения точности определения координат.

Предложена модель описания коэффициента преломления тропосферы с помощью функций Гаусса и атомарных функций Кравченко – Рвачова, а также показана возможность учета нестационарности поведения коэффициента преломления путем отдельного описания его статистических характеристик этими функциями на протяжении сезонов. Предложен новый подход к проверке гипотез о законах распределения случайной величины. Предложены новые методы диагностики метеорологической обстановки, рефракционного состояния тропосферы и подстилающей поверхности на основе особенностей поведения навигационных сигналов. Проанализированы сезонные и суточные изменения измеряемых координат в течение года и их изменение при прохождении солнечного затмения и наличия различных метеорологических явлений на трассе распространения сигнала (дождей, тумана, снега), а также проведено сопоставление с изменениями метеорологических параметров непосредственно в месте проведения навигационных измерений. Предложена модель функции отображения, которая учитывает сферичность тропосферы и позволяет более точно описывать реальные значения тропосферной задержки, что может использоваться для решения обратной задачи по определению градиента коэффициента преломления тропосферы путем минимизации расхождений между реальными задержками и моделью. Предложена интерполяционная методика дифференциальной коррекции координат и псевдодальностей, которая обеспечивает большую стабильность и точность, чем стандартный дифференциальный метод коррекции, основанный на выборе ближайшей опорной станции, опираясь на предположение, что условия распространения навигационных сигналов будут максимально схожи. Предложены методики устранения аномально высоких выбросов координат на основе фильтрации с дополнительным информационным каналом первой производной и изъятия спутников с малым уровнем сигналов из навигационного решения. Предложен эмпирический коэффициент коррекции тропосферной задержки для улучшения точности определения координат.

Ключевые слова: распространение радиоволн, тропосферная рефракция, коэффициент преломления, суточная и сезонная изменчивость, глобальная навигационная спутниковая система, солнечное затмение, подстилающая поверхность.

## ABSTRACT

Popov D. O. **Remote sensing of environment using radiation of global navigation satellite systems.**

Dissertation for competition of scientific degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences on specialty 01.04.03 – Radiophysics. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2017.

Dissertation is devoted to solving the problem of atmosphere diagnosis using radiation of the global navigation satellites and accounting characteristics of signal propagation through the atmosphere to increase the accuracy of the coordinates determining.

The model that describing the troposphere refractive index using Gaussian function and atomic Kravchenko – Rvachev function is proposed. New methods for diagnosing the meteorological situation, the refractive state of the troposphere and underlying surface based on the behavior of navigation signals are proposed. The seasonal and diurnal variations of measured coordinates over the year and their changing during the passage of the solar eclipse and the availability of various meteorological phenomena on the signal propagation path were analyzed. The model of the mapping function that takes into account the sphericity of the troposphere and allows more accurate describing of the actual values for the tropospheric delay is proposed. Interpolation methods of differential correction of coordinates and pseudoranges that provides greater stability and accuracy than the standard differential correction method is proposed. The methods for eliminating abnormally high emissions of coordinates based on filtration with an additional information channel of the first derivative and removal of satellites with low level signals from the navigation solution are proposed. The empirical correction coefficient for tropospheric delay that improves the accuracy of the coordinate measurements is proposed.

Keywords: radiowave propagation, tropospheric refraction, refractive index, daily and seasonal variability, global navigation satellite system, solar eclipse, underlying surface.