

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**РАДІОЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНИХ  
АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**Частина 3  
ВИКОРИСТАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ  
СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2023

УДК 621.396.9:528.8(075.8)  
P15

Колектив авторів:  
М. Ф. Бабаков, В. І. Луценко, І. В. Луценко, О. В. Соболяк

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук Ю. Ф. Логвінов,  
канд. фіз.-мат. наук О. В. Кривенко

**Радіоелектронні засоби дистанційних аерокосмічних досліджень**  
P15 [Текст] : навч. посіб. У 3 ч. Ч. 3. Використання випромінювання  
глобальних навігаційних супутникових систем для моніторингу  
навколишнього середовища / М. Ф. Бабаков, В. І. Луценко,  
І. В. Луценко, О. В. Соболяк. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т  
ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2023. – 112 с.

ISBN 978-966-662-916-9

Розглянуто результати експериментальних досліджень із використанням для моніторингу навколишнього середовища випромінювань глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), які було створено для вирішення завдань радіонавігації. Запропоновано оригінальні методики, що дають змогу вивчати рефракційні властивості тропосфери, їх просторову неоднорідність, виявляти зони небезпечних метеорологічних явищ і визначати вплив Сонця на процеси в атмосфері.

Для магістрів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» під час виконання практичних робіт і самопідготовки з дисципліни «Радіоелектронні засоби дистанційних аерокосмічних досліджень», а також дипломних проєктів. Для аспірантів, які розробляють радіоелектронні засоби й методи дистанційних аерокосмічних досліджень.

Іл. 69. Табл. 19. Бібліогр.: 10 назв

**УДК 621.396.9:528.8(075.8)**

© Колектив авторів, 2023  
© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2023

ISBN 978-966-662-916-9

## ПЕРЕДМОВА

Предметом вивчення навчальної дисципліни «Радіоелектронні засоби дистанційних аерокосмічних досліджень» є радіофізичні характеристики об'єктів зондування в навколишньому середовищі, математичні моделі, що використовуються для опису процесів відбиття радіохвиль від природних та антропогенних об'єктів, моделі й методи комп'ютерного моделювання радіофізичних процесів і сигналів, а також оброблення даних експериментів і сигналів у радіоелектронній апаратурі для дистанційних аерокосмічних досліджень.

Навчальна дисципліна базується на матеріалі попередніх навчальних дисциплін «Вища математика», «Спеціальні розділи вищої математики», «Основи програмування», «Основи теорії сигналів», «Статистичні методи оброблення сигналів», є підґрунтям професійної підготовки магістра спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» і забезпечує виконання дипломного проєкту, а також подальше навчання в аспірантурі.

Навчальний посібник з дисципліни складається з трьох частин: у першій частині розглянуто радіофізичні властивості навколишнього середовища; у другій – моделі нестационарних негавсових відбитих сигналів, методи їх аналізу, а також засоби дистанційного зондування атмосфери й підстильних поверхонь з використанням аерокосмічних носіїв; у третій – використання радіовипромінювання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) для моніторингу навколишнього середовища та вирішення завдань радіолокації.

Основою матеріалу частини 3 посібника є оригінальні результати експериментальних досліджень із використанням для моніторингу навколишнього середовища випромінювань глобальних навігаційних супутникових систем, які було створено для вирішення завдань радіонавігації, однак за допомогою запропонованих оригінальних методик дають змогу вивчати рефракційні властивості тропосфери, їх просторову неоднорідність, виявляти зони небезпечних для людини метеорологічних явищ (зливи, хуртовини тощо) і визначати вплив Сонця на процеси в атмосфері. Описані особливості побудови ГНСС (структури сигналів та апаратури приймачів споживача) дають змогу використовувати їх не тільки за основним призначенням, тобто для вирішення навігаційних завдань, але й для моніторингу навколишнього середовища. Ці результати можуть бути використані не тільки студентами під час навчального процесу, але й спеціалістами та науковцями під час розроблення нових методів і засобів дистанційних аерокосмічних досліджень. Матеріал кожного з розділів частини 3 посібника викладено таким чином, що є можливим його вивчення незалежно від інших.

# Розділ 1. АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ ГНСС СИГНАЛІВ

## 1.1. Супутникові системи навігації

Супутникові системи навігації (англ. Global Navigation Satellite System (GNSS)) – системи, призначені для визначення місця розташування (географічних координат) наземних, водних і повітряних об'єктів. Супутникові системи навігації дають змогу отримати швидкість і напрямок руху приймача сигналу, крім того, їх можна використовувати для отримання точного часу. Такі системи складаються з космічного устаткування й наземного сегмента (систем керування). На цей час тільки дві супутникові системи забезпечують повне і безперервне покриття земної кулі – GPS і ГЛОНАСС.

*Принцип роботи* супутникових систем навігації базується на вимірюванні відстані від антени на об'єкті (координати якого необхідно отримати) до супутників, положення яких є відомим з великою точністю. Таблицю положень усіх супутників називають альманахом, який повинен мати у своєму розпорядженні будь-який супутниковий приймач до початку вимірювань. Зазвичай альманах зберігається у пам'яті приймача з часу останнього вимкнення, і, якщо він не застарів, то приймач миттєво використовує його. Кожен супутник передає в своєму сигналі весь альманах. Таким чином, знаючи відстані до декількох супутників системи, за допомогою звичайних геометричних побудов і з використанням альманаху можна обчислити положення об'єкта в просторі.

Метод вимірювання відстані від супутника до антени приймача ґрунтується на тому, що швидкість поширення радіохвиль передбачається відомою (насправді це питання вкрай складне, на швидкість впливає безліч слабо передбачуваних факторів, таких як характеристики йоносферного шару та ін.). Для вимірювання часу поширюваного радіосигналу кожен супутник навігаційної системи випромінює сигнали точного часу за допомогою атомного годинника, точно синхронізованого з системним часом. Під час роботи супутникового приймача його годинник синхронізуються з системним часом, і під час подальшого приймання сигналів обчислюється затримка між часом випромінювань, що містяться в самому сигналі, і часом приймання сигналу. Маючи в своєму розпорядженні цю інформацію, навігаційний приймач обчислює координати антени. Усі інші параметри руху (швидкість, курс, пройденої відстані) обчислюються на

основі вимірювання часу, який об'єкт витратив на переміщення між двома або більше точками з певними координатами.

## **1.2. Огляд супутникових систем навігації**

*Історичні аспекти.* Transit – перша в світі супутникова навігаційна система, США, 1960–1996 рр. «Циклон» – перша супутникова система навігації в СРСР [1], 1976-2010 рр. «Цикада» – низькоорбітальна космічна навігаційна система (КНС) – цивільний варіант морської супутникової навігаційної системи «Циклон», аналог Transit, 1976-2008 рр. «Парус» – низькоорбітальна КНС (саме під такою назвою було взято на озброєння 1976 року) – серія російських (радянських) навігаційних супутників військового призначення.

*Діючі супутникові системи.* GPS – система, що належить міністерству оборони США. Цей факт, на думку деяких держав, є її головним недоліком. Пристрої, що підтримують навігацію за GPS, є найпоширенішими в світі. Система також відома під більш ранньою назвою NAVSTAR.

ГЛОНАСС – система, що належить міністерству оборони РФ. Розроблення системи офіційно почалося 1976 року, повне розгортання системи завершилося 1995 року, після 1996 року супутникове угруповання скорочувалося і до 2002 року занепало. Було відновлено до кінця 2011 року. Сьогодні на орбіті знаходиться 26 супутників, з яких 24 використовуються за призначенням [2]. До 2025 року передбачається глибока модернізація системи.

DORIS – французька навігаційна система. Принцип роботи системи пов'язаний із застосуванням ефекту Доплера. На відміну від інших супутникових навігаційних систем базується на системі стаціонарних наземних передавачів, приймачі розташовуються на супутниках. Після визначення точного положення супутника система може визначити точні координати й висоту маяка на поверхні Землі. Спочатку призначалася для спостереження за океанами і дрейфом материків.

*Будуються та розгортаються такі глобальні супутникові системи.* BeiDou (див. також Compass) – місцева супутникова система навігації, що розгортається Китаєм, базується на геостаціонарних супутниках. Станом на 2015 рік система мала 14 працюючих супутників: 5 – на геостаціонарних орбітах (GEO), 5 – на похилих геосинхронних (IGSO), 4 – на середніх кругових орбітах (MEO). Реалізація програми почалася 2000 року. Перший супутник вийшов на орбіту 2007 року. У травні 2016 року запущено 21-й космічний апарат. З 2020 року, коли кількість супутників збільшилася до 35, система «Бейдоу» працює як глобальна. На сьогодні орбітальне угруповання BeiDou складається з 49 супутників, із них 8 – на геостаціонарній орбіті, 12 – на похилих геосинхронних орбітах і 29 – на середніх кругових орбітах. 44 супутники використовуються за цільовим призначенням і 5 супутників не використовуються за цільовим призначенням.

Galileo – європейська система, що знаходиться на етапі створення супутникового угруповання. Станом на листопад 2016 року на орбіті знаходиться 16 супутників, 9 діючих і 7, що перебувають у стані тестування. Повністю розгорнуте супутникове угруповання з 2020 року [3].

*Діючі регіональні супутникові системи.* IRNSS – індійська навігаційна супутникова система у стані розроблення. Передбачається її використання тільки в Індії. Перший супутник запущено 2008 року. Загальна кількість супутників системи IRNSS – 7.

QZSS – японська квазізенітна супутникова система (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS), що була задумана 2002 року як комерційна система з набором послуг для рухомого зв'язку, мовлення та широкого використання для навігації в Японії та сусідніх районах Південно-Східної Азії. Перший QZSS-супутник запущено 2010 року. Передбачається створення угруповання з трьох супутників, що знаходяться на геосинхронних орбітах, а також власної системи диференціальної корекції.

### **1.3. Основні елементи систем**

*Основні елементи супутникової системи навігації:*

– орбітальне угруповання супутників, що випромінюють спеціальні радіосигнали;

– наземна система керування й контролю (наземний сегмент), що складається з блоків вимірювання поточного положення супутників і передавання на них отриманої інформації для коригування інформації про орбіти;

– апаратура користувача супутникових навігаційних систем («супутникові навігатори»), яка використовується для визначення координат;

– опціонально: наземна система радіомаяків, що дає змогу значно підвищити точність визначення координат;

– опціонально: інформаційна радіосистема для передавання користувачам поправок, що дає змогу значно підвищити точність визначення координат.

### **Контрольні запитання**

1. Розкажіть про принцип роботи ГНСС. Поняття «альманах».
2. Перелічіть сучасні супутникові системи навігації.
3. Опишіть основні елементи ГНСС та їх призначення.

## Розділ 2. ОСНОВНІ СИСТЕМИ ГНСС

### 2.1. Global Positioning System

#### 2.1.1. Принцип дії та основні характеристики

GPS (англ. Global Positioning System (GPS) – система глобального позиціонування) – супутникова система навігації, що забезпечує вимірювання відстані, часу й визначає місце розташування у всесвітній системі координат WGS 84 (табл. 2.1, 2.2). Дає змогу майже за будь-якої погоди визначати місце розташування в будь-якому місці Землі (виключаючи приполярні області) і навколоземного космічного простору. Система розроблена, реалізована й експлуатується міністерством оборони США, при цьому нині є доступною для використання в цивільних цілях, потребується лише навігатор або інший апарат (наприклад, смартфон) з приймачем GPS.

Таблиця 2.1

Основні характеристики системи GPS

|                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| Країна походження  | США                              |
| Оператор           | AFSPC                            |
| Застосування       | Військове, цивільне              |
| Статус             | Експлуатація                     |
| Покриття           | Глобальне                        |
| Точність           | ≤7,8 м (типова, близько 0,715 м) |
| Сузір'я супутників |                                  |
| Потрібно           | 24                               |
| На орбіті          | 32                               |
| Перший запуск      | Лютий 1978 року                  |
| Усього запусків    | 72                               |
| Орбіта             |                                  |
| Тип                | Середньовисока                   |
| Висота             | 20180 км                         |

Основний принцип використання системи – визначення місця розташування користувача апаратури ГНСС шляхом вимірювання моментів часу приймання синхронізованого сигналу від навігаційних супутників антеною користувача. Для визначення тривимірних координат GPS-приймачу потрібно мати чотири рівняння: відстань дорівнює добутку швидкості світла на різницю моментів приймання сигналу користувачем і моменту його синхронного випромінювання від супутників.

## Технічна реалізація

| Супутники |                       |                    |         |           |           |             |                |           |                      |
|-----------|-----------------------|--------------------|---------|-----------|-----------|-------------|----------------|-----------|----------------------|
| Блок      | Період запусків, роки | Запуски супутників |         |           |           |             | Працюють зараз | У резерві | На техобслуговуванні |
|           |                       | Усього             | Успішно | Неуспішно | Готується | Заплановано |                |           |                      |
| I         | 1978–1985             | 11                 | 10      | 1         | 0         | 0           | 0              | 0         | 0                    |
| II        | 1989–1990             | 9                  | 9       | 0         | 0         | 0           | 0              | 0         | 0                    |
| IIA       | 1990–1997             | 19                 | 19      | 0         | 0         | 0           | 0              | 7         | 0                    |
| IIR       | 1997–2004             | 13                 | 12      | 1         | 0         | 0           | 10             | 0         | 0                    |
| IIR-M     | 2005–2009             | 8                  | 8       | 0         | 0         | 0           | 7              | 0         | 1                    |
| IIF       | 2010–2016             | 12                 | 12      | 0         | 0         | 0           | 12             | 0         | 0                    |
| III       | 2018–2023             | 5                  | 5       | 0         | 0         | 8           | 5              | 0         | 0                    |
| IIIF      | 2025–2034             | 0                  | 0       | 0         | 0         | 22          | 0              | 0         | 0                    |
| Усього    |                       | 74                 | 72      | 2         | 0         | 30          | 34             | 7         | 1                    |

GPS складається з трьох основних сегментів: космічного, керувального та користувацького. Супутники GPS транслюють сигнал із космосу, і всі приймачі GPS використовують цей сигнал для обчислення свого положення в просторі за трьома координатами в режимі реального часу.

Космічний сегмент складається з 32 супутників, що обертаються на середній орбіті Землі.

Станом на 07 квітня 2020 року використовується за цільовим призначенням 31 космічний апарат (КА). На етапі введення в систему немає жодного КА, виведено на техобслуговування один КА.

Станом на 05 липня 2021 року 32 КА використовуються за цільовим призначенням.

Керувальний сегмент являє собою головну керувальну станцію та кілька додаткових станцій [11], а також наземні антени та станції моніторингу, ресурси деяких зі згаданих є спільними з іншими проектами.

Користувацький сегмент представлено приймачами GPS, які знаходяться у веденні державних інститутів, і сотнями мільйонів приймальних пристроїв, власниками яких є звичайні користувачі.



## 2.1.2. Космічні супутники

Орбіти супутників системи GPS. Приклад видимості супутників із однієї з точок на Землі показано на рис. 2.1. Visible sat – кількість супутників, які бачить спостерігач над горизонтом в ідеальних умовах (чисте поле).

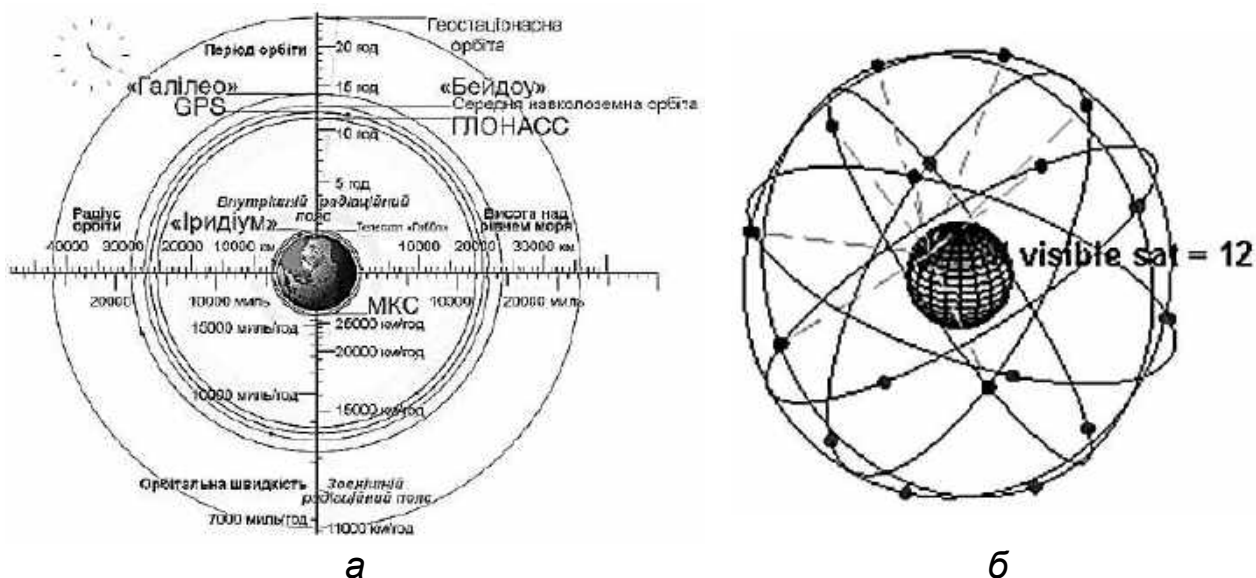


Рис. 2.1. Орбіти супутників різних ГНСС (а) і їх порівняння (б)

Супутникове угруповання системи NAVSTAR обертається навколо Землі по кругових орбітах з однаковими висотою й періодом обертання всіх супутників. Кругова орбіта з висотою близько 20200 км (радіус орбіти близько 26600 км) є орбітою добової кратності з періодом обертання 11 год 58 хв; таким чином, супутник здійснює два витки навколо Землі за одну зоряну добу (23 год 56 хв). Тобто час між двома послідовними проходженнями підсупутникової точки через одну й ту ж точку земної поверхні приблизно дорівнює 23 год 56 хв.

Нахил орбіти ( $55^\circ$ ) є також загальним для всіх супутників системи. Єдиною відмінністю орбіт супутників є довгота висхідного вузла, або точка, у якій площина орбіти супутника перетинає екватор: ці точки відстоять одна від одної приблизно на  $60^\circ$ . Таким чином, незважаючи на однакові (крім довготи висхідного вузла) параметри орбіт, супутники обертаються навколо Землі в шести різних площинах, по чотири апарати в кожній.

## 2.1.3. Радіочастотні характеристики

Супутники випромінюють відкриті для використання сигнали в діапазонах  $L1 = 1575,42$  МГц і  $L2 = 1227,60$  МГц (починаючи з блока IIR-M), а моделі IIF випромінюють також на частоті  $L5 = 1176,45$  МГц. Ці частоти є відповідно 154-ю, 120-ю і 115-ю гармоніками фундаментальної частоти 10,23 МГц, що генерується бортовим атомним годинником супутника з добовою нестабільністю не гірше 10...13; при цьому частота атомного годинника зміщується до значення 10,229 999 995 43 МГц для компенсації

релятивістського зсуву, обумовленого рухом супутника відносно наземного спостерігача й різницею гравітаційних потенціалів супутника і спостерігача на поверхні Землі. Навігаційна інформація може бути прийнята антеною (зазвичай в умовах прямої видимості супутників) і оброблена за допомогою GPS-приймача.

Сигнал із кодом стандартної точності (C/A-код – модуляція BPSK), що передається в діапазоні L1 (і сигнал L2C (модуляція BPSK) у діапазоні L2, починаючи з апаратів IIR-M), поширюється без обмежень на використання. Спочатку штучне загрублення сигналу (режим селективного доступу – S/A), що використовується на L1, з травня 2000 року було відключено. З 2007 року США остаточно відмовилися від методик штучного загрублення. Із запуском апаратів блока III планується введення нового сигналу L1C (модуляція BOC) у діапазоні L1. Він матиме зворотну сумісність, покращену можливість простежування шляху і буде більшою мірою сумісним із сигналами L1 європейської системи супутникового позиціонування Galileo.

Для військових користувачів додатково є доступними сигнали в діапазонах L1/L2, модульовані завадостійким криптостійким P(Y)-кодом (модуляція BPSK). Починаючи з апаратів IIR-M введено в експлуатацію новий M-код (використовується модуляція BOC). Використання M-коду дає змогу забезпечити функціонування системи в межах концепції Navwar (навігаційна війна). M-код передається на наявних частотах L1 і L2. Цей сигнал має підвищену стійкість до завад, і його достатньо для визначення точних координат (у випадку з P-кодом було необхідне отримання й коду C/A). Ще однією особливістю M-коду стане можливість його передавання для конкретної області діаметром кілька сотень кілометрів, де потужність сигналу буде вищою на 20 дБ. Звичайний сигнал M є доступним у супутниках IIR-M, а вузькоспрямований буде доступним лише за допомогою супутників GPS-III.

Із запуском супутника блока IIF введено нову частоту L5 (1176,45 МГц). Цей сигнал також називають safety of life (охорона життя людини). Сигнал на частоті L5 є потужнішим на 3 дБ, ніж цивільний сигнал, і має смугу пропускання, у 10 разів ширшу. Сигнал зможуть використовувати в критичних ситуаціях, пов'язаних із загрозою життю людини. Повноцінно сигнал використовується після 2014 року.

Сигнали модулюються псевдовипадковими послідовностями (PRN – Pseudorandom Noise) двох типів: C/A-код та P-код. C/A (Clear access) – загальнодоступний код – є PRN з періодом повторення 1023 цикли й частотою проходження імпульсів 1,023 МГц. Саме з цим кодом працюють усі цивільні GPS-приймачі. P (Protected/precise) – код, що використовується в закритих для загального користування системах, період його повторення становить 21014 циклів. Сигнали, модульовані P-кодом, передаються на двох частотах: L1 = 1575,42 МГц і L2 = 1227,6 МГц. C/A-код передається лише на частоті L1. Несна, крім PRN-кодів, модулюється також навігаційним повідомленням. Загальні характеристики різних типів КА системи GPS наведено в табл. 2.3.

## Загальні характеристики системи GPS

| Характеристика   | Тип супутника    |                  |                  |                          |                                  |
|--|------------------|------------------|------------------|--------------------------|----------------------------------|
|  | GPS-II           | GPS-IIA          | GPS-IIR          | GPS-IIRM                 | GPS-IIF                          |
| Маса, кг   | 885              | 1500             | 2000             | 2000                     | 2170                             |
| Термін життя, роки   | 7,5              | 7,5              | 10               | 10                       | 15                               |
| Еталон бортового часу  | Cs               | Cs               | Rb               | Rb                       | Rb+Cs                            |
| Міжсупутниковий зв'язок  | -                | +                | +                | +                        | +                                |
| Автономна робота, дні  | 14               | 180              | 180              | 180                      | >60                              |
| Антирадіаційний захист   | -                | -                | +                | +                        | +                                |
| Антенa   | -                | -                | Поліпшена        | Поліпшена                | Поліпшена                        |
| Можливість настроювання на орбіті та потужність бортового передавача | +                | +                | ++               | +++                      | ++++                             |
| Навігаційний сигнал  | L1:C/A+P<br>L2:P | L1:C/A+P<br>L2:P | L1:C/A+P<br>L2:P | L1:C/A+P+M<br>L2:C/A+P+M | L1:C/A+P+M<br>L2:C/A+P+M<br>L5:C |

24 супутники забезпечують повну роботоздатність системи в будь-якій точці земної кулі, але не завжди можуть забезпечити надійне приймання та точний розрахунок позиції. Тому для підвищення точності позиціонування та забезпечення резерву на випадок збоїв загальна кількість супутників на орбіті підтримується в більшій кількості (32 апарати з вересня 2018 року).

#### 2.1.4. Наземний сегмент супутникової системи навігації

Стеження за орбітальними апаратами здійснюється за допомогою головної контрольної станції та 10 станцій стеження. Головна станція розташована на авіабазі ВПС США «Фалькон», штат Колорадо. Інші станції стеження розташовані на американських військових базах у Колорадо-Спрінгс, на островах Гаваї, Вознесіння, Дієго-Гарсія, Кваджелейн. Станції

на островах Вознесіння, Дієго-Гарсія, Кваджелейн здатні посилати на супутники коригувальні дані як радіосигнали з частотою 2000-4000 МГц. Супутники останнього покоління розподіляють дані серед інших супутників.

### 2.1.5. Застосування GPS

Незважаючи на те, що спочатку проєкт GPS був спрямований на військову мету, сьогодні GPS широко використовуються в цивільних цілях. GPS-приймачі продають у багатьох магазинах електроніки, їх вбудовують у мобільні телефони, смартфони, наручні електронні годинники, кишенькові портативні комп'ютери (КПК) та онбордери. Користувачам також пропонуються різні пристрої та програмні продукти, що дають змогу бачити своє місцезнаходження на електронній карті, можуть прокладати маршрути з урахуванням дорожніх знаків, дозволених поворотів і навіть заторів, шукати на карті конкретні будинки та вулиці, пам'ятки, кафе, лікарні, автозаправки та інші об'єкти інфраструктури.

Області застосування GPS:

- *Геодезія*: за допомогою GPS визначаються точні координати точок і межі земельних ділянок.
  - *Картографія*: GPS використовується в цивільній і військовій картографії.
  - *Навігація*: із застосуванням GPS здійснюється як морська, так і дорожня навігація.
  - *Супутниковий моніторинг транспорту*: за допомогою GPS ведеться спостереження за положенням і швидкістю автомобілів, здійснюється контроль їх руху.
  - *Стільниковий зв'язок*: перші мобільні телефони з GPS з'явилися в 90-х роках. У деяких країнах, наприклад США, GPS використовується для оперативного визначення місцезнаходження людини, що телефонує за номером екстреної допомоги 911. У Росії 2010 року розпочато реалізацію аналогічного проєкту ЕРА-ГЛОНАСС.
  - *Тектоніка, тектоніка плит*: за допомогою GPS ведеться спостереження за рухами та коливаннями плит.
  - *Активний відпочинок*: є різні ігри, де застосовується GPS, наприклад геокешинг та ін.
  - *Геотеґінг*: інформація, наприклад фотографії, «прив'язується» до координат завдяки вбудованим або зовнішнім GPS-приймачам.
- Висловлювалися пропозиції щодо інтеграції систем Iridium та GPS.

### 2.1.6. Точність

Складники, які впливають на похибку одного супутника при вимірюванні псевдодальності, наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

## Характеристики похибок у системі GPS

| Джерело похибки                                 | Середньоквадратичне значення похибки, м |
|---|---|
| Нестабільність роботи генератора                | 6,5                                     |
| Затримка у бортовій апаратурі                   | 1,0                                     |
| Невизначеність просторового положення супутника | 2,0                                     |
| Інші похибки космічного сегмента                | 1,0                                     |
| Неточність ефемерид                             | 8,2                                     |
| Інші похибки наземного сегмента                 | 1,8                                     |
| Іоносферна затримка                             | 4,5                                     |
| Тропосферна затримка                            | 3,9                                     |
| Шумова похибка приймача                         | 2,9                                     |
| Багатопроменевість                              | 2,4                                     |
| Інші помилки сегмента користувача               | 1,0                                     |
| Сумарна похибка                                 | 13,1                                    |

Сумарна похибка при цьому не дорівнює сумі складових, а складається квадратично, оскільки складові похибки вважаються незалежними.

Коефіцієнт кореляції похибок двох приймачів GPS (при роботі в кодовому режимі) становить 0,15...0,4 залежно від співвідношення сигнал/шум. Чим більше співвідношення сигнал/шум, тим більша кореляція. При затіненні частини супутників і перевідбитті сигналу кореляція може зменшуватися до нуля і навіть до від'ємних величин. Також коефіцієнт кореляції похибок залежить від геометричного фактора. При геометричному факторі PDOP < 1,5 кореляція може набирати значення 0,7. Оскільки похибка GPS складається з багатьох складових, її можна подати у вигляді нормального білого шуму. За формою розподілу похибка є сумою нормальної похибки, узятій з коефіцієнтом 0,6...0,8, і похибки, що має розподіл Лапласа з коефіцієнтом 0,2...0,4. Автокореляція сумарної похибки GPS знижується до 0,5 протягом приблизно 10 с.

Типова точність сучасних GPS-приймачів у горизонтальній площині становить приблизно 6...8 м при хорошій видимості супутників і використанні алгоритмів корекції. На території США, Канади, Японії, КНР, Європейського Союзу та Індії є станції WAAS, EGNOS, MSAS тощо. При використанні більш складних диференціальних режимів точність визначення координат можна довести до 10 см. Точність будь-якої СНР залежить від відкритості простору, від висоти використовуваних супутників над горизонтом.

Починаючи з 2010 року, запускаються космічні супутники версії GPS IIF, які забезпечують більш високу точність визначення координат. Якщо апарати GPS IIA/IIR/IIR-M мають похибку 6 м, то за допомогою нових супутників можна визначати місцезнаходження з похибкою не більше 60...90 см. Підвищена точність супутників GPS нового покоління стала можливою завдяки використанню точніших атомних годинників. Оскільки супутники переміщуються зі швидкістю близько 14 000 км/год (3,874 км/с) (колова швидкість на висоті 20200 км), підвищення точності часу навіть у шостому знаку є важливим для трилатерації.

Спочатку планувалося запустити 33 супутники нового покоління, але через технічні проблеми початок запуску перенесли з 2006 року на 2010 рік, а кількість супутників зменшили з 33 до 12. На вересень 2018 року на орбіту виведено всі 12 супутників з IIF-1 (запущено 28 травня 2010 року), GPS IIF-2 (запущено 16 липня 2011 року), GPS IIF-3 (запущено 4 жовтня 2012 року), GPS IIF-4 (запущено 15 травня 2013 року), GPS IIF-5 (запущено 21 лютого 2014 року), GPS IIF-6 (запущено 17 травня 2014 року), GPS IIF-7 (запущено 2 серпня 2014 року), GPS IIF-8 (запущено 29 жовтня 2014 року), GPS IIF-9 (запущено 25 березня 2015 року), GPS IIF-10 (запущено 15 липня 2015 року), GPS IIF-11 (запущено 30 жовтня 2015 року), GPS IIF-12 (запущено 5 лютого 2016 року).

Однак навіть точності 10 см недостатньо для багатьох завдань геодезії, зокрема, для прив'язки до місцевості меж суміжних земельних ділянок. При помилці 10 см площа ділянки 600 м<sup>2</sup> може зменшитися або збільшитися на 10 м<sup>2</sup>. Сьогодні для геодезичних робіт все частіше застосовують GPS-приймачі, що працюють у режимі RTK. У такому режимі приймач отримує сигнал як із супутників, так і з наземних базових станцій. Режим RTK забезпечує в реальному часі точність близько 1 см у плані та 2 см за висотою.

### *2.1.7. Недоліки*

Загальним недоліком використання будь-якої радіонавігаційної системи є те, що за певних умов сигнал може не надійти до приймача або надійти зі значними спотвореннями або затримками. Наприклад, практично неможливо визначити своє точне місцезнаходження вглибині квартири всередині залізобетонної будівлі, у підвалі чи тунелі навіть професійними геодезичними приймачами. Оскільки робоча частота GPS знаходиться в дециметровому діапазоні радіохвиль, рівень сигналу від супутників може серйозно знизитися під щільним листям дерев або через велику хмарність. Нормальному прийманню сигналів GPS можуть перешкоджати завади від багатьох наземних радіоджерел, а також (у поодиноких випадках) від магнітних бур або навмисно створюваних «глушилками» (цей спосіб боротьби з супутниковими автосигналізаціями часто використовують викрадачі). Постановка перешкод приймачам GPS-сигналів ефективно використовувалася для боротьби з засобами наведення крилатих ракет під час операцій США та Великої Британії

в Іраку, а також операції «Вирішальна сила» НАТО в Союзній Республіці Югославії. Це призводило до самоліквідації крилатих ракет, а також до їх нештатного польоту несанкціонованою траєкторією. Для більш ефективного виконання завдання супутникової навігації в складних перешкодових умовах у GPS-системі застосовуються цифрові решітки антени, що забезпечують формування «нулів» у діаграмі спрямованості антенної системи в напрямках на джерела активних завад.

Невисокий нахил орбіт GPS (приблизно 55°) значно погіршує точність у приполярних районах Землі, оскільки супутники GPS невисоко піднімаються над горизонтом, унаслідок чого на промені зору знаходиться більша повітряна маса, а також можливі об'єкти поблизу горизонту (будинки, гори тощо). Похибки у визначенні псевдодальності, що вносяться іоносферою і тропосферою, для супутника в зеніті становлять 1 і 2,3 м відповідно, тоді як ці величини для надгоризонтного супутника можуть становити 100 і 10 м відповідно.

GPS реалізована й експлуатується міністерством оборони США, і тому отримання іншими користувачами точного сигналу GPS повністю залежить від цього органу.

## 2.2. Глобальна навігаційна супутникова система ГЛОНАСС

Глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС) – російська супутникова система навігації, одна із двох систем глобальної супутникової навігації, що першими були розгорнуті повністю і функціонують сьогодні (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

### Характеристики системи ГЛОНАСС

|                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| Країна походження  | Росія                    |
| Оператор           | «Роскосмос»              |
| Застосування       | Військове, цивільне      |
| Статус             | Експлуатація             |
| Покриття           | Глобальне                |
| Точність           | 2,8 м                    |
| Сузір'я супутників |                          |
| Потрібно           | 24                       |
| На орбіті          | 26 (24 використовується) |
| Перший запуск      | 12 жовтня 1982 року      |
| Останній запуск    | 3 листопада 2018 року    |
| Усього запусків    | 133 КА                   |
| Орбіта             |                          |
| Тип                | Середньовисока кругла    |
| Висота             | 19400 км                 |

Систему ГЛОНАСС, що мала спочатку військове призначення, було запущено одночасно з системою попередження про ракетний напад (СПРН) 1982 року для оперативного навігаційно-часового забезпечення необмеженої кількості користувачів наземного, морського, повітряного й космічного базування, наприклад, пасивних метео-РЛС типу РАЗК «Положення-2». Додатково система транслює цивільні сигнали, доступні в будь-якій точці земної кулі, надаючи навігаційні послуги російським та іноземним користувачам на безоплатній основі та без обмежень.

Основою системи є 24 супутники, що рухаються над поверхнею Землі в трьох орбітальних площинах з нахилом орбітальних площин  $64,8^\circ$  і висотою орбіт 19 100 км. Принцип вимірювання є аналогічним американській системі навігації NAVSTAR GPS. Основна відмінність від системи GPS полягає в тому, що супутники ГЛОНАСС у своєму орбітальному русі не мають резонансу (синхронності) з обертанням Землі, завдяки чому вони мають більшу стабільність. Таким чином, угруповання космічних апаратів (КА) ГЛОНАСС не потребує додаткових коригувань протягом усього терміну активного існування. Проте термін експлуатації супутників ГЛОНАСС є значно меншим.

Нині проєкт ГЛОНАСС розвивають «Роскосмос», АТ «Інформаційні супутникові системи» імені академіка М. Ф. Решетньова та АТ «Російські космічні системи». Для забезпечення комерціалізації й масового впровадження технологій ГЛОНАСС у Росії і за кордоном Постановою уряду РФ у липні 2009 року було створено Федеральний мережний оператор у сфері навігаційної діяльності, функції якого було покладено на ПАТ «Навігаційно-інформаційні системи». 2012 року Федеральним мережним оператором у сфері навігаційної діяльності було визначено некомерційне партнерство «Сприяння розвитку і використанню навігаційних технологій».

### *2.2.1. Історія розвитку*

Офіційно початок робіт зі створення ГЛОНАСС було покладено в грудні 1976 року. Цей проєкт був продовженням розвитку вітчизняної навігаційної супутникової системи, розпочатої програмою «Циклон». Теоретично опрацювання супутникової навігаційної системи 2-го покоління почали 1967 року співробітники НДІ-9 ВМФ.

Терміни робіт зі створення системи неодноразово зсувалися, льотні випробування було розпочато 12 жовтня 1982 року запуском на орбіту першого супутника «Ураган» 11Ф654 і двох масо-габаритних макетів 11Ф654ГВМ. У наступних шести запусках на орбіту виводилося по два штатних апарати й по одному макету. Застосування макетів було наслідком неготовності електронної частини супутників. Тільки 16 вересня 1986 року з восьмого за рахунком запуску було виведено відразу три штатних апарати. Два рази протягом 1989 року разом з двома супутниками «Ураган» на орбіту



виводилися пасивні геодезичні апарати «Еталон», які використовувалися для уточнення параметрів гравітаційного поля та його впливу на орбіти КА «Ураган».

4 квітня 1991 року в складі ГЛОНАСС у двох орбітальних площинах виявлено одночасно 12 роботоздатних супутників системи, і 24 вересня 1993 року систему було офіційно взято в експлуатацію. У цьому ж році США вивели на орбіту останній 24-й супутник (перший супутник США вивели на орбіту 1974 року). Після цього стали проводитися запуски в третю орбітальну площину. 14 грудня 1995 після 27-го запуску «Протона-К» з «Ураганами» супутникове угруповання було розгорнуто до штатного складу – 24 супутники.

### 2.2.2. Супутник системи ГЛОНАСС другого покоління

Усього з жовтня 1982 року по грудень 1998 року на орбіту було виведено 74 КА «Ураган» і вісім масо-габаритних макетів. У період розгортання системи шість «Ураганів» виявилися загубленими через відмови розгінного блока 11С861. Згідно з оцінюванням, проведеним 1997 року, на розгортання ГЛОНАСС було витрачено близько 2,5 млрд дол. (рис. 2.2).

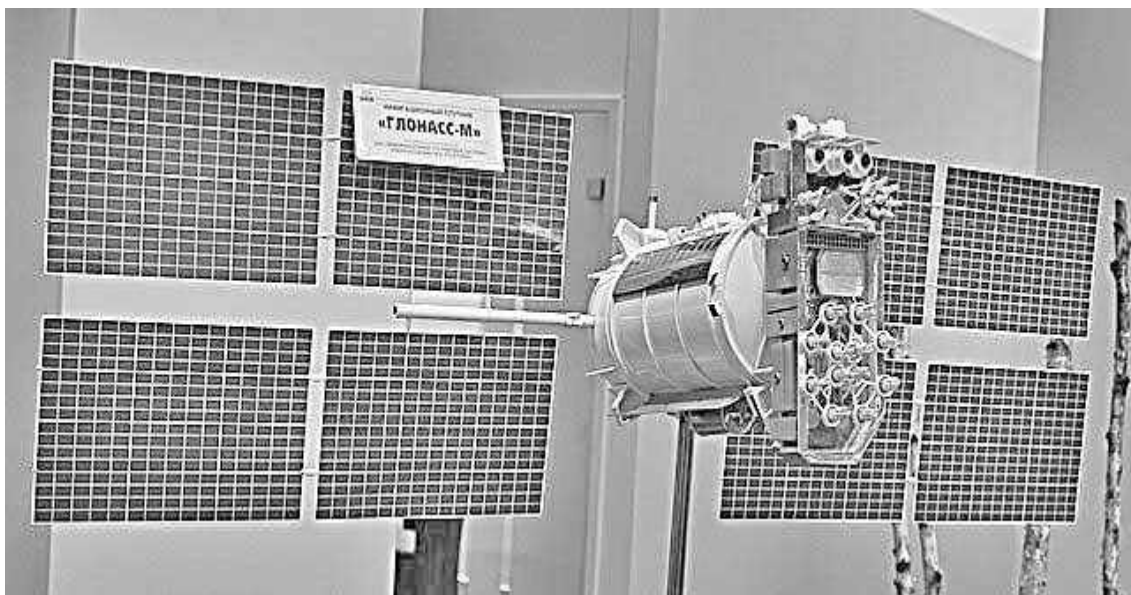


Рис. 2.2. ГНС «ГЛОНАСС-М»

Далі внаслідок недостатнього фінансування, а також через малий термін експлуатації кількість супутників скоротилася до шести до 2001 року.

У серпні 2001 року було впроваджено федеральну цільову програму «Глобальна навігаційна система», згідно з якою повне покриття території Росії планувалося вже на початку 2008 року, а глобальних масштабів система мала набути до початку 2010 року. Для вирішення цього завдання протягом 2007–2009 років проведено шість запусків РН і виведено на орбіту

18 супутників – таким чином, до кінця 2009 року угруповання знову налічувало 24 апарати. 2002 року здійснено перехід на оновлену версію геоцентричної системи координат ПЗ-90 – ПЗ-90.02. З 2003 року запускаються нові КА «ГЛОНАСС-М», що транслюють два цивільних сигнали на частотах L1 і L2.

2007 року проведено 1-шу фазу модернізації наземного сегмента, унаслідок чого підвищилася точність визначення координат. У 2-й фазі модернізації наземного сегмента на семи пунктах наземного комплексу керування встановлено нову вимірювальну систему з високими точнісними характеристиками. Унаслідок цього до кінця 2010 року підвищилася точність розрахунку ефемерид і відходу бортового годинника, що сприяло підвищенню точності навігаційних визначень.

Наприкінці березня 2008 року рада головних конструкторів російської глобальної навігаційної супутникової системи (ГЛОНАСС) трохи скорегувала терміни розгортання космічного сегмента ГЛОНАСС. У колишніх планах передбачалося, що на території Росії системою можна буде користуватися вже до 31 грудня 2007 року, проте для цього потребувалося 18 працюючих супутників, деякі з яких встигли виробити свій гарантійний ресурс і припинили працювати. Таким чином, хоча в 2007 році план щодо запуску супутників ГЛОНАСС було виконано (на орбіту вийшли шість апаратів), орбітальне угруповання станом на 27 березня 2008 року складалося лише з 16 працюючих супутників. 25 грудня 2008 року їх кількість було доведено до 18.

Радою головних конструкторів ГЛОНАСС план розгортання системи був скорегований з тією метою, щоб на території Росії система ГЛОНАСС запрацювала хоча б до 31 грудня 2008 року. У колишніх планах передбачався запуск на орбіту двох трійок нових супутників «ГЛОНАСС-М» у вересні і грудні 2008 року, проте в березні 2008 року терміни виготовлення супутників і ракет було переглянуто, щоб ввести всі супутники в експлуатацію до кінця року. Передбачалося, що запуски відбудуться раніше на два місяці і система до кінця року в Росії запрацює. Плани було реалізовано у зазначений термін.

29 січня 2009 року було оголошено, що першим містом країни, де громадський транспорт у масовому порядку буде оснащено системою супутникового моніторингу на базі ГЛОНАСС, стане Сочі. На той момент ГЛОНАСС-обладнання виробництва компанії «М2М Телематика» було встановлено на 250 сочинських автобусах.

У листопаді 2009 року було оголошено, що Український науково-дослідний інститут радіотехнічних вимірювань (м. Харків) і Російський науково-дослідний інститут космічного приладобудування (м. Москва)

створять спільне підприємство. Сторони створять систему супутникової навігації для обслуговування користувачів на території двох країн. У проєкті будуть використані українські станції корекції для уточнення координат систем ГЛОНАСС.

2 вересня 2010 року загальну кількість супутників ГЛОНАСС було доведено до 26 – угруповання було повністю розгорнуто для повного покриття Землі.

2011 року було модернізовано систему наземного комплексу керування. Результатом програми модернізації стало підвищення точності навігаційних визначень системи ГЛОНАСС у 2–2,5 рази й зменшення середньоквадратичного відхилення визначення координат цивільних споживачів, яке становило близько 2,8 м. 26 лютого того ж року запуснено перший КА «ГЛОНАСС-К», у якому реалізовано додаткові сигнали у форматі CDMA і протестовано новий відкритий сигнал у діапазоні L3. Модель КА «ГЛОНАСС-К» показано на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Модель КА «ГЛОНАСС-К»

Протягом 2012–2020 років на розвиток ГЛОНАСС з бюджету РФ виділено 320 млрд руб. У цей період планувалося виготовити 15 супутників «ГЛОНАСС-М» і 22 супутники «ГЛОНАСС-К» (рис. 2.4).

2014 року почалися роботи щодо забезпечення сумісності російської і китайської навігаційних систем ГЛОНАСС і «Бейдоу».

7 грудня 2015 року було оголошено про завершення створення системи ГЛОНАСС. Готову систему було відправлено на заключні випробування Міноборони РФ.

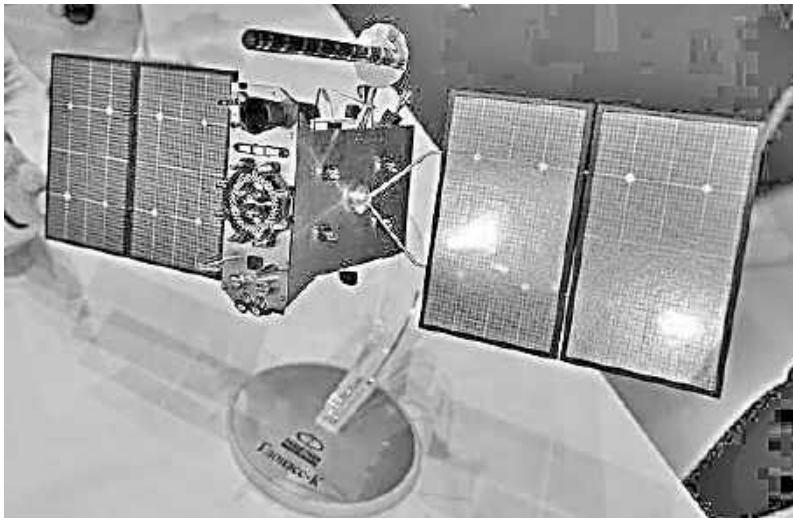


Рис. 2.4. Космічний апарат «ГЛОНАСС-К»

### 2.2.3. Навігація

Супутники ГЛОНАСС знаходяться на середньовисотній круговій орбіті на висоті 19400 км з нахилом  $64,8^\circ$  і періодом 11 год 15 хв. Така орбіта є оптимальною для використання у високих широтах (північних і південних полярних регіонах), де сигнал GPS погано ловиться. Супутникове угруповання розгорнуто у трьох орбітальних площинах з вісьмома рівномірно розподіленими супутниками в кожному. Для забезпечення глобального покриття потребується 24 супутники, тоді як для покриття території Росії достатньо 18 супутників. Сигнали передаються зі спрямованістю  $38^\circ$  з використанням правої кругової поляризації потужністю 316...500 Вт (EIRP 25...27 dBW).

Для визначення координат приймач має приймати сигнали як мінімум чотирьох супутників та обчислювати відстані до них. Якщо використовується три супутники – визначення координат є утрудненим через помилки, спричинені неточністю годинника приймача.

### 2.2.4. Навігаційні сигнали

*FDMA-сигнали.* Використовуються два типи навігаційних сигналів: відкриті зі звичайною точністю й захищені з підвищеною точністю.

Сигнали передаються шляхом розширення спектра в прямій послідовності (DSSS) і модуляцією через двійкову фазову маніпуляцію (BPSK). У всіх супутниках використовується одна й та сама псевдовипадкова кодова послідовність для передавання відкритих сигналів, проте кожен супутник передає на різній частоті з використанням 15-канального поділу за частотою (FDMA). Сигнал у діапазоні L1 знаходиться на центральній частоті 1602 МГц, а частота передавання супутників визначається формулою  $1602 \text{ МГц} + n \times 0,5625 \text{ МГц}$ , де  $n$  – номер частотного каналу ( $n = -7, -6, -5, \dots, 0, \dots, 6$ , раніше  $n = 0, \dots, 13$ ). Сигнал в діапазоні L2 знаходиться на центральній частоті 1246 МГц, а частота кожного каналу визначається

формулою  $1246 \text{ МГц} + n \times 0,4375 \text{ МГц}$ . Протилежно розташовані апарати не можуть бути одночасно видимими з поверхні Землі, тому 15 радіоканалів достатньо для 24 супутників.

Відкритий сигнал генерується через додавання за модулем двох трикодових послідовностей: псевдовипадкового далекомірного коду зі швидкістю 511 кбіт/с, навігаційного повідомлення зі швидкістю 50 біт/с і 100 Гц манчестер-коду. Усі ці послідовності генеруються одним тактовим генератором. Псевдовипадковий код генерується 9-кроковим зсувним регістром з періодом 1 мс.

Навігаційне повідомлення відкритого сигналу транслюється безперервно зі швидкістю 50 біт/с. Суперкадр завдовжки 7500 біт потребує 150 с (2,5 хв) для передавання повного повідомлення і складається з п'яти кадрів розміром 1500 біт кожний (30 с). Кожен кадр складається з 15 рядків розміром 100 біт кожний (2 с на передавання кожного рядка), 85 біт (1,7 с) даних і контрольних сум і 15 біт (0,3 с) на маркер часу. Рядки 1–4 містять безпосередньо інформацію про поточний супутник і передаються заново в кожному кадрі; дані містять ефемериди, зміщення тактових генераторів частот, а також стан супутника. Рядки 5–15 містять альманах; у кадрах I–IV передаються дані на п'ять супутників у кожному, а в кадрі V – на чотири супутники.

Ефемериди оновлюються кожні 30 хв з використанням вимірювань наземного контрольного сегмента; використовується система координат ECEF (Earth Centered, Earth Fixed) для положення і швидкості, а також передаються параметри прискорення під дією Сонця і Місяця. Альманах використовує модифіковані кеплерові елементи й оновлюється щодня.

Захищений сигнал підвищеної точності призначено для авторизованих користувачів, таких як Збройні сили РФ. Сигнал передається в квадратурній модуляції з відкритим сигналом на тих же самих частотах, але його псевдовипадковий код має в десять разів більшу швидкість передавання, що підвищує точність визначення координат. Хоча захищений сигнал не зашифрований, формат його псевдовипадкового коду й навігаційних повідомлень засекречений. За даними дослідників, навігаційне повідомлення захищеного сигналу L1 передається зі швидкістю 50 біт/с без використання манчестер-коду, суперкадр складається з 72 кадрів розміром 500 біт кожний, де кожен кадр складається з п'яти рядків розміром 100 біт кожний і потребує 10 с для передавання. Таким чином, все навігаційне повідомлення має довжину 36 000 біт і потребує для передавання 720 с (12 хв). Передбачається, що додаткова інформація використовується для підвищення точності параметрів сонячно-місячних прискорень і корекції частоти тактових генераторів.

*CDMA-сигнали.* Відкритий сигнал L3OC передається на частоті 1202,025 МГц, використовується двійкова фазова маніпуляція BPSK (10) для пілотного й інформаційного сигналів; псевдовипадковий дальномірний код транслюється з частотою 10,23 мільйона імпульсів (чіпів) за секунду і модулюється на несній частоті через квадратурну фазову маніпуляцію QPSK, при цьому пілотний та інформаційний сигнали рознесені по квадратурах модуляції: інформаційний сигнал знаходиться у фазі, а пілотний – у квадратурі. Інформаційний сигнал додатково модульовано 5-бітовим кодом Баркера, а

пілотний – 10-бітовим кодом Ньюмана – Хоффмана.

Відкритий сигнал L1OC і захищений сигнал L1SC передаються на частоті 1600,995 МГц, а відкритий сигнал L2OC і захищений сигнал L2SC – на частоті 1248,06 МГц, перекриваючи діапазон сигналів формату FDMA. Відкриті сигнали L1OC і L2OC використовують мультиплексування з поділом за часом для передавання пілотного й інформаційного сигналів; використовується модуляція BPSK (1) для інформаційного сигналу та BOC (1,1) – для пілотного. Захищені широкосмугові сигнали L1SC і L2SC використовують модуляцію BOC (5; 2,5) для пілотного й інформаційного сигналів і передаються в квадратурі відносно відкритих сигналів; при такому типі модуляції пік потужності зміщується на краю частотного діапазону і захищений сигнал не заважає відкритому вузькосмуговому сигналу, що передається на частоті.

Модуляція BOC (binary offset carrier, двійкова модуляція зі зміщенням несної) використовується в сигналах систем Galileo і модернізованої GPS; у сигналах GLONASS і стандартної GPS використовується двійкова фазова маніпуляція (BPSK), однак і BPSK, і QPSK є окремими випадками квадратурної амплітудної модуляції (QAM-2 і QAM-4).

Навігаційне повідомлення CDMA сигналів передається у вигляді послідовності текстових рядків. Розмір повідомлення змінний – зазвичай псевдокадр складається з шести рядків, у яких містяться ефемериди поточного супутника (рядки типу 10, 11 і 12) і частина системного альманаху з параметрами трьох супутників (три рядки типу 20). Для складання повного альманаху на всі 24 супутники зазвичай потрібно отримати суперкадр з восьми послідовних псевдокадрів. У майбутньому суперкадр може бути розширений до 10 псевдокадрів для підтримки роботи 30 супутників. Навігаційне повідомлення також може містити параметри обертання Землі, моделі йоносфери, повідомлення Коспас-SARSAT і довготривалі параметри орбіти супутників ГЛОНАСС. На початку кожного рядка передається мітка системного часу у вигляді постійної послідовності бітів. Секунда координації UTC ураховується укороченням або подовженням (із заповнення нулями) останнього рядка кварталу на тривалість однієї секунди (100 біт) – такі аномальні рядки відкидаються апаратурою приймача. Надалі можуть вводитися нові типи рядків, тому апаратура приймача має ігнорувати невідомі типи.

Навігаційне повідомлення сигналу L3OC передається зі швидкістю 100 біт/с, довжина текстового рядка – 300 біт (3 с на передавання). Псевдокадр з шести рядків має розмір 1800 біт і передається за 18 с, а суперкадр складається з восьми псевдокадрів загальним розміром 14400 біт і потребує 144 с (2 хв 24 с) на передавання повного альманаху.

Навігаційне повідомлення сигналу L1OC передається зі швидкістю 100 біт/с. Текстовий рядок має довжину 250 біт (2,5 с на передавання). Псевдокадр із шести рядків має розмір 1500 біт (15 с на передавання), суперкадр – 12000 біт і 120 с (2 хв) на передавання.

Сигнал L2OC містить тільки дальномірний код без навігаційного повідомлення.

## 2.2.5. Формат навігаційного повідомлення

### 2.2.5.1. Сигнал L1OC

Формат навігаційного повідомлення сигналу L3OC проілюстровано у табл. 2.6.

Таблиця 2.6  
Нормальний рядок навігаційного повідомлення L3OC

| Поле                       |     | Довжина, біт | Опис   |
|----------------------------|-----|--------------|--|
| Мітка часу                 | СМВ | 20           | Постійна послідовність 0000 0100 1001 0100 1110 (0494Eh)                 |
| Тип рядка                  | Тип | 6            | Тип рядка  |
| Час КА                     | ОМВ | 15           | Добовий час годинника КА з інтервалом 3 с<br>Діапазон значень 0 – 28799) |
| Номер КА                   | j   | 6            | Аналогічно сигналу L1OC  |
| Придатність КА             | Г   | 1            |  |
| Достовірність інформації   | р   | 1            |  |
| Виклик комплексу керування | П1  | 4            |  |
| Режим орієнтації           | П2  | 1            |  |
| Тип корекції UTC           | КР  | 2            |  |
| Виконання корекції         | А   | 1            |  |
| Інформаційне поле          |     | 219          | Зміст інформаційного поля визначається типом рядка                       |
| Циклічний код              | ЦК  | 24           | Циклічний код виявлення помилок  |
| Усього                     |     | 300          |  |

### 2.2.5.2. Загальні параметри сигналів CDMA

У табл. 2.7–2.9 наведено загальні параметри сигналів CDMA: відповідність змісту інформаційного поля типу рядка навігаційного повідомлення, опис інформаційного поля рядків альманаху для орбіти типу 0, а також структура квитанції Коспас-SARSAT.

Таблиця 2.7

#### Типи рядків навігаційного повідомлення

| Тип        | Зміст інформаційного поля  |
|------------|--|
| 0          | (Службова технологічна інформація)   |
| 1          | Укорочений рядок секунди координат   |
| 2          | Подовжений рядок секунди координат   |
| 10, 11, 12 | Оперативна інформація (ефемериди й частотно-часові відхилення).<br>Передається в пакеті з трьох послідовних рядків |
| 16         | Параметри орієнтації КА в режимі розвороту   |
| 20         | Альманах   |
| 25         | Параметри обертання Землі, моделі іоносфери, моделі розбіжності шкал часу UTC (SU) і TAI                           |
| 31, 32     | Параметри довготривалої моделі руху  |
| 50         | Квитанції системи Коспас-SARSAT – тільки сигнал L1OC   |
| 60         | Текстове повідомлення  |

Таблиця 2.8

## Інформаційне поле рядків типу 20 (альманах) для орбіти типу 0

| Поле                 |                  | Довжина, біт | Вага молодшого розряду | Опис   |
|----------------------|------------------|--------------|------------------------|--|
| Тип орбіти           | TO               | 2            | 1                      | 0 – колова орбіта з висотою 19 100 км  |
| Кількість супутників | N <sub>S</sub>   | 6            | 1                      | Кількість супутників, що випромінюють CDMA-сигнали (від 1 до 63), для яких передаються параметри альманаху   |
| Вік альманаху        | E <sub>A</sub>   | 6            | 1                      | Кількість діб, що пройшли після поновлення альманаху до поточної доби  |
| Поточна доба         | N <sub>A</sub>   | 11           | 1                      | Номер доби (1–1461) усередині чотирирічного інтервалу, який починається від 1 січня останнього високосного року за московським декретним часом   |
| Статус сигналів      | PC <sub>A</sub>  | 5            | 1                      | Бітове поле для сигналів CDMA, що випромінюються вказаним супутником. Три старші розряди відповідають сигналам L1, L2 і L3: 0 – випромінює, 1 – не випромінює  |
| Модифікація КА       | PC <sub>A</sub>  | 3            | 1                      | Модифікація космічного апарата й випромінювані сигнали CDMA:<br>0 – «ГЛОНАСС-М» (сигнал L3),<br>1 – «ГЛОНАСС-K1» (сигнал L3),<br>2 – «ГЛОНАСС-K1» (сигнали L2 і L3),<br>3 – «ГЛОНАСС-K2» (сигнали L1, L2 і L3) |
| Поправка часу        | T <sub>A</sub>   | 14           | 2 <sup>-20</sup>       | Груба поправка для переходу від шкали часу КА до шкали часу системи ГЛОНАСС (діапазон значень – $(\pm 7,8 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ с)   |
| Сходження            | λ <sub>A</sub>   | 21           | 2 <sup>-20</sup>       | Геодезична довгота першого висхідного вузла орбіти КА (діапазон значень – $\pm 1$ півцикл)   |
| Час сходження        | t <sub>λA</sub>  | 21           | 2 <sup>-5</sup>        | Момент проходження першого висхідного вузла орбіти КА в межах поточної доби (діапазон значень – від 0 до 44100 с)  |
| Нахил                | Δi <sub>A</sub>  | 15           | 2 <sup>-20</sup>       | Поправка до номінального нахилу (64,8°) орбіти КА в момент сходження (діапазон значень – $\pm 0,0156$ півциклу)  |
| Ексцентриситет       | ε <sub>A</sub>   | 15           | 2 <sup>-20</sup>       | Ексцентриситет орбіти КА в момент сходження (діапазон значень – від 0 до 003)  |
| Перигей              | ω <sub>A</sub>   | 16           | 2 <sup>-15</sup>       | Аргумент перигею орбіти КА в момент сходження (діапазон значень – $\pm 1$ півцикл)   |
| Період               | ΔT <sub>A</sub>  | 19           | 2 <sup>-9</sup>        | Поправка до номінального драконічного періоду обертання КА (40544 с) у момент сходження (діапазон значень – $\pm 512$ с)   |
| Зміна періоду        | ΔṪ <sub>A</sub> | 7            | 2 <sup>-14</sup>       | Швидкість змінення драконічного періоду обертання КА в момент сходження (діапазон значень – $(\pm 3,9) \cdot 10^{-3}$ с/витків)  |
| (Зарезервовано)      |                  | L1OC: 23     |                        |  |
|                      |                  | L3OC: 58     |                        |  |



## Структура квитанції Коспас-SARSAT (рядок типу 50)

| Поле        | Beacon ID | Контрольна сума | Інформація від пошуково-рятувальних служб | Резерв головного конструктора |
|-------------|-----------|-----------------|---|-------------------------------|
| Розмір, біт | 60        | 4               | 16  | 12                            |

*2.2.6. Модернізація*

Від середини 2000-х років готувалося введення сигналів ГЛОНАСС з кодовим поділом. Інтерфейсний контрольний документ (ІКД) для сигналів ГЛОНАСС з кодовим поділом був опублікований АТ «Російські космічні системи» у серпні 2016 року. Поточний стан модернізації системи ГЛОНАСС наведено в табл. 2.10.

2019 року проведено запуск удосконаленого супутника КА «ГЛОНАСС-К2», доопрацьованого за результатами випробувань КА «ГЛОНАСС-К1». На додаток до відкритого CDMA-сигналу в діапазоні L3, виникли два відкритих і два шифрованих сигнали в діапазонах L1 і L2.

Надалі планується створення вдосконаленого супутника «ГЛОНАСС-КМ», характеристики якого ще розробляються. Імовірно, у нових супутниках буде використовуватися до шести відкритих і до трьох зашифрованих сигналів з кодовим поділом, частоти й модуляція яких будуть збігатися з сигналами модернізованої GPS третього покоління і Galileo/Compass.

Приклади можливого перетину модуляцій:

– сигнал L1OCM – модуляція BOC (1,1) на частоті 1575,42 МГц, збігається з сигналом L1C модернізованої GPS, сигналом E1 системи Galileo і сигналом B1C системи Beidou/Compass;

– сигнал L3OCM – модуляція BPSK (10) на частоті 1207,14 МГц, збігається з сигналом E5b системи Galileo і сигналом E2b системи Beidou/Compass;

– сигнал L5OCM – модуляція BPSK (10) на частоті 1176,45 МГц, збігається з сигналом Safety of Life (L5) модернізованої GPS, сигналом E5a системи Galileo і сигналом E2a системи Beidou/Compass.

Ця конфігурація допоможе забезпечити широку сумісність приймального обладнання й сприятиме підвищенню точності і швидкості визначення координат для критично важливих застосувань, насамперед в авіаційній і морській безпеці.

Після повного переходу на CDMA-сигнали передбачається поступове збільшення кількості КА в угрупованні з 24 до 30, що, можливо, потребуватиме відімкнення сигналів FDMA.

2014 року запуснено перший супутник «ГЛОНАСС-М» (номер 755), оснащений передавачем сигналу L3OC; ще шість таких супутників планувалося запуснути в 2017–2018 роках.

Таблиця 2.10

## Модернізація системи ГЛОНАСС

| Серія КА     | Розробник | Стан   | Стабільність частоти                  | Сигнали FDMA, МГц |                 | Сигнали CDMA, МГц |            |            | Сумісні сигнали CDMA, МГц |             |
|--------------|-----------|--|---------------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------|------------|---------------------------|-------------|
|              |           |  |                                       | 1602 + nх0,5625   | 1246 + nх0,4375 | 1600,995          | 1248,06    | 1202,025   | 1575,42                   | 1207,14     |
| «ГЛОНАСС»    | 1982–2005 | Виведений з експлуатації                     | $5 \cdot 10^{-13}$                    | L1OF, L1SF        | L2SF            |                   |            |            |                           |             |
| «ГЛОНАСС-М»  | 2003      | В експлуатації                               | $1 \cdot 10^{-13}$                    | L1OF, L1SF        | L2OF, L2SF      | –                 | –          | L3OC       |                           |             |
| «ГЛОНАСС-К1» | 2011      | Серійне виробництво                          | $5 \cdot 10^{-14} - 1 \cdot 10^{-13}$ | L1OF, L1SF        | L2OF, L2SF      | –                 | –          | L3OC       |                           |             |
| «ГЛОНАСС-К2» | 2019      | Виробництво апаратів для льотних випробувань | $5 \cdot 10^{-15} - 5 \cdot 10^{-14}$ | L1OF, L1SF        | L2OF, L2SF      | L1OC, L1SC        | L2OC, L2SC | L3OC       |                           |             |
| «ГЛОНАСС-В»  | 2023–2025 | На стадії вивчення                           |                                       | –                 | –               | L1OC, L1SC        | L2OC, L2SC | L3OC       |                           |             |
| «ГЛОНАСС-КМ» | 2030      | На стадії вивчення                           |                                       | L1OF, L1SF        | L2OF, L2SF      | L1OC, L1SC        | L2OC, L2SC | L3OC, L3SC | L1OCM                     | L3OCM L5OCM |

«О»: відкритий сигнал стандартної точності / «S»: шифрований сигнал високої точності  
«F»: частотний поділ каналів (FDMA) / «C»: кодовий поділ каналів (CDMA), n = -7, -6, -5, ..., 0, ..., 5, 6

У 2023–2025 рр. планується запуснути шість додаткових супутників «ГЛОНАСС-В» у трьох площинах по високоеліптичній орбіті «Тундра», що дасть змогу забезпечити підвищену доступність і збільшену на 25 % точність у Росії та країнах Східної півкулі. Орбіти формують дві наземні траси з нахилом  $64,8^\circ$ , ексцентриситетом 0,072, періодом обертання 23,9 год, географічною довготою висхідного кута  $60^\circ$  і  $120^\circ$ . Супутники «ГЛОНАСС-В» створюються на платформі «ГЛОНАСС-К» і передаватимуть тільки нові сигнали з кодовим поділом. Раніше для регіонального угруповання також розглядалися орбіта «Блискавка» і геосинхронна або геостаціонарна орбіта.

### 2.2.7. Точність

На 2014 рік точність визначення координат системою ГЛОНАСС дещо відстає від аналогічних показників для GPS.

Згідно з даними СДКМ на 18 вересня 2012 року, помилки навігаційних визначень ГЛОНАСС (при  $p = 0,95$ ) по довготі й широті становили 3...6 м при використанні в середньому 7–8 КА (залежно від точки приймання). Водночас помилки GPS становили 2...4 м при використанні в середньому 6–11 КА (залежно від точки приймання).

При використанні обох навігаційних систем відбувається суттєве підвищення точності. Європейський проєкт EGNOS, де використовуються сигнали обох систем, дає точність визначення координат на території Європи на рівні 1,5...3,0 м. Система ГЛОНАСС забезпечує визначення місцезнаходження об'єкта з точністю до 2,8 м. Після переведення в робочий стан двох супутників корекції сигналу системи «Луч» точність навігаційного забезпечення ГЛОНАСС підвищиться до 1 м (раніше система визначала місцезнаходження об'єкта лише з точністю до 5 м).

До 2015 року планувалося підвищити точність позиціонування до 1,4 м, до 2020 року – до 0,6 м з подальшим доведенням до 10 см.

Технології високоточного позиціонування на основі ГЛОНАСС уже сьогодні широко використовуються в різних сферах діяльності. Так, фахівці НДІ прикладної телематики розробили унікальне для навігаційної галузі рішення – систему дистанційного моніторингу стану складних інженерних об'єктів, яка в режимі реального часу відстежує зміщення споруд дорожньо-транспортної інфраструктури та зсувних геомасивів (у постобробленні з точністю до 4...5 мм), що дає змогу не тільки оперативно реагувати на виникнення позаштатних і надзвичайних ситуацій, а й заздалегідь їх прогнозувати, своєчасно визначати появу дефектів дорожніх споруд. Систему впроваджено й успішно відпрацьовано на ділянці федеральної траси М27 Джубга – Сочі в районі Хостинської естакади (ділянка 194...196 км) – на найбільш небезпечному і складному з огляду на міцність елементів конструкції.

### *2.2.8. Станції диференціальної корекції*

Росія почала роботи з розміщення станцій системи диференціальної корекції й моніторингу для підвищення точності й надійності роботи навігаційної системи ГЛОНАСС за рубежом. Перша зарубіжна станція була побудована й успішно функціонує в Антарктиді на станції «Беллінсгаузен». Тим самим забезпечено необхідні умови для безперервного глобального моніторингу навігаційних полів космічних апаратів ГЛОНАСС. Поточна мережа наземних станцій налічує 14 станцій у Росії, одну станцію в Антарктиді й одну – у Бразилії. З метою розвитку системи передбачається розгортання восьми додаткових станцій на території Росії і кількох станцій за рубежом (додаткові станції будуть розміщені в таких країнах, як Куба, Іран, В'єтнам, Іспанія, Індонезія, Нікарагуа, Австралія, дві в Бразилії, і ще одна додаткова буде розміщена в Антарктиді).

Через побоювання, що системи ГЛОНАСС можуть бути використані у військових цілях, Держдепартамент США відмовив «Роскосмосу» у видачі дозволів на будівництво на американській території декількох російських вимірювальних станцій. Закон про фактичну заборону розміщення станцій ГЛОНАСС у США був підписаний 30 грудня 2013 року. У відповідь на це з 1 червня 2014 року призупинено роботу на території Російської Федерації станцій для системи GPS. Мабуть, це рішення стосується 19 наявних вимірювальних станцій IGS на території Росії. Станції IGS не призначені для функціонування самої системи GPS і мають переважно наукове значення. На території США є безліч подібних станцій, що передають дані ГЛОНАСС у режимі реального часу. Дані цих станцій знаходяться у відкритому доступі.

Сьогодні в мережі «Інтернет» у публічному доступі є навігаційні дані у форматі RINEX, що надаються IGS (International GNSS Service) з усього світу. Подібні дані надаються у форматі 30-секундних вимірювань, що дає змогу проводити моніторинг іоносфери на основі вертикальних значень повної електронної концентрації, отриманих за допомогою двочастотних вимірювань. Однак, незважаючи на широкий спектр інформації, що надається, дослідження тропосфери є дуже складними через обмежену можливість зіставлення навігаційної інформації зі змінами метеорологічної інформації в точці проведення спостережень. Дані про метеорологічні параметри, наявні в публічному доступі, також мають недоліки, пов'язані з періодом наданої інформації (раз за 3 год), а також просторовим рознесенням між метеостанцією й навігаційним приймачем, що може

спричинити відмінності в параметрах приземного шару тропосфери. Таким чином, однією з переваг проведених досліджень є використання власних навігаційних приймачів, а також можливість вимірювання приземного значення основних метеорологічних параметрів безпосередньо в точці проведення вимірювань з дублюванням при цьому результатів вимірювання на різних приймачах з метою зменшення помилок вимірювання, не пов'язаних з досліджуваними ефектами.

### **Контрольні запитання**

1. Які існують основні системи ГНСС?
2. GPS. Опишіть принцип дії та основні характеристики. Якими є параметри орбіти та період обертання?
3. Радіочастотні характеристики. Поняття релятивістського зсуву частоти. Види кодів модуляції та їх параметри.
4. Наземний сегмент навігаційної системи. Розташування, завдання, що вирішуються.
5. Застосування GPS-приймачів користувача.
6. Точність, види похибок. Недоліки системи навігації.
7. ГЛОНАСС. Параметри орбіти та період обертання. Історія розвитку.
8. Параметри орбіти, навігаційні сигнали.
9. Формат навігаційного повідомлення, загальні параметри сигналів CDMA.
10. Модернізація, точність системи, станції диференціальної корекції.

## Розділ 3. ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ СИГНАЛІВ ГНСС

### 3.1. Одночастотний комплекс

Для проведення досліджень з діагностики атмосфери за допомогою сигналів ГНСС був створений комплекс для приймання сигналів супутникових систем (рис. 3.1). До складу комплексу входять: приймач сигналів ГНСС, цифрові пристрої для обчислення координат, їх накопичення й відображення, пакет спеціальних програм (BM-Ctrl, Storegis) для проведення цих операцій. Приймач СН-4719 являє собою одночастотний приймач навігаційних сигналів систем GPS / ГЛОНАСС, і його призначено для визначення поточних значень координат (широти, довготи, висоти), вектора швидкості користувача, поточного часу за сигналами СНС. Приймач забезпечує приймання й оброблення сигналів СНС ГЛОНАСС, GPS і SBAS (EGNOW / WAAS / MSAS) за відкритими кодами СТ і С/А в діапазоні L1 з частотою видачі даних на зовнішні пристрої 1, 2, 5 Гц.



Рис. 3.1. Комплекс реєстрації сигналів GPS/GLONASS (а), навігаційний приймач СН-4719 та антена (б)

У комплекті з навігаційними приймачами використовувалося кілька типів антен: В104 і М102. Обидві антени, призначені для приймання сигналів СНС ГЛОНАСС/GPS у діапазоні частот від 1570 до 1606 МГц, мають такі діаграми спрямованості, які зображено на рис. 3.2. Особливістю цих антен є те, що вони здатні приймати сигнали навігаційних супутників при кутах піднесення  $0^\circ$  і навіть при невеликих від'ємних кутах, коли супутник заходить за горизонт.

Для роботи з описаними вище приймачами розроблено спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ). Програму накопичення й оброблення вимірювань STOREGIS (рис. 3.3) призначено для приймання даних за протоколами NMEA, BINR і BINR2 та подання цих даних у текстовому й графічному вигляді. Програма також може обробляти вже

накопичені файли й керувати режимами роботи навігаційного приймача.

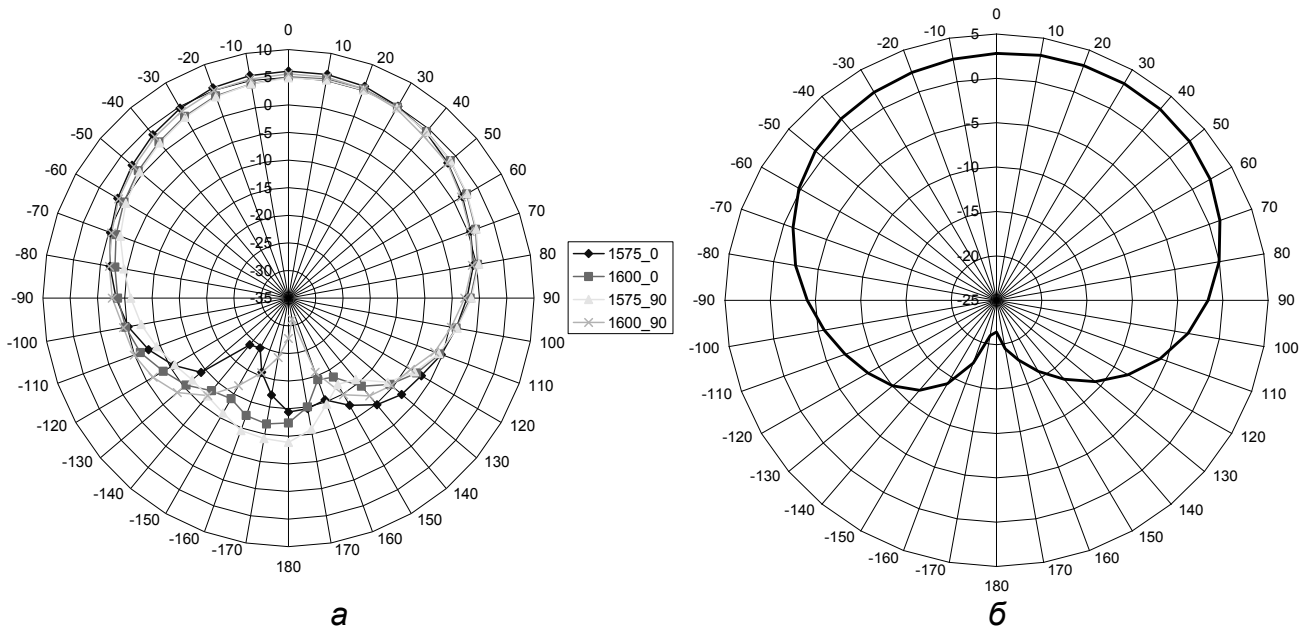


Рис. 3.2. Діаграми спрямованості антен: а – В104; б – М102

Файли, отримані програмою, дають змогу аналізувати флуктуації вимірюваних координат, псевдовідстаней, співвідношень сигнал/шум, а також розраховувати збільшення псевдовідстаней унаслідок впливу середовища поширення, що дає змогу спільно з даними про іоносферну затримку, розділяти внески тропосфери та іоносфери.

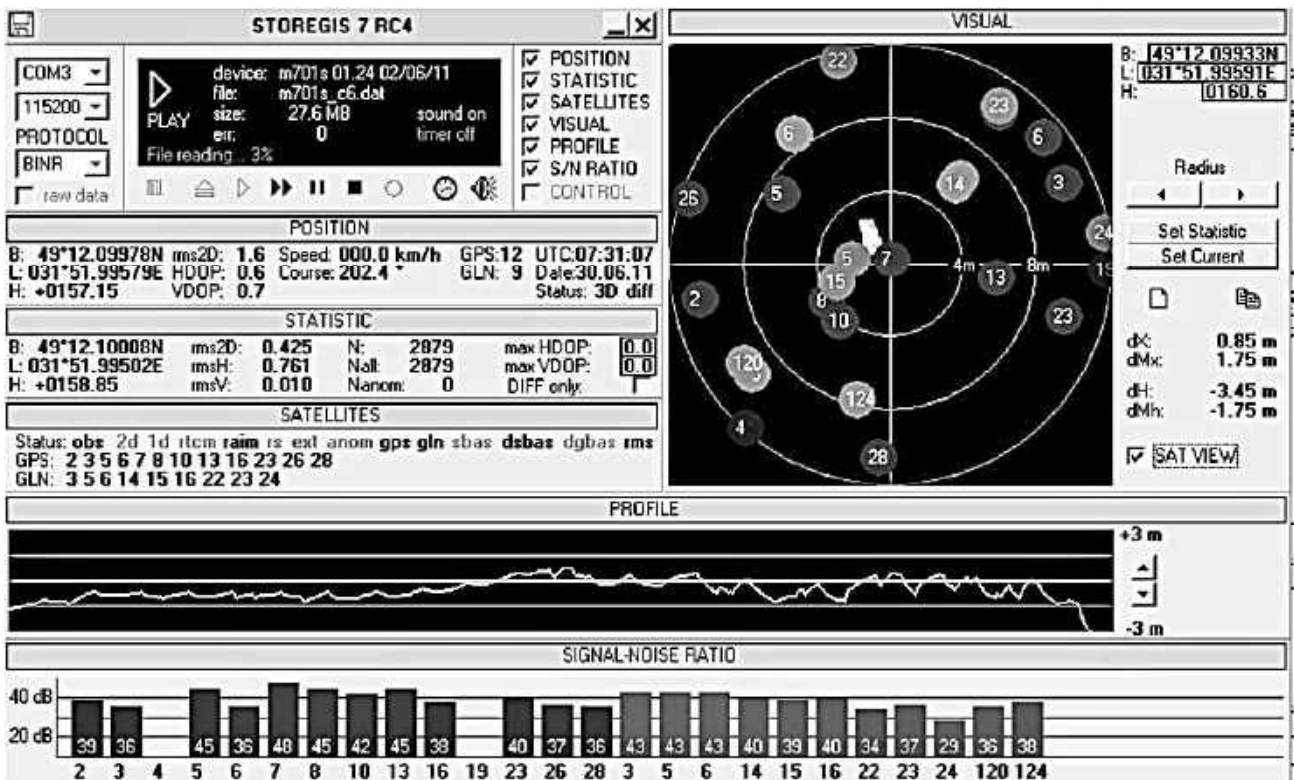


Рис. 3.3. Відображення на моніторі результатів програмного оброблення навігаційних даних

Червоним кольором на полі мішені відображаються супутники ГЛОНАСС, синім – GPS, зеленим – SBAS. Мішень у цьому випадку потрібно розглядати як осі напрямку з півночі на південь (вертикальна вісь) і з заходу на схід (горизонтальна вісь). Віддалення позначки супутника від центра мішені вказує на його кут місця відносно антени апаратури (у центрі – 90°, на крайньому положенні зовнішнього кола – 0°).

Вихідні файли являють собою масиви даних (рис. 3.4), що містять інформацію про часові мітки з періодичністю 1 с, дані про вимірювані координати (висоту, довготу, широту). Супутники беруть участь у вирішенні навігаційного завдання, а масиви даних для окремих супутників містять інформацію про псевдовідстані, кути піднесення, азимутальні кути і співвідношення сигнал/шум для відповідного моменту часу (рис. 3.5).

|                       |              |              |           |                                   |
|-----------------------|--------------|--------------|-----------|-----------------------------------|
| 2012/07/10 07:25:54 - | 0.8660561106 | 0.6047853742 | 0112.0180 | 10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15 |
| 2012/07/10 07:25:55 - | 0.8660561056 | 0.6047853752 | 0112.0845 | 10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15 |
| 2012/07/10 07:25:56 - | 0.8660561043 | 0.6047853717 | 0112.1102 | 10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15 |
| 2012/07/10 07:25:57 - | 0.8660561039 | 0.6047853719 | 0112.1104 | 10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15 |
| 2012/07/10 07:25:58 - | 0.8660561037 | 0.6047853705 | 0112.1267 | 10: 10 28 05 26 19 08 03 13 07 15 |
| <b>1</b>              | <b>2</b>     | <b>3</b>     | <b>4</b>  | <b>5</b> <b>6</b> <b>7</b>        |

Рис. 3.4. Приклад файлу з обумовленими координатами приймача (1 – дата, 2 – час, 3 – широта, 4 – довгота, 5 – висота, 6 – кількість використовуваних НКА, 7 – номери використовуваних НКА)

|                       |          |          |          |            |          |                   |
|-----------------------|----------|----------|----------|------------|----------|-------------------|
| 2012/02/25 12:01:54 - | GPS      | 01       | 11.8406  | 182.5637 = | 40.64    | -00022.553        |
| 2012/02/25 12:01:55 - | GPS      | 01       | 11.8336  | 182.5625 = | 40.12    | -00022.548        |
| 2012/02/25 12:01:56 - | GPS      | 01       | 11.8265  | 182.5613 = | 39.94    | -00022.553        |
| 2012/02/25 12:01:57 - | GPS      | 01       | 11.8194  | 182.5602 = | 39.81    | -00022.548        |
| 2012/02/25 12:01:58 - | GPS      | 01       | 11.8123  | 182.5590 = | 39.50    | -00022.499        |
| <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b>   | <b>6</b> | <b>7</b> <b>8</b> |

Рис. 3.5. Приклад файлу з поправками псевдовідстаней (1 – дата, 2 – час, 3 – СНС, 4 – номер НКА, 5 – кут піднесення в градусах, 6 – азимут у градусах, 7 – співвідношення сигнал/шум, dB/Hz, 8 – поправка псевдовідстаней)

Перевагою використання «сирих» даних без додаткових алгоритмів фільтрації є можливість установлення взаємозв'язку між сезонними й добовими варіаціями метеопараметрів і затримками, що виникають на трасах поширення навігаційних сигналів. При цьому масиви, що формуються, є вирішенням навігаційного завдання на основі кодових вимірювань, однак для деяких завдань доцільніше використовувати фазовий режим, що дає змогу отримати високі точності (відносна навігація). Під фазовими вимірами розуміють значення затримки поточної фази електромагнітної хвилі під час поширення від фазового центра антени навігаційного супутника до фазового центра антени навігаційного приймача. На основі такого виміру отримують фазову псевдовідстань (суму кількості цілих довжин радіохвиль і дробової частини довжини радіохвилі). Оскільки радіохвиля є періодичною функцією, то звичайне визначення цілих довжин хвиль є неможливим. Супутникові приймачі фіксують тільки дробову частину фази радіохвилі, кількість цілих хвиль розраховується



математичним методом за допомогою надлишкової інформації. Таким чином, фазовий режим роботи може використовуватися для підвищення точності вимірюваних параметрів, а також для виділення йоносферної затримки за відсутності вимірювань на частоті L2.

### 3.2. Двочастотний комплекс

Основною помилкою під час визначення координат є вплив затримки сигналу в атмосфері. Використання двочастотних приймачів дає змогу підвищити точність вимірювань шляхом вимірювання йоносферної затримки на двох частотах. На відміну від одночастотного режиму роботи, коли для корекції вимірюваних псевдодальностей необхідно використовувати різні моделі тропосферної та йоносферної вертикальної затримки й перераховувати їх під різними кутами, у двочастотному приймачі можна безпосередньо вимірювати затримки, спричинені йоносферою. Це дає змогу максимально точно компенсувати їх вплив.

Апаратура "Бриз" (рис. 3.6) забезпечує роботу за радіосигналами навігаційних космічних апаратів (НКА) у діапазонах частот L1 і L2 КНС ГЛОНАСС і L1 КНС GPS.



а



б

Рис. 3.6. Зовнішній вигляд двочастотного приймача (а) і програми накопичення (б)

Робота з програмним забезпеченням дає змогу отримувати навігаційні дані у форматі RINEX. RINEX (Receiver Independent Exchange Format) – формат обміну даними для файлів вихідних даних супутникових навігаційних приймачів. Цей формат дає змогу проводити постоброблення отриманих даних для виконання більш точних обчислень – зазвичай за допомогою інших даних, що є невідомими для приймача, наприклад,

шляхом застосування більш точної моделі атмосферних параметрів у момент вимірювань. Приклад кадру вихідного файлу показано на рис. 3.7.

|  |              |           |        |
|--|--------------|-----------|--------|
| 14 7 10 8 44 49.0000000 0 16R13R23G12R14R22R 5G 1R24R 4G28G24G17 0.000735882 |              |           |        |
| G15G26R 6G 4   |              |           |        |
| 163408210.64118  | 20779350.952 | -5621.326 | 39.000 |
| 127090379.445 9  | 20779351.339 | -4372.166 | 44.000 |
| 134023229.28519  | 20315735.130 | -4587.586 | 46.000 |
| 87945903.621 9   | 20315737.415 | -3568.082 | 46.000 |
| 1  | 2            | 3         | 4      |

Рис. 3.7. Приклад кадру файлу RINEX: 1 – псевдовідстань у фазових циклах; 2 – кодова псевдовідстань, 3 – доплерівська частота, 4 – співвідношення сигнал/шум

Аналогічно одночастотним приймачам, у двочастотному існує можливість використання як кодових, так і фазових вимірювань, однак поява фазових вимірювань на частоті L2 дає змогу більш точно враховувати йоносферну затримку, ніж використання кодових або комбінованих методів.

### Контрольні запитання

1. Вимірювальні комплекси ГНСС: одночастотний і двочастотний. Завдання, що вирішуються з їх допомогою.
2. Структура файлів координатної інформації з поправками псевдовідстаней, кадру файлу RINEX.

## Розділ 4. МЕТЕОРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1. Вимірювальний комплекс для реєстрації сигналів метеорологічних супутників Землі

Дані полярно-орбітальних супутників NOAA використовуються для довгострокових прогнозів погоди, моніторингу атмосфери й погодних явищ, а також для забезпечення безпеки польотів і безпеки водного транспорту. Зображення хмарності передаються у форматі АРТ (Automatic Picture Transmission) у діапазоні 137 МГц. Приклад одержуваних зображень показано на рис. 4.1.

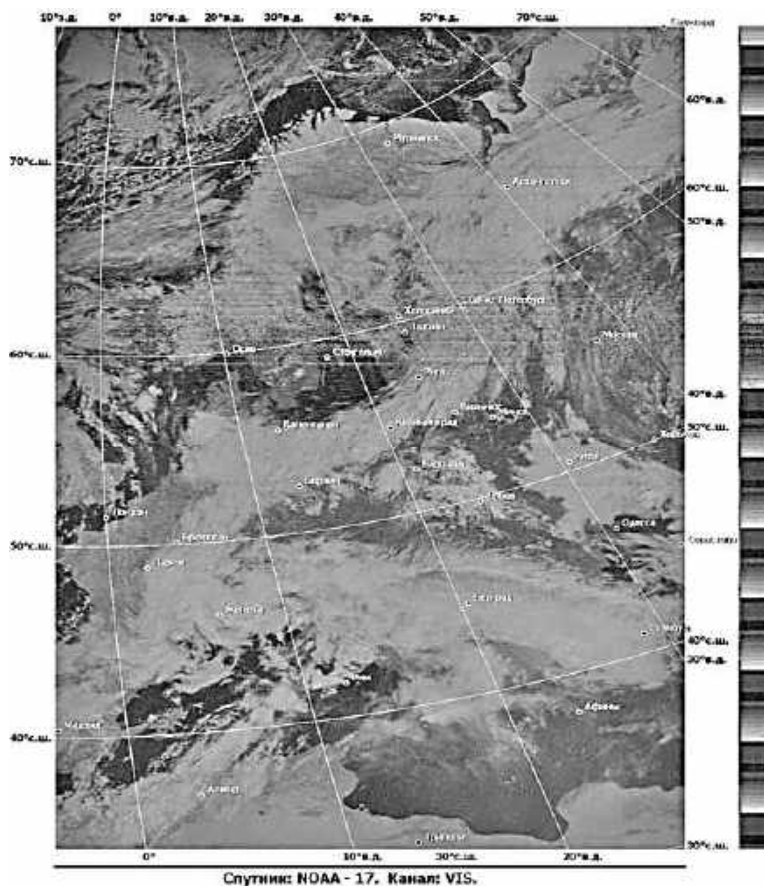


Рис. 4.1. Карти хмарності з супутників NOAA

У сеансі передавання даних із супутників NOAA передаються зображення двох спектральних каналів: видимого (удень) або середнього ІК (уночі) і теплового ІК (цілодобово) з просторовою роздільною здатністю 4 км і шириною смуги огляду приблизно 3000 км. Повторюваність приймання знімків однієї й тієї ж території – 2–3 рази на добу для одного супутника або 8–12 разів залежно від кількості одночасно діючих супутників (NOAA15 –  $f = 137,62$  МГц, NOAA17 –  $f = 137,5$  МГц, NOAA18 –  $f = 137,9125$  МГц, NOAA19 –  $f = 137,1$  МГц). Для приймання знімків розроблено стенд приймання сигналів метеорологічних супутників NOAA (рис. 4.2).

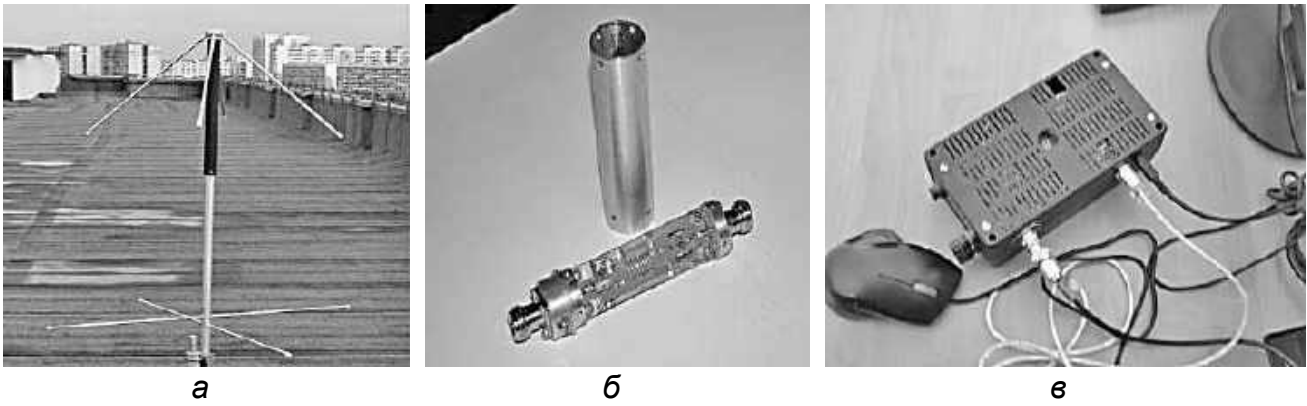


Рис. 4.2. Зовнішній вигляд антени (а), антенного підсилювача (б), приймача сигналів NOAA (в)

Пункт приймання космічної інформації складається з антени, малошумного антенного підсилювача і приймача. Антена являє собою пару півхвильових вібраторів, розміщених ортогонально один до одного. Антенний підсилювач має коефіцієнт шуму 1 дБ і коефіцієнт підсилення, близький до 25 дБ. Підсилювач, розміщений у безпосередній близькості до антени, забезпечує високу чутливість приймача та компенсацію втрат у кабелі.

Приймач космічної інформації побудовано за супергетеродинною схемою з подвійним перетворенням частоти. Це забезпечує високу вибірковість по сусідньому і дзеркальному каналах.

Для автоматизації роботи комплексу розроблено програму SatScheduler, що дає змогу записувати прольоти супутників у заданий користувачем час. Для створення розкладу використовується програма WXtrack (рис. 4.3), яка дає змогу оцінювати траєкторії руху супутників їх охоплення досліджуваної території.

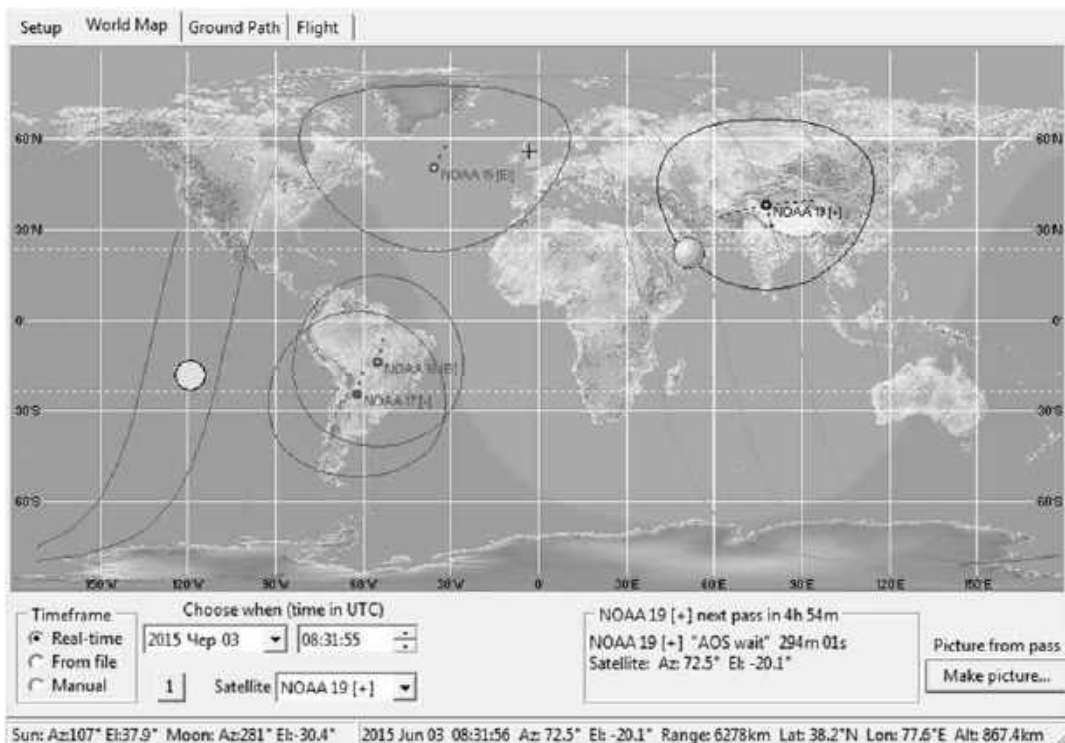


Рис. 4.3. Інтерфейс трекінг-програми WXtrack

Таким чином, використання карт хмарності може забезпечувати додатковою інформацією про просторовий розподіл хмарності та зон випадання опадів.

## 4.2. Метеостанція

Використовувана в дослідженнях метеостанція дає змогу з високою точністю визначати параметри атмосфери (температуру, тиск, вологість) з малими інтервалами між вимірами. У метеостанції використовуються датчик вологості й датчик тиску, кожен з яких укомплектовано пристроєм для вимірювання температури, завдяки чому не потребується встановлення окремого датчика температури. Однією з переваг використання штатної метеостанції є період отримання інформації про метеорологічні параметри, який може задаватися починаючи з 2 с (для даних з мережі «Інтернет» період оновлення інформації становить 1...3 год). Таким чином, отримана інформація про змінення коефіцієнта заломлення, розрахованого за метеорологічними параметрами, є значно достовірнішою. Приклад порівняння метеорологічної інформації, отриманої в місці проведення досліджень і від найближчої станції, дані якої є доступними в мережі «Інтернет», показано на рис. 4.4.

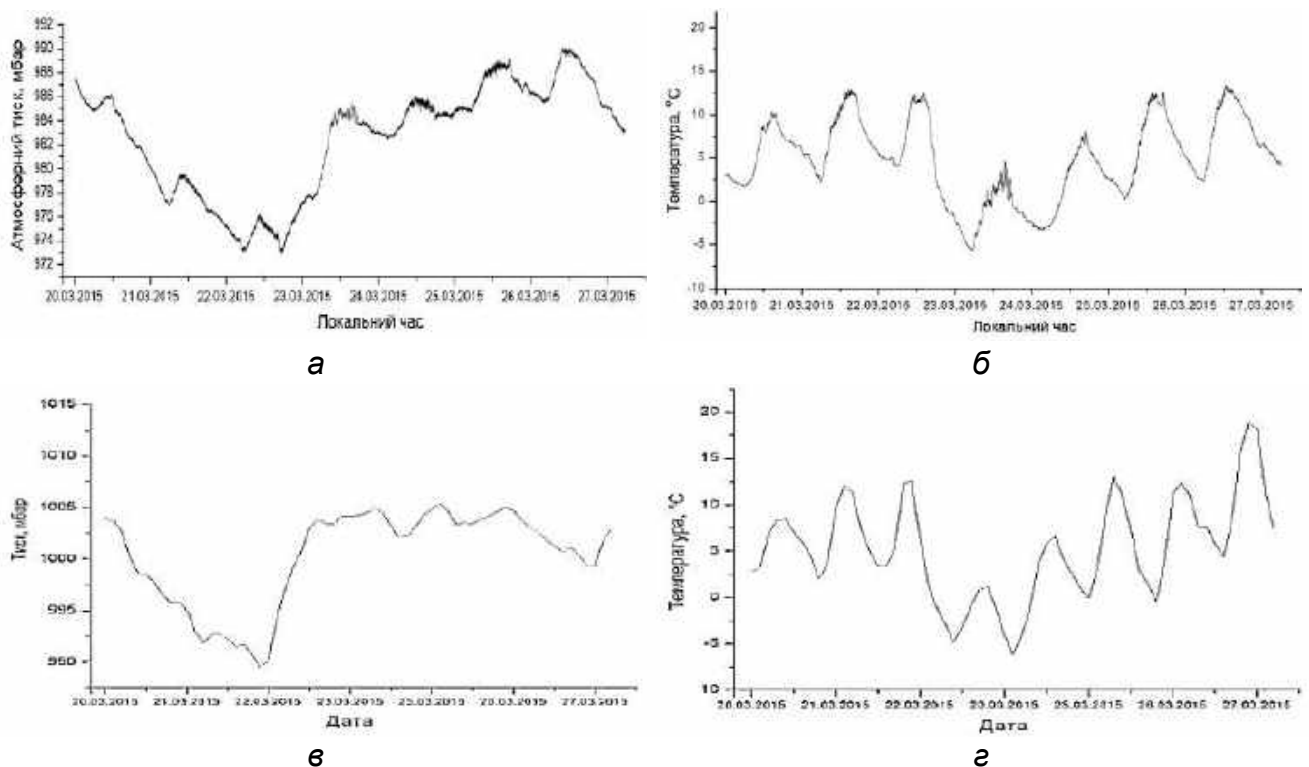


Рис. 4.4. Змінення тиску (а, в) і температури (б, г) за період з 20.03.2015 по 27.03.2015: а, б – штатна метеостанція; в, г – інформація про погоду в аеропорту

Для вимірювання вологості використовується датчик серії SHT (Humidity & Temperature Sensor) компанії Sensirion. Такі датчики призначено для вимірювання відносної вологості повітря в межах від 0 до 100 %. Основою датчика є чутливий елемент, який являє собою багатошарову

структуру, утворену двома плоскими платиновими обкладками й діелектричним термореактивним полімером, який заповнює простір між ними. Датчик має двопровідний послідовний цифровий інтерфейс із тактовою частотою до 10 МГц. Використовуваний датчик SHT15 має таку точність:  $\pm 2\%$  під час вимірювання відносної вологості;  $\pm 0,3^\circ$  під час вимірювання температури. Діапазон вимірюваних температур: від  $-40^\circ\text{C}$  до  $+123,8^\circ\text{C}$ . Усередині датчика SHT15 є елементи, електричні характеристики яких змінюються при змінні вологості й температури і які навантажені на 14-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), з'єднаний з внутрішнім мікроконтролером датчика SHT15 за допомогою послідовного інтерфейсу, що дає змогу отримати високу якість сигналу і малий час відгуку на змінення метеорологічних параметрів (максимум 3 с).

Як датчик тиску використовується датчик HP03SA компанії HoreRF, який являє собою мініатюрний гібридний модуль барометра/альтиметра з підвищеною точністю, виготовлений на основі п'єзорезистивного датчика тиску й інтерфейсної мікросхеми АЦП. Тензочутливий елемент датчика складається з чотирьох п'єзорезисторів у тонкій кремінній мембрані, сформованих методом іонної імплантації та під'єднаних за мостовою схемою.

Деформація мембрани під дією прикладеного тиску призводить до змінення опору й розбалансування моста. Формат вихідних даних такого пристрою можна подати у вигляді 16-розрядного слова, яке відповідає вимірюваній АЦП напрузі залежно від тиску й температури. Модуль HP03SA дає змогу вимірювати атмосферний тиск у межах від 300 до 1100 ГПа з точністю  $\pm 1,5$  ГПа і температуру в діапазоні від  $-20^\circ\text{C}$  до  $+60^\circ\text{C}$  з точністю  $\pm 0,8^\circ\text{C}$ . Конструктивно пристрій реалізовано у вигляді двох блоків: блока процесора й блока датчиків, з'єднаних між собою 10-контактним шлейфом (рис. 4.5).

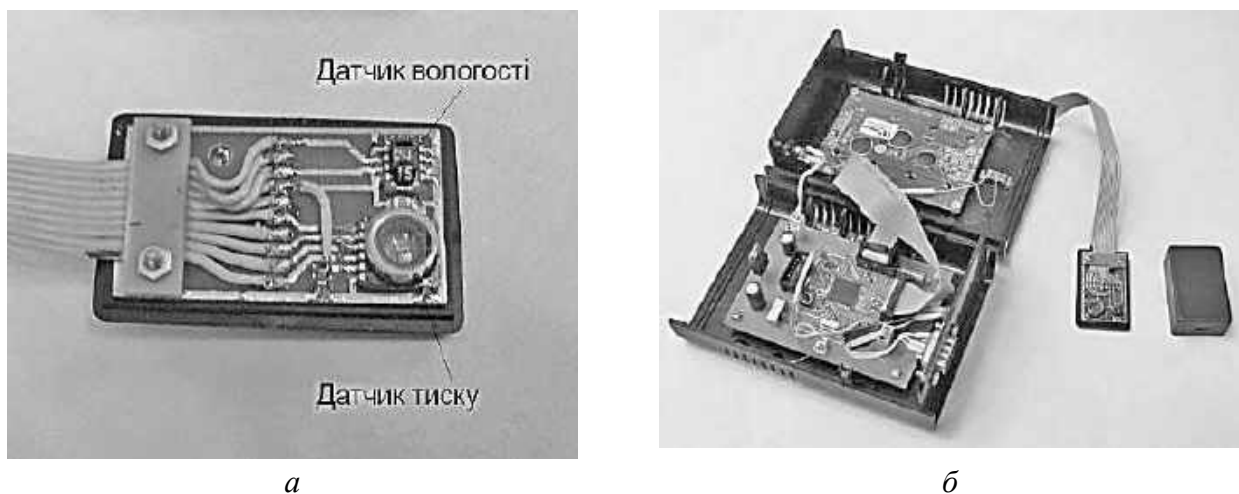


Рис. 4.5. Блок датчиків (а) і пристрій з'єднання з виносним блоком датчиків (б)

Накопичення метеорологічної інформації здійснюється за допомогою спеціально створеної програми, інтерфейс якої зображено на рис. 4.6.

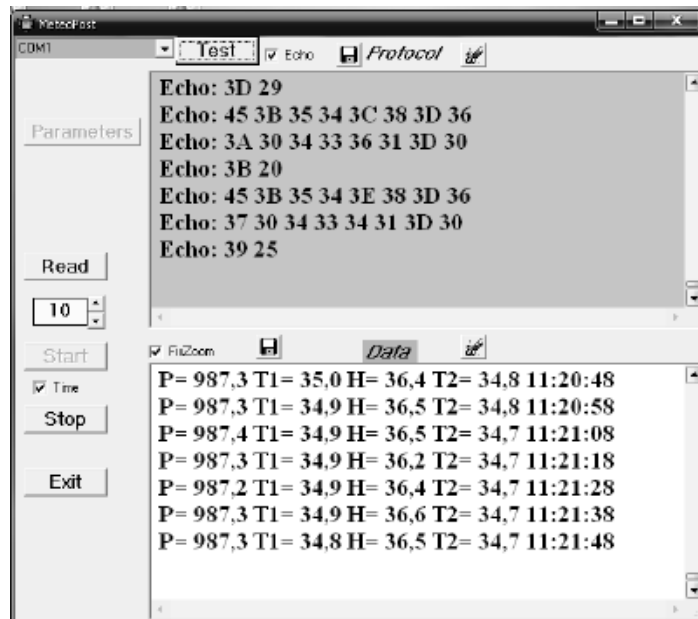


Рис. 4.6. Інтерфейс програми реєстрації метеорологічних параметрів

### 4.3. Конденсаторний НЧ-рефрактометр

Властивості середовища при поширенні радіохвиль визначаються коефіцієнтом заломлення  $n$ , який зв'язаний з діелектричною проникністю середовища простим співвідношенням  $n = \sqrt{\epsilon}$ . Для атмосфери поблизу поверхні Землі величина діелектричної проникності відрізняється від одиниці лише в шостому знаку, тому для зручності на практиці використовується індекс рефракції  $N = (n - 1) \cdot 10^6$ . Для вимірювання індексу рефракції можна використовувати як підходи, що базуються на перерахунку метеопараметрів, так і безпосереднє вимірювання діелектричної проникності середовища. Як пристрій для безпосереднього вимірювання коефіцієнта заломлення середовища в цих дослідженнях використовувався конденсаторний НЧ-рефрактометр (рис. 4.7).

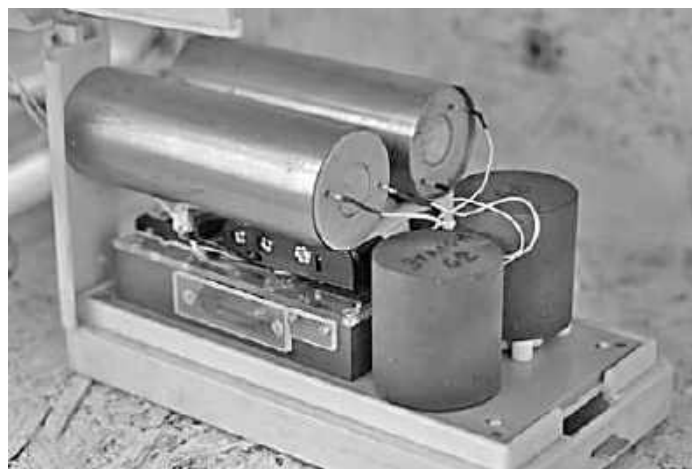


Рис. 4.7. Зовнішній вигляд конденсаторного НЧ-рефрактометра

Робота використовуваного рефрактометра ґрунтується на методі

Крейна, за яким вимірюється різниця резонансних частот вимірюваного (що сполучається із середовищем) та еталонного (закритого) резонаторів, кожен з яких визначає частоту свого осцилятора. Флуктуації різницевої частоти визначаються змінами показника заломлення середовища у вимірюваному резонаторі. Схематичну структуру рефрактометра зображено на рис. 4.8.

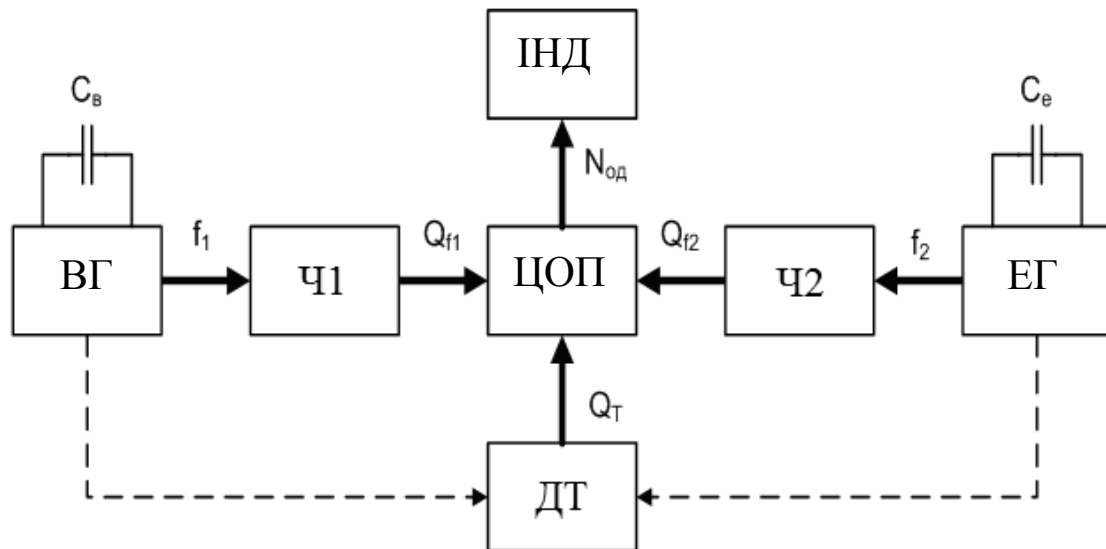


Рис. 4.8. Структура конденсаторного НЧ-рефрактометра:  
 ВГ – вимірювальний генератор; ЕГ – еталонний генератор; Ч1, Ч2 – частотоміри;  
 ДТ – датчик температури; ЦОП – цифровий обчислювальний прилад;  
 ІНД – індикаторний прилад

Для запобігання впливу змішувача частот на точність вимірювання використовується пряме вимірювання частот генераторів, а різниця визначається цифровим методом. Також для зменшення впливу температурних коефіцієнтів частот генераторів на точність вимірювань застосовуються датчики температури, інформація з яких дає змогу проводити також і температурну компенсацію вимірювань.

Частотоміри реалізовано в цифровому вигляді (алгоритмічно) на основі мікроконтролера (МК). Мікроконтролер МК1 працює в режимі веденого. Його функція – вимірювання частоти генератора Г1 і передавання вимірюваної частоти на МК2. Мікроконтролер МК2 працює в режимі ведучого. Крім вимірювання частоти сигналу генератора Г2 мікроконтролер МК2 виконує функції основного обчислювального приладу й керує всіма функціями рефрактометра.

Інформація про вимірювання зберігається на постійному запам'ятовувальному пристрої (ПЗП). Відображення інформації про режим роботи рефрактометра й коефіцієнт заломлення, а також керування приладом здійснюється за допомогою окремого блока, що містить рідкокристалічний індикатор і клавіатуру. Рефрактометр працює таким чином: МК2 формує інтервал вимірювання  $T_{\text{вим}}$  і видає керувальний сигнал для вказівки його початку і кінця мікроконтролеру МК1, чим синхронізуються процеси вимірювання частот генераторів Г1 і Г2. Після закінчення інтервалу



вимірювання мікроконтролер МК2 через послідовний інтерфейс зв'язку SPI (Serial Peripheral Interface) приймає значення частоти генератора Г1 від МК1, обчислює різницеву частоту генераторів Г1 і Г2 і за нею визначає коефіцієнт заломлення середовища, значення якого записується в ПЗП. Для врахування температурного коефіцієнта частоти генераторів при обчисленні коефіцієнта заломлення в схемі використовується датчик температури, інформація з якого зчитується мікроконтролером МК2 через однопровідний послідовний інтерфейс 1-Wire.

Таким чином, створений вимірювальний комплекс забезпечує такі можливості:

1. Цілодобове вимірювання основних метеорологічних параметрів приземного шару тропосфери (температури, тиску, вологості), тобто умов поширення.

2. Цілодобове накопичення навігаційної інформації в одно- і двочастотному режимах роботи ГНС-приймачів, що дає змогу аналізувати добові й сезонні зміни вимірюваної координатної інформації.

3. Можливість відстежувати переміщення хмарного покриву за допомогою карт, що одержуються із супутників NOAA.

Як впливає з наведеного вище, сукупність технічних рішень, використаних під час створення вимірювального комплексу, сприяла тому, що він має унікальні можливості, які забезпечують вирішення не тільки фундаментальних завдань дистанційного зондування навколишнього середовища, а й багатьох прикладних завдань, що дає змогу підвищити точність позиціонування в ГНС шляхом урахування особливостей поширення радіохвиль.

### **Контрольні запитання**

1. Супутники та параметри їх орбіт для дослідження хмарного покриву Землі.

2. Вимірювальний комплекс для реєстрації сигналів метеорологічних супутників Землі.

3. Особливості побудови метеостанцій для вимірювального комплексу.

4. Оцінювання коефіцієнтів заломлення тропосфери за допомогою радіорефрактометрів.

## Розділ 5. ВИКОРИСТАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Відомо, що ефективність роботи радіотехнічних систем різного призначення (навігації, радіолокації, зв'язку) значною мірою залежить від умов поширення радіохвиль, що визначаються станом атмосферної рефракції, яка, своєю чергою, обумовлена просторово-часовим розподілом коефіцієнта заломлення  $n$ . Як варіації середньої рефракції, так і численні випадки так званого аномального поширення радіохвиль можуть призводити до значного зростання рівнів сигналів за обрієм або до завмирань у межах прямої видимості, а також позначатися на точності радарних і навігаційних вимірювань.

Урахування рефракції зазвичай проводиться шляхом введення відповідних поправок, які можна брати з усереднених модельних даних, наприклад, рекомендованих Міжнародним консультативним комітетом у справах радіомовлення (МККР). Більш ефективним було б знання умов поширення в конкретному місці в заданий час, що досягається засобами короткострокової діагностики атмосферної рефракції.

Традиційними способами визначення коефіцієнта заломлення для діагностики тривалий час були контактні вимірювання атмосферних параметрів (температури, тиску, вологості) за допомогою метеорологічних датчиків або безпосередньо рефрактометричні вимірювання  $n$  як у фіксованих точках простору, так і при переміщенні датчиків. В останні десятиріччя активно розробляються методи неконтактного зондування атмосфери: радіометричний, радіолокаційний, метод радіопросвічування та ін. Такі методи вигідно відрізняються від контактних можливістю більш ефективного огляду великих територій, швидкістю отримання інформації, методичними зручностями.

Сьогодні широкого застосування набувають ГНСС-технології в різноманітних галузях науки та техніки. У зв'язку з цим досить привабливим є застосування сигналів, що випромінюються штучними супутниками Землі (ШСЗ), для діагностики тропосферної рефракції, виявлення й попередження про небезпечні метеоявища.

У розд. 5 розглянуто можливість використання радіозаходів навігаційних супутників систем GPS, ГЛОНАСС, GNSS для оцінювання тропосферної рефракції над сушею й запропоновано використовувати моменти радіозаходів супутників систем глобальної навігації, а також спектральний склад сигналу, який приймається від ШСЗ, для оцінювання рефракційних властивостей тропосфери над сушею. Розглянуто використання штатних режимів приймачів систем глобальної навігації для визначення коефіцієнта заломлення тропосфери. Проаналізовано застосування приймачів сигналів систем глобальної супутникової навігації

для виявлення небезпечних метеоявищ. Розглянуто також можливість застосування ГНСС для досліджень підстильної поверхні. Запропоновано методики виявлення небезпечних метеорологічних явищ з використанням даних вимірювання координат приймачами систем глобальної супутникової навігації GLN і GPS.

### **5.1. Використання радіозаходів супутників ГНСС для визначення рефракційних властивостей тропосфери**

Основою для визначення параметрів приземного шару тропосфери може бути метод радіопросвічування (який називають також методом радіозатемнень), що має декілька різновидів. Фізичною передумовою методу є зв'язок між спотвореннями параметрів сигналу (його рівня або частоти) під час руху джерела та мірою атмосферної рефракції. Під час роботи над морем унаслідок сильного відбиття від поверхні розподілу використовується інтерференційний варіант методу, коли прийнятий від ШСЗ сигнал набуває пелюсткового характеру у вигляді максимумів і мінімумів, які чергуються.

У багатьох роботах, що стосуються поширення радіохвиль над морем, зазначається зв'язок інтерференційної структури сигналу зі станом атмосферної рефракції. Ця явна закономірність дала змогу Г. В. Хітні запатентувати ідею визначення профілю коефіцієнта заломлення в приводному шарі атмосфери за допомогою приймання випромінювання ШСЗ на корабельну антену, на яку надходять прямий і відбитий від поверхні моря промені. Уперше цю ідею реалізував К. Д. Андерсон, який у дослідях, проведених на частотах 1239 і 2891 МГц, показав можливість приблизного відновлення профілю коефіцієнта заломлення  $n(h)$ . В основу методу відновлення покладено порівняння реалізації прийнятого сигналу ШСЗ з набором (банком) аналогічних залежностей, попередньо аналітично розрахованих для різних атмосферних ситуацій.

Ідею відновлення профілю  $n(h)$  за доплерівською методикою шляхом розв'язання оберненої задачі рефракції було випробувано в роботі [10]. Показано, що при заданій точності вимірювання доплерівської частоти похибка відновлення профілю  $n(h)$  становить 20...30 N од. На думку авторів, метод можна застосовувати в багатьох геофізичних задачах.

У серії робіт, проведених ІФА РАН, здійснювалося приймання випромінювання ШСЗ "Транзит" (діапазони 150 і 600 МГц) на кораблі в умовах океанської експедиції. На початковому етапі увага приділялася випадкам так званої сильної квазіперіодичної модуляції (СКМ), яка мала місце за наявності піднесеного відбивного шару. Для опису явища було запропоновано просту модель, що дає змогу приблизно оцінити параметри шару. Спроби відновлення профілю  $n(h)$  за доплерівською методикою стали перед серйозними проблемами, пов'язаними з обмеженнями навігаційної системи "Транзит". У теоретичному плані ця група дослідників

запропонувала методи відновлення профілю  $n(h)$ , що базуються на отриманні корисної інформації за допомогою фазових вимірювань сигналів навігаційних систем типу "Навстар" і на нових математичних методах розв'язання обернених задач.

В ІРЕ НАНУ проведено цикл робіт з діагностики умов поширення радіохвиль з використанням випромінювання ШСЗ "Транзит" у діапазоні 600 МГц на березі Чорного моря. З інтерференційної залежності сигналу, прийнятого від ШСЗ, були отримані дані про кути рефракції в кожному мінімумі функції кута місця джерела. Отримані дані були первинними для знаходження ефективного градієнта в приводному шарі методом перебору заздалегідь розрахованих кривих. Робилася також спроба розв'язати обернену задачу рефракції. Похибка відновлення за обома методами становить близько 15...20 N од.

В експериментах спостерігалися також характерні явища – осциляції рівня й радіями, а також спотворення та руйнування регулярної пелюсткової структури. Методами променевої оптики здійснено моделювання деяких з цих ефектів. Такі ефекти перешкоджають застосуванню стандартної процедури відновлення профілю  $n(h)$ , проте самі є ознаками аномальних умов поширення радіохвиль, зазвичай – підвищеної і понадрефракції, що може спричинити появу аномально високих похибок у системах глобального позиціонування.

Таким чином, результати наведених робіт (велика частина яких виконана із супутниками типу "Транзит") показують принципову можливість використання методу радіопросвічування атмосфери з ШСЗ для діагностики рефракції й аномальних умов поширення радіохвиль над морською поверхнею. Разом з тим залишаються питання, які потребують більш детального опрацювання. Насамперед це стосується похибки відновлення профілю  $n(h)$ , на яку впливають такі фактори:

1) схема атмосферних вимірювань, при якій обернена задача рефракції є некоректною; унаслідок цього малі похибки вимірюваної величини призводять до великої похибки відновлення;

2) флуктуації тропосфери й морське хвилювання, унаслідок чого відбуваються флуктуації положень мінімумів інтерференційної кривої;

3) мала тривалість сеансу обсервації й великий часовий інтервал між сусідніми обсерваціями, унаслідок чого неможливо застосувати усереднення за часом або за ансамблем для згладжування тропосферних флуктуацій;

б) іоносфера, внесок якої в діапазоні 600 МГц становить до 10 % тропосферного ефекту за кутами рефракції, а в діапазоні 150 МГц може навіть перевищувати його.

Інші похибки методичного й інструментального характеру можуть бути зменшені відносно вище перелічених.

Слід зазначити, що найпростіший інтерференційний варіант методу радіопросвічування, особливо такий, коли використовується

випромінювання ШСЗ супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) першого покоління, має певні обмеження. Потребується вжиття багатьох заходів для зниження внеску похибок.

Ще складніше діагностувати тропосферну рефракцію над поверхнею суші. На відміну від морської поверхні, ділянки суші мають істотно більшу неоднорідність унаслідок як мінливості їх електрофізичних характеристик, так і наявності різних видів рослинності. Крім того, поверхня суші, на відміну від моря, має значну шорсткість. На морі наявність провалів в інтерференційній структурі поля визначається взаємодією прямого сигналу, дзеркально відбитого від поверхні моря, і піднесених інверсійних шарів. Над сушею поле в точці приймання формується ще й випадковими, так званими дифузними відбиттями від її нерівностей. У процесі руху супутника по орбіті може відбуватися змінення цих дифузних розсіювачів, що значно ускладнює інтерференційну картину поля й робить відновлення профілю коефіцієнта заломлення за нею досить складним.

Оскільки використання класичного інтерферометричного методу для діагностики тропосферної рефракції над сушею є досить складним процесом, можна застосувати його спрощений варіант та оцінювання рефракційних властивостей тропосфери проводити по першій інтерференційній пелюстці – моменту появи (зникнення) сигналу ШСЗ – його радіосходу або радіозаходу.

### *5.1.1. Методика вимірювань та оброблення даних*

*Експериментальні дослідження.* Експериментальні дослідження проводилися в м. Харкові і м. Смілі Черкаської області. У м. Харкові приймальна антена розташовувалася на висоті близько 30 м відносно поверхні землі, рівень цієї поверхні становив близько 170 м відносно рівня моря. Вимірювальний пункт був розташований у північній частині міста. Для аналізу використовувалися сигнали супутників, траєкторії яких проходили в північно-західному секторі кутів, тобто секторі, у якому не було міської забудови, і відбиття від поверхні розподілу формувалися в основному рельєфом місцевості й рослинним покривом. В експериментах використовувалася стандартна приймальна апаратура системи GPS.

У м. Смілі антени приймачів GPS і ГЛОНАСС розташовувалися на висоті близько 30 м відносно поверхні землі, на плоскому даху будівлі на штативах заввишки близько 1 м. Антени розташовувалися над металевим рефлектором діаметром 0,5 м, при цьому їх фазовий центр знаходився на висоті 15...20 мм відносно рефлектора. Рівень поверхні землі в місці вимірювання становив 125 м відносно рівня моря. Для вимірювань

використовувався розроблений фахівцями ТОВ «Навис-Україна» приймач, що забезпечує можливість приймання й оброблення сигналів декількох навігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС), у тому числі і спільне їх оброблення (GNSS).

Вимірювання проводилися в різні періоди року. Для порівняння використовувалися дані метеорологічних станцій, що вимірюють стандартні показники атмосфери: температуру, вологість, тиск, за якими визначався коефіцієнт заломлення. Слід зазначити, що висота формується у двох відліках: над геоїдом (рівнем моря) і над еліпсоїдом. Для Сміли різниця між ними (перевищення геоїда над еліпсоїдом) становить 26,8 м. Тому при формуванні файлів Position Velocity Time (PVT) та задаванні еталонних координат в програмі постоброблення використовуються значення висоти відносно еліпсоїда, тоді як статистика набирається за файлами NMEA або BINR, де висота розраховується відносно рівня моря.

Місце встановлення антени вимірювального комплексу має забезпечувати приймання сигналів КА без перешкод, починаючи з малих кутів місця, менших за  $5^\circ$ .

*Теоретичне обґрунтування.* Під час руху ШСЗ по орбіті навколо Землі випромінюваний ним сигнал може реєструватися приймачем, якщо супутник знаходиться в межах прямої видимості.

Рефракційні властивості атмосфери будемо враховувати в межах моделі еквівалентного радіуса Землі. Геометрію задачі показано на рис. 5.1.

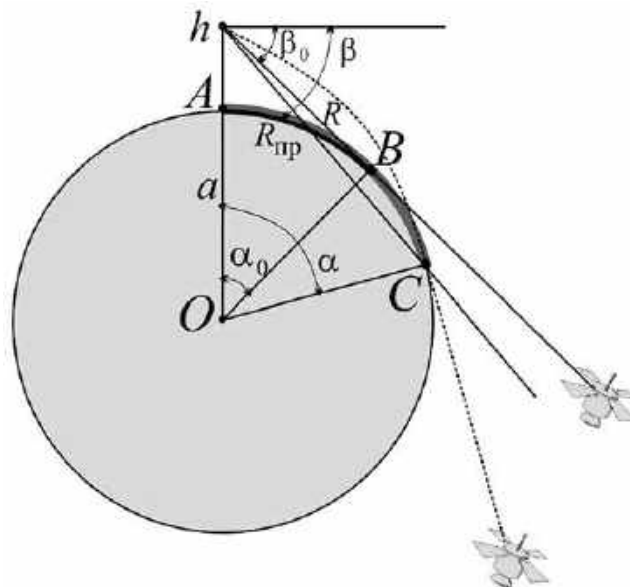


Рис. 5.1. Геометрія задачі

В умовах відсутності рефракції сигнал від супутника буде прийнятий приймачем, розташованим на висоті  $h$ , коли супутник буде знаходитися під кутом  $\beta_0$  відносно горизонту, причому, як видно з рисунка,

$$\beta_0 = \frac{h}{R_{\text{пр}}} \approx \alpha_0 = \frac{R_{\text{пр}}}{a}, \quad (5.1)$$

де  $R_{\text{пр}}$  – відстань прямої видимості;

$a \approx 6,37 \cdot 10^6$  м – радіус Землі.

У більшості випадків  $h \ll a$ , і відстань прямої видимості визначається відомим співвідношенням:

$$R_{\text{пр}} \approx \sqrt{2ha}, \quad (5.2)$$

а

$$\beta_0 = \alpha_0 \approx \sqrt{\frac{2h}{a}}. \quad (5.3)$$

Поява рефракції призводить до викривлення променя, унаслідок чого супутник раніше (при великих кутах  $\beta$ ) з'являється в зоні прямої видимості приймача. Викривлення променя й зміну дальності прямої видимості  $R$  можна врахувати в межах моделі еквівалентного радіуса Землі  $a_e$ :

$$R \approx \sqrt{2ha_e}, \quad (5.4)$$

а

$$\beta \approx \alpha = \frac{R}{a} \approx \sqrt{\frac{2h}{a^2} a_e}, \quad (5.5)$$

де

$$a_e = a(1 + g_N a)^{-1}, \quad (5.5a)$$

а  $g_N$  – градієнт коефіцієнта заломлення.

Тоді зі співвідношень (5.4), (5.5) з урахуванням (5.3) можна визначити кут, при якому ШСЗ з'явиться в межах прямої видимості приймача:

$$\beta \approx \sqrt{\frac{2h}{a(1 + g_N a)}} = \beta_0 (1 + g_N a)^{-0,5}. \quad (5.6)$$

Зі співвідношення (5.6) випливає, що збільшення градієнта коефіцієнта заломлення приводить до збільшення від'ємного відносно горизонту кута, під яким супутник потрапляє в межі прямої видимості приймача.

Схожий підхід уперше запропонував А. Г. Аренберг для визначення іоносферної рефракції і точок радіосходів супутника.

### 5.1.2. Дані за кутами радіозаходів та їх зв'язок з градієнтом коефіцієнта заломлення

На рис. 5.2 показано розраховану з використанням співвідношення (5.6) залежність очікуваного кута спостереження супутника в межах прямої видимості для наших умов (висота розміщення приймального пункту: крива 1 – 30 м відносно поверхні землі, крива 2 – 200 м відносно рівня моря) від градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери. Необхідно зазначити сильну залежність кута радіосходу від висоти розташування приймального пункту. Оскільки поверхня землі не є гладкою, а має рельєф, виникає природне запитання: «Яку висоту необхідно брати в розрахунках – висоту відносно рівня моря чи висоту відносно поверхні землі в місці розташування приймача?»

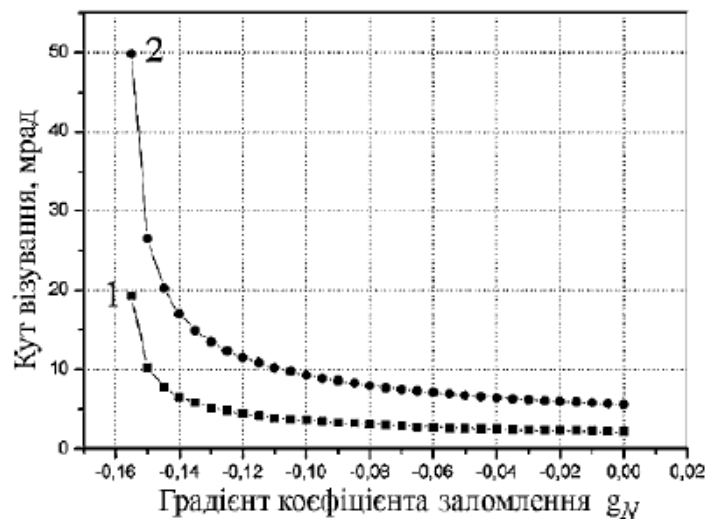


Рис. 5.2. Залежність очікуваного кута візування супутника нижче горизонту від градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери при висоті розташування приймального пункту: 1 —■—  $h = 30$  м, 2 —●—  $h = 200$  м

Мабуть, як висоту  $h_0$  необхідно брати різницю між висотою розташування приймача  $h$  і висотою найвищої точки рельєфу місцевості  $h_{\max}(R)$  відносно рівня моря  $h_0 = h - h_{\max}(R)$ .

Після цього формулу (5.6) слід записати з урахуванням наведеного вище співвідношення. Очевидно, що точка радіосходу над сушею для різних азимутальних кутів буде різною через мінливість рельєфу поверхні землі. Дальність, на якій необхідно брати висоту розташування цієї точки, також буде залежати від рефракції в тропосфері (формула (5.5)).

Отже, слід з обережністю ставитися до результатів, що отримуються під тими азимутальними кутами, де на дальності прямої видимості є істотні перепади висот, наприклад, у вигляді зон забудови. Під час оцінювання кута сходу (заходу) фактично використовується поняття просвіту, яке ввів раніше А. І. Калінін для розрахунку рівня сигналів.



*Результати експерименту та їх обмірковування.* Під час проведення вимірювань реєструвалися в основному радіозаходи супутників, оскільки для них простіше було реалізувати супроводження їх сигналу при віддаленні від приймача. Для цього розроблено спеціальні програми, що дають змогу працювати із супутниками з малими кутами піднесення.

Сигнал з виходу приймального пристрою вводився до комп'ютера. З використанням спеціальних програм оброблення амплітуда сигналу нормувалася відносно рівня шумів на вході приймача, а прийнята часова реалізація з урахуванням даних про місцезнаходження супутника відображалася в координатах «амплітуда/кут місця супутника відносно горизонту». Як приклад на рис. 5.3 зображено реалізації, що характеризують залежність поведінки сигналу від кута візування супутника відносно горизонту при радіозаходах ШСЗ для м. Харкова (рис. 5.3, а) і м. Сміли (рис. 5.3, б).

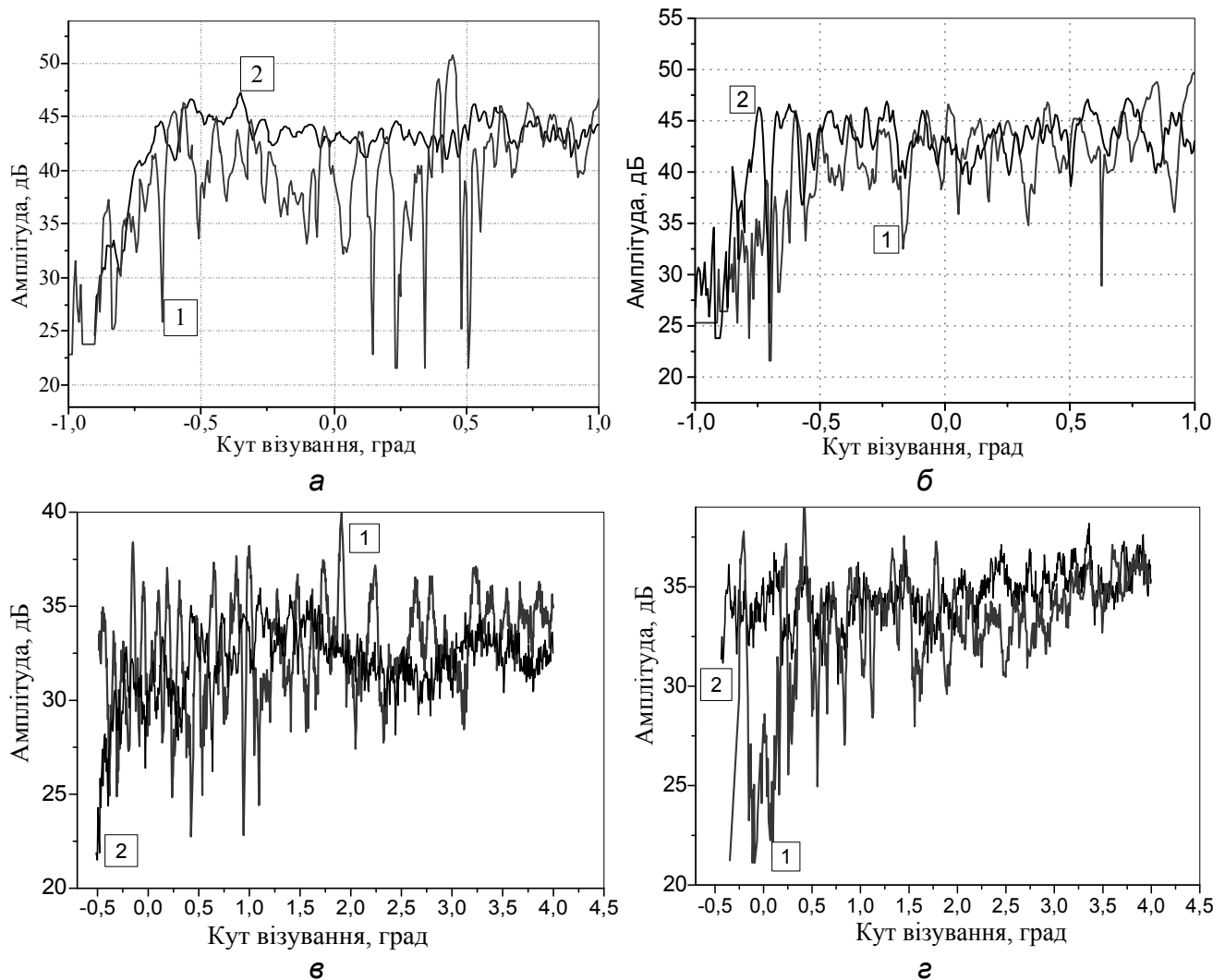


Рис. 5.3. Поведінка сигналу залежно від кута візування супутника відносно горизонту при двох радіозаходах: м. Харків, а – 1 – 8 червня, 2 – 16 грудня, б – 1 – 31 травня, 2 – 6 грудня; м. Сміла, в – 1 – 1 червня, 2 – 30 січня, г – 1 – 9 червня, 2 – 20 січня

На кривих 1, отриманих під час експериментів, які проводилися в літній період, спостерігаються глибокі квазіперіодичні завмирання. Завмирання можуть бути спричинені багатопроменевістю в каналі поширення, що пов'язано з відбиттям від шорсткої земної поверхні, а також від піднесених інверсійних шарів. Характерним для цієї ситуації є мала кількість розсіювачів, що формують поле в точці приймання. Зазвичай у сигналі, що реєструється, спостерігається одна, рідше дві гармонійні складові. У більшості випадків зміну рівня сигналу на схилі радіозаходу в логарифмічному масштабі можна апроксимувати лінійною залежністю від кута. Це означає, що зміна сигналу в цій області підпорядковується експоненціальному закону, характерному для зони дифракції. Криві 2 отримано під час експериментів у зимовий період, коли рефракція в тропосфері зазвичай є близькою до нормальної. Практично відсутні глибокі завмирання в прийнятому сигналі. Діапазон його флуктуацій не перевищує 5 дБ. Такі ситуації є характерними за наявності великої кількості точок, що дифузно розсіюють. В отриманих реалізаціях радіозаходів оцінювалися кути зникнення сигналу (радіозахід), а також кути виходу сигналу на максимальне значення (вихід із зони дифракції та вхід у зону прямої видимості).

Дані про радіозаходи, отримані експериментально з використанням методу найменших квадратів, апроксимувалися кусково-ламанною функцією  $\hat{S}_0(\beta)$ :

$$\hat{S}_0(\beta) = \begin{cases} S_0 & \text{при } \beta \geq \beta_1; \\ S_1 + b_1\beta & \text{при } \beta \leq \beta_1, \end{cases} \quad (5.7)$$

де  $\beta_1$  – кут перегину, при якому значення сигналу набуває максимуму  $S_0$ .

Потім оцінювалися точки появи сигналу (перевищення ним рівня шумів) і набирання ним максимального значення:

$$S_{\min} = S_1 + b_1\beta_2; S_0 = S_1 + b_1\beta_1, \quad (5.7a)$$

де  $S_{\min}$  – рівень шуму;

$\beta_2$  – кут радіозаходу (радіосходу), коли сигнал починає перевищувати шум;

$S_0; S_1; b_1$  – величини, що визначаються з рівнянь (5.7a).

З використанням цього підходу були оброблені дані про радіозаходи супутників GPS. Для днів вимірювань з використанням співвідношення (5.1) і даних метеоцентру (м. Харків) про температуру, вологість і тиск були оцінені значення коефіцієнта заломлення приземного шару тропосфери та їх градієнти:

$$g_N = -7,32 \cdot 10^{-3} \exp(5,577 \cdot 10^{-3} N_0); \quad (5.8a)$$

$$g_N = A + BN_0 = 0,086 - 3,97 \cdot 10^{-4} N_0, \quad (5.86)$$

де співвідношення (5.8а) узято з роботи [10], а (5.8б) отримано за експериментальними даними. На рис. 5.4 показано залежності кутів перегину (рис. 5.4, а), заходу (рис. 5.4, б) і швидкості спадання сигналу при заході (рис. 5.4, в) ШСЗ від значення коефіцієнта заломлення біля Землі  $N_0$ .

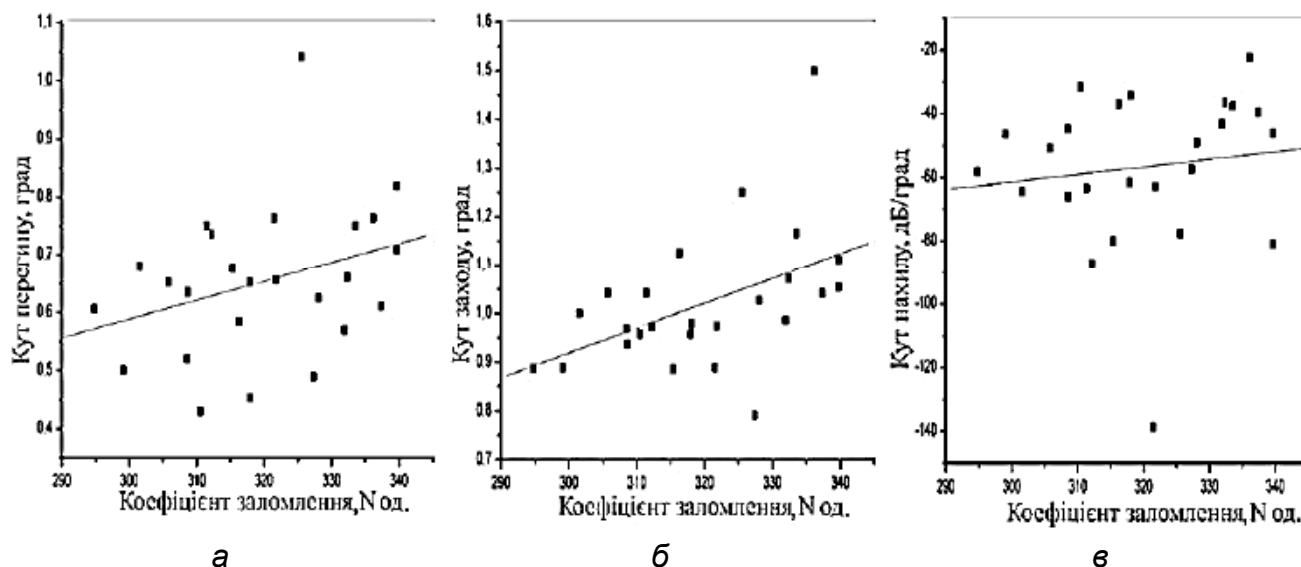


Рис. 5.4. Вплив коефіцієнта заломлення на характеристики сигналу при радіозаході: а – кут перегину; б – кут радіозаходу; в – швидкість зменшення сигналу при радіозаході

У табл. 5.1 наведено статистичні характеристики, одержані під час апроксимації експериментальних даних рівнянням лінійної регресії.

Таблиця 5.1

#### Статистичні дані апроксимації сигналу при радіозаходах

| Характеристика сигналу                               | Середнє значення А | Нахил В | Коефіцієнт кореляції R | Дисперсія $\sigma^2$ | Кількість N | Імовірність неприйняття гіпотези |
|--|--------------------|---------|------------------------|----------------------|-------------|----------------------------------|
| Кут перегину характеристики, град                    | -0,39357           | 0,00327 | 0,32923                | 0,12568              | 25          | 0,10806                          |
|  | -0,23975           | 0,00276 | 0,3668                 | 0,09601              | 22          | 0,09507                          |
|  | -0,21311           | 0,00266 | 0,36561                | 0,09658              | 21          | 0,10333                          |
|  | -0,02111           | 0,002   | 0,29988                | 0,08992              | 18          | 0,22666                          |
| Кут радіозаходу, град                                | -0,61766           | 0,00512 | 0,6762                 | 0,12657              | 25          | 0,01611                          |
|  | -0,11682           | 0,0035  | 0,59062                | 0,06532              | 22          | 0,00382                          |
|  | -0,16622           | 0,00361 | 0,63868                | 0,06076              | 21          | 0,00183                          |
|  | -0,16279           | 0,00369 | 0,65957                | 0,05967              | 18          | 0,0029                           |
| Швидкість зменшення сигналу при радіозаході, град/дБ | -132,208           | 0,23615 | 0,12836                | 26,6167              | 25          | 0,56088                          |
|  | -101,777           | 0,13978 | 0,07683                | 26,7673              | 22          | 0,73399                          |
|  | -120,626           | 0,21063 | 0,17536                | 16,5307              | 21          | 0,66712                          |
|  | -162,282           | 0,35831 | 0,62276                | 10,8622              | 18          | 0,0805                           |

Для апроксимації брали повний обсяг даних і дані, з яких були відсіяні

грубі помилки, тобто дані, що сильно різняться. Видно, що така характеристика, як кут перегину слабо, залежить від коефіцієнта заломлення. Водночас кут радіозаходу супутника і нахил характеристики змінення рівня сигналу при радіозаході більшою мірою залежать від коефіцієнта заломлення приземного шару тропосфери, а отже і градієнта коефіцієнта заломлення в цьому шарі.

Видно, що при збільшенні коефіцієнта заломлення (його градієнта) у приповерхневому шарі відбувається збільшення кута радіозаходу супутника. Коефіцієнт кореляції цих параметрів – більше 0,65. У більшості випадків при цьому спостерігається і зниження декременту загасання інтенсивності сигналу.

Таким чином, з урахуванням (5.8) і даних табл. 5.1 можна записати вираз, що зв'язує кут радіозаходу  $\beta_2$  з коефіцієнтом заломлення тропосфери  $N$  :

$$N = a + b\beta_2, \quad (5.9)$$

де  $a = 40 \dots 44$ ,  $b = 277 \dots 271$  – значення, які можна використовувати для оцінювання ефективного значення коефіцієнта заломлення за кутами радіозаходів супутника.

Як видно із співвідношення (5.6), значення коефіцієнтів, що зв'язують градієнт, а отже, і коефіцієнт заломлення приземного шару тропосфери з кутом радіозаходу ШСЗ, будуть залежати від висоти розташування приймальної антени і рельєфу місцевості в напрямку на супутник. Установлення цієї залежності і буде метою подальших досліджень.

*Спектральне оброблення радіозаходів супутників.* Якщо вихідний ефект каналу зв'язку формується двома механізмами: дифракційним  $V_d$  та інтерференційним  $V_I$ , кожен з яких має свій коефіцієнт передавання сигналу  $V_j$  у каналі поширення:  $V_{\Sigma} = V_d * V_I$ , то під час логарифмування вихідного сигналу приймача, який є мультиплікатором двох механізмів впливу, він трансформується в адитивну суміш логарифмів компонент кожного з механізмів. Подібний підхід для розподілу ефектів, пов'язаних з мультиплікативним об'єднанням декількох процесів, часто використовується під час кепстрального оброблення сигналів для розподілу в спектральній області компонент, що належать кожному з механізмів, які формують вихідний ефект. Однак там для розподілу використовують логарифмування спектра процесу й подальше обернене перетворення Фур'є. У цьому випадку логарифмуванню піддається вихідний процес для розподілу механізмів, що його формують.

Для одержаних реалізацій  $S(\theta)$  здійснювалося згладжування сигналу у ковзному вікні (рис. 5.5, а):

$$\hat{S}(\beta) = \frac{1}{\Delta\beta} \int_{\beta-\Delta\beta/2}^{\beta+\Delta\beta/2} S(\beta) d\beta. \quad (5.10)$$

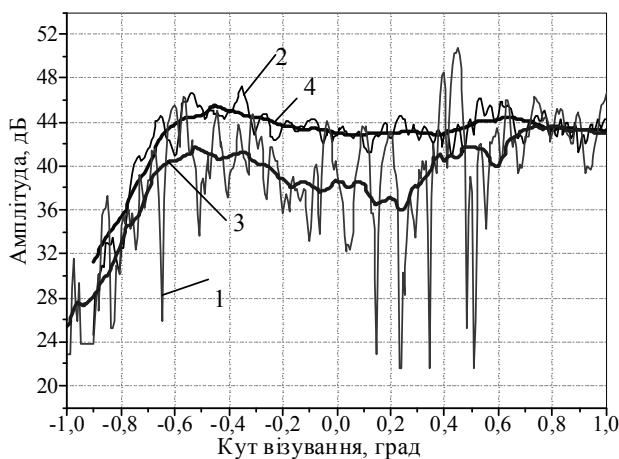
З урахуванням отриманих оцінок змінного середнього можна виділити нев'язку  $\Delta(\beta)$ , обумовлену інтерференційним механізмом (рис. 5.5, б):

$$\Delta(\beta) = S(\beta) - \hat{S}(\beta). \quad (5.11)$$

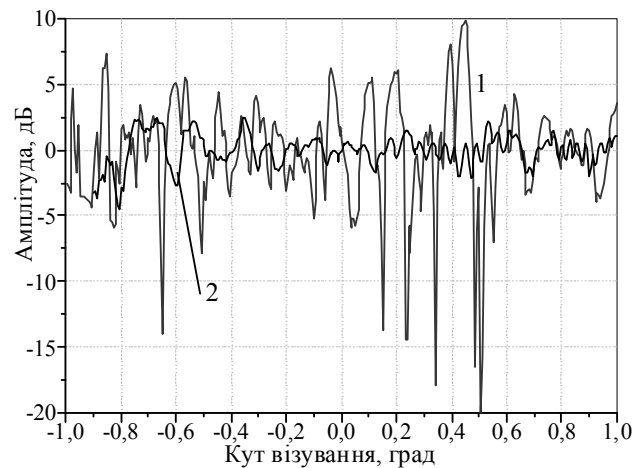
Для виділеної нев'язки можна оцінити Фур'є-образ (рис. 5.6, в):

$$S_{\Delta}(i\chi) = F(\Delta(\beta)) = \int_{\beta_{\min}}^{\beta_{\max}} \Delta(\beta) \exp(-i\chi\beta) d\beta, \text{ який далі буде використовуватися}$$

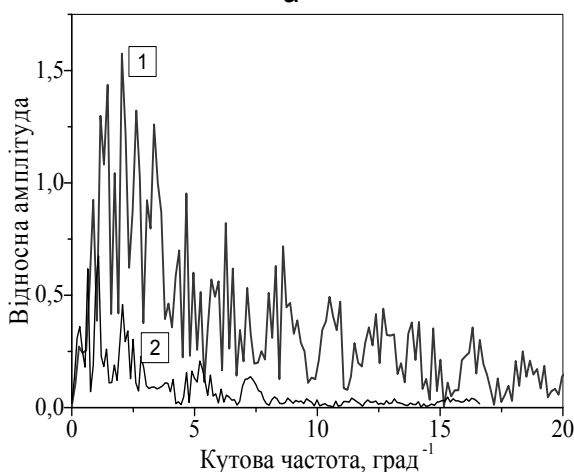
для оцінювання кутового положення джерел сигналів.



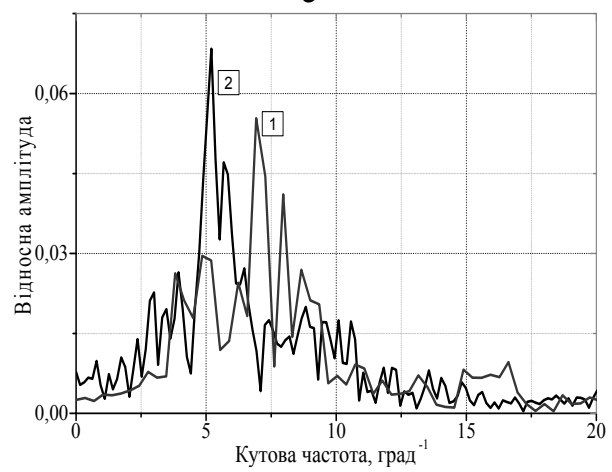
а



б



в



г

Рис. 5.5. Залежність прийнятого сигналу ШСЗ від кута місця:  
 а – радіозаходи, первинні дані: 1 – 8 червня, 2 – 16 грудня; 3, 4 – ковзне середнє за 60 точками; б – нев'язка: 1 – 8 червня, 2 – 16 грудня;  
 в – спектр від нев'язки: 1 – 8 червня, 2 – 16 грудня; г – спектр від взаємно кореляційних функцій: 1 – 31 травня і 8 червня, 2 – 6 грудня і 16 грудня

Трендові зміни рівня сигналу дають змогу оцінити кути радіозаходу та радіосходу, перехід сигналу від дифракційної області до області прямої видимості, простежити появу «радіоям», пов'язаних з наявністю в тропосфері піднесених інверсійних шарів, які можуть «екранувати» сигнал навігаційного супутника. Так само з наявністю піднесеного шару пов'язане зниження сигналу (див. рис. 5.5, а, криві 1, 3) у літній період при кутах місця супутника  $-0,6^\circ \dots +0,6^\circ$ . У спектрах нев'язки виявляються спектральні компоненти, пов'язані як з рефракційними ефектами, так і з дифузними відбиттями від поверхні розподілу. Використання взаємно кореляційного оброблення за кількома радіозаходами супутників GPS у різні дні, але в один і той же час, коли вони знаходилися в однаковому просторовому положенні, дає змогу виділити загальні для цих радіозаходів ефекти, пов'язані, наприклад, з відбивними точками на поверхні землі (рис. 5.5, а).

## **5.2. Використання штатних режимів приймачів систем глобальної навігації для оцінювання рефракційних властивостей тропосфери**

### *5.2.1. Апаратура і методика вимірювань*

Експериментальні дослідження проводилися у м. Смілі Черкаської області. Антени приймачів GPS і ГЛОНАСС розташовувалися на висоті близько 30 м від поверхні землі, на плоскому даху будівлі на штативах заввишки близько 1 м. Антени розташовувалися над металевим рефлектором діаметром 0,5 м, при цьому їх фазовий центр розташовувався на висоті 15...20 мм відносно рефлектора.

Рівень поверхні землі в місці вимірювання становив близько 125 м відносно рівня моря. Для порівняння використовувалися дані, отримані з використанням приймача GPS на вимірювальному пункті у м. Харкові. Висота розташування антени була приблизно така ж (близько 30 м), рівень земної поверхні відносно рівня моря – близько 170 м. Вимірювання проводилися в різні періоди року. У Харкові використовувався стандартний приймач сигналів системи GPS, а в Смілі – розроблений фахівцями ТОВ «Навіс-Україна» приймач, що забезпечує можливість приймання й оброблення сигналів декількох навігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС), у тому числі і спільне їх оброблення (GNSS). Для зіставлення використовувалися дані метеорологічних станцій, що вимірюють стандартні показники атмосфери: температуру, вологість, тиск, за якими визначався коефіцієнт заломлення.

На рис. 5.6 показано отримані для м. Харкова ( $69^\circ 58' \text{СШ}$ ,  $36^\circ 08' \text{ВД}$ , висота над рівнем моря – 156 м) і м. Черкаси ( $69^\circ 25' \text{СШ}$ ,  $32^\circ 03' \text{ВД}$ , висота над рівнем моря – 107 м) залежності показника заломлення в жовтні (рис. 5.6, а) і листопаді (рис. 5.6, б) 2008 року; крива 1 – коефіцієнт

заломлення, м. Харків, 2 – коефіцієнт заломлення, м. Черкаси.

На рис. 5.7 лініями зображено регресійні залежності між коефіцієнтами заломлення в м. Черкаси та м. Харкові у жовтні (рис. 5.7, а, в) і листопаді (рис. 5.7, б, г), зняті з інтервалом 3 год (рис. 5.7, а, б) та усереднені протягом доби (рис. 5.7 в, г). Видно, що розкид точок у жовтні є істотно більшим, ніж у листопаді. Значення параметрів, що входять у регресійне рівняння, що зв'язує значення коефіцієнтів заломлення в цих містах, їх середньоквадратичний розкид наведено в табл. 5.2. Також наведено значення коефіцієнтів кореляції, дисперсію помилки апроксимації та обсяги оброблених вибірок.

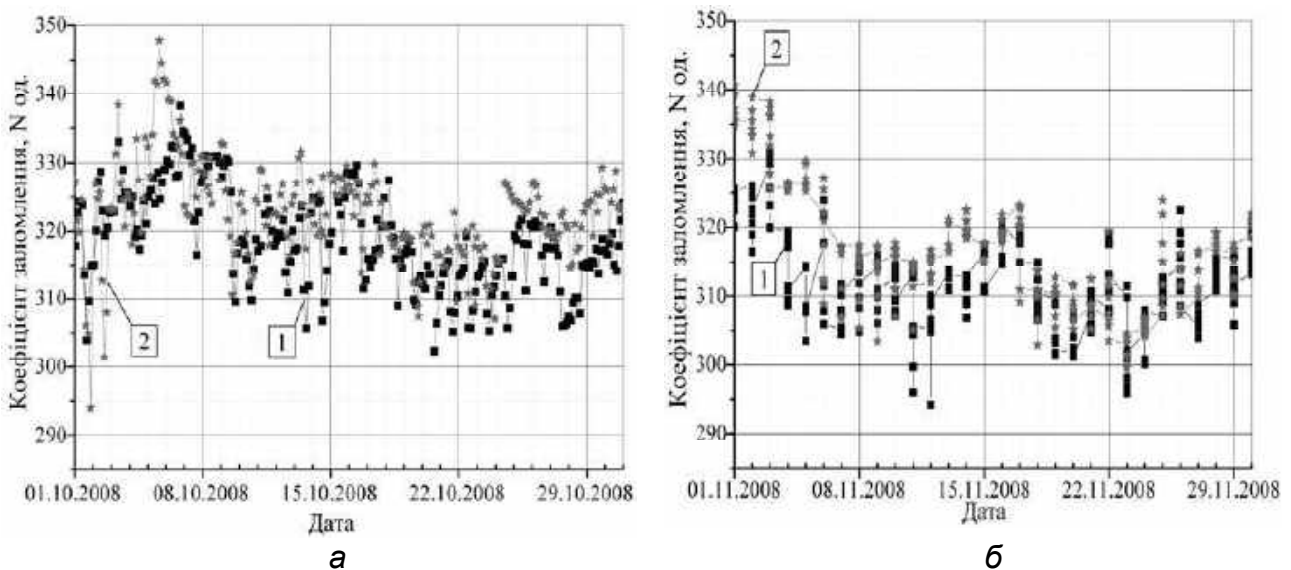


Рис. 5.6. Значення коефіцієнта заломлення для м. Харків і м. Черкаси:  
а – жовтень 2008 р., б – листопад 2008 р.

(1 – коефіцієнт заломлення, м. Харків; 2 – коефіцієнт заломлення, м. Черкаси)

З табл. 5.2 випливає, що для листопада є характерними більші, ніж для жовтня, значення коефіцієнтів кореляції як для поточних значень коефіцієнтів заломлення, так і середньодобових.

Таблиця 5.2

Значення параметрів регресійного рівняння й коефіцієнтів кореляції, дисперсія помилки апроксимації та обсяги оброблюваних вибірок  $n$

| Місяць   | Усереднення | $A_0$ | $\sigma_A$ | $B_0$ | $\sigma_B$ | $R$  | $\sigma^2$ | $n$ |
|----------|-------------|-------|------------|-------|------------|------|------------|-----|
| Жовтень  | Поточні     | 157,6 | 17,5       | 0,50  | 0,05       | 0,51 | 6,2        | 260 |
|          | Добові      | 88,0  | 13,0       | 0,76  | 0,06       | 0,75 | 3,6        | 268 |
| Листопад | Поточні     | 165,6 | 11,0       | 0,53  | 0,03       | 0,71 | 6,7        | 236 |
|          | Добові      | -89,6 | 15,5       | 1,30  | 0,05       | 0,86 | 6,1        | 238 |

Середньодобові значення корельовані сильніше, ніж поточні, і більшою мірою відображають тенденції змінення цього параметра, які й

необхідно враховувати при введенні поправок. Коефіцієнт кореляції середньодобових даних за коефіцієнтами заломлення для м. Черкаси і м. Харкова за жовтень становить 0,75, а за листопад – 0,86.

Збільшення коефіцієнта кореляції в зимовий період пояснюється більш спокійним характером поведінки тропосферних процесів і більшою їх просторовою однорідністю пізньої осені, взимку і ранньою весною, коли земля охолола й покрита снігом, що ускладнює появу інверсій вологості і температури і робить профілі коефіцієнта заломлення атмосфери більш гладкими.

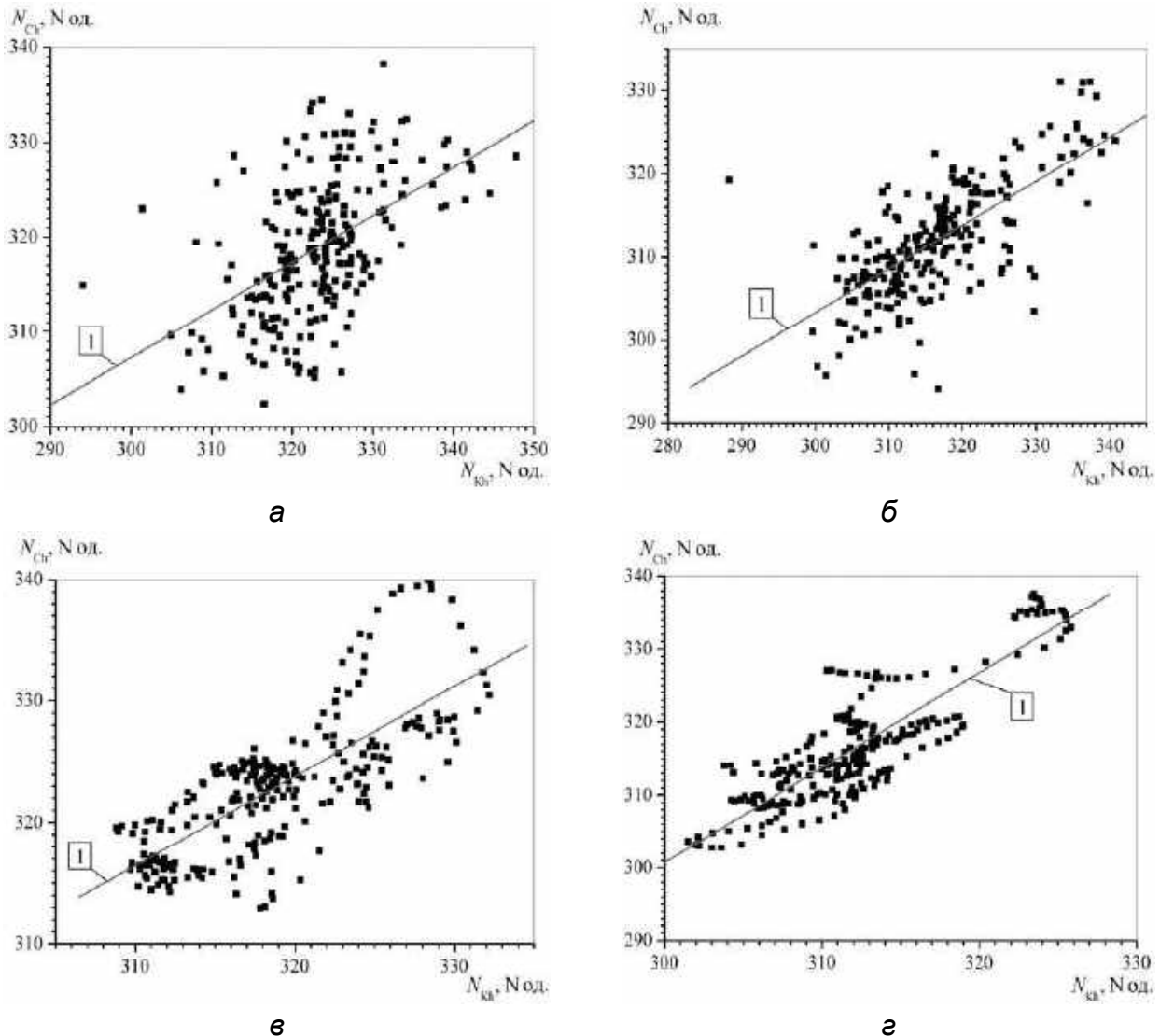


Рис. 5.7. Залежність між коефіцієнтами заломлення в м. Черкаси ( $Ch$ ) і м. Харкові ( $Kh$ ): у жовтні (а, в) і листопаді (б, г); зняті з інтервалом 3 год (а, б) і усереднені протягом доби (в, г); 1 – лінія регресії

Це означає, що можна шукати взаємозв'язок між середньодобовими значеннями вимірних параметрів коефіцієнта заломлення з координатами вимірювального пункту і помилками їх вимірювання.



### 5.2.2. Результати вимірювань

Під час руху ШСЗ по орбіті навколо Землі сигнал, який він випромінює, може реєструватися приймачем, якщо супутник знаходиться в межах прямої видимості.

Рефракція в прилеглому шарі тропосфери призводить як до викривлення фазового фронту хвилі, що поширюється від супутника, так і до появи додаткових фазових затримок, а це спричиняє змінення псевдовідстаней і, як наслідок, виміряних координат об'єкта. Досліджувався взаємозв'язок середньодобових метеорологічних параметрів атмосфери з вимірюваними середньодобовими значеннями координат вимірювального пункту. Виявилось, що флуктуації координат довготи й широти, виміряні різними приймачами, практично не корелюються з коефіцієнтом заломлення в приземному шарі тропосфери.

Водночас існує значуща кореляція між значеннями середнього за добу коефіцієнта заломлення тропосфери і середнього за добу значення виміряної висоти розташування вимірювального пункту (рис. 5.8).

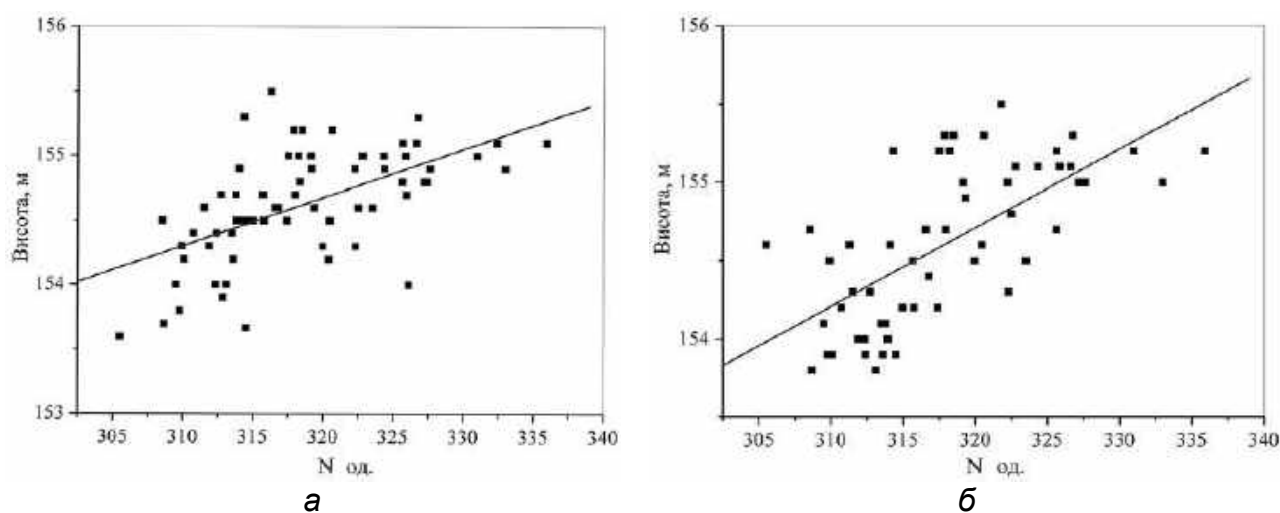


Рис. 5.8. Залежність оціненої висоти вимірювального пункту від коефіцієнта заломлення тропосфери: а – для системи GPS; б – для систем GPS і ГЛОНАСС

На цьому рисунку показано значення середньої за добу визначеної висоти розташування, отримані шляхом усереднення, – приблизно  $3 \cdot (10^6 \dots 10^5)$  вимірювань, узятих з темпом 1 с. Коефіцієнт кореляції даних системи GPS протягом 67 діб вимірювань становить 0,58, а спільних вимірювань систем ГЛОНАСС і GPS протягом 56 діб вимірювань – 0,67. Водночас для системи ГЛОНАСС кореляція висоти з коефіцієнтом заломлення була істотно нижчою, оскільки значною мірою маскувалася апаратними помилками вимірювання, зумовленими неповним сузір'ям розгорнутих на той час супутників. Відомо, що підвищена рефракція в межевому шарі тропосфери призводить до появи помилок вимірювання дальності, які трансформуються в помилки вимірювання висоти

розташування об'єкта. Для цього випадку, коли супутник знаходиться далеко за межами тропосфери, помилка вимірювання дальності  $\Delta R$  при кутах місця  $\beta$ , більших  $5^\circ$ , може бути апроксимована виразом

$$\Delta R = 0,007 N_0 \sin^{-1} \beta \quad , \quad (5.12)$$

де  $N_0$  – коефіцієнт заломлення біля поверхні землі.

Тропосферна рефракція враховується при розрахунках координат об'єкта шляхом уведення поправок з використанням експонентної моделі тропосфери й приземного значення коефіцієнта заломлення. Зазвичай користуються усередненими даними за коефіцієнтом заломлення.

При цьому можуть виникати різні ситуації. Коли помилка внаслідок рефракції при розрахунках максимально повно скомпенсована, то змінення коефіцієнта заломлення позначається на виміряній висоті найменшою мірою. Коли ж уведена поправка перевищує або є меншою від значення, яке необхідно ввести, тобто спостерігається перерегулювання або недорегулювання, то змінення коефіцієнта заломлення призводить до збільшення дисперсії виміряної висоти, що й спостерігалось в цих дослідженнях. Як показали експерименти, розрахунковий метод уведення поправок, що базується на середніх значеннях коефіцієнта заломлення й експонентній моделі його змінення зі значенням висоти, не дає змоги повністю компенсувати помилки, пов'язані з впливом тропосфери. Наявність некомпенсованого залишку може використовуватися для діагностики тропосферної рефракції. З іншого боку, якщо існують дані про значення коефіцієнта заломлення для конкретної ділянки місцевості, де проводяться вимірювання, то можна їх використовувати для підвищення точності визначення місцезнаходження. Для цього можна скористатися емпіричним співвідношенням

$$h(N_0) = A_N + B_N N_0, \quad (5.13)$$

де  $A_N, B_N$  – коефіцієнти;  $\sigma_A, \sigma_B$  – їх середньоквадратичний розкид (табл. 5.3). У табл. 5.3 також наведено значення коефіцієнтів кореляції  $R$ , дисперсію похибки апроксимації  $\sigma^2$  та обсяги оброблюваних вибірок  $n$ .

Попереднє оброблення здійснювалося по всьому масиву точок, де кожна точка – усереднені дані за добу. Після цього відкидали грубі помилки й отримували уточнені дані. На наступному етапі виставлявся коридор по висоті, що дорівнював середньоквадратичному розкиду помилок, і уточнювалися параметри. Результати обчислень наведено в табл. 5.3. Слід зазначити, що відбраковування точок, які мають великий розкид відносно регресійної прямої, не сильно впливає на коефіцієнти рівняння регресії. Водночас при відбраковуванні відбувається істотне збільшення коефіцієнта кореляції. За вихідним масивом точок і масивом, отриманим після

відбраковування, оцінювалися коефіцієнти кореляції коефіцієнтів показника заломлення у м. Харкові і м. Черкаси (останній рядок табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Результати оброблення

| Система | $n$ | $A_N$ | $\sigma_A$ | $B_N$ | $\sigma_B$ | $R$  | $\sigma^2$ | $R_N$ |
|---------|-----|-------|------------|-------|------------|------|------------|-------|
| GPS     | 68  | 161,6 | 3,1        | 0,061 | 0,01       | 0,66 | 0,53       | 0,66  |
|         | 67  | 162,7 | 2,10       | 0,037 | 0,006      | 0,58 | 0,35       | –     |
|         | 55  | 166,1 | 1,61       | 0,033 | 0,006      | 0,72 | 0,22       | 0,79  |
| GNSS    | 58  | 160,0 | 2,69       | 0,066 | 0,008      | 0,56 | 0,62       | 0,72  |
|         | 56  | 138,6 | 2,39       | 0,050 | 0,008      | 0,67 | 0,37       | –     |
|         | 61  | 137,8 | 1,63       | 0,053 | 0,005      | 0,86 | 0,23       | 0,86  |

Видно, що для більш гладкого масиву, отриманого після відбраковування, характерними є більші значення кореляції метеоданих у цих містах. Це означає, що при більшій просторовій однорідності характеристик тропосфери функціональний зв'язок між показником заломлення й вимірною висотою є сильнішим.

У табл. 5.4 наведено середньоквадратичні значення помилок вимірювання висоти різними системами, отримані при стандартному способі введення поправок, а також після введення поправок, які використовують місцеве значення коефіцієнта заломлення. При цьому  $h$  – це середня висота вимірювального пункту, отримана з використанням різних систем, а  $\hat{h}$  – відносна висота, отримана після введення поправки на місцеву рефракцію відносно регресійної лінії. Відносна висота визначається як різниця між середньою висотою вимірювального пункту  $h$  та висотою  $h(N_0)$ , розрахованою за формулою (5.13).

Таблиця 5.4

Похибки вимірювання висоти і числові характеристики їх розподілу

| Тип системи               | GLN     |                     | GPS     |                   | GNSS    |               |
|---------------------------|---------|---------------------|---------|-------------------|---------|---------------|
|                           | $h$ , м | $\hat{h}$ , м       | $h$ , м | $\hat{h}$ , м     | $h$ , м | $\hat{h}$ , м |
| Середнє                   | 155,5   | $8,4 \cdot 10^{-5}$ | 154,6   | $4 \cdot 10^{-4}$ | 154,6   | -0,001        |
| Медіана                   | 155,4   | -0,10               | 154,6   | $8 \cdot 10^{-3}$ | 154,6   | -0,06         |
| Стандартне відхилення     | 1,86    | 1,86                | 0,43    | 0,35              | 0,5     | 0,37          |
| Ексцес                    | 2,04    | 2,19                | -0,25   | 0,75              | -1,35   | -0,75         |
| Асиметричність            | 0,77    | 0,78                | -0,40   | 0,05              | -0,02   | 0,52          |
| Кількість днів вимірювань | 67      | 67                  | 67      | 67                | 56      | 56            |

Слід зазначити, що система ГЛОНАСС має більші помилки

вимірювання висоти. Середньоквадратичне значення помилки в цій системі є суттєво більшим, ніж у системі GPS. Це пов'язано насамперед з тим, що ця вимірювальна система на момент проведення вимірювань була не повністю розгорнута. Спільне використання координатних вимірювань двох систем (режим GNSS) не дає при цьому істотного підвищення точності. Водночас уведення поправок, які використовують місцеві значення коефіцієнта заломлення тропосфери, дає змогу знизити приблизно на 20...25 % помилку вимірювання висоти. Наведені в табл. 5.4 значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу розподілу висоти показують, що як для систем ГЛОНАСС і GPS, так і для комплексу систем GNSS вони мають невелику величину. Тому для опису розподілу можна використовувати гавсову модель.

На рис. 5.9 зображено розкид визначення координат, який також залежить від величини введеної тропосферної корекції.

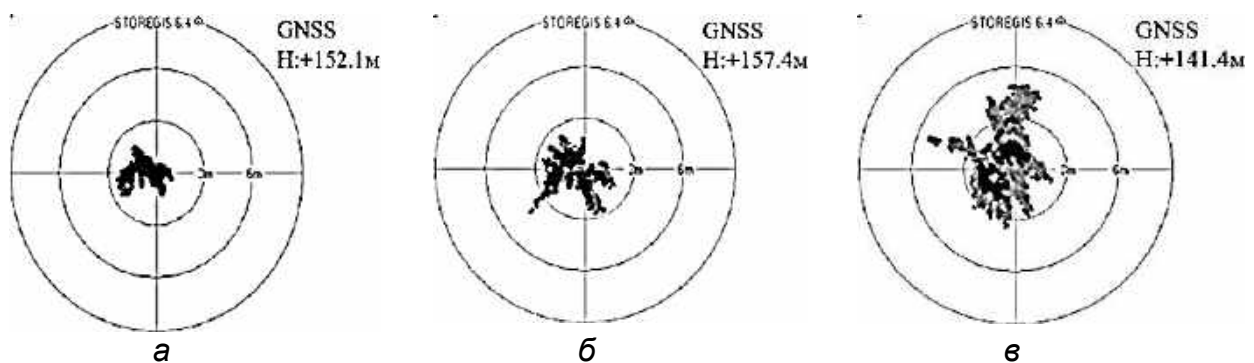


Рис. 5.9. Поводження координат вимірювального пункту й результати оброблення одного й того ж набору даних при введенні різної величини тропосферних корекцій:  
а – оптимальна; б – зменшена в 2 рази; в – збільшена в 2 рази

Як видно з наведених даних, при неповній корекції тропосферних затримок математичне сподівання висоти виходить більшим, а при надмірній величині корекцій – меншим від істинного значення висоти.

Проведені дослідження показали, що виміряні середньодобові значення висоти можуть використовуватися для отримання оцінок середньодобових значень коефіцієнта заломлення тропосфери. З іншого боку, отримані регресійні залежності можуть набути застосування для уточнення результатів вимірювань висоти штатними приймачами систем глобальної навігації.

Водночас, добові змінення виміряної висоти за відсутності корекції від'ємно корельовані з коефіцієнтом заломлення.

Фізично це пов'язано з тим, що при збільшенні коефіцієнта заломлення тропосфери відбувається збільшення електричної довжини шляху хвилі, що поширюється, і, як наслідок, зменшення виміряної висоти приймального пристрою. Сказане ілюструє рис. 5.10, де показано змінення висоти, виміряної за допомогою супутників системи GPS (рис. 5.10, а), значення коефіцієнтів заломлення, отримані за даними метеостанції у м. Черкаси (рис. 5.10, б), і залежність змінення висоти від приземного

коефіцієнта заломлення (рис. 5.10, в). Слід звернути увагу на значний перепад вимірної висоти на початку вимірювань з поступовим зменшенням її протягом доби, що відповідає різкому збільшенню значення коефіцієнта заломлення тропосфери на початку вимірювань і поступовому його зменшенню в подальшому. Спостерігається кореляція ( $-0,68$ ) між значеннями вимірюваної висоти й коефіцієнтами заломлення тропосфери.

Таким чином, вимірювання поточних значень висоти й коефіцієнта заломлення підтвердило, що для поточного змінення висоти спостерігається від'ємна кореляція з поточними значеннями коефіцієнта заломлення, тобто збільшення рефракції супроводжується зменшенням вимірюваного значення висоти.

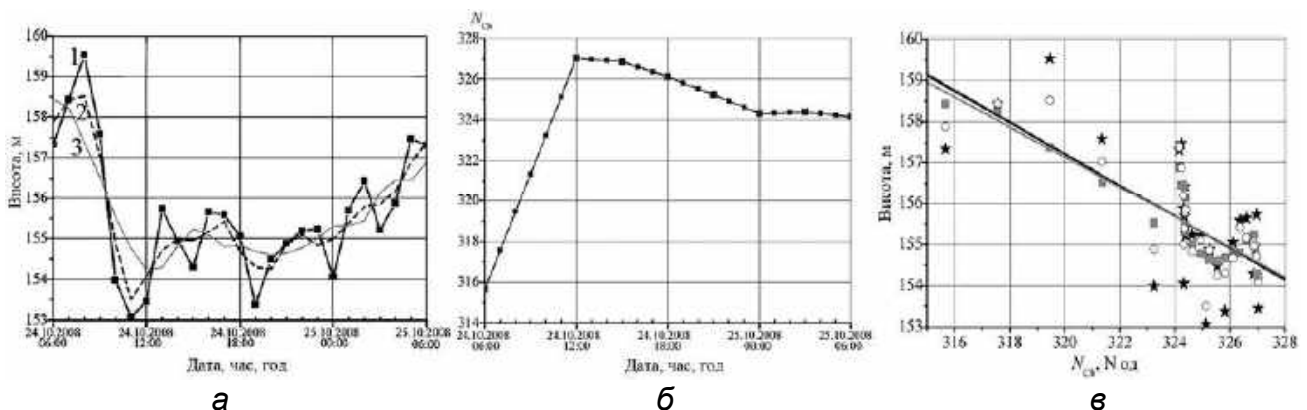


Рис. 5.10. Зміна висоти, вимірної за допомогою супутників системи GPS (а): 1 – погодинне усереднення, 2, 3 – усереднення в ковзному вікні протягом 3 і 5 год; зміна коефіцієнта заломлення (б); залежність зміни висоти від приземного значення показника заломлення (в);  $\xi - R1 = 0,68$ ,  $- R2 = 0,8$ ,  $! - R3 = 0,9$  – коефіцієнти кореляції між висотою, усередненою протягом 1, 3 і 5 год, і приземним коефіцієнтом заломлення

### 5.3. Виявлення метеорологічних утворень на основі ГНСС-вимірювань

#### 5.3.1. Передумови використання GPS

Багато атмосферних явищ становлять небезпеку для повітряного й морського транспорту. Для забезпечення безпеки польотів сучасних літаків і плавання морських суден деякі метеорологічні величини необхідно вимірювати з особливою точністю. Тому для потреб авіації і флоту знадобилися нові відомості, яких раніше не мали кліматологи, а також необхідним стало вдосконалення методів прогнозування погоди. Стало необхідним також упровадження засобів і методів обчислення майбутнього стану метеорологічних величин (атмосферного тиску, швидкості й напрямку вітру, температури повітря), розрахунку переміщення й еволюції небезпечних синоптичних об'єктів, таких як циклони, їх улоговини з атмосферними фронтами, антициклони, гребені тощо.

Синоптичні процеси (атмосферні фронти, значна конвекційна нестійкість, екстремально потужний розвиток купчасто-дощової хмарності)

призводять до виникнення багатьох небезпечних метеорологічних явищ. При деяких з них в атмосфері міститься достатньо велика кількість вологи, льоду або піску. До таких явищ належать:

1. *Сильний дощ*. Кількість очікуваних опадів становить 50 мм і більше за 12 год і менший період. У великих містах, в окремих регіонах, а також у гірських районах небезпеку становлять опади більше 30 мм за період 12 год і менший. Розрахунковий час попередження – від 1 год до 2–3 діб.

2. *Злива*. Кількість очікуваних опадів – понад 30 мм за 1 год і менше. Розрахунковий час попередження – від моменту початку явища.

3. *Тривалі дощі*. Сумарна очікувана кількість опадів 120 мм і більше за 2–3 доби залежно від регіону. Розрахунковий час попередження – від початку явища до 2–3 діб.

4. *Сильний снігопад*. Очікувана кількість опадів 20 мм і більше за 12 год і менше. Розрахунковий час попередження – від моменту початку явища до 2–3 діб.

5. *Сильна хуртовина*. Випадання й перенесення снігу при швидкості вітру 15 м/с і більше; на узбережжі арктичних і далекосхідних морів 20 м/с і більше протягом 12 годин і менше. Необхідно знати напрямок вітру, середню й максимальну швидкості, а також кількість опадів, висоту снігових заметів і горизонтальну видимість. Розрахунковий час попередження – від моменту початку до 2–3 діб.

6. *Сильні пилові (піщані) бурі*. Відбувається перенесення пилу (піску) при швидкості вітру 15 м/с і більше, погіршення видимості до 100 м і менше. Необхідно знати напрямок і швидкість вітру, висоту заметів. Розрахунковий час попередження – від моменту початку до 2–3 діб.

7. *Тропічні циклони (тайфуни)*. Необхідно знати напрямок переміщення тропічних циклонів, швидкість вітру, висоту хвиль і напрямок зсуву, кількість опадів за 6, 12, 26 год. Час попередження – з моменту виникнення тропічного циклону.

8. *Великий град*. Його появу спричиняють циклони, атмосферні фронти, купчасто-дощова хмарність, активний розвиток конвекційної нестійкості в атмосфері, грози. Необхідним є знання прогнозу грозової ситуації, розвитку конвекційної нестійкості, діаметра градин, періоду випадання. Час попередження – від моменту початку явища до 26–36 год.

Для виявлення таких явищ широко використовуються засоби авіаційно-космічного спостереження в радіо- й оптичному діапазоні, а також радіолокаційні метеорологічні спостереження, які здійснюються як з Землі, так і з використанням аерокосмічних носіїв. Створення спеціальних супутників, оснащених радіолокаційними засобами моніторингу небезпечних метеорологічних явищ, є досить витратним. Інтерес становить використання для моніторингу цих явищ ШСЗ, наприклад, що застосовуються для глобальної навігації. Відмінність діелектричних характеристик тих ділянок атмосфери, де знаходяться небезпечні явища типу купчасто-грозових хмар,

насичених вологою, від стандартних, може бути передумовою для виявлення небезпечних метеорологічних явищ за змінненням електричної довжини шляху.

*Теоретичне обґрунтування можливості виявлення зон підвищеної вологості.* Навігаційне завдання визначення місця розташування об'єкта в просторі вирішується шляхом вимірювання псевдовідстаней мінімально до чотирьох ШСЗ. При цьому положення об'єкта визначається чотирма радіусами-векторами  $\vec{R}_i$ , положення яких у полярній системі координат задається кутами спостереження  $i$ -го супутника: азимутальним кутом  $\varphi_i$  і кутом місця  $\beta_i$ . Тропосферна рефракція та наявність неоднорідностей тропосфери (наприклад, у вигляді насичених вологою хмар) будуть приводити до збільшення псевдовідстані до навігаційного супутника і до появи похибок вимірювання місця розташування  $\delta \vec{R}_i$  відносно кожного із супутників і загальної похибки оцінювання координат, яка описується радіусами-векторами:

$$\vec{\delta} = \sum_{i=1}^3 \delta \vec{R}_i. \quad (5.14)$$

Збільшення електричного шляху електромагнітної хвилі, що поширюється, визначається діелектричною проникністю середовища, яка буде насамперед визначатися запасом вологи.

Залежність коефіцієнта заломлення  $n'$  від температури  $t$  можна апроксимувати виразом

$$n' = A + B_1 t + B_2 t^2, \quad (5.15)$$

де  $A, B_1, B_2$  – коефіцієнти апроксимації;  $t$  – температура.

Для льоду дійсна й уявна частини коефіцієнта заломлення практично не залежать від довжини хвилі (у сантиметровому діапазоні). Показник заломлення  $n'$  до того ж не залежить від температури й дорівнює 1,78.

Погонне загасання льоду визначається співвідношенням

$$\gamma = \frac{3\pi}{\lambda \rho} c_1 W, \quad (5.16)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі;

$\rho$  – густина;

$c = const \approx$ ;

$W$  – водність.

Водність і просторові характеристики метеоутворень наведено в табл. 5.5, а залежність середнього діаметра крапель від водності й інтенсивності дощу – у табл. 5.6.

Залежність водності опадів від їх інтенсивності, а також апроксимацію цієї залежності зображено на рис. 5.11. Залежність водності опадів від їх інтенсивності подано в логарифмічному масштабі, найкращі результати дає параболічна апроксимація (табл. 5.7).

Таблиця 5.5

Водність і просторові характеристики метеорологічних утворень

| Вид утворення         | Розміри, км |            | Водність $W$ , г/м <sup>3</sup> |          |
|-----------------------|-------------|------------|---------------------------------|----------|
|                       | $\Delta X$  | $\Delta Y$ | $\bar{W}$                       | $\max W$ |
| Туман                 | 100...1000  | 0,3...2,3  | 0,25                            | 0,88     |
| Багатошарові хмари    | 1000        | 1...6      | 0,1                             | 0,6      |
| Купчасті хмари        | 10          | 10         | 0,6                             | 1,7      |
| Купчасто-дощові хмари | 15...20     | 2...10     |                                 |          |

Таблиця 5.6

Параметри дощів

| Тип дощу     | $d$ , мм | $W$ , г/м <sup>3</sup> | $I$ , мм/ч |
|--------------|----------|------------------------|------------|
| Дрібний      | 0,2      | 0,093                  | 0,25       |
| Легкий       | 0,65     | 0,16                   | 1,0        |
| Помірний     | 1,0      | 0,28                   | 6,0        |
| Сильний      | 1,5      | 0,83                   | 15,0       |
| Дуже сильний | 2,1      | 1,8                    | 60,0       |
| Злива        | 3,5      | 5,6                    | 100,0      |

Таблиця 5.7

Апроксимація водності й інтенсивності дощу

| Залежність                               | Вид апроксимації | A      | B1    | B2    | R     | SD    | N | P       |
|--|------------------|--------|-------|-------|-------|-------|---|---------|
| Водності від середньої інтенсивності     | Лінійна          | -1,835 | 0,675 | -     | 0,979 | 0,361 | 6 | 6,82E-6 |
|  | Квадратична      | -1,97  | 0,608 | 0,083 | 0,999 | 0,063 | 6 | <0,0001 |
| Середньої інтенсивності від максимальної | Квадратична      | -0,236 | -0,23 | 5E-6  | 0,66  | 18,9  | 9 | 0,061   |

Коефіцієнт кореляції даних при цьому – більше 0,99. Аналітичний вираз має вигляд



$$\ln(W) = -1,97 + 0,408 \ln(I) + 0,0827(\ln(I))^2. \quad (5.17)$$

Просторова кореляційна функція зливових дощів описується виразом

$$\rho(l) = \exp(-0,2l).$$

Тут урахується та обставина, що радіус кореляції  $l_0$ , при якому величина  $\rho(l)$  зменшується в  $e$  разів відносно максимуму, дорівнює приблизно 5 км. Максимальна кількість опадів залежить від їх середньої інтенсивності.

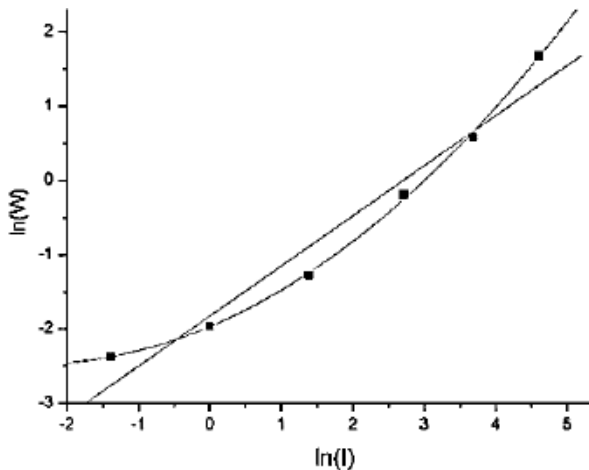


Рис. 5.11. Залежність водності зливових опадів від інтенсивності

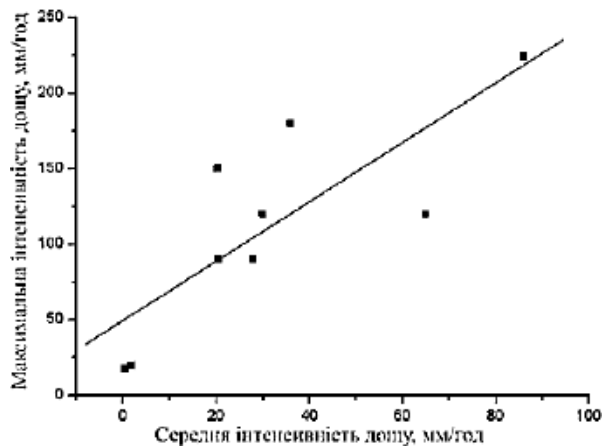


Рис. 5.12. Залежність максимальної інтенсивності опадів від середньої

На рис. 5.11 і 5.12 зображено залежність, побудовану за експериментальними даними, а також апроксимацію даних залежністю

$$I_{\max} = 50 + 2I \text{ при } I \geq 5 \text{ мм/год} . \quad (5.18)$$

При цьому коефіцієнт кореляції експериментальних і розрахункових даних – більше 0,8.

Для врахування впливу метеоутворень на фазову затримку і згасання сигналу можна скористатися моделлю покривної хмари, а також даними щодо діелектричних характеристик води. При цьому погонне (на 1 км) згасання  $\gamma$ , дБ/км, яке вносить метеоутворення в сигнал, і збільшення електричної довжини шляху  $\delta r$ , м/км, визначаються формулами

$$\begin{aligned} \gamma &= 10 \lg e * 10^{-3} W n^n ; \\ \delta r &= 10^{-3} W (n' - 1) . \end{aligned} \quad (5.19)$$

Крім того, збільшення електричної довжини шляху приводить до появи додаткового фазового набігу хвилі, що поширюється, через зосередження опадів.

Таким чином, наявність вологи або частинок пилу в небезпечному метеорологічному явищі, яке просвічується сигналом ШСЗ, впливає на амплітуду й фазове запізнення. Цей вплив можна виявити, визначаючи змінення псевдовідстані до ШСЗ, координат і висоти вимірювального пункту, а також інтерференційної картини прийнятого поля.

Зміна псевдовідстані  $\Delta r$  унаслідок проходження електромагнітної хвилі через зону з підвищеним вологозапасом  $W$  протяжністю  $\Delta l_0$  є такою:  $\Delta r = \delta r \Delta l_0$ , причому при малих кутах протяжність зони буде приблизно відповідати її горизонтальним розмірам, які для злив становлять близько 5 км. Використовуючи співвідношення (5.19), можна записати вираз для оцінки максимального приросту псевдовідстані  $\max \delta r$  до ШСЗ з урахуванням наявності опадів на трасі поширення:

$$\max \delta r [\text{m}] = 10^{-3} l_0 W_{\max} \left[ \text{g/m}^3 \right] (n' - 1), \quad (5.20)$$

де  $W_{\max}$  – максимальна водність опадів;

$$l_0 = \begin{cases} h_y / \sin \beta \leq h_x \\ h_x \end{cases} \quad \text{– довжина шляху радіохвилі в опадах;}$$

$\{h_x, h_y\}$  – потужність хмарності в горизонтальній і вертикальній площинах;

$\beta$  – кут місця ШСЗ.

Використовуючи дані за коефіцієнтами заломлення, зв'язок водності  $W$  з інтенсивністю опадів  $I$ , а також залежність максимальної кількості опадів від їх середньої інтенсивності, оцінено очікуваний приріст псевдовідстані залежно від інтенсивності опадів і кута місця ШСЗ (рис. 5.13).

Оцінювання з використанням співвідношень (5.16)–(5.20) показало, що зливові опади можуть приводити до змін псевдовідстаней, які становлять одиниці метрів.

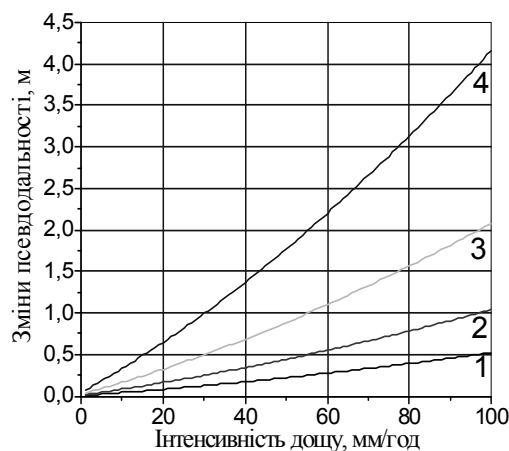


Рис. 5.13. Залежність приросту псевдовідстані від інтенсивності опадів і розміру їх зони: 1 –  $l_0 = 5$  км; 2 –  $l_0 = 10$  км; 3 –  $l_0 = 20$  км; 4 –  $l_0 = 60$  км

### 5.3.2. Особливості поводження сигналів ГНСС за наявності на трасі метеоутворень і результати їх виявлення

Експериментальні дослідження впливу дощу на характеристики сигналів ГНСС. Під час експериментальних досліджень антена вимірювального приймача розташовувалася на висоті 30 м відносно поверхні землі.

Оскільки чутливість до наявності хмарності збільшується при малих кутах місця через збільшення довжини шляху в опадах, то вимірювалася псевдовідстань ШСЗ при їх радіозаходах і радіосходах. На рис. 5.14 показано змінення середньоквадратичного значення флуктуацій псевдовідстані до ШСЗ системи GPS, отримане шляхом усунення з вимірюної псевдовідстані тренда, пов'язаного з переміщенням супутника й обумовленого зміною похилої дальності.

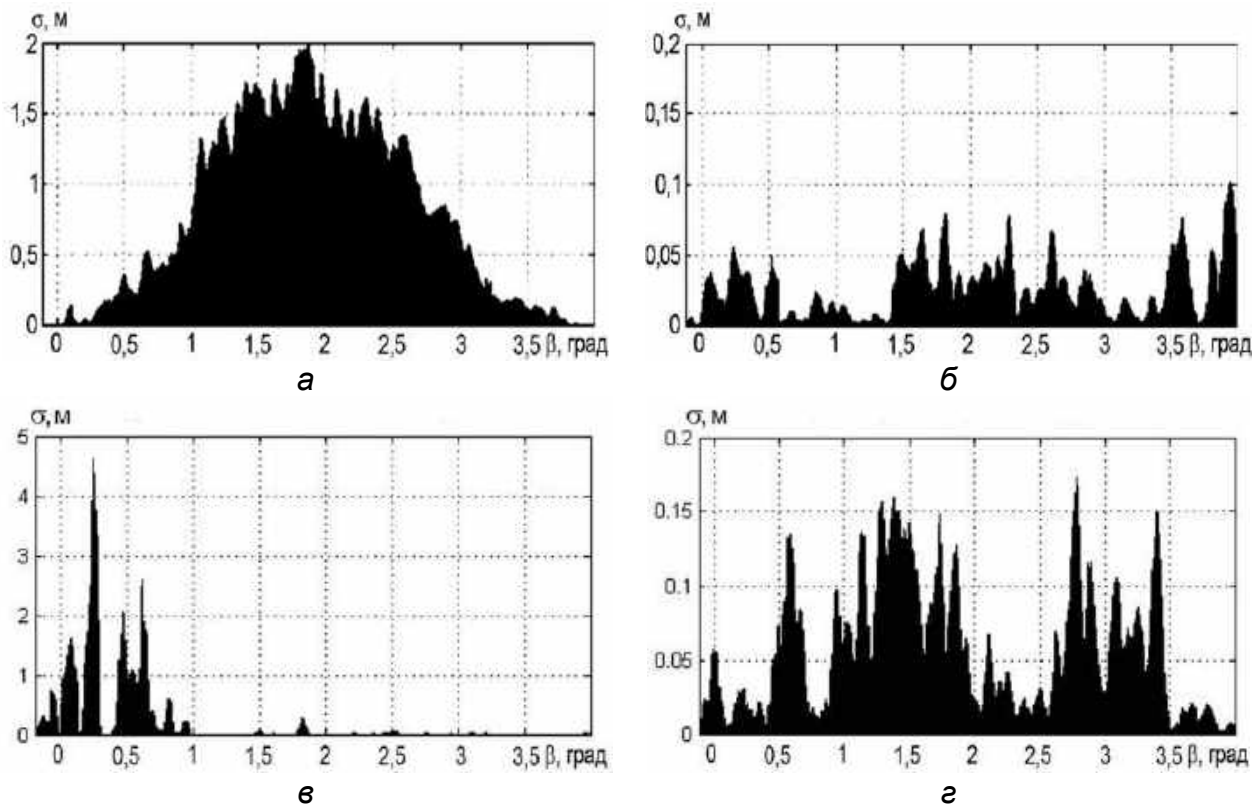


Рис. 5.14. Середньоквадратичне значення флуктуацій псевдовідстані залежно від кута спостереження супутника: а – шарувато-купчасті хмари, 6 балів, нижня кромка основного ярусу 1000...1500 м, вологість 66 %; б – ясна погода, 0 балів, вологість 89 %; в – гроза з опадами, хмарність 7–8 балів, висота основного ярусу 2000...2500 м, вологість 76 %; г – хмарність, 6 балів, висота основного ярусу 100...1500 м, вологість 57 %

Для усунення трендових змін псевдовідстані до супутника від вимірюного значення псевдовідстані віднімалося попереднє значення. Після цього визначалася нев'язка між отриманими значеннями та їх лінійною апроксимацією, яка після піднесення до квадрата згладжувалася в ковзному вікні за 6–8 відліків.

Видно, що за наявності потужних шарувато-купчастих хмар і зон дощу збільшується середньоквадратичне значення флуктуацій псевдовідстані. Збільшення висоти розташування хмар також позначається на кутах, під якими спостерігаються найбільші флуктуації псевдовідстані.

На рис. 5.15 зображено змінення псевдовідстані до ШСЗ системи GPS при поширенні сигналу через зону суцільних зливових опадів.

Їх отримано шляхом усунення з виміряної псевдовідстані тренда (рис. 5.15, а), пов'язаного з переміщенням супутника й обумовленого зміною похилої дальності (рис. 5.17, б). Різницю між даними при опадах і без них ілюструє рис. 5.17, в.

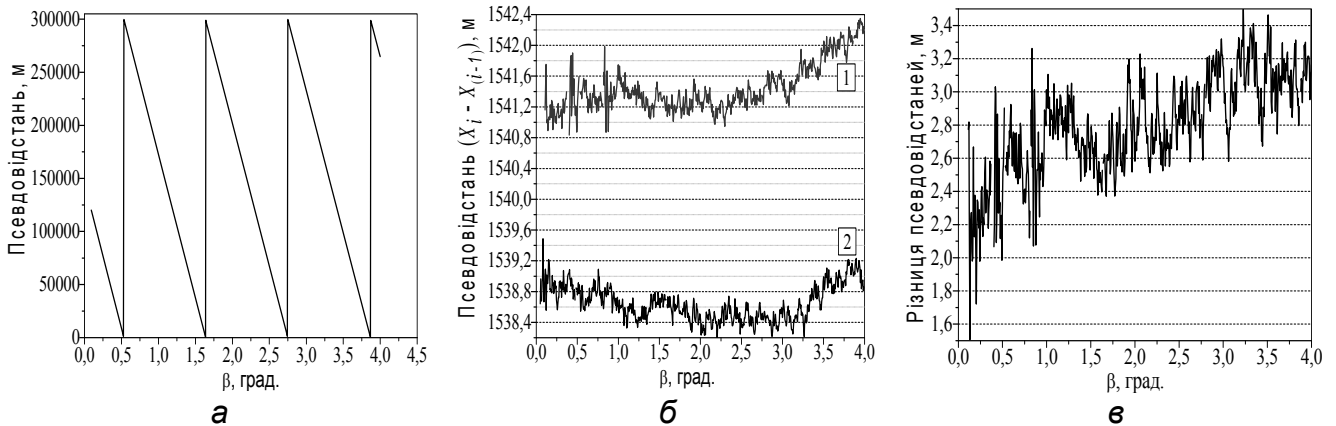


Рис. 5.15. Змінення псевдовідстані до ШСЗ при поширенні через зону зливи (а); приріст псевдовідстані між сусідніми вимірами (б): 1 – під час зливи, 2 – за ясної погоди; різниця псевдовідстані при опадах і за ясної погоди (в)

На рис. 5.16 показано різниці між даними поправок псевдовідстаней, отриманими в дні, коли спостерігалися опади і за їх відсутності.

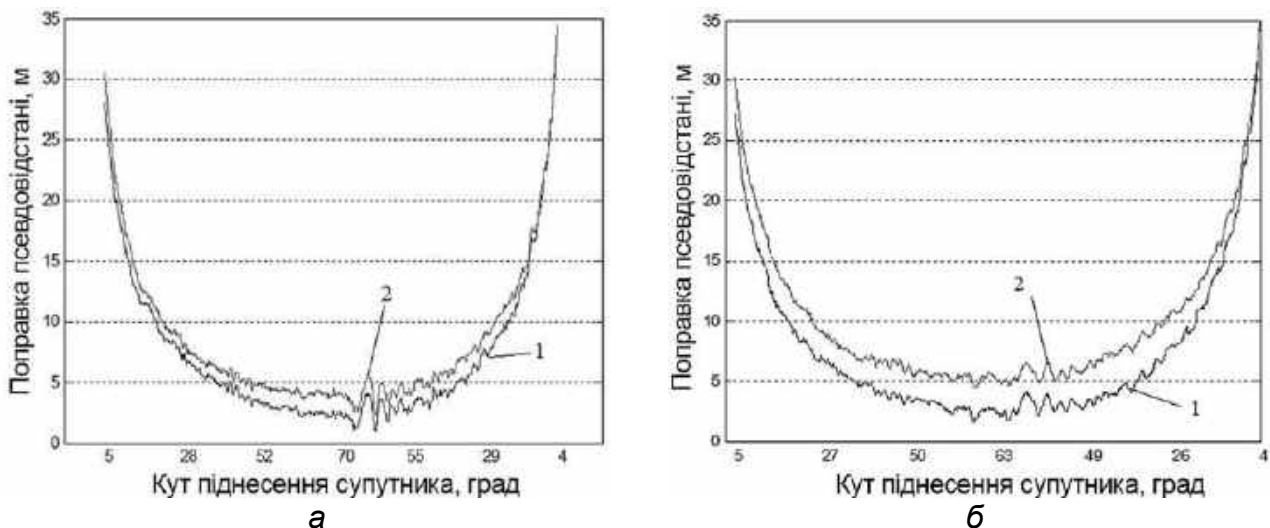
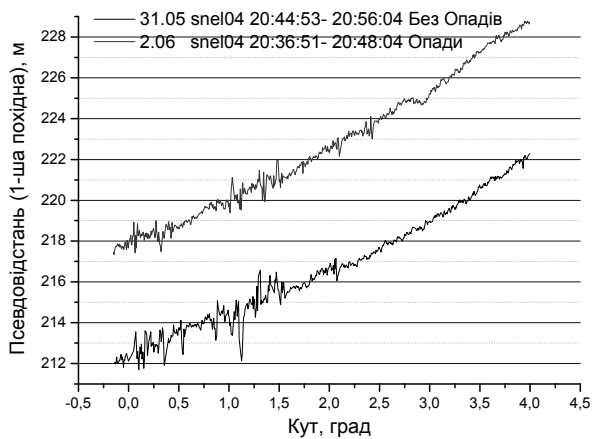


Рис. 5.16. Різниця між даними поправок псевдовідстаней при опадах і без них (м. Харків): а – супутник № 6: 1 – 04.05.2012, 21:36:19 – 05.05.2012, 03:27:23; 2 – 05.05.2012, 21:31:66 – 06.05.2012, 03:23:23 (дощ); б – супутник № 3: 1 – 04.05.2012, 22:05:65 – 05.05.2012, 03:32:26; 2 – 05.05.2012, 22:16:19 – 06.05.2012, 03:60:53 (дощ)

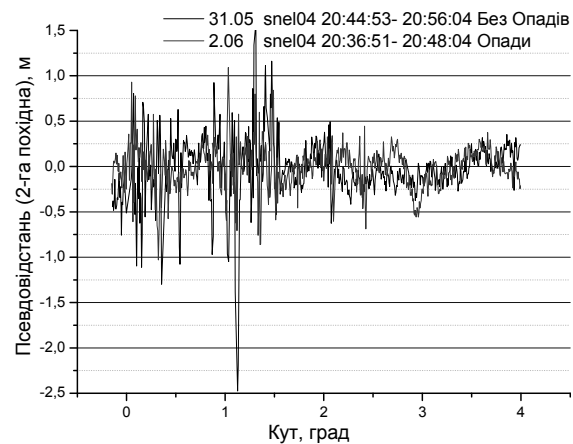
Результати, отримані при обсервації різних супутників у ті ж самі дні,

зображено на рис. 5.17. Там показано значення як 1-ї похідної (рис. 5.17, а, в, д), так і 2-ї (рис. 5.17, б, г, е). Слід зазначити, що 1-ша похідна суттєво відрізняється для днів з опадами від днів без них. При опадах збільшується величина зміни псевдовідстані (рис. 5.17, а, в, д). Крім того, зазвичай при опадах збільшується й дисперсія флуктуацій 2-ї похідної псевдовідстані (рис. 5.17, б, г, е).

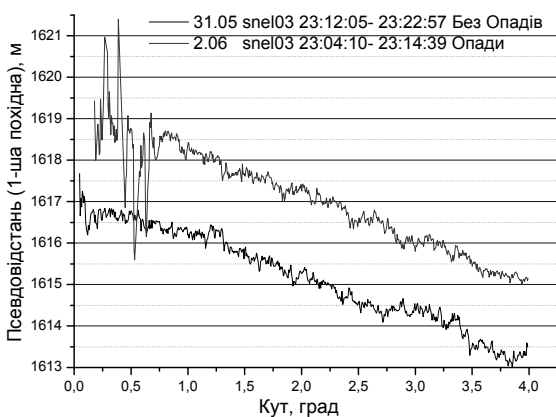
Це можна використовувати як інформативні ознаки для виявлення зон дощу.



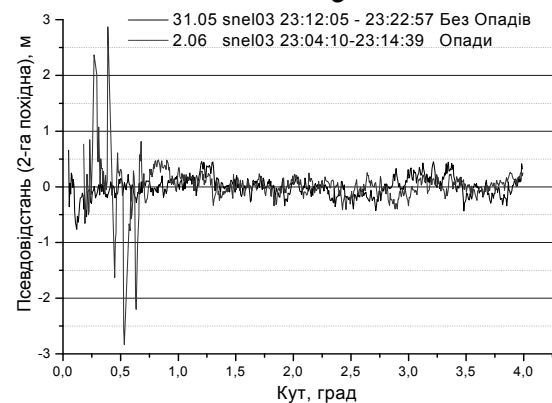
а



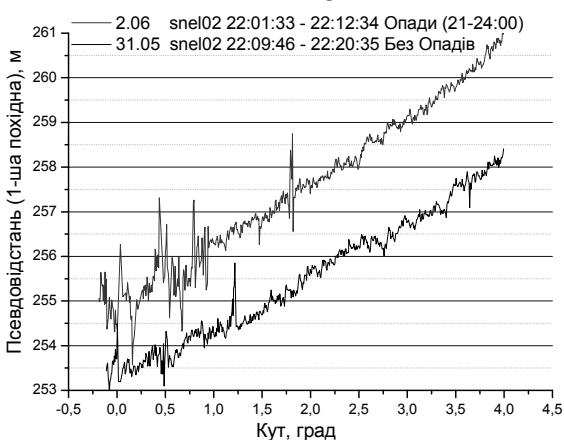
б



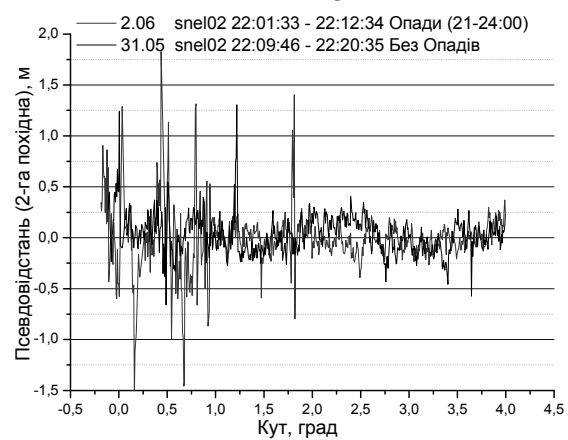
в



г



д



е

Рис. 5.17. Змінення псевдовідстаней за наявності 02.06.2012 і відсутності 31.05.2012 опадів: а, в, д – зміна псевдовідстані (1-ша похідна); б, г, е – 2-га похідна псевдовідстані; а, б – GPS06; в, г – GPS03; д, е – GPS02

Аналогічним чином при поширенні через зону опадів унаслідок збільшення псевдовідстані відбувається зменшення вимірної висоти  $\Delta z$  (рис. 5.18). При випаданні опадів зазвичай спостерігається зменшення вимірної висоти, що обумовлено збільшенням псевдодальності до супутників. Похибку вимірювання висоти при поширенні радіохвиль через зону опадів може маскувати добова зміна похибки вимірювання, пов'язана з тропосферною рефракцією.

На рис. 5.19 показано добові зміни висоти (рис. 5.19, а) і приземного значення коефіцієнта заломлення (рис. 5.19, б) при зливі, а на рис. 5.20 – залежності вимірної висоти і відхилення довготи й широти від коефіцієнта заломлення при сильному снігопаді.

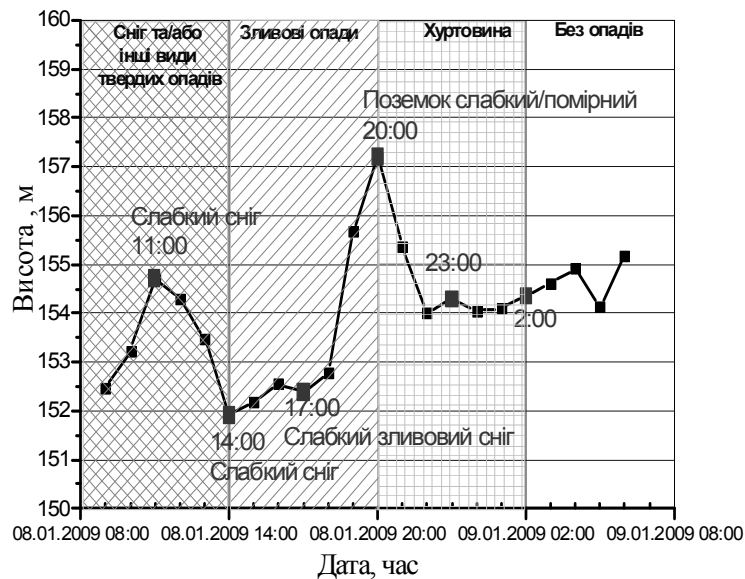


Рис. 5.18. Зміни вимірної висоти при поширенні через зону опадів

З рис. 5.19 видно, що спостерігається збільшення похибки вимірювання у вечірньо-нічні години, характер якої повторює зміни приземного значення коефіцієнта заломлення.

На цих же рисунках показано, що відбувалося під час сильного дощу. Порівняння висот, виміряних під час випадання опадів і за ясної погоди, дає змогу виділити зміни, пов'язані із затримками сигналу при поширенні через зону опадів (рис. 5.21).

При цьому порівнюються висоти, отримані з використанням вимірювань одних і тих же супутників в один і той же час. Помилка вимірювання висоти пов'язана з похибками визначення псевдовідстаней  $\Delta r_i$ :

$$\Delta z = \sum_{i=1}^m \Delta r_i \sin \beta_i, \quad (5.21)$$

де  $\beta_i$  – кут візування  $i$ -го ШСЗ;  $m = 4$  – кількість ШСЗ, що використовуються при вимірюваннях.

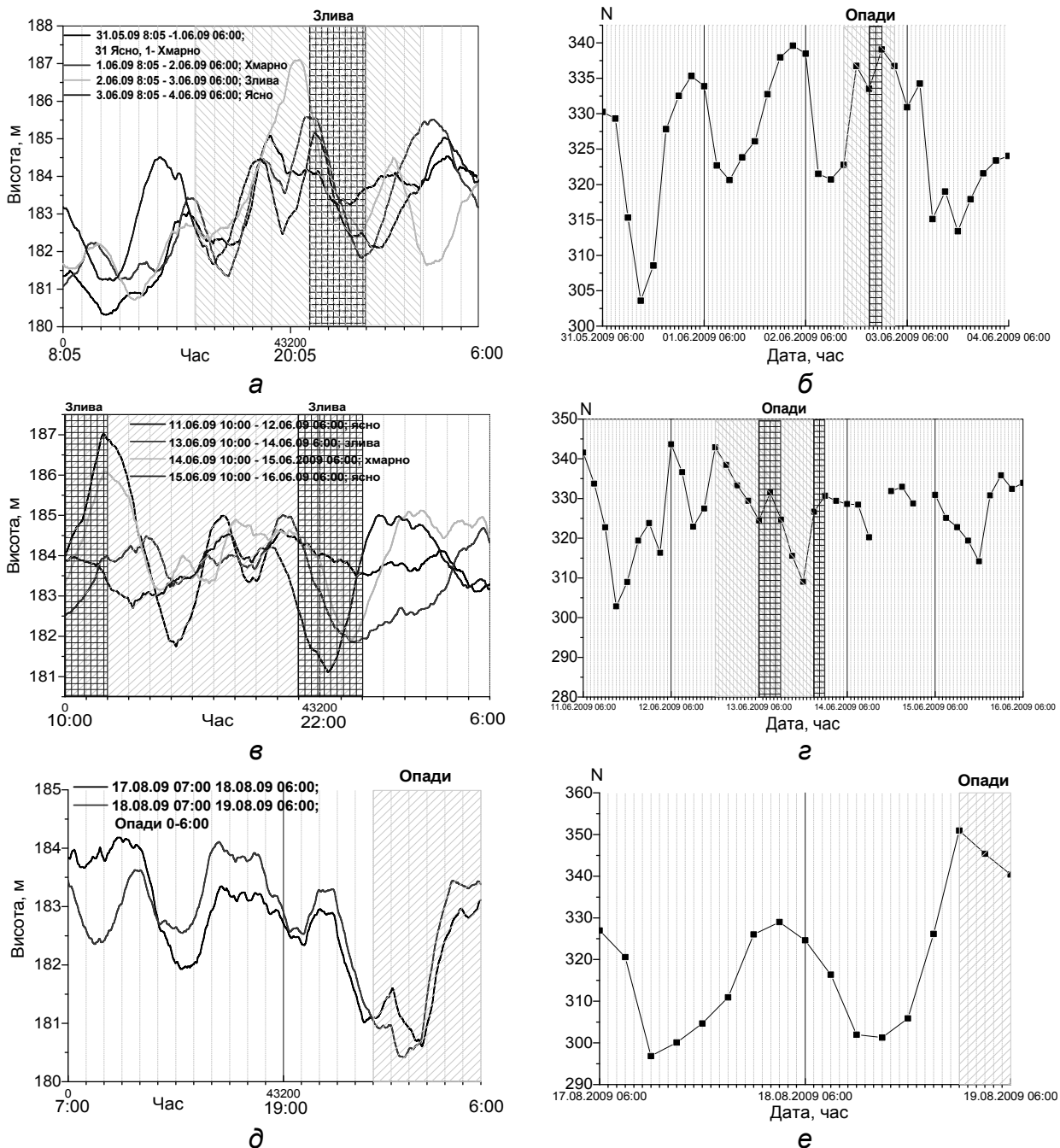


Рис. 5.19. Зміна висоти й коефіцієнта заломлення тропосфери: а, в, д – зміна висоти за кілька днів; б, г, е – зміна приземного значення коефіцієнта заломлення; в – зміна висоти внаслідок випадання опадів

Слід зазначити, що в процесі випадання дощу кількість вологи в атмосфері зменшувалася, і це приводило до зменшення вимірної різниці висот за ясної погоди і під час дощу (див. рис. 5.20), а також до зменшення приземного значення коефіцієнта заломлення (див. рис. 5.19, б, г, е).

Під час руху супутника відбувається переміщення неоднорідностей тропосфери через зону поширення. Це приводить до амплітудної модуляції прийнятого сигналу. Розмір  $n$ -ї зони Френеля при відстані до супутника  $R_0$  і неоднорідності  $l_0 = h_0 / \sin \beta$ , де  $h_0$  – її висота, а  $\beta$  – кут спостереження супутника, з урахуванням того, що  $R_0 \gg l_0$ , визначається співвідношенням

$$2r_n = \sqrt{n \frac{l_0(R_0 - l_0)\lambda}{R_0}} \approx \sqrt{nl_0\lambda} = \sqrt{nh_0\lambda / \sin \beta}. \quad (5.22)$$

Розмір зон Френеля визначає просторове розрізнення неоднорідностей, яке для хмар заввишки 1..6 км становить близько 15..60 м при  $\beta = 90^\circ$ , збільшуючись до 100..600 м при кутах місця близько  $1^\circ$ .

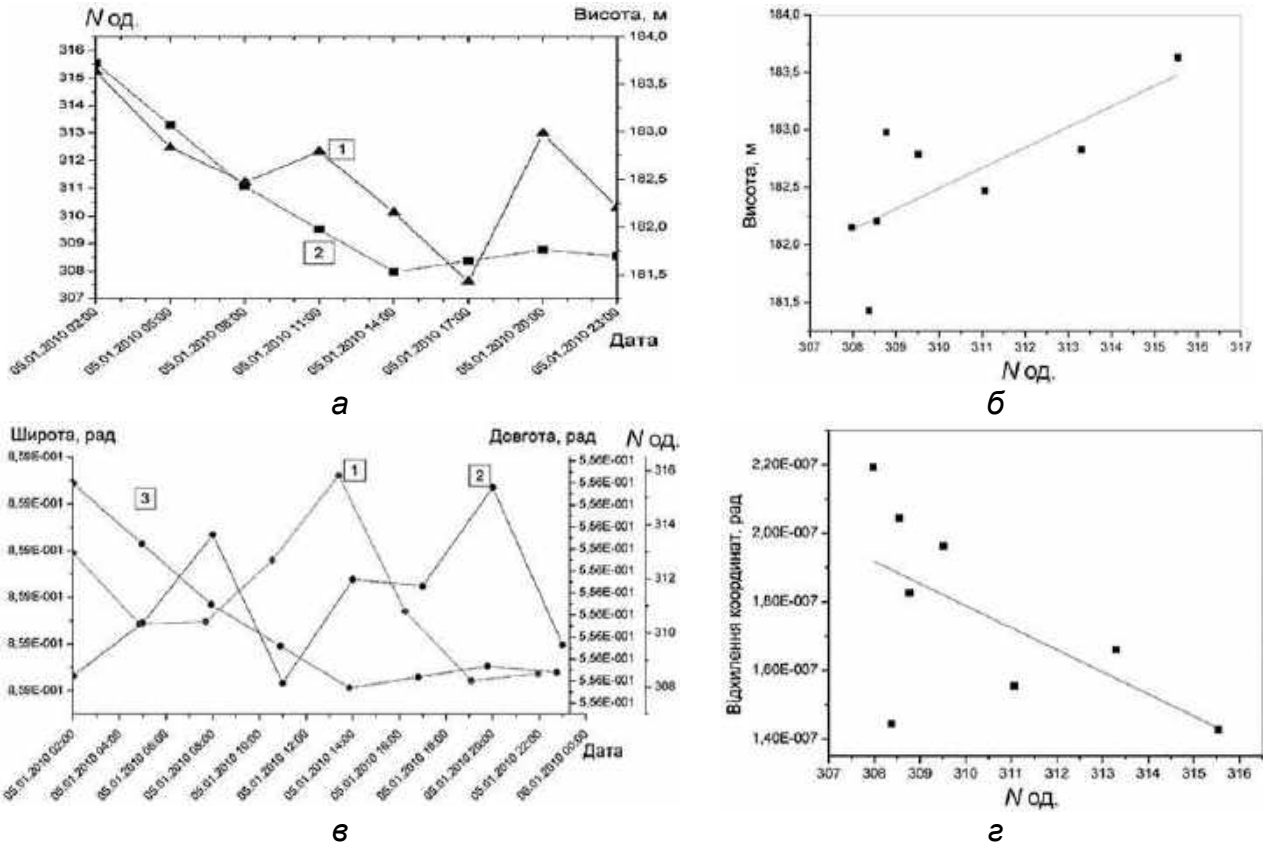


Рис. 5.20. Залежності вимірної висоти й відхилення довготи і широти від коефіцієнта заломлення при сильному снігопаді й відносній вологості 78 %: а – висота  $h$  – 1, коефіцієнт заломлення  $N$  – 2; б – регресійна залежність між висотою  $h$  і  $N$ ,  $R=0,7$ ; в – зміни довготи  $\Delta\beta$ –1, широти  $\Delta\varphi$ –2 і  $N$ –3; г – регресійна залежність між відхилення довготи й широти і  $N$ ,  $R = -0,6$

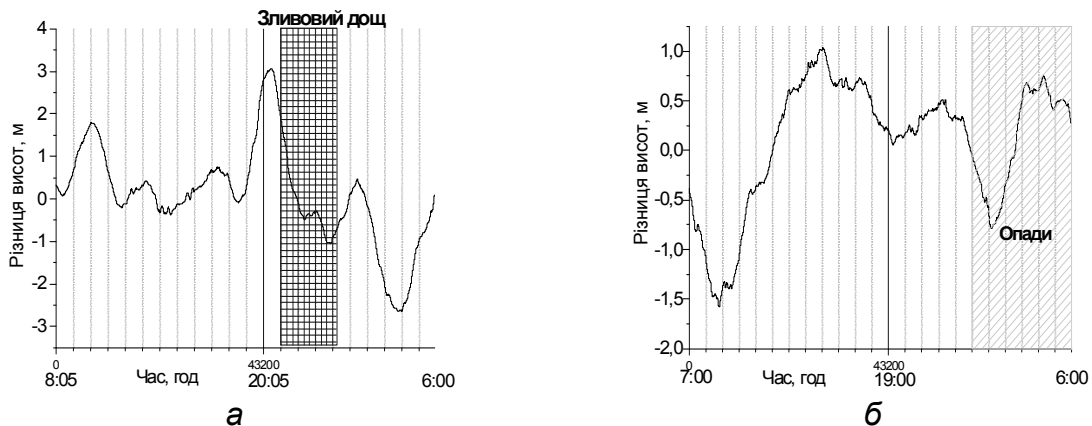


Рис. 5.21. Зміна висоти внаслідок випадання опадів: а – 31.05–2.06; б – 17–19.08



Кутовий розмір відповідної зони  $\Delta\beta_n$  і час її проходження  $\Delta t_n$  нерухомою точковою неоднорідністю внаслідок руху супутника по орбіті зі швидкістю  $v_0$  визначаються формулами

$$\Delta\beta_n = \beta_n - \beta_{n-1} = \frac{r_n - r_{n-1}}{l_0}; \Delta t_n = \frac{\Delta\beta_n R_0}{v_0}. \quad (5.23)$$

Остаточно

$$\Delta\beta_n = \sqrt{n \frac{\lambda \sin \beta}{h_0}} - \sqrt{(n-1) \frac{\lambda \sin \beta}{h_0}}, \quad (5.24)$$

$$\Delta t_n = \frac{\left( \sqrt{n \frac{\lambda \sin \beta}{h_0}} - \sqrt{(n-1) \frac{\lambda \sin \beta}{h_0}} \right) R_0}{v_0}.$$

Для першої зони Френеля співвідношення набувають такого вигляду:

$$\Delta\beta_1 = \sqrt{\frac{\lambda \sin \beta}{h_0}}; \Delta t_1 = \frac{\left( \sqrt{\frac{\lambda \sin \beta}{h_0}} \right) R_0}{v_0}. \quad (5.25)$$

Оцінки, отримані з використанням співвідношень (5.24), (5.25), показують, що при висоті неоднорідностей тропосфери 1...6 км, наприклад, у вигляді зосередження грозових хмар, кутовий розмір першої зони Френеля для супутників системи GPS, що знаходяться в надирі, становить  $1^\circ \dots 0,5^\circ$ . Час переміщення супутника на такий кутовий розмір становить 35...160 с. Водночас при малих кутах візування ШСЗ (близько  $1^\circ$ ) розмір зони, істотної для поширення, зменшується до  $0,1^\circ$ , а час її прольоту – до 3,5...16 с.

На рис. 5.22 показано добові зміни приземного значення коефіцієнта заломлення (рис. 5.22, а) та відносної вологості (рис. 5.22, б) під час зливи та за її відсутності, а на рис. 5.23 – зміни вимірюваної висоти, довготи й широти під час дощу.

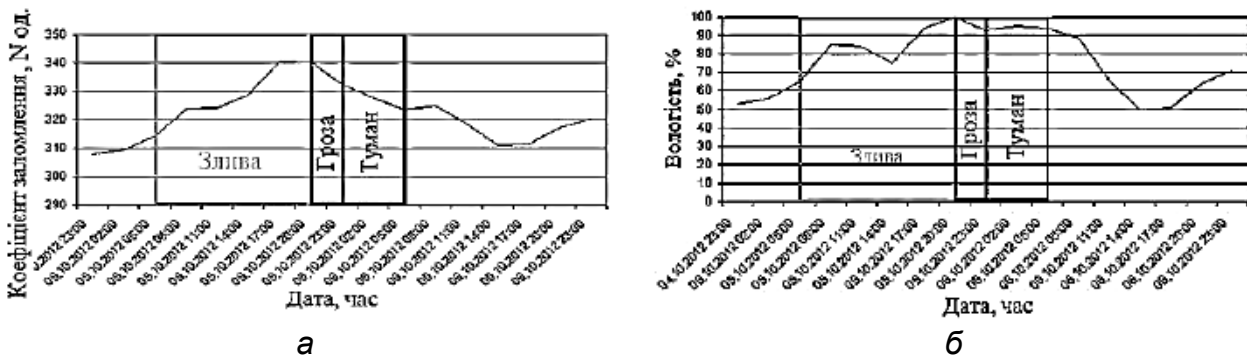


Рис. 5.22. Зміна коефіцієнта заломлення (а) і вологості (б) 05–06.10.2012

З рис. 5.22 видно, що наявність дощу приводить до поступового збільшення значення індексу коефіцієнта заломлення, поки злива не переходить у стан грози. При цьому видно, що зі збільшенням коефіцієнта заломлення збільшується різниця між вимірюваними висотами.

Проведені дослідження показують, що максимальне збільшення затримки спостерігається під час грозових злив. Незважаючи на високу вологість повітря туман дає значно менший внесок у збільшення затримки й може супроводжуватися зменшенням коефіцієнта заломлення тропосфери.

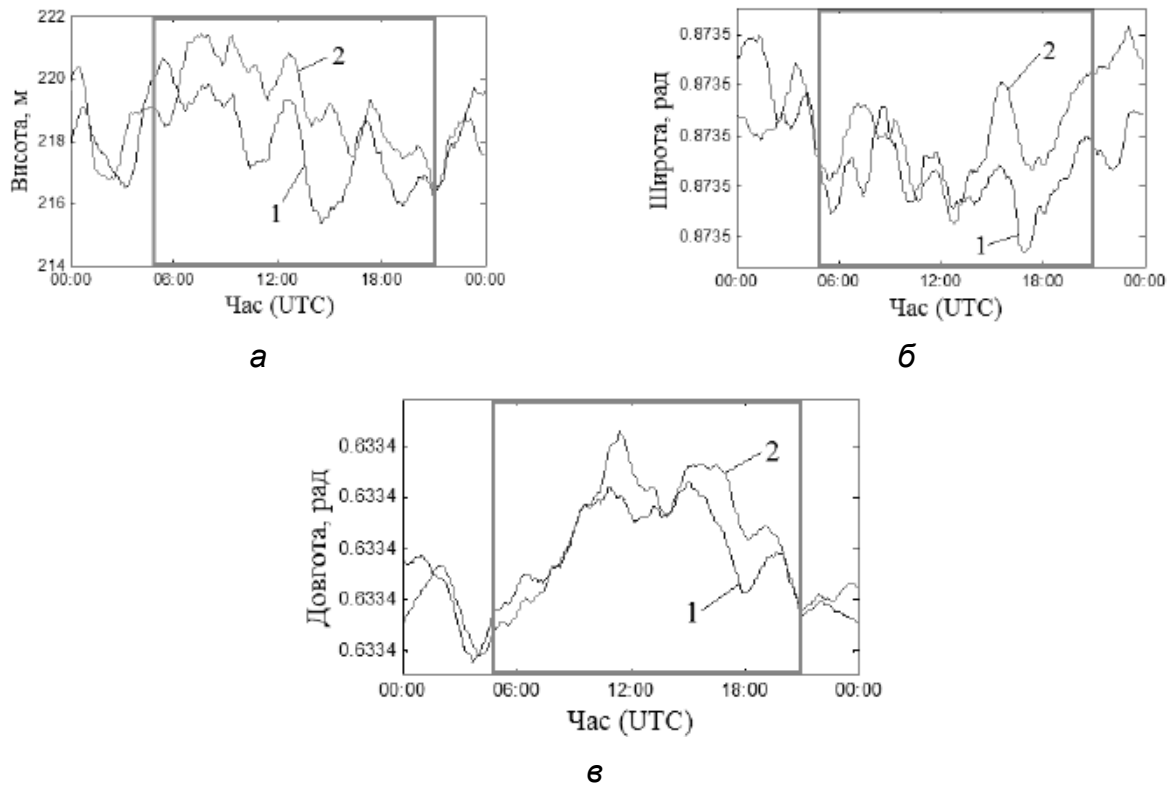


Рис. 5.23. Зміна вимірюваних значень координат 05–06.10.2012 унаслідок опадів (1 – за наявності опадів, 2 – за ясної погоди): а – висота; б – широта, в – довгота

Зазначимо, що під час інтенсивних опадів спостерігається зниження рівня сигналів, прийнятих від супутників. Для прикладу показано зміни координат (рис. 5.24) та їх флуктуацій (рис. 5.25), розрахованих як різниця між «сирими» даними і згладженими у віконному фільтрі.

Аналізувалося два дні, в один з яких у 00:00 за місцевим часом був зливовий дощ. Видно, що флуктуаційна компонента координат на відміну від трендової реагує на появу опадів з самого початку спостереження метеоявищ. Виразний перепад координат трендової складової фіксується ближче до закінчення дощу.

Таким чином, можна зробити висновок, що для виявлення зон випадання опадів існує необхідність використовувати не тільки порівняння

змін псевдовідстаней і координат, а також поведження рівня сигналів, що приймаються від супутників.

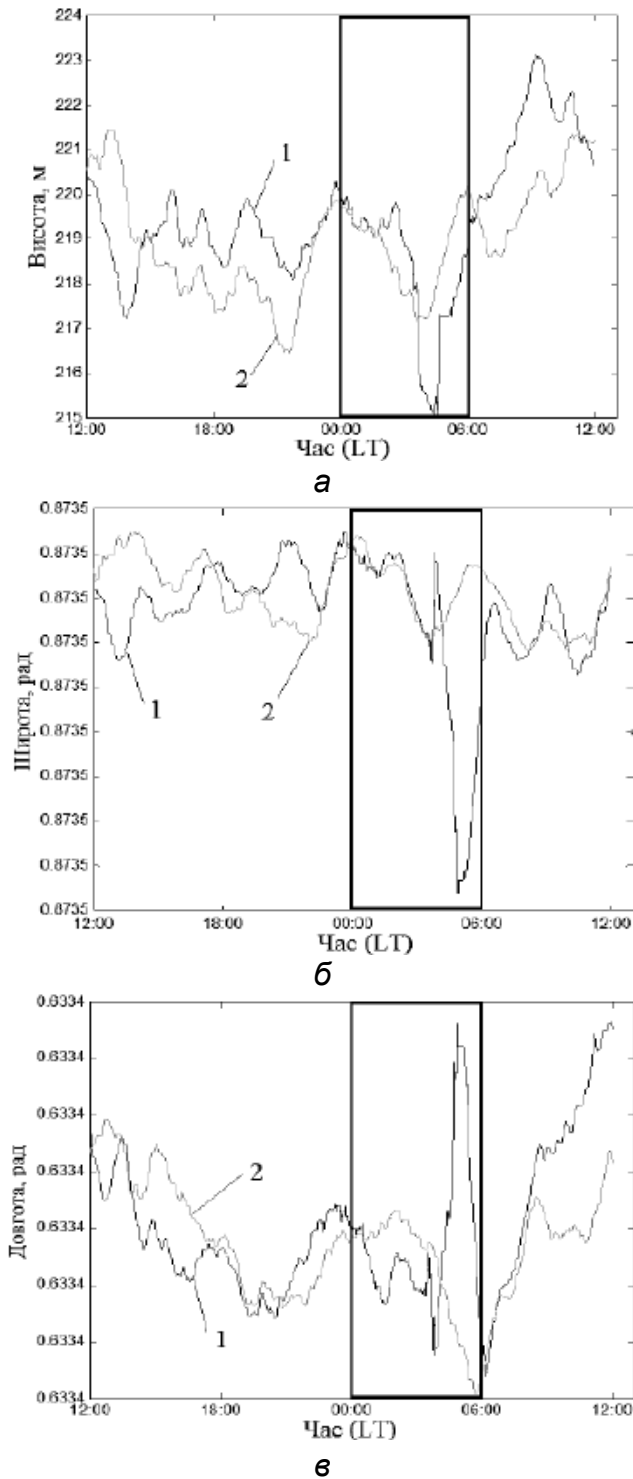


Рис. 5.24. Трендова компонента координат під час дощу і за його відсутності: 1 – 20–21.07.2015 – грозова злива, 2 – 21–22.07.2015 – нормальна погода; а – висота, б – широта, в – довгота

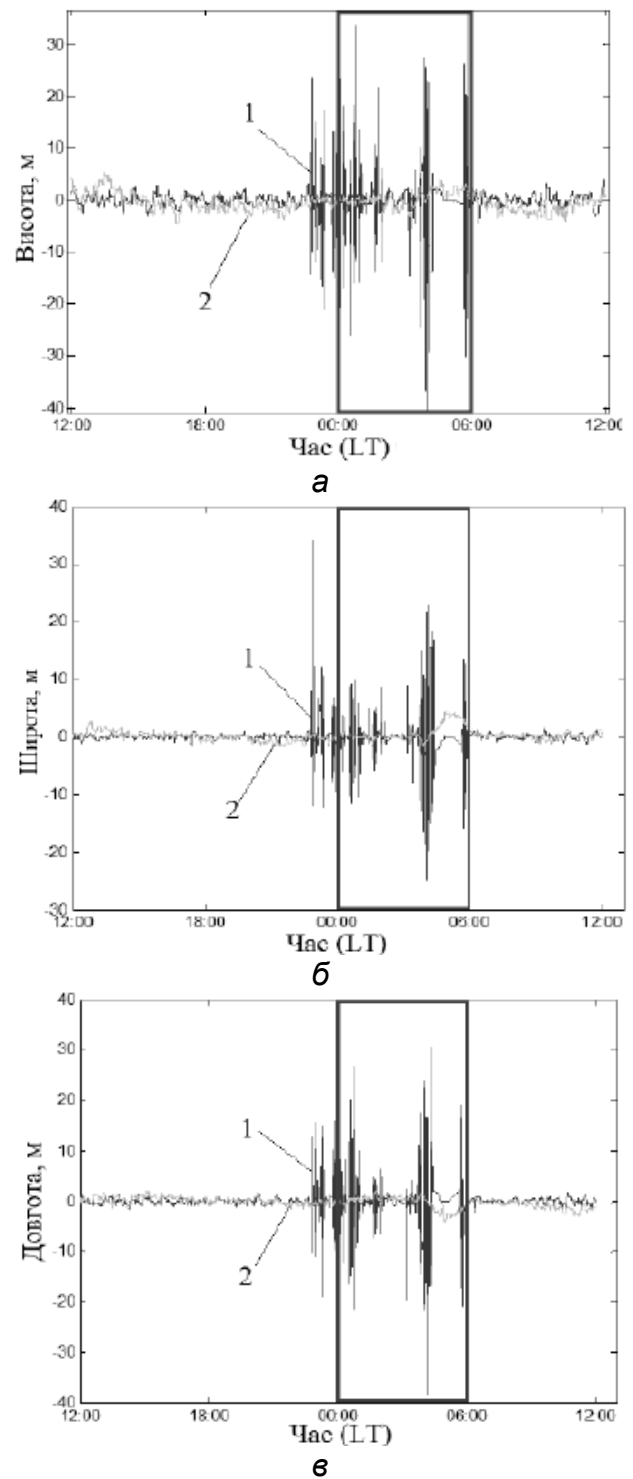


Рис. 5.25. Флуктуаційна компонента координат під час дощу і за його відсутності при істотному зниженні рівня сигналу від супутників GPS: 1 – 20–21.07.2015 – грозова злива, 2 – 21–22.07.2015 – нормальна погода; а – висота, б – широта, в – довгота

### 5.3.3. Аналіз просторового розподілу коефіцієнта заломлення за даними GPS

Раніше було показано, що зміни вимірюваної висоти за допомогою приймачів ГНСС корелюють зі змінами приземного значення коефіцієнта заломлення. Логічно припустити, що існує зв'язок між коефіцієнтом заломлення тропосфери й поведінням площинних координат. Для виявлення подібного зв'язку було вибрано 10 міст навколо м. Харкова з кроком приблизно  $40^\circ \dots 45^\circ$ , у якому проводилося накопичення навігаційної інформації (рис. 5.26).

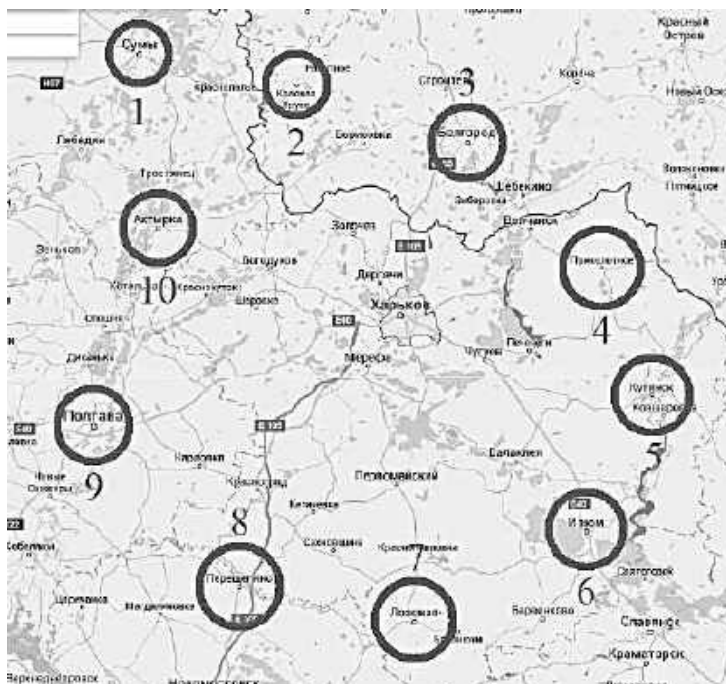
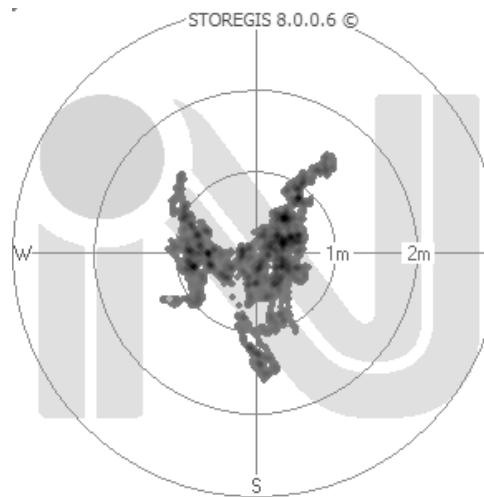
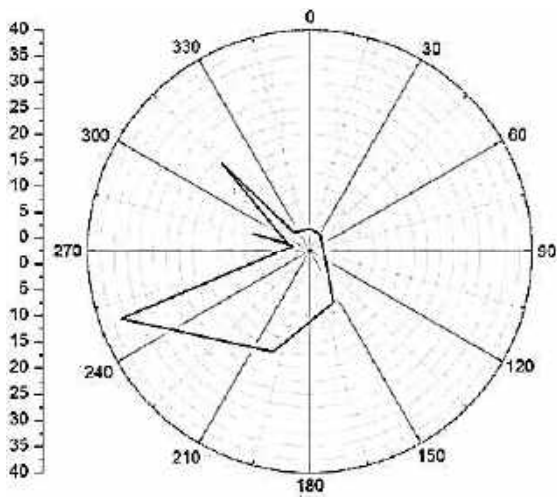


Рис. 5.26. Розташування міст для оцінювання коефіцієнта заломлення:  
1 – Суми, 2 – Червона Яруга, 3 – Белгород, 6 – Приколотне, 5 – Куп'янськ, 6 – Ізюм,  
7 – Лозова, 8 – Перещепине, 9 – Полтава, 10 – Охтирка

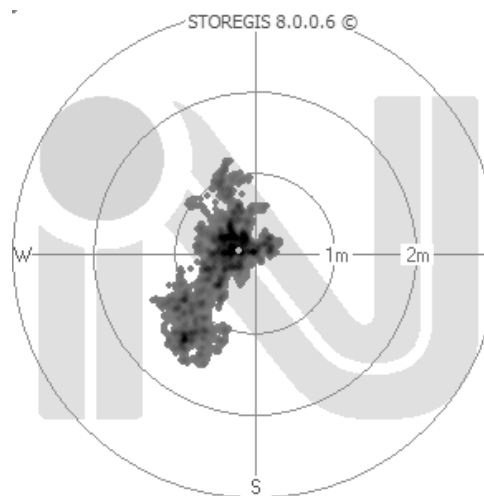
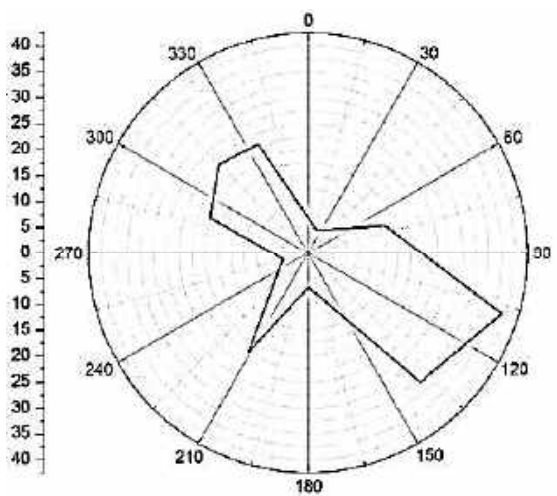
У досліджуваних містах оцінювалися приземні коефіцієнти заломлення тропосфери на основі даних метеостанцій про вологість, тиск і температуру, які вимірювалися на 3-годинних інтервалах. Отримані навігаційні дані вимірювалися з частотою 1 Гц і являли собою накопичення на 3-годинних інтервалах часу між вимірами коефіцієнта заломлення. Таким чином, для аналізу використовувалися дані про зміни коефіцієнта заломлення між сусідніми вимірами й порівнювалися з отриманими мішенями координат. У разі, якщо відбувалося зменшення значення коефіцієнта заломлення для якогось із міст за період спостереження, то отримане значення бралось за модулем, а азимутальний кут у напрямку міста змінювався на  $180^\circ$ .

Для аналізу було вибрано кілька днів у літній період, коли могли спостерігатися флуктуації площинних координат протягом доби. На рис. 5.27 показано зміну площинних координат і коефіцієнта заломлення в полярних координатах.



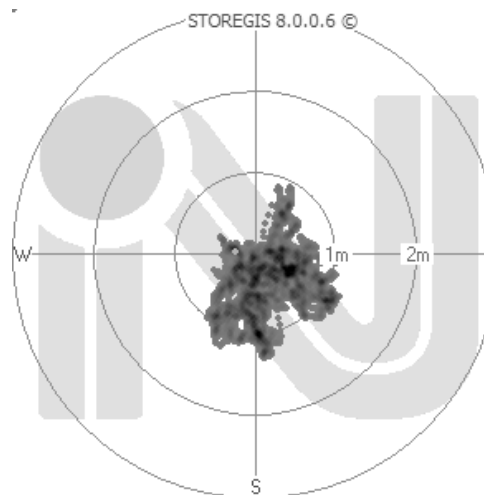
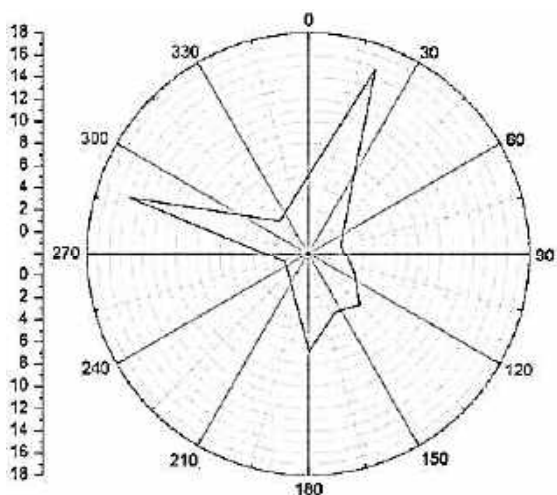
Dev: unknown  
 File: 15\_18.nme  
 Date: 14.06.12  
 B: 50°02.77139N  
 L: 036°17.46031E  
 H: 0204.5 m  
 N: 9756  
 Nanom: 0  
 rms2D: 0.700 m  
 rmsH: 1.282 m  
 rmsV: 0.002 m/s  
 deltaMb: -0.02 m  
 deltaMl: -0.03 m  
 deltaMh: 0.85 m

**a**



Dev: unknown  
 File: 18\_21.nme  
 Date: 14.06.12  
 B: 50°02.77139N  
 L: 036°17.46031E  
 H: 0204.5 m  
 N: 10800  
 Nanom: 0  
 rms2D: 0.586 m  
 rmsH: 1.196 m  
 rmsV: 0.002 m/s  
 deltaMb: -0.14 m  
 deltaMl: -0.43 m  
 deltaMh: 0.42 m

**б**



Dev: unknown  
 File: 21\_00.nme  
 Date: 14.06.12  
 B: 50°02.77139N  
 L: 036°17.46031E  
 H: 0204.5 m  
 N: 10800  
 Nanom: 0  
 rms2D: 0.516 m  
 rmsH: 1.108 m  
 rmsV: 0.004 m/s  
 deltaMb: -0.38 m  
 deltaMl: 0.17 m  
 deltaMh: 1.84 m

**в**

Рис. 5.27. Зміна коефіцієнта заломлення (зліва) і площинних координат (справа) 16.06.2012 на 3-годинних інтервалах:  
 а – 15:00–18:00; б – 18:00–21:00; в – 21:00–00:00

Видно, що поведження площинних координат у багатьох випадках є протилежним до поведження коефіцієнта заломлення, що зазначалося в

попередньому підрозділі. При збільшенні значення коефіцієнта заломлення в певному напрямку зазвичай відбувається зміщення вимірюваних координат у протилежний бік. Таким чином, на основі зміщення площинних координат відносно реального місця розташування внаслідок нерівномірного впливу тропосфери для різних напрямків можна проводити якісне оцінювання просторового змінення коефіцієнта заломлення. Оскільки під час дощів коефіцієнт заломлення збільшувався, дані про зміни площинних координат можуть використовуватися для грубого аналізу напрямку зони випадання опадів.

#### **5.4. Модель функції відображення тропосферної затримки**

Сьогодні існує велика кількість високоточних приймачів супутникових навігаційних сигналів різних систем. Однак домінуючим фактором, який може вносити значні помилки під час вимірювання місця розташування об'єкта, є просторово-часова неоднорідність розподілу електромагнітних хвиль в атмосфері і, зокрема, у тропосфері. Найбільш зручним і достовірним способом урахування тропосферної помилки під час розрахунку координат користувача методом вимірювання псевдовідстаней є використання тропосферної моделі. У наслідок цього виникла необхідність в аналізі обмежень наявних математичних моделей тропосфери і розробленні нової моделі, у якій ураховуються регіональні особливості поведінки коефіцієнта заломлення. Нині усунення йоносферної затримки реалізується шляхом використання двочастотних режимів роботи приймачів. Однак на відміну від іоносфери, яка є частотно-залежним середовищем, у тропосфері подібний підхід реалізувати неможливо, тому компенсація тропосферної затримки є значно складнішою, оскільки її стан у приземній частині залежить від великої кількості факторів.

Для опису параметрів тропосфери існує багато математичних моделей, за допомогою яких проводиться розрахунок поправок: моделі Saastamoinen, Hopfield, MOPS тощо. Основний недолік цих моделей полягає в тому, що вони ґрунтуються на глобальному розподілі метеорологічних параметрів і не враховують їх регіональних відхилень.

Як зазначалося раніше, рефракція радіохвиль в атмосфері визначається не абсолютним значенням коефіцієнта заломлення, а швидкістю його змінення зі змінням висоти, тобто вертикальним градієнтом коефіцієнта заломлення. У нижніх шарах просторово-часові зміни коефіцієнта заломлення з висотою виникають більшою мірою внаслідок відповідного змінення температури й вологості повітря.

##### *5.4.1. Формування моделі функції відображення*

Вплив тропосфери на затримку сигналу, який поширюється від ГНСС до користувача, ураховується з використанням моделі зенітної

тропосферної затримки, причому окремо для гідростатичної й вологої компонент затримок. Далі отримані результати перераховуються в похилі затримки з використанням функцій відображення.

Наявні сьогодні функції відображення є емпіричними, слабо враховують фізичні особливості трас поширення, тому доцільно запропонувати таку функцію відображення, яка була б зумовлена фізичною моделлю середовища поширення й давала б змогу враховувати його рефракційні властивості. Ця функція відображення має залежати від значення градієнта коефіцієнта заломлення, тобто враховувати різні рефракційні ситуації від сферичної (при  $g_N = 0$ ) до «пласкої» Землі при критичній рефракції ( $g_N = -0,157$  Н од./м). Однією із загальноприйнятих моделей урахування рефракційних властивостей тропосфери в припущенні її сферично-шаруватої структури є еквівалентний радіус Землі. Вплив атмосферної рефракції при лінійній залежності показника заломлення  $N$  від висоти враховується шляхом уведення еквівалентного радіуса Землі  $a_e$ .

Значення еквівалентного радіуса Землі визначається умовою збереження відносної кривизни між радіопроменем і поверхнею Землі в діючих та еквівалентних умовах поширення радіохвилі:

$$a_e = \frac{a}{1 + a g_N}, \quad (5.26)$$

де  $a = 6371$  км – радіус Землі.

При нормальній рефракції, коли  $g_N = -0,04 \cdot 10^{-6}$  Н од./м, еквівалентний радіус Землі набуває значення  $a_e = 8569,861$  км.

Будемо вважати, що рефракція враховується введенням еквівалентного радіуса Землі. Поширення радіохвиль відбувається в сферично-шаруватій тропосфері з ефективною товщиною  $h_e$ , при цьому товщину тропосфери будемо вважати залежною від широти й сезону. Схематичне зображення задачі показано на рис. 5.28.

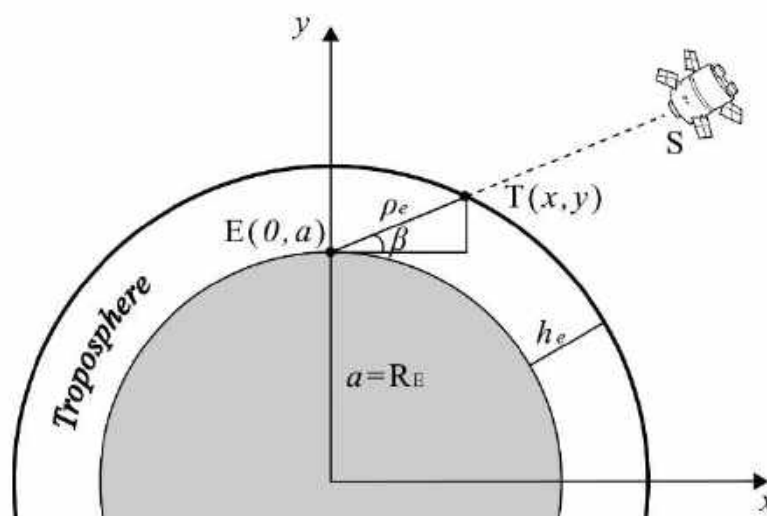


Рис. 5.28. Поширення сигналу в тропосфері

Залежно від кута піднесення супутника (точка  $S$ ) буде змінюватися похила дальність шляху поширення сигналу в тропосфері ( $ET$ ). Записавши рівняння для точки  $T$ , яка знаходиться на верхній межі тропосфери (у межах розглянутої моделі сферично-шаруватої тропосфери), через рівняння кола

$$x^2 + y^2 = (a_e + h_e)^2 \quad (5.27a)$$

і рівняння променя  $ET$

$$y = a_e + x \operatorname{tg} \beta, \quad (5.27b)$$

одержуємо систему рівнянь для оцінювання значення похилої дальності поширення променя в тропосфері  $\rho$ :

$$\rho = \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \beta} \left( \frac{2h_e}{a_e} + \frac{h_e^2}{a_e^2} \right)} \right) a_e \sin \beta, \quad (5.28)$$

де  $x, y$  – координати в площині приймання;

$a_e$  – еквівалентний радіус Землі;

$h_e$  – товщина шару тропосфери.

Зі співвідношення (5.28) випливає, що при куті піднесення супутника  $\beta \rightarrow 90^\circ$  тропосферна затримка визначається ефективною товщиною шару тропосфери  $\rho \rightarrow h_e$ , причому при будь-яких  $a_e$ , у тому числі і в разі  $a_e \rightarrow \infty$ , коли градієнт коефіцієнта заломлення стає критичним, тобто  $g_N \rightarrow -0,157$  Н од./м. При малих кутах піднесення ( $\beta \rightarrow 0^\circ$ ) тропосферна затримка  $\rho \rightarrow \sqrt{2h_e a_e + h_e^2} \approx \sqrt{2h_e a_e}$ , тобто дорівнює дальності прямої видимості. При критичній рефракції, коли  $g_N \rightarrow -0,157$  Н од./м, Земля стає «пласкою» і  $a_e \rightarrow \infty$ , а тропосферна затримка набуває вигляду  $\rho \approx \sin \beta \rightarrow \infty$ . Запропонована функція відображення має вигляд

$$m_e = \frac{\rho_e}{h_e} = \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \beta} \left( \frac{2h_e}{a_e} + \frac{h_e^2}{a_e^2} \right)} \right) \frac{a_e}{h_e} \sin \beta. \quad (5.29)$$

Це означає, що якщо порівнювати її зі стандартною функцією відображення, яку отримано для моделі «пласкої» Землі і для якої  $m = (\sin \beta)^{-1}$ , то при зенітних кутах  $\beta \rightarrow 90^\circ$  обидві функції відображення дають однакові значення  $\delta = \frac{m_e}{m} \approx 1$  при будь-яких градієнтах заломлення



(рис. 5.29). Найбільш значні відмінності функцій відображення починаються при малих кутах піднесення супутника ( $\beta \rightarrow 0^\circ$ ) під час рефракції, відмінній від критичної, коли Земля є сферичною, а не «пласкою».

З метою порівняння запропонованої моделі з відомими розраховувалася залежність  $\delta = \frac{m_e(\beta)}{m(\beta)}$  для різних висот тропосфери (у полярних широтах, середніх і тропічних), а також для різних градієнтів коефіцієнта заломлення  $g_N$  (див. рис. 5.29):

$$m(\beta) = \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + (\sin \beta)^2}}. \quad (5.30)$$

З наведених рисунків видно, що спостерігаються суттєві відмінності запропонованої функції від функції  $1/\sin\beta$  при нормальній рефракції, які починаються з  $15^\circ$ , а від функції Black&Eisner – з  $5^\circ$ . При  $3^\circ$  значення функції  $1/\sin\beta$  у 2 рази перевищують реальні тропосферні затримки.

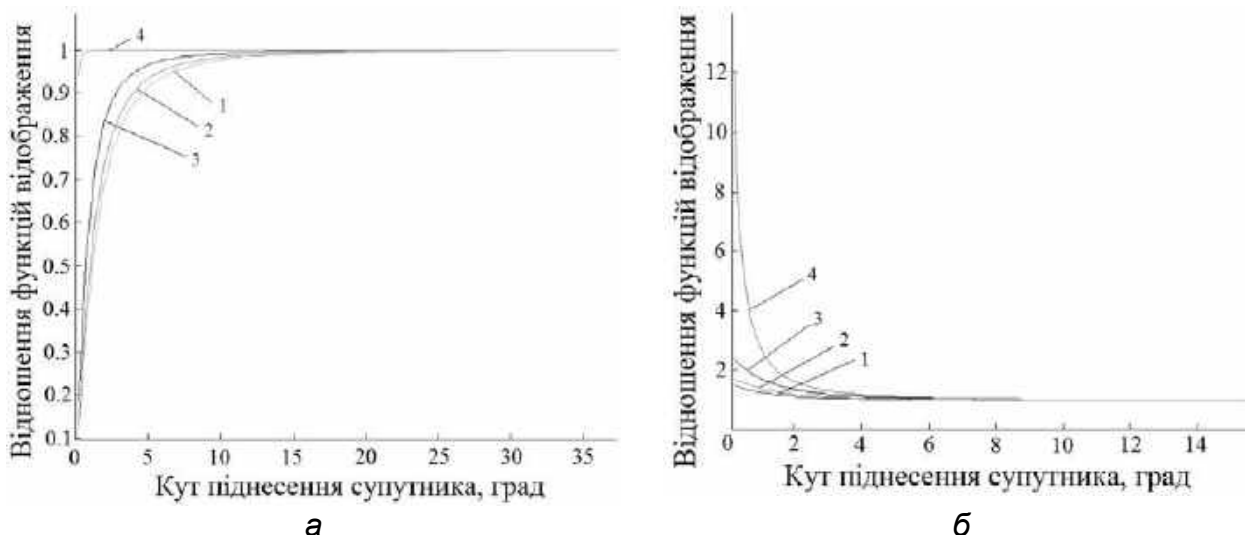


Рис. 5.29. Залежність  $\delta$  для різних градієнтів коефіцієнта заломлення  $g_N$  (1 –  $g_N = 0$ ; 2 –  $g_N = -0,06 \cdot 10^{-6}$  N од./м; 3 –  $g_N = -0,1 \cdot 10^{-6}$  N од./м;

4 –  $g_N = -0,1568 \cdot 10^{-6}$  N од./м): а – модель  $1/\sin \beta$ ; б – модель Black&Eisner

На рис. 5.30 для прикладу показано поведження порівнюваних функцій відображення, при цьому для пропонованої функції відображення  $g_N = -0,06 \cdot 10^{-6}$  N од./м.

Для апробації запропонованої функції відображення й порівняння характеру її поведження з характером реальних затримок, що виникають у тропосфері, проводилися параметрична апроксимація експериментальних даних і підбір градієнта коефіцієнта заломлення для  $h_e$ , який розраховувався таким чином:

- висота тропосфери залежно від широти:

$$h_\varphi = h_{90} + (h_0 - h_{90}) \cos^2 \varphi; \quad (5.31a)$$

- сезонна залежність товщини тропосфери:

$$h_{\varphi}(n) = h_{\varphi} + \Delta h \left( 1 + \cos 2\pi \frac{n - 173}{365,25} \right), \quad (5.316)$$

де  $\Delta h = 1$  км;

$h_{90}$  – висота шару тропосфери в полярних широтах;

$h_0$  – висота шару тропосфери в тропічних широтах;

$\varphi$  – широта місця спостереження;

$n$  – номер дня в році.

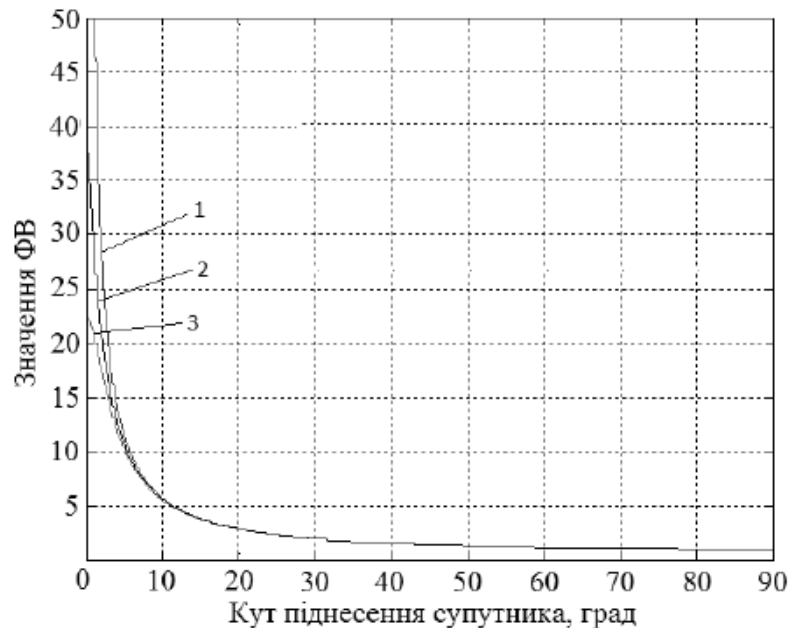


Рис. 5.30. Куту залежність функцій відображення:  
1 –  $1/\sin(\beta)$ ; 2 – запропонована ФВ; 3 – ФВ Black&Eisner

Ці співвідношення отримано шляхом гармонійної апроксимації значень висоти в тропосфері від полярних широт до екватора, і в них ураховується сезонна змінність ефективної товщі тропосфери – улітку вона є більшою, ніж узимку. Разом з виразом (5.29) ці співвідношення дають змогу оцінити тропосферні затримки, а також поведження функції відображення залежно від географічного положення й рефракційних властивостей тропосфери.

Експериментальні дані, що використовуються для порівняння з теоретичними розрахунками, отримано за допомогою вимірювальних пунктів, спеціально розгорнутих у чотирьох містах України (м. Харків, м. Суми, м. Сміла, м. Полтава). Використовувані разом з приймачами антени давали змогу приймати сигнали навіть при невеликих від’ємних кутах спостереження GNSS-супутників. За отриманими даними проводився розрахунок поправок псевдовідстаней, метод обчислення яких був описаний раніше. Запропонована функція відображення порівнювалася з найбільш використовуваною в реальних вимірах функцією Black&Eisner (рис. 5.31).

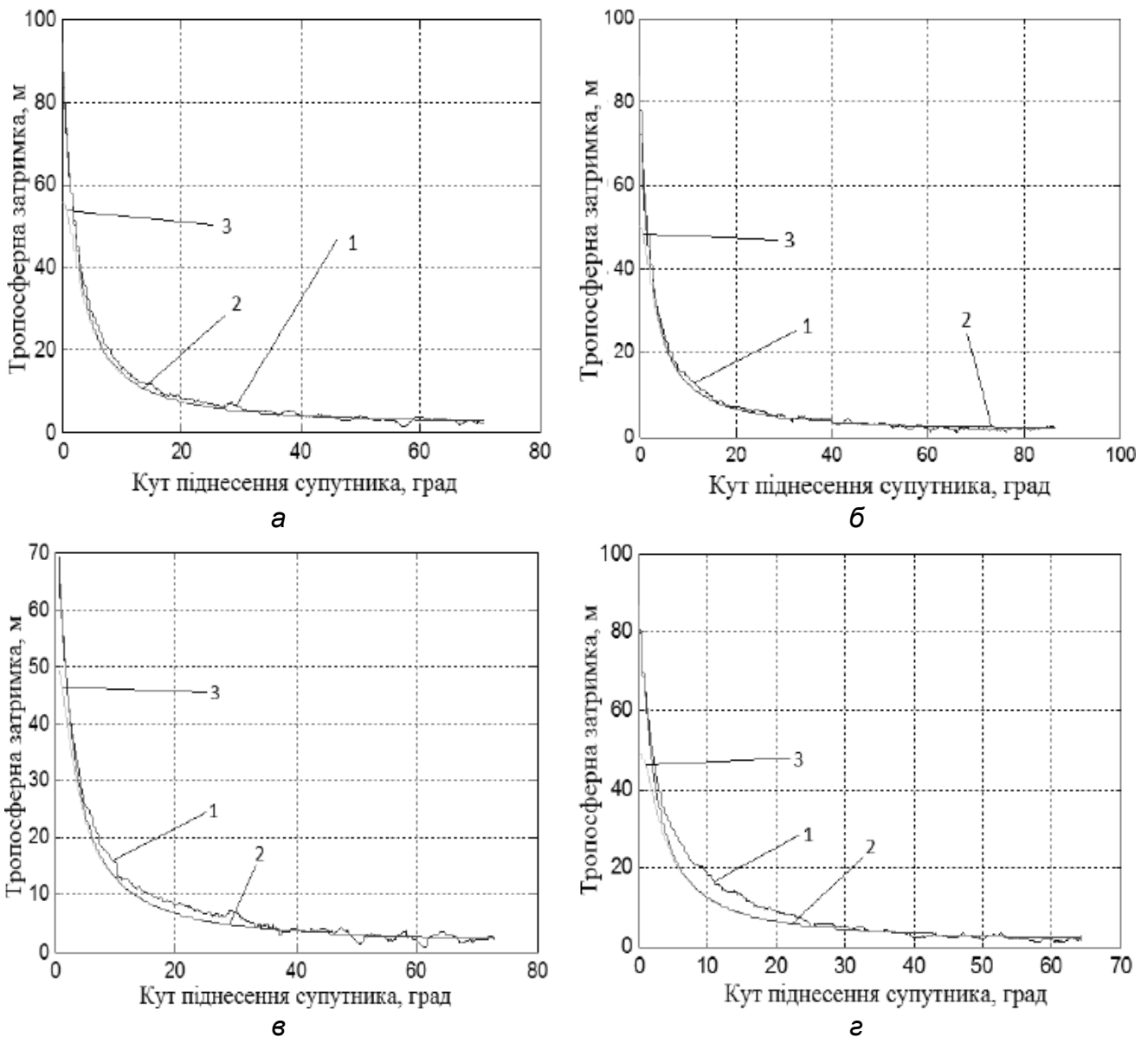


Рис. 5.31. Порівняння експериментальних даних (1) із запропонованою функцією відображення (2) і функцією відображення Black&Eisner (3):

- а – 06.07.2012, 20:19:21–06.07.2012, 23:19:16 (N = 337,5 – 360 N од.);
- б – 26.02.2012, 15:02:27–26.02.2012, 18:32:56 (N = 306 N од.);
- в – 30.06.2012, 16:59:15–30.06.2012, 19:36:00 (N = 316,5 – 313,5 N од.);
- г – 27.03.2012, 03:33:21–27.03.2012, 06:29:51 (N = 307 – 306 N од.)

На рис. 5.32 зображено відхилення запропонованої функції відображення й моделі Black&Eisner від реальних даних.

Помилка синхронізації годинників апаратури супутника й користувача усувалася під час розв'язання навігаційної задачі. Таким чином, отримані поправки псевдовідстані є адитивною сумішшю тропосферної й іоносферної затримок. Для аналізу використовувався приріст псевдовідстані з урахованою іоносферною затримкою, який порівнювався з теоретично розрахованим за моделлю значенням функції відображення для весняного й літнього періодів, коли флуктуації коефіцієнта заломлення значно змінювалися від мінімальних до максимальних значень відповідно.

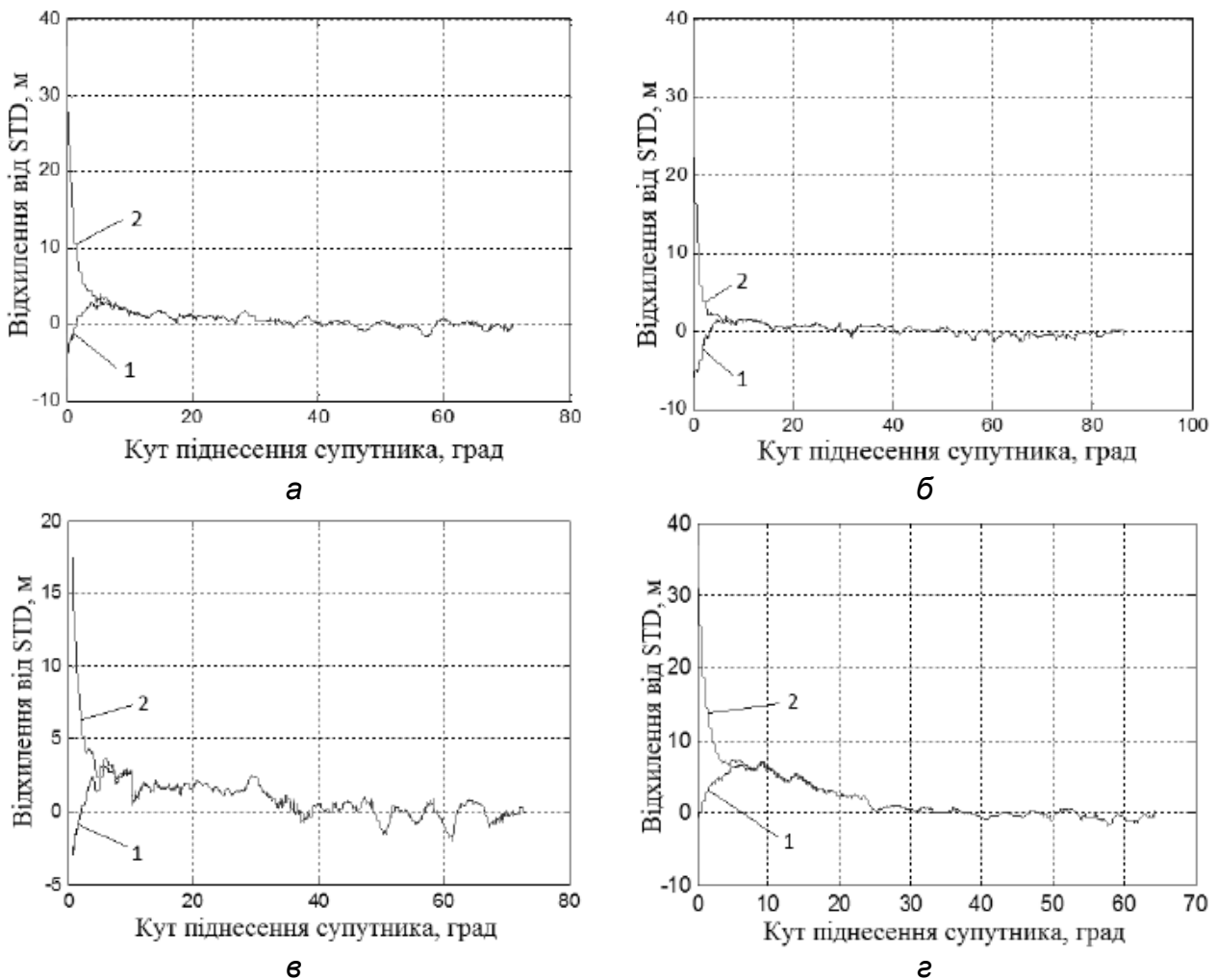


Рис. 5.32. Відхилення експериментальних даних від теоретично розрахованих функцій відображення (1 – запропонована функція відображення, 2 – функція відображення Black&Eisner): а – 06.07.2012, 20:19–06.07.2012, 23:19; б – 26.02.2012, 15:62–26.02.2012, 18:32; в – 30.06.2012, 16.59–30.06.2012, 19:36; г – 27.03.2012, 03:33–27.03.2012, 06:29

З отриманих результатів видно, що, на відміну від емпіричної моделі Black&Eisner, запропонована модель функції відображення дає змогу точніше описати поведження похилої тропосферної затримки на малих кутах (менше  $5^\circ$ ). Поводження обох функцій є схожим при кутах піднесення супутника, більших за  $5^\circ$ , які зазвичай і використовуються для розв'язання навігаційної задачі.

#### 5.4.2. Розв'язання оберненої задачі зі знаходження градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери

Використовуючи той факт, що на малих кутах піднесення тропосферна затримка стає чутливою до змінення рефракційних властивостей середовища поширення, можна розв'язати обернену задачу. Для цього проводився підбір градієнта, що входить у модель запропонованої функції відображення зенітної тропосферної затримки, щоб забезпечити мінімальне

відхилення від реальних тропосферних затримок, які виникають при поширенні сигналу від навігаційних супутників (НС). Для порівняння вибиралася ділянка функції відображення до кутів, менших від  $25^\circ$ , оскільки на малих кутах збільшується товщина шару, через який проходить сигнал від НС. Значення градієнта коефіцієнта заломлення, отримані за допомогою запропонованої функції відображення, порівнювалися зі значеннями, отриманими за емпіричним співвідношенням, що зв'язує індекс коефіцієнта заломлення та його градієнт. У роботах було показано, що приблизно з половини жовтня по початок квітня рефракційні властивості тропосфери є близькими до стандартних (коефіцієнт заломлення становить близько  $310 \text{ N од.}$ , а його градієнт –  $0,04 \text{ N од./м}$ ). Однак з квітня по першу половину жовтня, особливо в літні місяці, спостерігається збільшення як коефіцієнта заломлення до  $355 \text{ N од.}$ , так і його градієнта до  $-0,06 \text{ N од./м}$ . Для оцінювання значень градієнта за вимірними біля поверхні землі значеннями коефіцієнта заломлення використовувалося емпіричне співвідношення

$$g_N = 0,086 - 3,97N \cdot 10^{-6} \text{ N од./м.} \quad (5.32)$$

Виходячи з цього співвідношення, було отримано значення градієнта коефіцієнта заломлення на основі метеорологічних даних, що надаються штатним метеорологічним центром раз на 3 год. Порівняння градієнтів заломлення, розрахованих за метеорологічними даними і отриманих за моделлю, здійснювалося як в зимові, так і в літні періоди. На рис. 5.33 показано результати, отримані при порівнянні реальних і прогнозованих за запропонованою моделлю тропосферних затримок.

Одержані результати свідчать про те, що градієнти коефіцієнта заломлення, розраховані за емпіричною формулою і за запропонованою моделлю, досить добре узгоджуються.

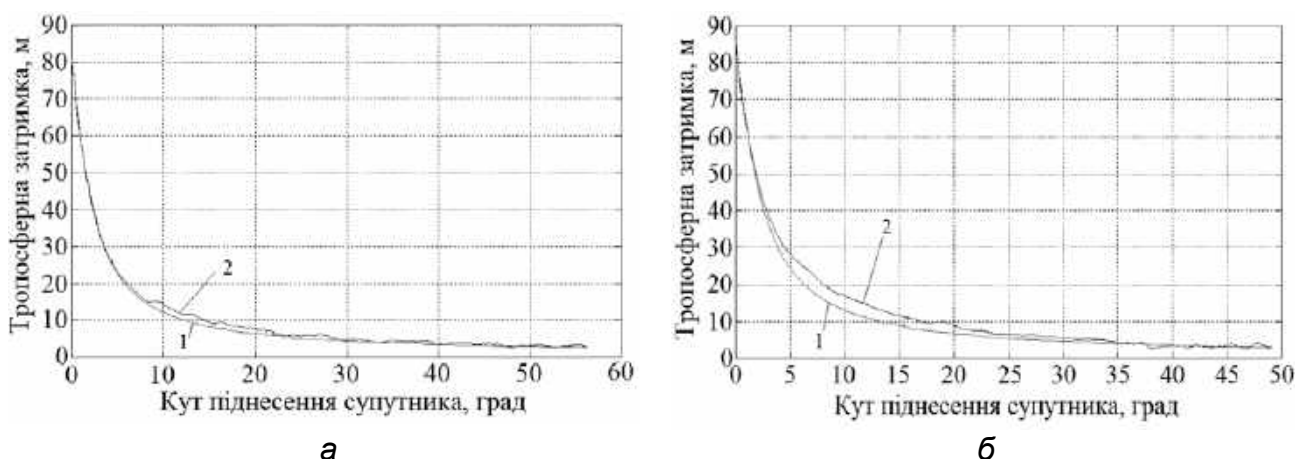


Рис. 5.33. Змодельовані (1) і реальні (2) тропосферні затримки:

- а – 27.01.2013, GPS02,  $g_N = -0,038 \cdot 10^{-6} \text{ N од./м}$  (розрахована за метеорологічними параметрами), отримано оптимальне значення  $g_N = -0,06 \text{ N од./м}$  за моделлю;  
 б – 06.06.2012, GPS02,  $g_N = -0,051 \text{ N од./м}$  (розрахована за метеорологічними параметрами), отримано оптимальне значення  $g_N = -0,051 \text{ N од./м}$  за моделлю

Таким чином, знаючи значення коефіцієнта заломлення та його градієнтів під різними азимутальними кутами, можна відтворювати структуру середовища поширення на основі даних, отриманих у навігаційних повідомленнях. Результати розрахунків наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Оцінка  $g_N$ , отримана за формулою (5.32) і запропонованою моделлю

| Дата       | Індекс коефіцієнта заломлення, N од. | Значення $g_N$ , розраховане за формулою (5.32), N од./м | Значення $g_N$ , розраховане за моделлю, N од./м |
|------------|--------------------------------------|--|--|
| 2012.07.06 | 321                                  | -0,0658  | -0,0666  |
| 2012.06.06 | 360                                  | -0,051   | -0,0506  |
| 2013.01.27 | 309                                  | -0,038   | -0,06  |
| 2016.01.29 | 311                                  | -0,039   | -0,0396  |
| 2016.01.30 | 311,5                                | -0,0391  | -0,0392  |
| 2016.03.07 | 307                                  | -0,0371  | -0,0372  |
| 2016.03.08 | 305                                  | -0,0361  | -0,0356  |

## 5.5. Вплив Сонця на атмосферу

Вплив Сонця на атмосферу Землі вивчається досить давно. Однак якщо вплив Сонця на іоносферу Землі вивчено досить добре, то взаємодія з нижньою атмосферою є мало вивченою. У цьому підрозділі аналізується вплив Сонця на сигнали ГНСС, а також на поведження тропосфери при змінненні сонячної активності.

### 5.5.1. Вплив сонячної активності на тропосферу

Більшість сучасних досліджень спрямовано на вивчення поведження іоносфери, властивості якої безпосередньо залежать від впливу Сонця. Для цього використовуються оптичні методи, методи часткових відображень, вертикального зондування, некогерентного розсіювання, супутникові методи тощо. Розглядаючи вплив сонячного випромінювання на тропосферу, вважають, що космічне випромінювання впливає на процес формування хмарності шляхом можливого створення ядер конденсації в повітрі, тобто рівень іонізувального випромінювання впливає на кількість аерозолів в атмосфері, що відіграють значну роль при утворенні хмар.

Таким чином, вважають, що 11- і 22-річні цикли сонячної активності змінюють рівень хмарності на 3...6 %.

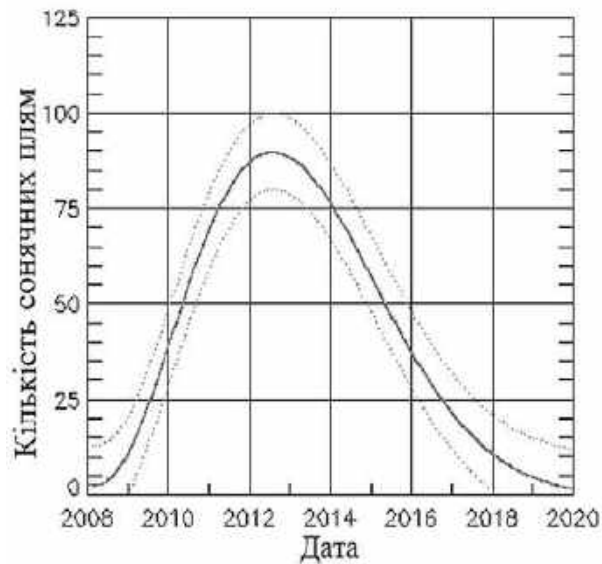
За оцінками, змінення сонячної сталої на 1 % призводить до змін температури повітря приблизно на 0,6 °С. У межах емпіричної моделі оцінка внеску сонячної активності у спостережувані зміни температури повітря в ХХ ст. становить 60...70 %.

У роботах Г. А. Жеребцова та інших було запропоновано фізичну модель впливу сонячної активності на кліматичні характеристики тропосфери Землі. Ключова концепція моделі – вплив геліогеофізичних збурень на параметри земної кліматичної системи. Основним агентом сонячної активності, що впливає на погодно-кліматичні характеристики тропосфери, є параметри сонячного вітру й міжпланетного магнітного поля, які визначають геомагнітну активність і впливають на зміни електричного поля високоширотної атмосфери. При підвищенні рівня сонячної активності відбуваються зменшення радіаційного вихолодження високоширотних областей, підвищення температури нижньої і середньої тропосфери, перебудова термобаричного поля, зменшення середнього меридіанного градієнта температури між полярними й екваторіальними областями, які визначають меридіональне перенесення тепла. Важливим є те, що фазовий перехід водяної пари й виділення прихованого тепла відповідно до розглянутих механізмів приводить лише до незначного підвищення температури в областях формування хмарності.

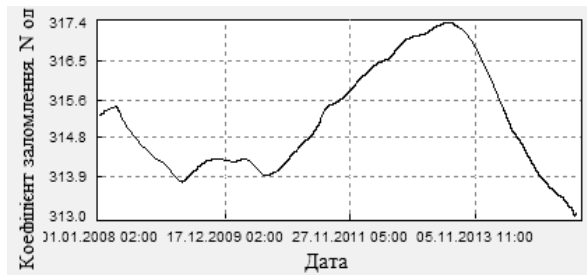
Досліджено вплив сонячної активності на коефіцієнт заломлення приземного шару. Для його оцінювання використовувалися багаторічні дані штатних метеостанцій щодо температури, тиску й вологості для м. Суми та м. Полтави.

Розглянувши трендові зміни сонячної активності й приземного коефіцієнта заломлення тропосфери, можна зазначити схожий характер їх поведінки. Для прикладу на рис. 5.34 показано дані про сонячну активність, починаючи з 2008 року, коли почався новий 11-річний сонячний цикл. Зміна сонячної активності визначається числом Вольфа. Основна крива являє собою згладжені значення, передбачені для всього 26-го сонячного циклу, а пунктирні криві – середньоквадратичне відхилення.

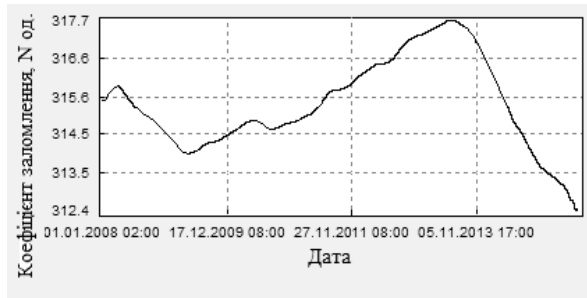
Видно, що підвищення сонячної активності на початку 11-річного циклу супроводжується аналогічним збільшенням трендової складової коефіцієнта заломлення в приземному шарі, а починаючи з 2013 року – зменшенням трендової компоненти для досліджуваних міст. При цьому флуктуаційна складова (що має аналогічний характер для досліджуваних міст), пов'язана з сезонним змінням метеорологічних параметрів, є досить стабільною.



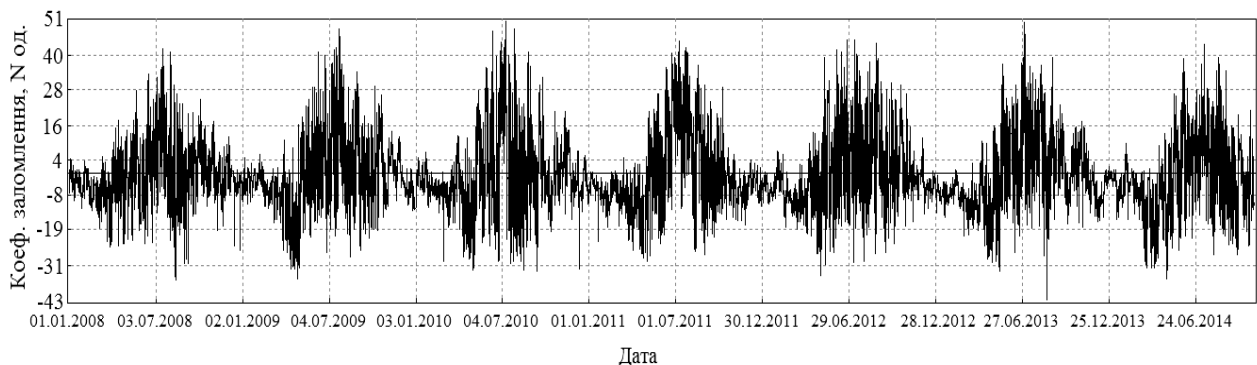
а



б



в



г

Рис. 5.34. Змінення сонячної активності (а) і приземного значення трендової складової коефіцієнта заломлення тропосфери в м. Суми (б) та м. Полтаві (в) за період з 2008 р. по 2015 р., а також флуктуаційної компоненти (г)

### 5.5.2. Вплив сонячного затемнення на ГНСС-вимірювання

Сонячна активність провокує змінення середовища поширення сигналів, тому доцільно проаналізувати, як сонячне затемнення впливає на ГНСС-вимірювання. Для оцінювання впливу Сонця на ГНСС-вимірювання використовувалися дані навігаційних накопичень, що припадають на період сонячного затемнення, на декількох приймачах.

У багатьох роботах з вивчення сонячних затемнень і пов'язаних з ними процесів зазвичай досліджуються зміни в іоносфері й зазначається, що при сонячному затемненні відбувається зменшення концентрації електронів, зменшення критичних частот шарів F1 і F2, що є характерним для нічної іоносфери. Динамічні процеси при конкретному затемненні істотно залежать від збурень Сонця й навколоземного середовища, часу доби, а також



метеорологічної обстановки. Раніше проведені дослідження показують, що під час сонячного затемнення відбувається охолодження і зменшується тиск повітря приземного шару, а також відбувається генерація акустико-гравітаційної хвилі (АГХ) в атмосфері, що приводить до взаємодії складових системи тропосфера – іоносфера – магнітосфера.

Розглядається затемнення, що відбувалося 20.03.2015 в період 11:09–13:21 LT (9:09–11:21 UTC) і мало частковий характер у точці спостереження (0,55 – розмір максимальної фази). Для оцінювання сонячної активності в досліджуваному проміжку часу використовувалися дані про змінення індексів геомагнітної активності  $K_p$  і  $D_{st}$  (рис. 5.35), що дало змогу оцінити також геомагнітну обстановку.

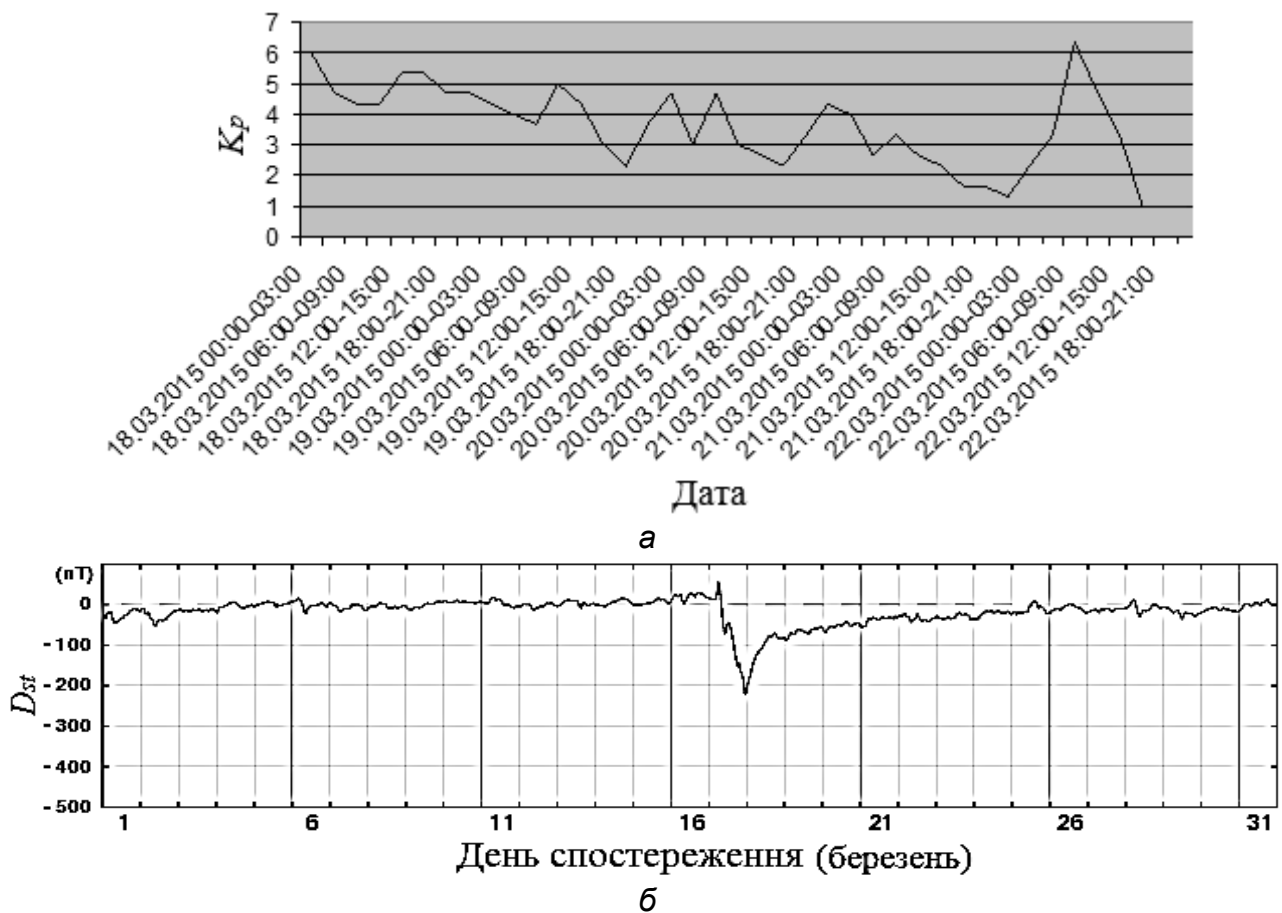


Рис. 5.35. Поводження геомагнітних індексів під час сонячного затемнення 20.03.2015: а – індекс  $K_p$ ; б – індекс  $D_{st}$

З рис. 5,35, а видно, що індекс  $K_p$  поступово зменшувався від 6, стану магнітної бурі (за два дні до затемнення), до приблизно 2, стану слабо збуреного магнітного поля, під час затемнення. Після затемнення він флюктував у невеликих межах; а саме 2–3 од., зменшився від 2 до 3:00 ранку 22.03.2015 майже до 1, після чого до 9:00 відбулося його різке збільшення до 7 – стану магнітної бурі. Індекс  $D_{st}$  (рис. 5.35, б) під час затемнення і після нього мав невелику від’ємну величину (менше 50), тому

необхідно враховувати, що затемнення проходило на фоні релаксаційної геокосмічної бурі, що може спричинити відхилення від аналогічних сонячних затемнень, що проходили раніше.

У роботі зазначається, що ефект сонячного затемнення 20.03.2015 істотно відрізняється від сонячних затемнень 11.08.1999, 31.05.2003, 03.10.2005, 29.03.2006, 01.08.2008, а також 06.01.2011, спостереження за якими проводилися поблизу м. Харкова.

Основним параметром, що визначає поведження тропосфери, є коефіцієнт заломлення, змінення якого показано на рис. 5.36. Значення коефіцієнта заломлення було розраховано за метеопараметрами, визначеними безпосередньо в точці вимірювання (рис. 5.37).



Рис. 5.36. Змінення коефіцієнта заломлення в період з 19.03.2015 по 25.03.2015

Видно, що індекс коефіцієнта заломлення, розрахований за метеорологічними параметрами, має схоже за характером поведження і в сусідні дні. На рис. 5.37 зображено змінення температури й вологості безпосередньо під час затемнення. Поведження метеорологічних параметрів відповідає описаному раніше в інших роботах.

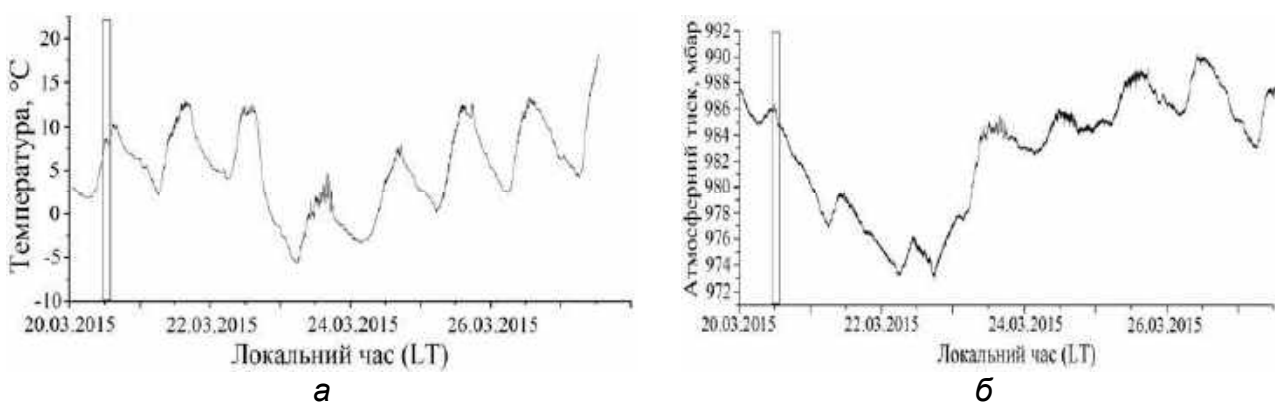


Рис. 5.37. Змінення температури (а) і тиску (б) з 20.03.2015 по 27.03.2015

Під час затемнення 29 березня 2006 року фіксувалося різке

зменшення коефіцієнта заломлення, пов'язане з підвищенням температури повітря, що було обумовлено напрямком вітру. Унаслідок цього відбувалося зниження рівня сигналу на заобрійній трасі на 2 дБ. На рис. 5.38 зображено змінення співвідношення сигнал/шум для супутників GPS 30 і GPS 27 у день затемнення і протягом двох наступних днів. Супутник GPS 30 здійснював повний проліт (до зенітних кутів) уздовж руху тіні, а GPS 27 проходив під низьким кутом з піднесенням відносно точки приймання до  $17^\circ$  поперек руху тіні.

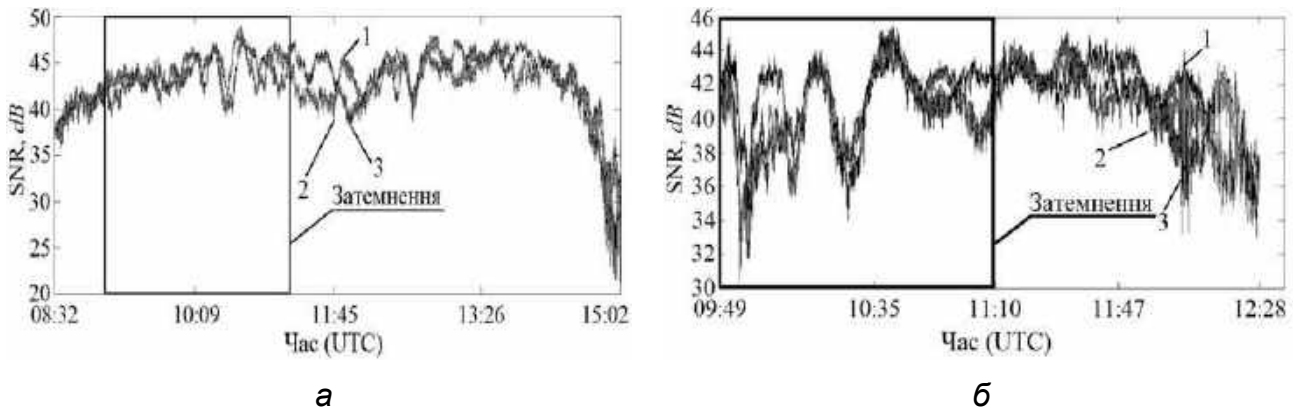


Рис. 5.38. Змінення співвідношення сигнал/шум для сигналів GPS 30 (а) і GPS 27 (б): 1 – 20.03.2015; 2 – 21.03.2015; 3 – 22.03.2015

Необхідно зазначити, що тінь рухалася з південного заходу на північний схід (рис. 5.39). Більш темній ділянці відповідає повне затемнення.



Рис. 5.39. Траєкторія тіні при сонячному затемненні 20.03.2015

Незважаючи на те, що поведження коефіцієнта заломлення в період затемнення не має принципових відмінностей з сусідніми днями, під час розгляду поведження флуктуацій вимірюваних координат видно, що при сонячному затемненні відбувається характерне зменшення вимірюваної висоти на всіх приймачах (рис. 5.40), а також характерні зміни за широтою та довготою (рис. 5.41), що є несприятливими двом наступним дням в аналогічний проміжок часу.

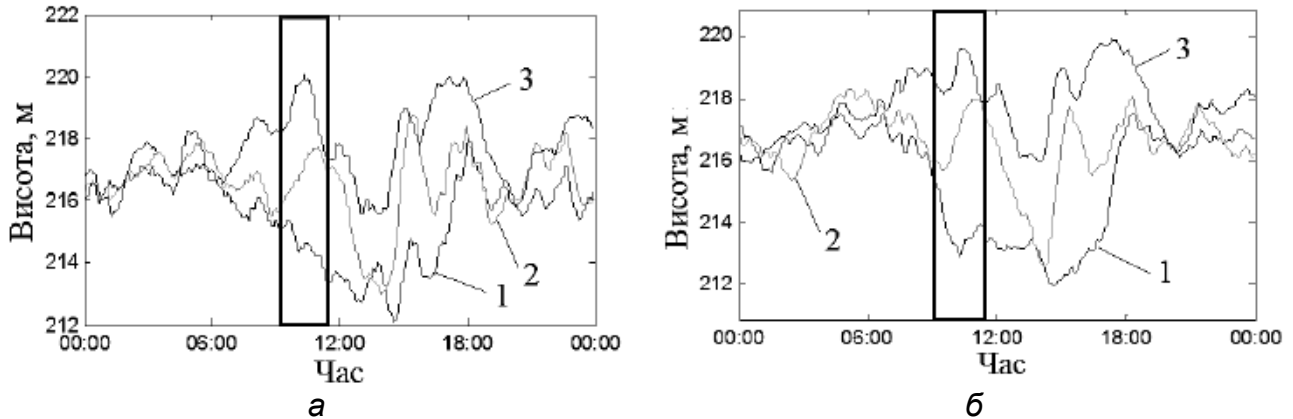


Рис. 5.40. Флуктуації вимірюваної висоти в період 2015.03.20–2015.03.22: а – приймач 1; б – приймач 2 (1 – 20.03.2015, 2 – 21.03.2015, 3 – 22.03.2015)

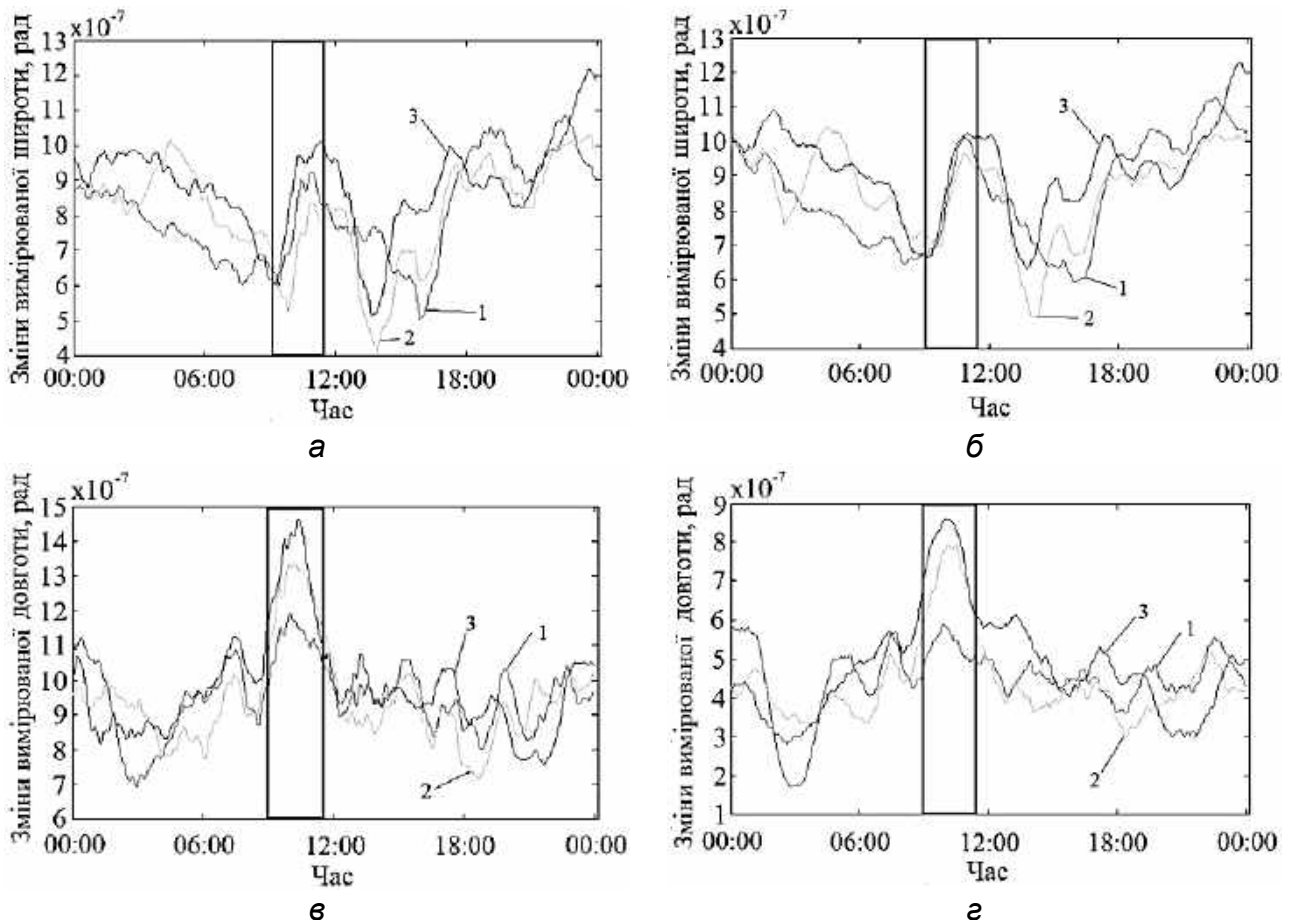


Рис. 5.41. Флуктуації вимірюваної широти (а, б) і довготи (в, г) у період 2015.03.20–2015.03.22: а, в – приймач 1; б, г – приймач 2 (1 – 20.03.2015, 2 – 21.03.2015, 3 – 22.03.2015)

Подібне поведження може пояснюватися тим, що на відміну від іоносферних процесів тропосферні будуть набагато більш інерційними, що може приводити до невластивого поведження вимірюваних координат, як, наприклад, при звичайному заході Сонця.

Однак при розгляді площинних координат (рис. 5.42) видно, що для дня проходження затемнення розкид координат є меншим, що може бути обумовлено зменшенням впливу сонячної активності на стан атмосфери, як у нічний час.

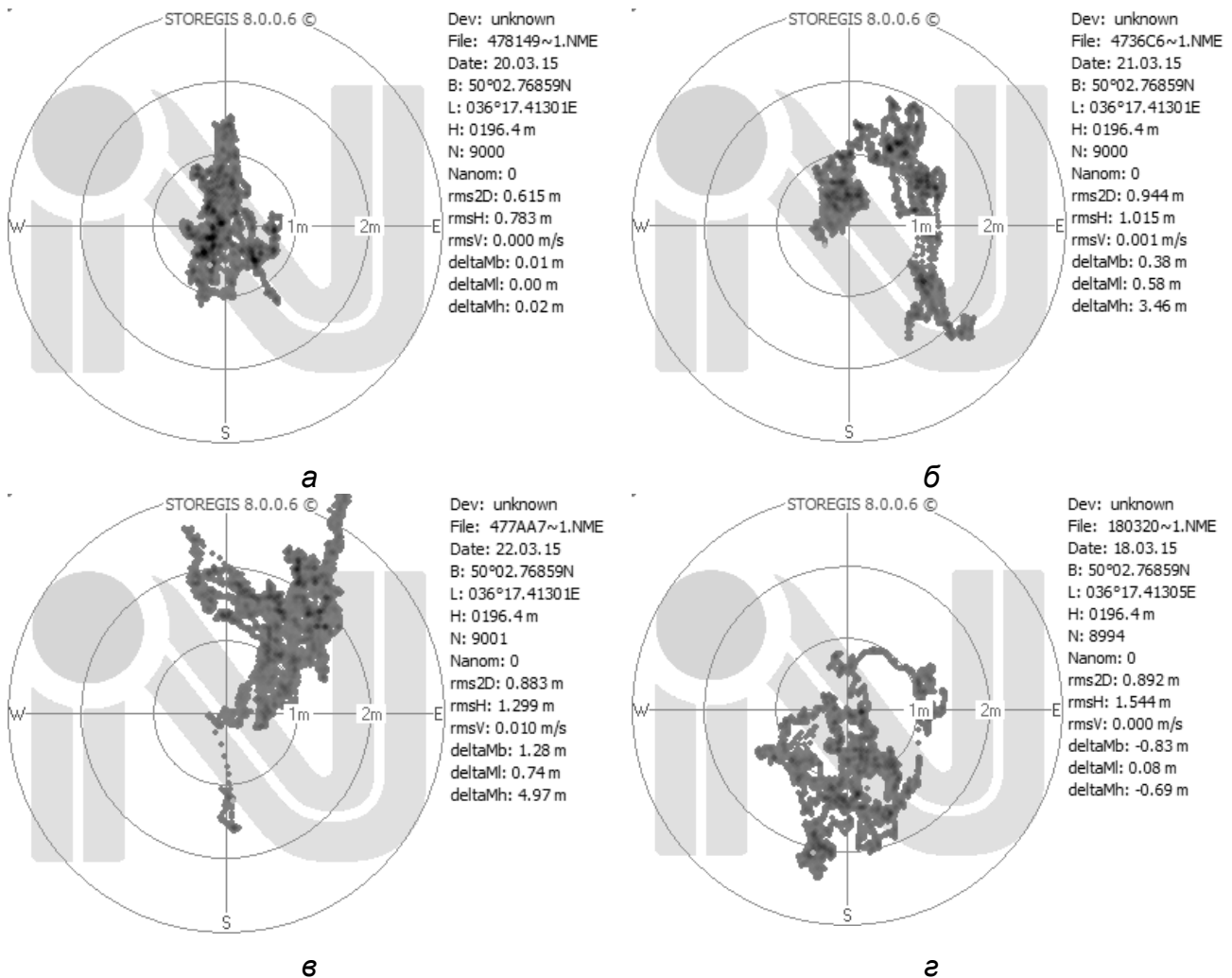


Рис. 5.42. Флуктуації площинних координат під час локального затемнення в точці проведення накопичень 20.03.2015 (а) і в аналогічний час в такі дні: 21.03.2015 (б), 22.03.2015 (в), 18.03.2015 (г)

Для оцінювання впливу іоносфери на змінення координат було проаналізовано змінення значення вертикальної повної електронної концентрації по земній кулі на основі карт IONEX, також для зони повного затемнення й поблизу точки вимірювання. На рис. 5.43 показано порівняння середнього значення інтегрального TECU для сусідніх двох днів (19.03.2015 і 21.03.2015) з днем проходження затемнення (20.03.2015).

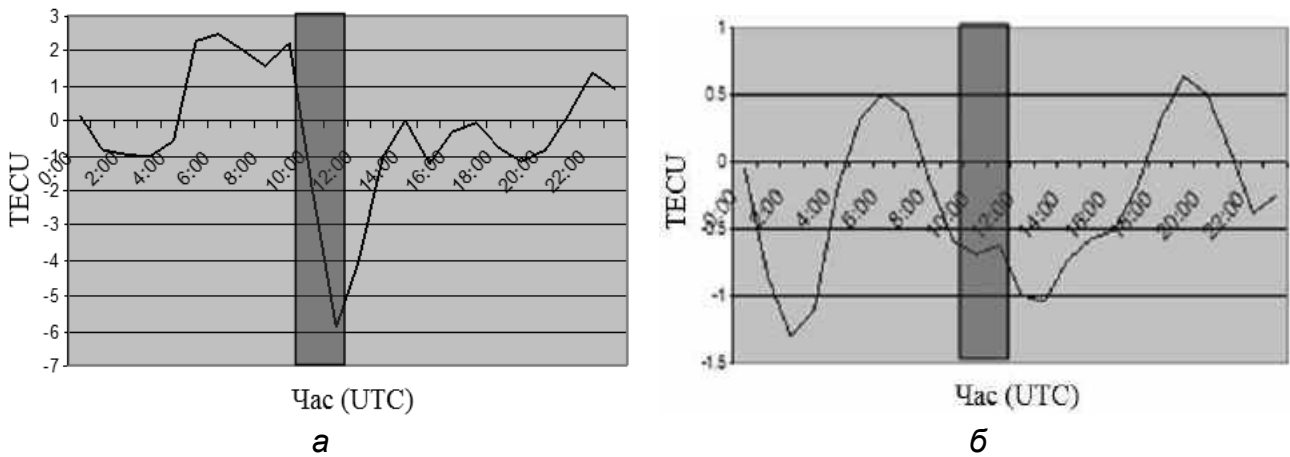


Рис. 5.43. Порівняння змін VTEC за добу: а – у точці проведення вимірювань; б – по всій карті

З отриманих результатів видно, що локальні зміни VTEC у точці проведення досліджень мають чітко виражене зниження концентрації електронів, яке простежується і для всієї іоносфери, але в значно менших масштабах через локалізацію ефекту затемнення. Це свідчить про те, що зміна VTEC має нерівномірний характер і потребує коригування залежно від географічного положення. Таким чином, можна зробити висновок, що при проходженні сонячного затемнення в точці проведення спостережень будуть відбуватися зміни координатної інформації, невластиві звичайним добовим флуктуаціям. Це пов'язано з тим, що йоносферна складова затримки прийнятих ГНСС сигналів є більш чутливою до локальних ефектів затемнення, що виявляється в різкому зниженні електронної концентрації. Водночас тропосферна затримка є менш чутливою до впливу затемнення через інерційність процесів у ній, тобто до впливу змін метеорологічних параметрів, а отже, і коефіцієнта заломлення, що потребує виконання особливих вимог до точності вимірювання координат під час спостереження затемнень.

## 5.6. Дослідження підстильної поверхні за допомогою випромінювання глобальної навігаційної супутникової системи

### 5.6.1. Методика

Нині широкої популярності набуває використання навігаційних систем не тільки для навігації, а й для інших завдань, таких, наприклад, як аналіз атмосферних процесів, що розглядались у попередніх підрозділах. Доцільним є дослідження можливості використання ГНСС не тільки для діагностики середовища поширення, але й підстильної поверхні поблизу точки приймання. Фізичною передумовою для такої діагностики може бути той факт, що під час передавання навігаційного повідомлення від супутника на приймальній стороні реєструються як прямі, так і відбиті поверхнею

сигнали, що несуть інформацію про її властивості та характеристики. Аналізуючи поведінку співвідношення сигнал/шум у точці спостереження при низьких кутах піднесення супутника і при різних його азимутах, можна виявляти точки відбиття на поверхні, а також оцінювати тип поверхні та ступінь її шорсткості в заданому напрямку.

Сигнал у точці приймання за наявності багатопроменевості в каналі поширення може бути записаний у вигляді суми гармонійних компонент. Множник послаблення сигналу  $V$  у точці приймання при малих кутах візування джерела  $\theta \approx \sin \theta$  можна подати у вигляді рівняння

$$V(\theta) = \left| 1 + \sum_{j=1}^m \dot{\rho}_j \exp(i2\pi\chi_j \sin \theta) \right|, \quad (5.33)$$

де  $\dot{\rho}_j$  – комплексний коефіцієнт відбиття, що характеризує величину сигналу від додаткового джерела відносно прямого сигналу;  $\chi_j = 2h_j / \lambda$  – частота, яка визначається набігом фази  $\varphi_j = 2\pi\chi_j \sin \theta$  від  $j$ -ї відбивної області, розташованої на висоті  $h_j$  відносно приймача. Зі співвідношення (5.33) випливає, що через змінення кута візування джерела  $\theta$ , що спостерігається при вертикальних розрізах поля над поверхнею розділу, унаслідок переміщення штучного супутника Землі (ШСЗ) системи глобальної навігації, а також змінення висоти розташування інверсійних відбивних шарів тропосфери в спектрі флуктуацій множника послаблення виникають компоненти, частота яких пов'язана з кутовим положенням джерела. Це означає, що використовуючи спектральний аналіз, можна за частотою компоненти визначити кутове положення джерела, а за її інтенсивністю – коефіцієнт відбиття. Відбивними областями можуть бути піднесені інверсійні шари тропосфери або блискучі точки на земній поверхні. Зі співвідношення (5.33) видно, що наявність додаткових (крім дзеркального) відбиттів приводить до збагачення спектра частотами  $\chi_j = h_j / \lambda$  та їх комбінаціями  $\chi_j - \chi_l$ . Слід зазначити, що якщо висота приймача відносно відбивної області на поверхні  $h_j$  (або інверсійного шару тропосфери) перевищує висоту приймача відносно середнього рівня земної поверхні  $h_0$ , то частоти  $\chi_j \geq \chi_0$  є вищими, ніж відповідні частоти для області дзеркального відбиття. В іншому випадку вони мають більш низькі частоти  $\chi_j \leq \chi_0$ . Спектральне розкладання амплітуди сигналу може використовуватися для оцінювання кількості областей відбиття та їх характеристик: кутових координат і коефіцієнтів відбиття з використанням підходів, розроблених раніше. Розглянемо ситуацію, коли сигнал ШСЗ відбивається від блискучих точок на земній поверхні (рис. 5.44). При цьому кути приходу прямого й відбитого променів будуть однаковими за абсолютною величиною.

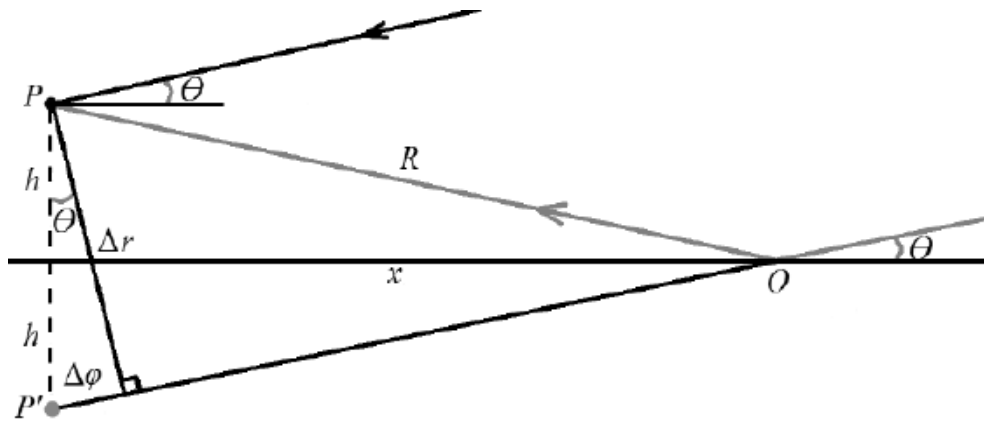


Рис. 5.44. Приймання променя, відбитого від блискучої точки на земній поверхні:  $P$  – точка приймання,  $O$  – відбивна точка,  $\theta$  – кут візування ШСЗ;  $h$  – висота розташування приймальної антени;  $x$  – відстань до відбивної точки

Відбитий сигнал має додатковий до прямого променя набіг фаз:

$$\Delta\varphi = K\Delta r = 2h \sin \theta K = \frac{2h2\pi}{\lambda} \sin \theta. \quad (5.34)$$

Частота  $F$ , подана як похідна по  $\Delta\varphi$ , набуде вигляду

$$\omega = \frac{\partial\Delta\varphi}{\partial t} = \frac{\partial\theta}{\partial t} \cdot 2h \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta. \quad (5.35)$$

Оскільки  $\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial t} = 2\pi F$ , отримаємо

$$F = \frac{\partial\theta}{\partial t} \frac{2h}{\lambda} \cos \theta, \quad (5.36)$$

де  $\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{V}{R_0}$  – кутова частота руху супутника, тут  $R_0$  – висота орбіти супутника ( $\approx 26\,600$  км), а  $V$  – швидкість його руху ( $\approx 3,9$  км/с),  $F$  – частота осциляцій сигналу, причому  $F = 1/\Delta t = 1/T$ , а  $\Delta t$  – час, за який фаза зміниться на  $2\pi$ . Звідси маємо

$$T = \frac{1}{F} = \frac{R_0}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda}{2h}, \quad (5.37)$$

тобто при малих кутах піднесення супутника, що становить для висоти розташування антени у м. Харкові близько 30 м, період флуктуацій сигналу становить близько 26 с, збільшуючись до 68 с при кутах близько  $60^\circ$ . Це означає, що частота флуктуацій становить близько 0,06 Гц на нульових кутах, зменшуючись до 0,02 Гц для кутів супутника близько  $60^\circ$ . Зниження висоти розташування приймача відносно області відбиття приводить до збільшення періоду, а отже, до зниження частоти флуктуацій.

При настільки невеликій кількості вибірок для оцінювання періоду



перспективним є використання сучасних методів вейвлет-аналізу. Крім того, необхідно враховувати, що при збільшенні висоти розташування приймача частота флуктуацій буде збільшуватися, і тоді, коли вона перевищить половину частоти оновлення інформації приймачем (для цього випадку  $F_0 = 1/T_0 = 0,5$  Гц), почне виявлятися строб-ефект, і це необхідно враховувати під час оцінювання висот:

$$h = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda}{2T_0} = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda F_0}{2}. \quad (5.38)$$

Таким чином, при висотах розміщення приймача понад 350 м частота оновлення інформації приймачем (1 Гц) стає недостатньою для правильного оцінювання частоти флуктуацій.

При настільки малій кількості точок дискретизації для оцінювання періоду (а отже, і відносної висоти) можна використати метод розрахунку нуль-перетинів. Суть підходу полягає в знаходженні відліків флуктуаційної компоненти сигналу, між якими її знак змінюється, і в уточненні часового інтервалу між переходами через нуль з використанням інтерполяції. Іншими словами, визначається часовий інтервал, на якому відбувається змінення різниці фаз прямого й відбитого сигналів на  $2\pi$ . Нехай для визначеності фіксуються переходи через нуль від від'ємного значення сигналу до додатного, хоча це й непринципово. З таким же успіхом можна визначити інтервал між переходами від додатного значення до від'ємного. Уважатимемо, що  $\{S_i, S_{i+1}\}$  – значення сигналу в  $i$ -й та  $(i+1)$ -й моменти часу, причому  $S_i \leq 0$ , а  $S_{i+1} \geq 0$ ,  $\{S_{i+k}, S_{i+k+1}\}$  – значення сигналу в  $(i+k)$ -й і  $(i+k+1)$ -й моменти часу, причому  $S_{i+k} \leq 0$ , а  $S_{i+k+1} \geq 0$ .

Тоді період флуктуацій можна визначити як

$$T = \left( k - 1 + \left( \frac{S_{i+1}}{S_{i+1} + S_i} + \frac{S_{i+k+1}}{S_{i+k+1} + S_{i+k}} \right) \right) T_0. \quad (5.39)$$

Наближену оцінку може дати використання цілої кількості відліків, тобто

$$T \approx kT_0. \quad (5.39a)$$

Співвідношення (5.39) і (5.39a) можна використовувати для оцінювання за частотою флуктуацій прийнятого сигналу висоти точки відбиття:

$$h = \frac{R}{V} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\lambda}{2T}. \quad (5.40)$$

Під час руху супутника по орбіті відбувається переміщення по дистанції області відбиття. Положення центра області відбиття на

підстильній поверхні визначається через її відносну висоту  $h(x)$  відносно приймача  $\frac{h(x)}{x} = \operatorname{tg} \theta$ . Відстань до неї визначається як

$$x = h(x) \operatorname{ctg} \theta, \quad (5.41)$$

де  $h(x)$  – висота розташування антени відносно висоти точки відбиття;  
 $x$  – відстань до центра області відбиття.

Оскільки висота розміщення антени відносно земної поверхні для м. Харкова та м. Суми становила приблизно 30 м, що при підвищенні супутника  $10^\circ \dots 20^\circ$  дає відстань до області відбиття 170...82 м, а при  $1^\circ \dots 2^\circ$  – відповідно 1720...860 м. Для м. Полтави розташування антени відносно земної поверхні становило близько 8 м. Відповідно при підвищенні супутника  $10^\circ \dots 20^\circ$  дальність до точки відбиття становитиме приблизно 65...22 м, а при  $1^\circ \dots 2^\circ$  – 658...230 м. При цьому кут візування області відбиття на поверхні буде збігатися з кутом візування супутника.

У формування поля в точці приймання основний внесок роблять точки, розташовані всередині зони, істотної для поширення, з радіусом  $r$ .

$$2r = \sqrt{\lambda R}. \quad (5.42)$$

Для відбивних поверхонь, близько розташованих до приймача, ці розміри становлять одиниці метрів, а для віддалених – десятки. Слід зазначити, що такі розміри має зона, істотна для поширення, при перетинанні еліпсоїда поверхнею перпендикулярно до напрямку поширення сигналу. Перетин еліпсоїда з підстильною поверхнею дасть розміри радіуса зони, істотної для поширення, на поверхні Землі в напрямку поширення сигналу:

$$r' = r \sin^{-1} \theta = \sqrt{\lambda R} \sin^{-1} \theta, \quad (5.42a)$$

який дорівнюватиме 26...36 м при куті  $20^\circ \dots 10^\circ$  і 600...2600 м при кутах  $2^\circ \dots 1^\circ$ . Це означає, що якщо відбивні елементи мають розміри, що перевищують розміри цієї зони, то відбиття від них відбувається з малими втратами.

Якщо відбивна площинка має розміри, менші від розмірів зони Френеля на поверхні, то рівень відбитого від неї сигналу буде пропорційним відношенню їх площ, і коефіцієнт відбиття можна визначити так:

$$\rho_i = \frac{S_i}{\pi \lambda R} \sin^{1/2} \theta = \frac{S_i}{\pi \lambda h} \sin^{3/2} \theta, \quad (5.43)$$

де  $S_i$  – площа  $i$ -ї зони відбиття;

$\rho_i$  – коефіцієнт відбиття від неї.

Якщо  $S_{i_{\max}} [dB]$  і  $S_{i_{\min}} [dB]$  – рівень сигналу (у децибелах) у максимумі й мінімумі пелюстки поля, то коефіцієнт відбиття

$$\rho_i \approx 0,1(S_{i_{\max}} [dB] - S_{i_{\min}} [dB]) / 2 \quad (5.43a)$$

визначається глибиною інтерференційних завмирань.

Зі співвідношення (5.39) можна визначити ширину інтерференційної пелюстки

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{2h} \frac{1}{\cos\theta}, \quad (5.44)$$

яка визначається кутом візування супутника, а також відносною висотою точки відбиття.

Ширина інтерференційної пелюстки для висот розташування антен становить: близько  $0,2^\circ$  для м. Харкова та м. Суми;  $0,7^\circ$  для м. Полтави. Співвідношення (5.44) дає змогу за вимірюваннями ширини інтерференційної пелюстки оцінити відносну висоту точки відбиття:

$$h_i = \frac{1}{\Delta\theta_i} \frac{\lambda}{2} \frac{1}{\cos\theta}. \quad (5.45)$$

Таким чином, вимірюючи ширину кожної інтерференційної пелюстки, можна оцінювати відносну висоту області відбиття, а за глибиною провалів – коефіцієнт відбиття, а отже, і розміри відбивної площинки.

Для знаходження точок відбиття й аналізу типу підстильної поверхні використовувалися «сирі» дані бази записів навігаційних сигналів ГНСС. В експериментах використовувалися одностотні приймачі СН-6719 розробки ТОВ «Навіс-Україна», розміщені в трьох містах України: м. Суми, м. Харків, м. Полтава. Панорама місцевості цих міст зображено на рис. 5.45.

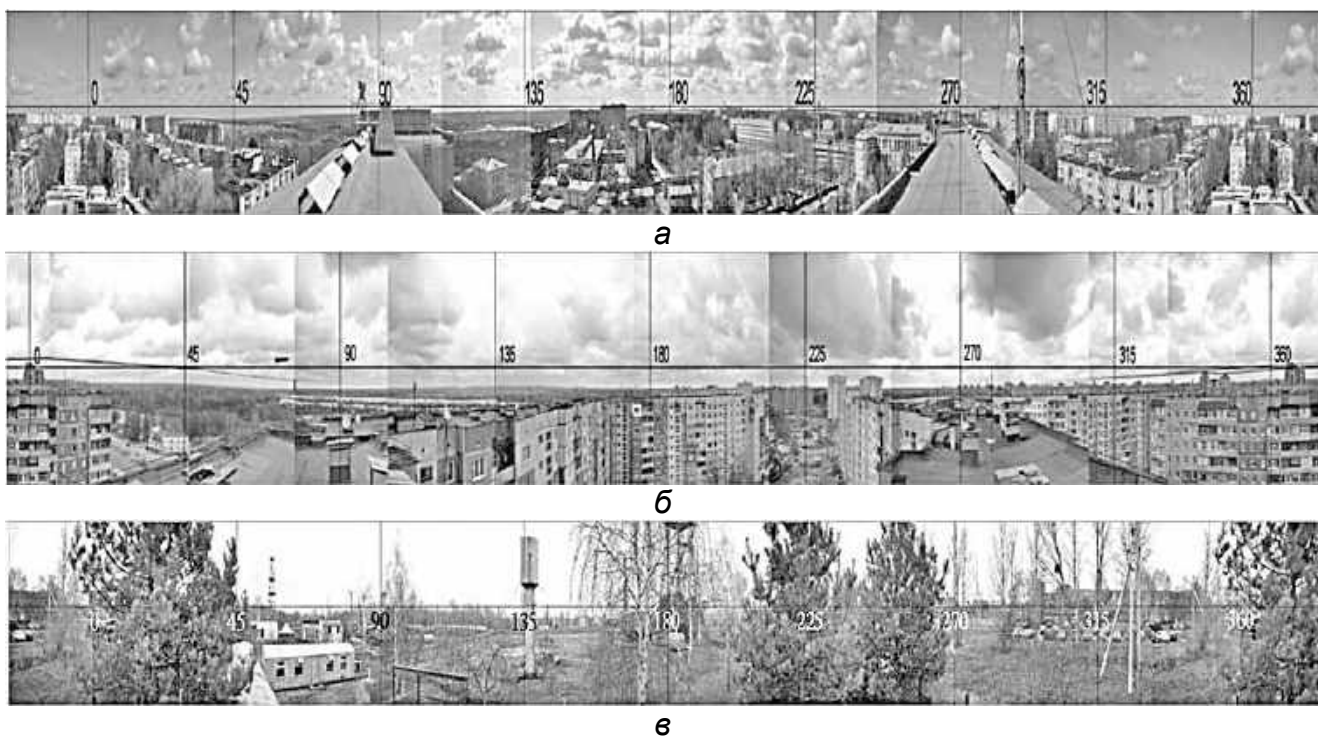


Рис. 5.45. Панорама місцевості з точки розташування приймача:  
а – м. Харків; б – м. Суми; в – м. Полтава

Сигнал супутника ГНСС записувався з моменту захоплення

приймачем і до моменту його втрати. Під час аналізу отриманих співвідношень сигнал/шум для різних супутників урахувалося, що в ГНСС супутники розбито на окремі групи з однаковими траєкторіями орбіт. Наприклад, для системи GPS супутники обертаються по кругових орбітах з однаковою висотою й періодом обертання для всіх супутників. Нахил орбіти ( $55^\circ$ ) є також загальним для всіх супутників системи. Єдиною відмінністю супутникових орбіт є довгота висхідного вузла або точка, у якій площину орбіти супутника перетинає екватор (ці точки відстоять одна від одної приблизно на  $60^\circ$ ). Отже, незважаючи на однакові параметри орбіт, супутники обертаються навколо Землі в шести різних площинах, по шість апаратів у кожній.

Таким чином, отримавши один і той же ефект на різних супутниках, можна зробити висновок про наявність стабільної області відбиття, а за частотою флуктуацій, азимутом і кутом місця можна оцінити місце розташування супутника.

На рис. 5.46 показано приклади амплітуд сигналів для різних груп супутників, траєкторії руху яких мають один і той же азимутальний напрямок. Для поділу стабільної й флуктуаційної компонент використовувався відомий алгоритм «гусениця».

### *5.6.2. Результати досліджень*

Основою методу є припущення, що вихідний часовий ряд є сумою декількох рядів. Тоді при деяких умовах можна визначити за виглядом власних чисел, власних і факторних векторів, що це за складові і який набір елементарних матриць відповідає кожному з них. Підсумовуючи елементарні матриці всередині кожного набору й переходячи від результативних матриць до ряду, отримують розвинення ряду на адитивні складові, наприклад на суму тренда, періодики та шуму або на суму низькочастотної й високочастотної складових.

Таким чином, метою методу є розвинення часового ряду на інтерпретовані адитивні складові, при цьому метод не потребує стаціонарності ряду, знання моделі тренда, а також відомостей про наявність у ряді періодичних складових та їх періоди. З використанням розглянутого підходу отримано трендові й флуктуаційні компоненти амплітуд сигналів супутників, зображені на рис. 5.46, 5.47.

На відміну від атмосфери, що впливає на зміну умов поширення сигналів ГНСС як протягом доби, так і залежно від пори року, підстильна поверхня є менш схильною до добових і сезонних змін і приблизно однаково впливає на характер поведінки сигналів для супутників, що знаходяться на одних і тих же орбітах.

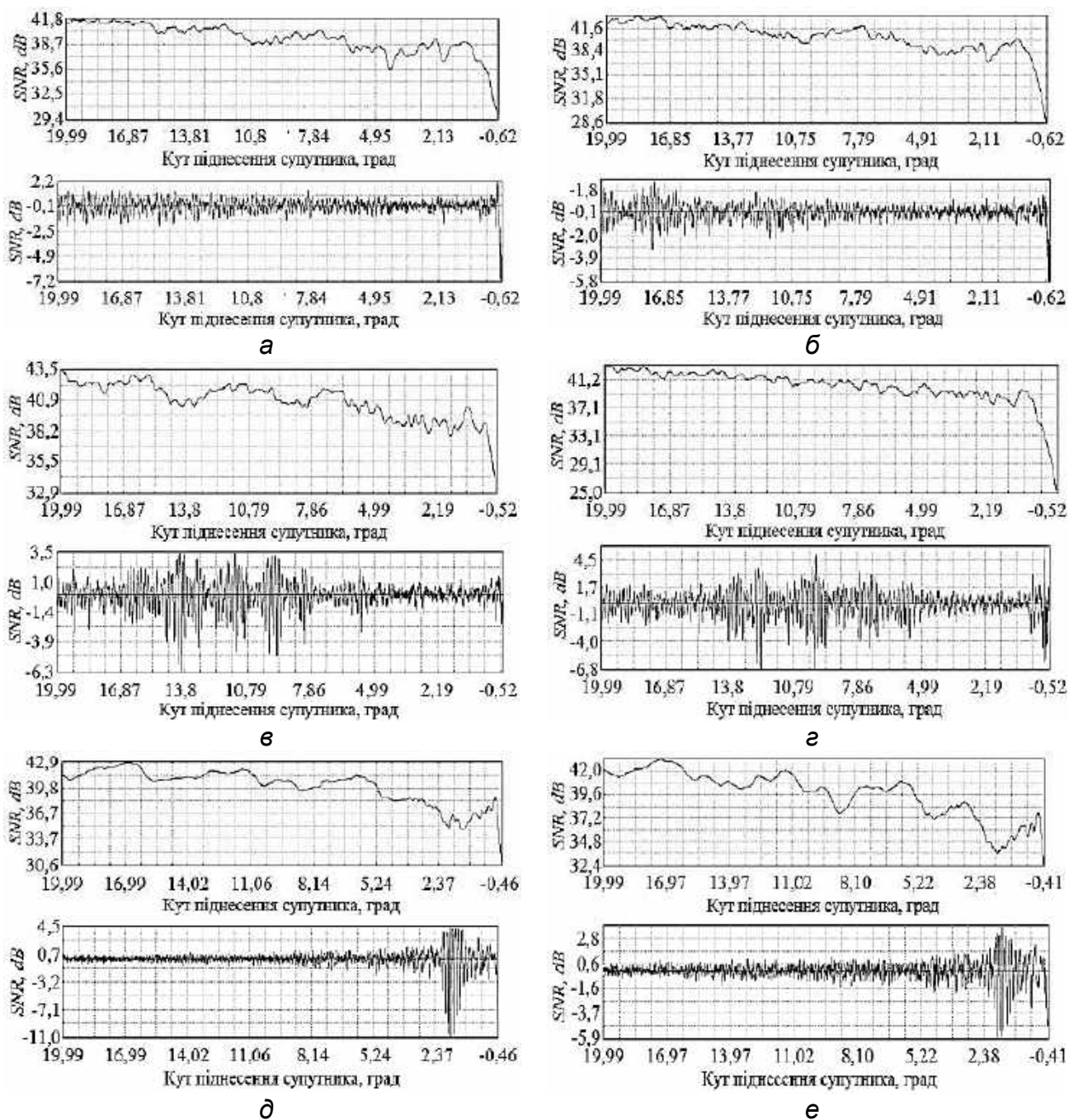


Рис. 5.46. Трендова (верхні криві) і флуктуаційна (нижні криві) складові амплітуд сигналів для супутників (м. Суми):  
 а – GPS 01 (26.02.2012); б – GPS 11 (26.02.2012); в – GPS 03 (26.02.2012);  
 г – GPS 10 (26.02.2012); д – GPS 02 (26.02.2012); е – GPS 17 (26.02.2012)

Так, для прикладу наведено три випадки для азимутальних напрямків:  $\sim 183^\circ$  (супутники GPS 01 і GPS 11);  $\sim 190^\circ$  (супутники GPS 03 і GPS 10);  $\sim 55^\circ$  (супутники GPS 02 і GPS 17). Для аналізу вибиралися заходи супутників у літній і зимовий періоди, починаючи з  $20^\circ$  піднесення супутника і закінчуючи втратою сигналів при заходженні супутника за обрій. Для літнього й зимового сезонів при заходах виділялися характерні ділянки, де флуктуації амплітуди значно збільшувалися і змінювалася частота.

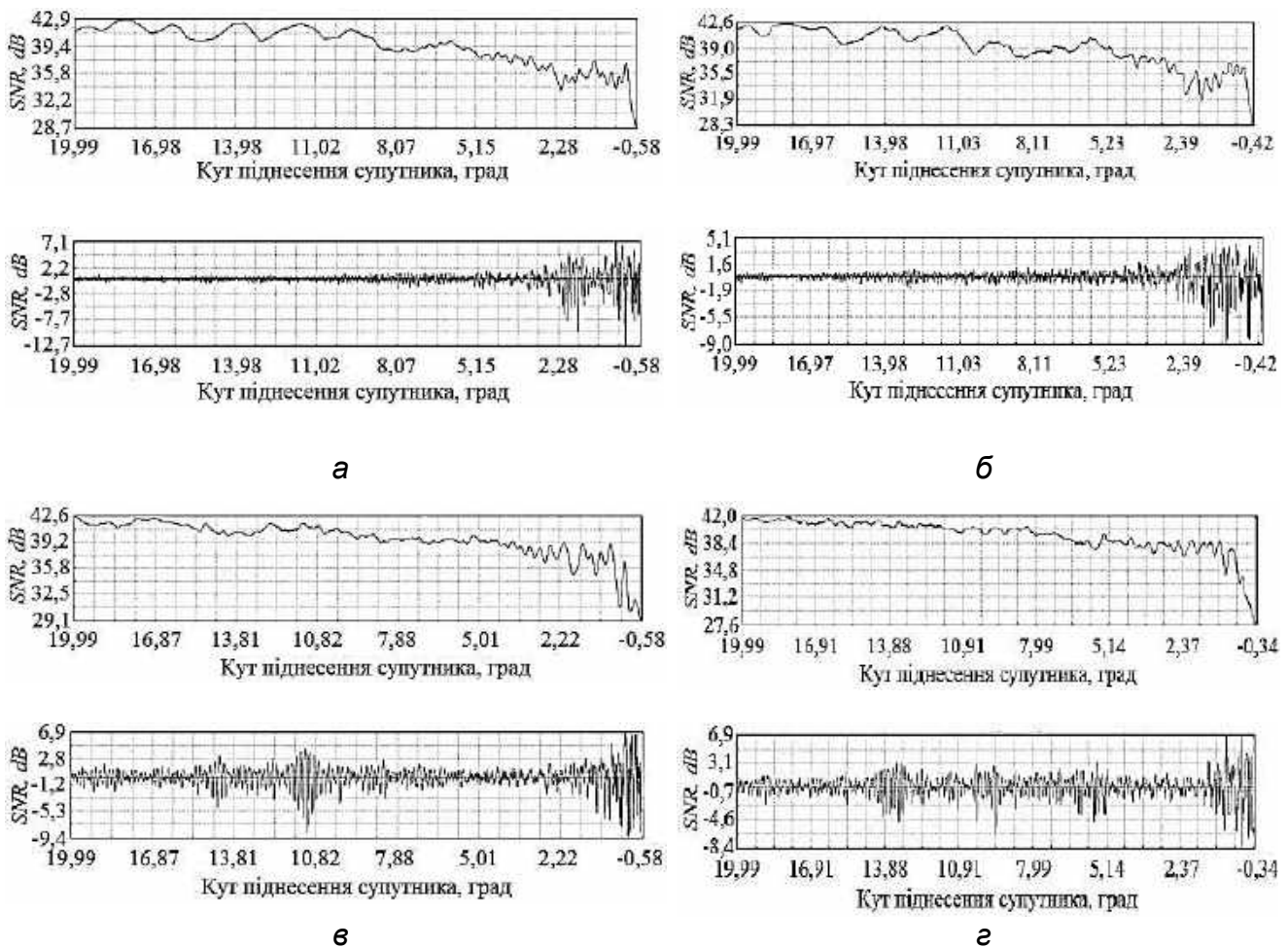


Рис. 5.47. Трендова (верхні криві) і флуктуаційна (нижні криві) складові амплітуд сигналів для супутників (м. Суми):  
 а – GPS 02 (21.06.2012); б – GPS 17 (23.06.2012); в – GPS 03 (22.06.2012);  
 г – GPS 10 (22.06.2012)

Наявність характерних ділянок при різних рефракційних умовах (динаміка й амплітуда зміни коефіцієнта заломлення в літній період є значно більшими, ніж у зимовий) має стабільний характер для всіх супутників, що свідчить про стійкість ефекту. З наведених рисунків видно, що зміни флуктуаційної компоненти досить чітко повторюються для різних супутників, що може свідчити про наявність точок відбиття. Видно, що для супутників з азимутальним кутом  $55^\circ$  виникають істотні флуктуації при низьких кутах піднесення супутника, що, скоріше за все, відповідає відбиттю від дахів будинків у ближній зоні, коли лісова посадка в далекій зоні ніяк не впливає на флуктуаційну компоненту.

У випадку із супутниками, розташованими під азимутальним кутом  $183^\circ$ , видно кілька викидів з однаковою частотою, що спричинено відбиттям від зони забудови, розташованої в цьому напрямку.

Для вимірювального пункту з відносно низьким розташуванням антени

(м. Полтава) спостерігалось збільшення амплітуди флукуційної компоненти, яке супроводжувалося падінням рівня сигналу трендової складової через затінення деревами у ближній зоні (рис. 5.48).

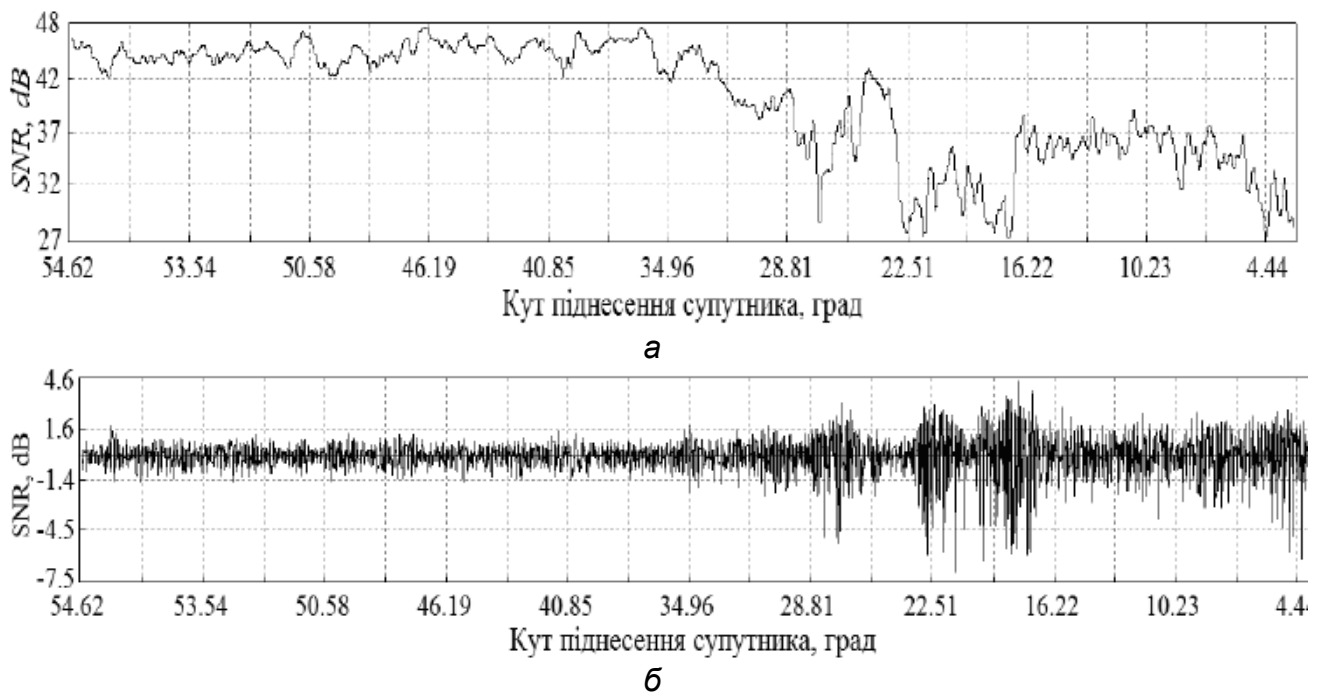


Рис. 5.48. Поводження сигналу супутника GPS 15 для м. Полтави при затіненні траси деревами (азимут  $210^\circ$ ):  
а – трендова компонента; б – флукуційна компонента

Для знаходження параметрів відбивних областей земної поверхні було проведено спектральний аналіз амплітуд сигналів супутників і розраховано параметри передбачуваних точок відбиття для м. Харкова, м. Суми та м. Полтави (рис. 5.49). Як приклад зображено кілька ділянок панорам, на яких виділено азимутальні кути, що відповідають аналізованим ділянкам. Крім того, показано спектри для повного аналізованого сигналу, а також спектри ділянок сигналу, характерні для зон відбиття.

Таким чином, шляхом аналізу спектральних компонент, установивши взаємозв'язок між спектральними компонентами і висотами відбивних областей, що їм відповідають, можна зробити припущення про рельєф місцевості.

З отриманих результатів (табл. 5.9) видно, що запропоновані вище теоретичні розрахунки досить добре збігаються зі значеннями для розглянутих областей відбиття. Зазначимо, що для м. Полтави, де антена розташовувалася досить низько відносно навколишньої забудови, мали місце випадки, коли неможливо було виділити певні ділянки через зашумленість сигналів, що спричинено навколишньою рослинністю.

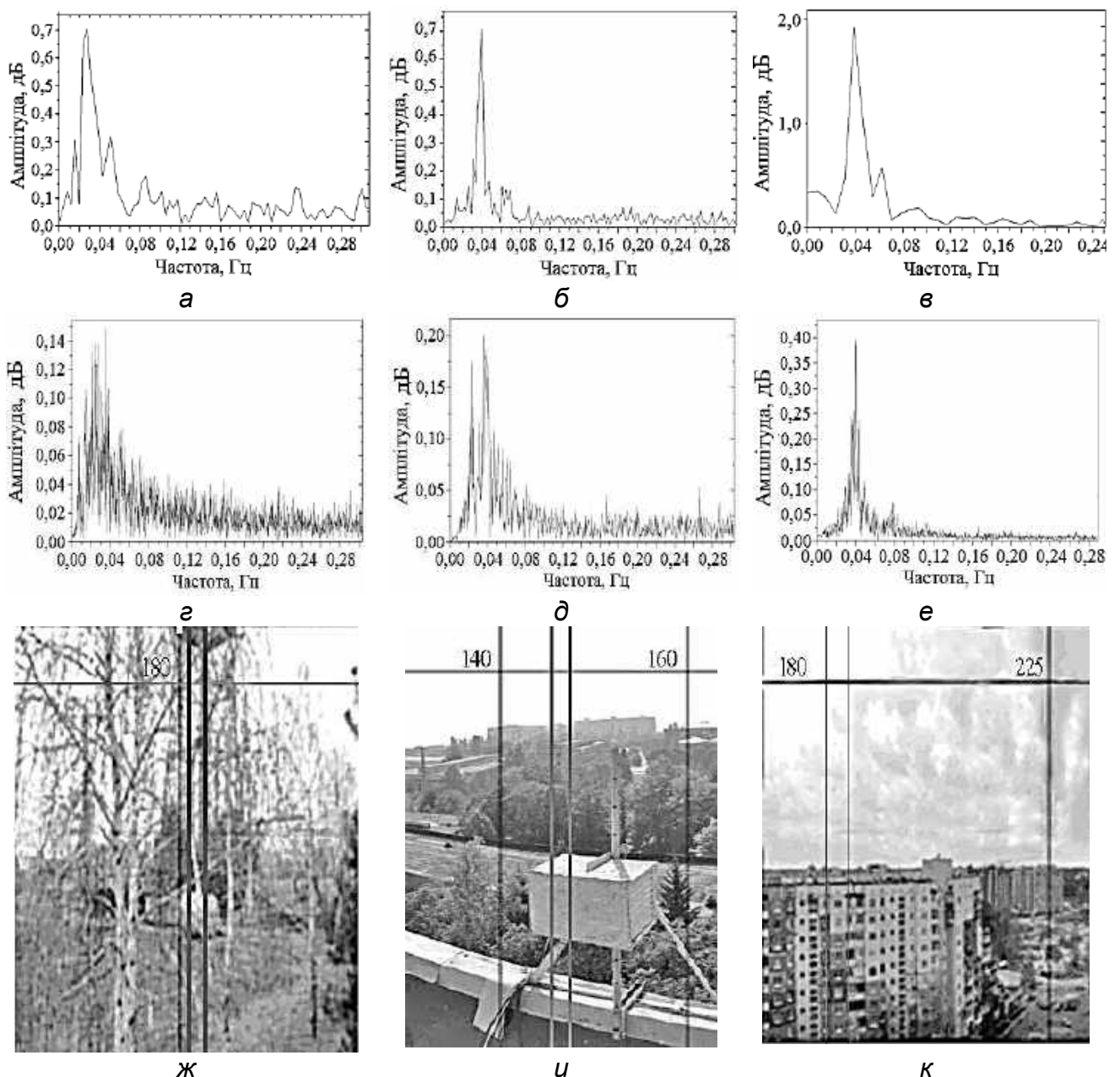


Рис. 5.49. Аналіз точок відбиття для м. Полтави GPS 26 (а, г, ж), м. Харкова GPS 09 (б, д, и), м. Суми GPS 03 (в, е, к): а–в – спектр ділянки, що відповідає передбачуваній точці відбиття; г–е – спектр повного прольоту супутника; ж–к – панорама місцевості

Оскільки на поведження сигналу впливає шорсткість підстильної поверхні, доцільно проаналізувати поведження дисперсії флуктуаційної компоненти для оцінювання типу підстильної поверхні в азимутальному напрямку, з якого приймається сигнал. При дослідженні типу підстильної поверхні аналізувалися прольоти супутників під різними азимутальними кутами й кутами піднесення супутників. Видно, що для м. Суми домінуючим типом місцевості є забудова, тоді як у м. Полтаві переважає відкрита місцевість, без висотних забудов. Для м. Харкова проаналізовано рівні флуктуацій як для місцевості з висотною забудовою, так і для рівнинної місцевості.



## Результати аналізу точок відбиття

| Супутник            | Азимут,<br>град | Кут місця,<br>град | Період<br>флуктуацій,<br>град (Гц) | Коефіцієнт<br>відбиття | Площа<br>відбивної<br>ділянки, м | Висота<br>відбивної<br>ділянки, м | Відстань до<br>відбивної<br>ділянки, м |
|---------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| GPS 02<br>(Харків)  | 56,5            | 6,6...5,5          | 0,069<br>(0,137)                   | 0,183                  | 162...116                        | 117                               | 391...311                              |
|                     | 55,5            | 7,1...8,7          | 0,35<br>(0,19)                     | 0,21                   | 91...67,25                       | 165                               | 261...196                              |
|                     | 55              | 9,6...10,2         | 0,029<br>(0,23)                    | 0,17                   | 67...63                          | 199                               | 178...166                              |
| GPS 16<br>(Харків)  | 56              | 8,3...10           | 0,03<br>(0,215)                    | 0,3                    | 103...78                         | 196                               | 205...170                              |
| GPS 09<br>(Харків)  | 166,5           | 8,2...11           | 0,177<br>(0,037)                   | 0,25                   | 87,6...56,5                      | 32,7                              | 210...155                              |
| GPS 12<br>(Харків)  | 168             | 7,3...9,9          | 0,166<br>(0,06)                    | 0,196                  | 80,7...51,3                      | 36,9                              | 235...171                              |
| GPS 26<br>(Харків)  | 183             | 6,8...7,6          | 0,1605<br>(0,0675)                 | 0,22                   | 171...86                         | 61,2                              | 358...225                              |
| GPS 01<br>(Харків)  | 183             | 6,7...9,9          | 0,138<br>(0,068)                   | 0,205                  | 96,9 ... 56,2                    | 62                                | 255...172                              |
| GPS 01<br>(Полтава) | 181             | 10,6...11,5        | 0,28<br>(0,023)                    | 0,65                   | 107,5...95,2                     | 20,9                              | 62,5...39,3                            |
| GPS 26<br>(Полтава) | 182             | 9,6...10,5         | 0,22<br>(0,027)                    | 0,615                  | 118...100,5                      | 23,6                              | 68,2...63                              |
| GPS 02<br>(Суми)    | 56              | 0,85...2,13        | 0,162<br>(0,067)                   | 0,8                    | 2780...701                       | 61,3                              | 2022...808                             |
| GPS 03<br>(Суми)    | 190             | 9,33...10,18       | 0,17<br>(0,039)                    | 0,62                   | 30,9...35,5                      | 36,6                              | 182...167                              |
|                     | 190,5           | 11...11,8          | 0,16<br>(0,062)                    | 0,61                   | 39,6...27,9                      | 36,6                              | 156...163                              |
|                     | 191,3           | 13,9...16,7        | 0,176<br>(0,038)                   | 0,69                   | 26,1...26,1                      | 32,9                              | 121...116                              |
| GPS 10<br>(Суми)    | 193,5           | 6,89...7,9         | 0,168<br>(0,06)                    | 0,6                    | 60,5...69,3                      | 36,7                              | 268...216                              |
|                     | 192,5           | 9,3...10,1         | 0,166<br>(0,06)                    | 0,59                   | 57...50,5                        | 36,8                              | 183...168                              |
|                     | 191,5           | 12,1...13,9        | 0,16<br>(0,062)                    | 0,515                  | 33,7...27,5                      | 36,6                              | 160...121                              |

На рис. 5.50 як приклад показано результати оцінювання (м. Харків) у літній період (330 N од.). Прольоти супутників розбито на кілька ділянок по 5°, пов'язаних з переміщенням супутника і зміненням характеру поведінки сигналу. З отриманих результатів можна зробити висновок, що рівнинні місцевості мають дисперсію флуктуаційної компоненти, приблизно в 3 рази меншу, ніж зони забудови. Однак у багатьох випадках зазначається

нехарактерне поведження рівня флуктуацій, що може бути спричинено появою додаткової області відбиття на певних кутах.

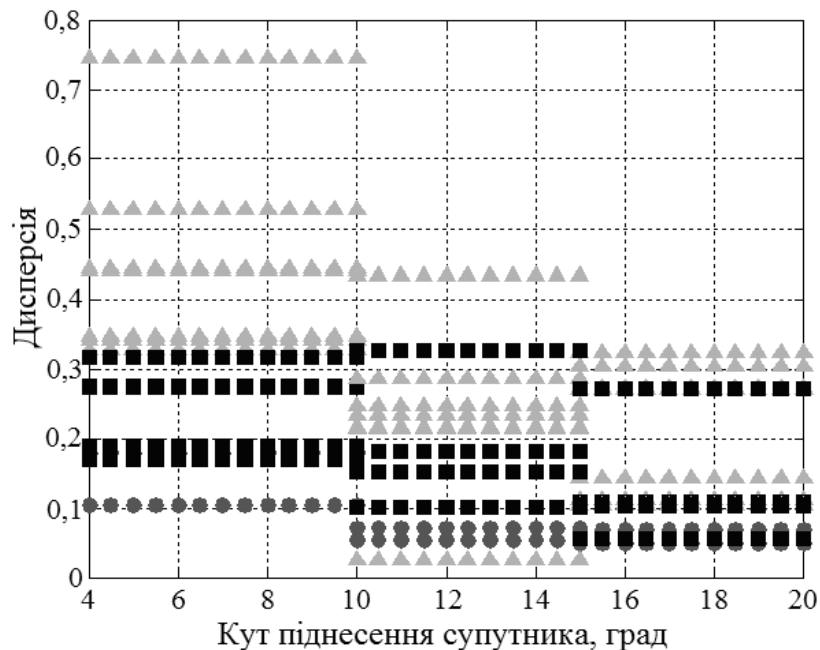


Рис. 5.50. Рівні дисперсії для різних типів місцевості (● – поля, ■ – будинки на рівні розташування антени, ▲ – будинки нижче рівня розташування антени) залежно від кута піднесення

Таким чином, розглянуто підходи, що дають змогу проводити моніторинг поверхні Землі з використанням випромінювань ГНСС.

1. Запропоновано метод оцінювання тропосферної рефракції над сушею з використанням радіосходів і радіозаходів навігаційних супутників системи GPS. Показано наявність кореляційного зв'язку між кутами радіозаходу (сходу) супутника й коефіцієнтом заломлення (його градієнтом) у приповерхневому шарі тропосфери. Наведено розрахункові співвідношення, що зв'язують кути візування супутника з ефективними градієнтами коефіцієнта заломлення в шарі тропосфери, що просвічується. Запропоновано використання спектрального оцінювання для виявлення кутового положення джерел сигналів.

2. Запропоновано використання поправок псевдовідстаней для визначення зенітних тропосферних затримок. Розроблено й перевірено на практиці використання моделі функції відображення зенітної тропосферної затримки для дослідження рефракційних властивостей тропосфери.

3. Розглянуто можливість виявлення небезпечних метеорологічних явищ (зон грозової активності, вологонасичених хмар) за координатною інформацією приймачів систем супутникової навігації. Показано наявність зв'язку між водністю хмар і вимірним місцем розташування, що може використовуватися для ідентифікації зон знаходження небезпечних метеорологічних явищ. Експериментально показано, що наявність грозових хмар і випадання опадів приводить до збільшення середньоквадратичного

значення флуктуацій вимірюної псевдовідстані. Отримано розрахункові співвідношення, що зв'язують похибку вимірювання псевдовідстані з висотою, водністю й кутами візування супутника. Виходячи з діелектричних характеристик води і вмісту вологи різного типу хмар, оцінено очікувану зміну псевдовідстані залежно від інтенсивності дощу, яка для зливових опадів може становити одиниці метрів. Проведені експериментальні дослідження показали, що збільшення бальності хмарного покриву, поява зон опадів виявляється у збільшенні середньоквадратичного значення флуктуацій псевдовідстані. Їх величина узгоджується з теоретично отриманими оцінками. Для виділення флуктуаційної компоненти псевдовідстані використано псевдодиференціальний метод. В експериментальних дослідженнях використовувалися приймачі супутникових навігаційних систем GPS, ГЛОНАСС СН-6701 і СН-6706 розробки ТОВ «Навіс-Україна» – «КБ-Центр».

4. Уперше запропоновано методику дистанційної діагностики тропосфери й визначення зон випадання опадів на трасі поширення сигналів від навігаційних супутників. Показано: зміни псевдовідстані можна використати для оцінювання інтенсивності дощу; наявність на трасі злив приводить до зменшення вимірюваної висоти, що пов'язано зі зростанням вологої компоненти тропосферної затримки і зміненням рефракційних умов на трасі поширення; під час сильних злив у зоні проведення вимірювань може спостерігатися сильне зниження рівня сигналів від навігаційних супутників, що призводить до спотворення координатної інформації і має бути враховано при аналізі даних.

5. Уперше запропоновано методику діагностики підстильної поверхні суші й точок відбиття на ній в умовах міської забудови за допомогою випромінювань навігаційних супутників. З'ясовано, що наявність точок відбиття може приводити до виникнення характерних флуктуацій через інтерференцію прямого й відбитого променя, які відзначаються для різних супутників, що рухаються приблизно за однаковою траєкторією. Спектральний аналіз флуктуаційної складової сигналу може використовуватися для визначення характеристик областей відбиття. Зазначено, що наявність міської забудови спричиняє підвищення рівня флуктуацій приблизно в 3 рази порівняно з місцевістю без будівель.

6. Уперше створено модель функції відображення, у якій враховується сферичність атмосфери через градієнт коефіцієнта заломлення. Запропонована модель більш точно описує поведінку тропосферної затримки на малих кутах піднесення супутників, де починають позначатися рефракційні ефекти в тропосфері, ніж емпіричні моделі, у яких не враховуються особливості регіону й метеообстановка. Її використання для розв'язання оберненої задачі зі знаходження градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери забезпечує мінімізацію розбіжності експериментальних і модельних даних щодо тропосферних затримок.

7. Аналіз поведінки координатної інформації під час спостереження

сонячного затемнення 20.03.2015 показав, що можуть бути зміни координатної інформації, отримані за допомогою ГНСС, невластиві для сусідніх днів. Експериментально показано, що йоносферний відгук, який виявляється в зниженні вертикальної концентрації електронів, відбувається безпосередньо в момент проходження затемнення на відміну від більш інерційної тропосфери, що приводить до затягування «хвостів» у змінах координатної інформації. Уперше встановлено, що зміна сонячної активності протягом 11-річного циклу виявляється в змінах трендової складової індексу коефіцієнта заломлення тропосфери.

### **Контрольні запитання**

1. Використання радіозаходів супутників ГНСС для визначення рефракційних властивостей тропосфери.
2. Використання штатних режимів приймачів ГНСС для оцінювання рефракційних властивостей тропосфери.
3. Виявлення метеорологічних утворень на основі ГНСС-вимірювань.
4. Аналіз просторового розподілу коефіцієнта заломлення за даними GPS.
5. Модель функції відображення тропосферної затримки.
6. Вплив на атмосферу Сонця, сонячної активності та сонячних затемнень.
7. Дослідження підстильної поверхні за допомогою випромінювання глобальної навігаційної супутникової системи.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Кравченко, В. Ф. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне / В. Ф. Кравченко, В. И. Луценко, И. В. Луценко. – М. : ФИЗМАТЛИТ. – 2015. – 448 с.
2. Белоус, А. И. Космическая электроника. В 2 кн. Кн. 1 / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – 696 с.
3. Радиолокационные системы землеозора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук. – М. : Радиотехника, 2010. – 680 с.
4. Шовенгард, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгард. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.
5. Иванов, В. К. Развитие методов дистанционного зондирования Земли в ИРЭ НАН Украины / В. К. Иванов, С. Е. Яцевич // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т. 16. – С. 333–343.
6. Кавелин, С. С. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Исследования морской поверхности, ледяного и ледникового покровов с помощью спутниковой радиолокационной станции бокового обзора / С. С. Кавелин ; под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.
7. Справочник по радиолокации. В 4 т. Т. 1. Основы радиолокации / под ред. М. Сколника ; пер. с англ. под общ. ред. К. Н. Трофимова. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.
8. Лауш, А. Г. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации / А. Г. Лауш, В. И. Луценко, И. В. Луценко // Радиоэлектроника. – 2015. – № 11. – С. 14–26.
9. Луценко, В. И. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы / В. И. Луценко, Д. О. Попов, И. В. Луценко // Радиофизика и электроника. – 2016. – Т. 7 (21). – № 1. – С. 31–39.
10. Remote Sensing of the Environment Using the Radiation of Existing Ground and Space Radio Systems [Electronic resource] / V. I. Lutsenko, I. V. Lutsenko, D. O. Popov, I. V. Popov. – Kyiv : PH “Akademperiodyka”, 2020. – 345 p. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.429.345>.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕДМОВА.....   | 3  |
| Розділ 1. АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ<br>НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ<br>ГНСС СИГНАЛІВ.....             | 4  |
| 1.1. Супутникові системи навігації .....   | 4  |
| 1.2. Огляд супутникових систем навігації.....  | 5  |
| 1.3. Основні елементи систем.....  | 6  |
| Розділ 2. ОСНОВНІ СИСТЕМИ ГНСС.....  | 7  |
| 2.1. Global Positioning System.....  | 7  |
| 2.1.1. Принцип дії та основні характеристики.....  | 7  |
| 2.1.2. Космічні супутники.....   | 9  |
| 2.1.3. Радіочастотні характеристики.....   | 9  |
| 2.1.4. Наземний сегмент супутникової системи навігації.....  | 11 |
| 2.1.5. Застосування GPS.....   | 12 |
| 2.1.6. Точність.....   | 12 |
| 2.1.7. Недоліки.....   | 14 |
| 2.2. Глобальна навігаційна супутникова система ГЛОНАСС.....  | 15 |
| 2.2.1. Історія розвитку.....   | 16 |
| 2.2.2. Супутник системи ГЛОНАСС другого покоління.....   | 17 |
| 2.2.3. Навігація.....  | 20 |
| 2.2.4. Навігаційні сигнали.....  | 20 |
| 2.2.5. Формат навігаційного повідомлення.....  | 23 |
| 2.2.6. Модернізація.....   | 25 |
| 2.2.7. Точність.....   | 27 |
| 2.2.8. Станції диференціальної корекції.....   | 28 |
| Розділ 3. ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ<br>СИГНАЛІВ ГНСС .....   | 30 |
| 3.1. Одночастотний комплекс .....  | 30 |
| 3.2. Двочастотний комплекс .....   | 33 |
| Розділ 4. МЕТЕОРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....  | 35 |
| 4.1. Вимірjuвальний комплекс для реєстрації сигналів<br>метеорологічних супутників Землі.....                                | 35 |
| 4.2. Метеостанція.....   | 37 |
| 4.3. Конденсаторний НЧ-рефрактометр.....   | 39 |
| Розділ 5. ВИКОРИСТАННЯ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ<br>НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ<br>НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА..... | 42 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.1. Використання радіозаходів супутників ГНСС для визначення рефракційних властивостей тропосфери.....                          | 43  |
| 5.1.1. Методика вимірювань та оброблення даних.....  | 45  |
| 5.1.2. Дані за кутами радіозаходів та їх зв'язок з градієнтом коефіцієнта заломлення.....  | 48  |
| 5.2. Використання штатних режимів приймачів систем глобальної навігації для оцінювання рефракційних властивостей тропосфери..... | 54  |
| 5.2.1. Апаратура і методика вимірювань.....  | 54  |
| 5.2.2. Результати вимірювань .....   | 57  |
| 5.3. Виявлення метеорологічних утворень на основі ГНСС-вимірювань.....   | 61  |
| 5.3.1. Передумови використання GPS.....  | 61  |
| 5.3.2. Особливості поведження сигналів ГНСС за наявності на трасі метеоутворень і результати їх виявлення.....                   | 67  |
| 5.3.3. Аналіз просторового розподілу коефіцієнта заломлення за даними GPS.....   | 76  |
| 5.4. Модель функції відображення тропосферної затримки.....  | 78  |
| 5.4.1. Формування моделі функції відображення.....   | 78  |
| 5.4.2. Розв'язання оберненої задачі зі знаходження градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери .....                             | 84  |
| 5.5. Вплив Сонця на атмосферу.....   | 86  |
| 5.5.1. Вплив сонячної активності на тропосферу.....  | 86  |
| 5.5.2. Вплив сонячного затемнення на ГНСС-вимірювання....  | 88  |
| 5.6. Дослідження підстильної поверхні за допомогою випромінювання глобальної навігаційної супутникової системи.....              | 94  |
| 5.6.1. Методика.....   | 94  |
| 5.6.2. Результати досліджень.....  | 100 |
| БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....  | 109 |

Навчальне видання

**Бабаков Михайло Федорович  
Луценко Владислав Іванович  
Луценко Ірина Владиславівна  
Соболяк Олександр Васильович**

## **РАДІОЕЛЕКТРОННІ ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **Частина 3 ВИКОРИСТАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ ГЛОБАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Редактор Т. О. Іващенко

Зв. план, 2023

Підписано до друку 20.12.2023

Формат 60×84 1/16. Папір офс. Офс. друк

Ум. друк. арк. 6,2. Обл.-вид. арк. 7. Наклад 50 пр.

Замовлення 113-23. Ціна вільна

---

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001