

О. В. Кривенко¹, А. Г. Лауш², В. І. Луценко¹, І. В. Луценко¹, Д. О. Попов¹, І. В. Попов¹, О. В. Соболяк³

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, Харків

² ТОВ «Навіс-Україна», Сміла

³ Харківське конструкторське бюро машинобудування ім. О. О. Морозова, Харків

ВИКОРИСТАННЯ ВИПРОМІНЮВАНЬ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ ТА ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ЦЕНТРІВ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АТМОСФЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Приводяться результати експериментальних досліджень впливу сонячної радіації на сигнали телевізійних центрів на зображеній трасі та сигнали глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС). Запропоновано нові способи та методики оцінювання рефракційних властивостей атмосфери і визначення зон опадів. Опрацьовано метод визначення рефракційних властивостей тропосфери з використанням кутів приходу сигналів УКХ та ГНСС. Запропоновані підходи дозволять розвинути методи дистанційного зондування та можуть використовуватися при створенні системи глобального моніторингу Землі та атмосфери.

Ключові слова: атмосферна рефракція, глобальні навігаційні супутникові системи, дистанційне зондування, небезпечні метеорологічні явища, УКВ-сигнали, тропосфера.

ВСТУП

Вивчення фізичних процесів у тропосфері необхідне для розуміння нестійких атмосферних проявів, що виявляються у великомасштабних флуктуаціях і обумовлюють зміни погоди, а також чинників, що визначають статистичні властивості загальної циркуляції атмосфери.

Для моніторингу атмосфери та прогнозування небезпечних метеоявищ широко використовують радіолокаційні засоби — метеорологічні радари. Однак їхнє використання вимагає значних матеріальних і енергетичних витрат і дозволяє організувати моніторинг території на відстанях не більше 200 — 300 км від радара. Для забез-

печення моніторингу всієї території країни необхідне розміщення великої кількості радарів, що потребує великих матеріальних витрат. Крім того, для теперішнього часу характерне істотне електромагнітне «забруднення» середовища, тому надзвичайно привабливо використовувати для рішення задач моніторингу атмосферних процесів і небезпечних явищ природи випромінювання діючих ШСЗ (навігаційних, метеорологічних або телевізійних), а також наземних телевізійних центрів.

Відомо, що ефективність роботи радіотехнічних систем різного призначення (навігації, радіолокації, зв'язку) значною мірою залежить від умов поширення радіохвиль, які визначаються станом атмосферної рефракції, котра, в свою чергу, обумовлена просторово-часовим розподілом коефіцієнта заломлення n . Традиційно його

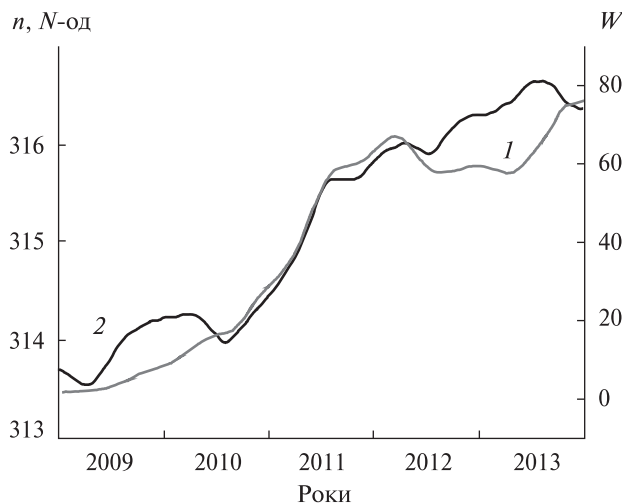


Рис. 1. Значення індекса сонячної активності W (крива 1) і приземного коефіцієнта заломлення n (крива 2) у 2009—2014 рр.

визначають вимірюванням атмосферних параметрів — температури, тиску, вологості за допомогою метеодавачів або безпосередньо рефрактометричними вимірюваннями n , як у фіксованих точках простору, так і при переміщенні давачів.

В останнє десятиріччя активно розробляються методи неконтактного зондування атмосфери: радіометричний, радіолокаційний, метод радіопросвічування та інші. Такі методи вигідно відрізняються від контактних можливістю більш ефективного огляду великих територій.

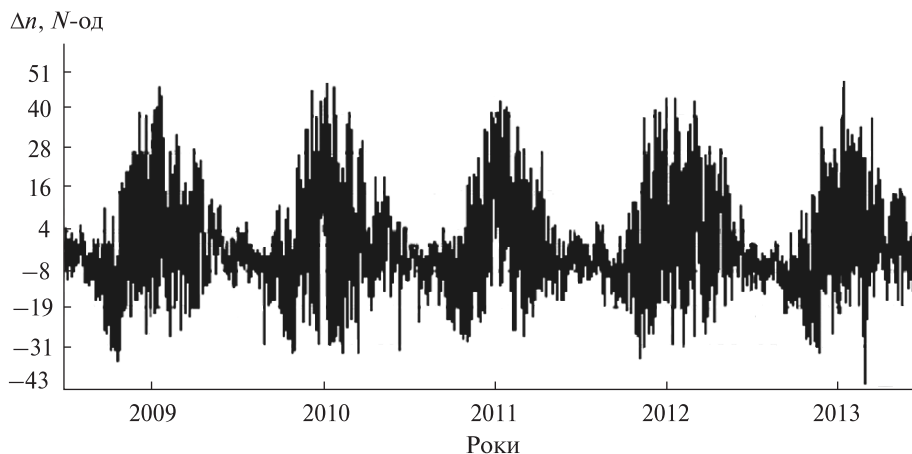


Рис. 2. Флуктуаційний компонент змін коефіцієнта заломлення

АПАРАТУРНІ КОМПЛЕКСИ

Метою роботи було проведення експериментальних досліджень та аналізу впливу сонячної радіації на сигнали телевізійних центрів на заобрійній трасі і ГНСС-сигнали, створення нових способів та методик оцінювання рефракційних властивостей атмосфери та підстильної поверхні, опрацювання методу визначення рефракційних властивостей тропосфери з використанням кутів приходу сигналів УКХ та ГНСС.

Для вирішення цих задач використовувалось випромінювання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС): російської (ГЛОНАСС) і американської (GPS) та телевізійних центрів.

Для експериментальних досліджень створено вимірювальний комплекс, до складу якого входять: система реєстрації телевізійних УКХ-сигналів на заобрійній трасі, три одночастотні приймачі СН-4719, один СН-4706 та один двочастотний приймач БРИЗ — всі вітчизняного виробництва (розробки ТОВ «Навіс-Україна»), які дозволяють реєструвати сирі дані ГНСС. Для контролю метеорологічної ситуації на трасах поширення радіохвиль додатково вимірювався коефіцієнт заломлення тропосфери за допомогою створеного радіорефрактометра та штатних метеопараметрів (тиску, вологості, температури) з використанням розробленої портативної метеостанції. Крім того, контролювався хмарний покрив в оптичному та інфрачервоному діапазонах за допомогою приймача сигналів метеорологічних супутників NOAA.

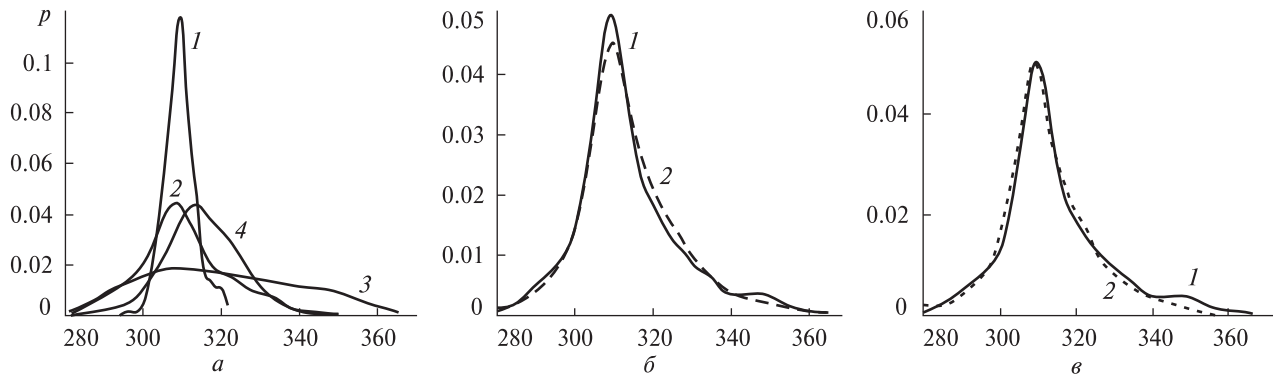


Рис. 3. Щільності розподілу коефіцієнта заломлення для м. Харкова і їхня апроксимація: *a* — дані метеоцентру (крива 1 — зима, 2 — весна, 3 — літо, 4 — осінь); *b* — полігауссова апроксимація; *c* — апроксимація функціями Кравченка (1 — експеримент, 2 — апроксимація)

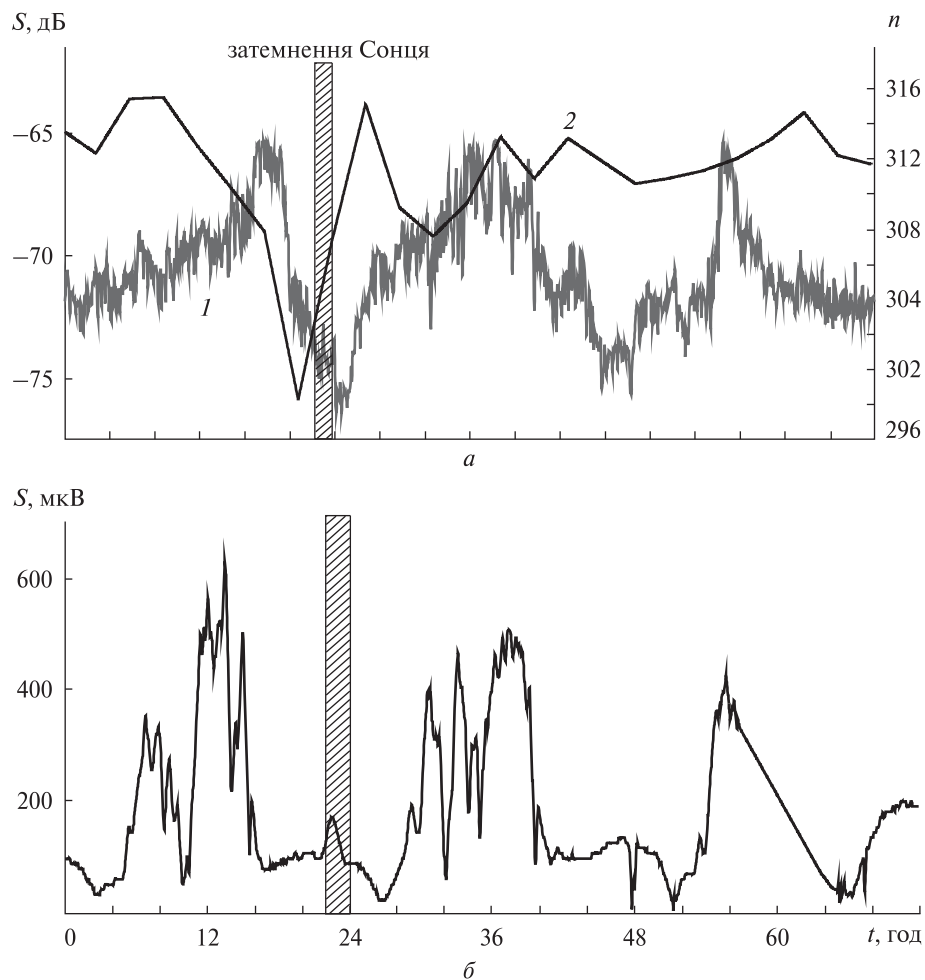


Рис. 4. Вплив затемнення Сонця на поведінку: *a* — сигналу S УКХ на заобрійній трасі (1) і коефіцієнта заломлення тропосфери (2); *b* — результати похилого зондування іоносфери за даними Миколаївської обсерваторії (момент $t = 0$ відповідає часу 15:00 UT 28 березня 2006 р.)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СОНЦЯ НА АТМОСФЕРУ ЗЕМЛІ ТА УМОВИ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ

Проведено дослідження впливу Сонця на характеристики сигналів ГНСС та телевізійних центрів. Вивчення сезонних змін характеристик тропосфери для різних регіонів України з використанням архіву штатних даних метеорологічних центрів (близько 100 міст) дозволило встановити, що для коефіцієнта заломлення характерна наявність сильних добових і сезонних залежностей, обумовлених змінами темпе-

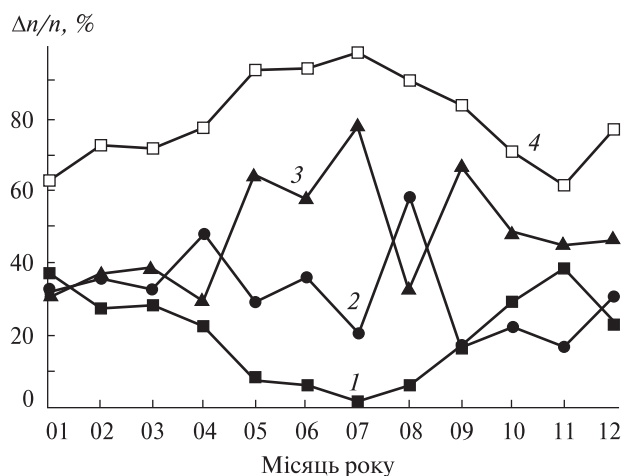


Рис. 5. Сезонні зміни рефракційних властивостей тропосферного каналу поширення, отримані за даними рівня сигналу УКХ на заобрійній трасі: 1 — нормальна, 2 — підвищена, 3 — інверсійні шари, 4 — наявність підвищеної рефракції та інверсійних шарів

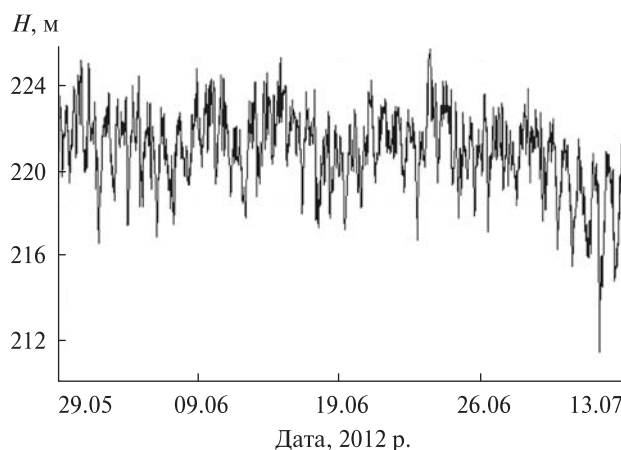


Рис. 6. Добові зміни обчисленої висоти H

ратури, тиску й вологості. Показано, що взимку для всіх міст, незалежно від їхнього місцезнаходження, коефіцієнт заломлення тропосфери має значення близько 310 N-одиниць, тоді як влітку максимальні його значення залежать від місця розташування міста. Встановлено, що трендові зміни коефіцієнта заломлення досить сильно корелюють зі змінами сонячної активності (рис. 1). На рис. 2 показано флюктуаційний компонент змін коефіцієнта заломлення. Закони розподілу коефіцієнта заломлення відрізняються від стандартних гауссівських моделей.

Для врахування нестационарності поведінки коефіцієнта заломлення запропоновано статистичні моделі тропосфери на основі вкладених напівмарківських процесів [1, 9].

Показано можливість опису статистик коефіцієнта заломлення усередині сезону локально гауссовою моделлю (рис. 3, б).

Уперше розглянуто використання фінітних атомарних функцій Кравченка для опису статистик коефіцієнта заломлення (рис. 3, в) [9]. Запропоновано новий підхід перевірки гіпотез про вид розподілу випадкової величини, заснований на використанні зворотних функцій [9].

З використанням архіву записів сигналів S УКХ на заобрійних трасах починаючи з 2003 р. проаналізовано вплив сонячних затемнень на характеристики телевізійних сигналів (рис. 4).

З використанням записів рівня заобрійного сигналу УКХ (частота 175 МГц) телевізійного центру м. Белгород (довжина траси близько 71 км) вивчено сезонні та добові зміни тропосферної рефракції, обумовлені сходами/заходами Сонця та його річним ходом.

Залежність рівня сигналу телевізійного центру за радіобрієм дала можливість розробити метод діагностики тропосферної рефракції за зміною рівня сигналу протягом доби та виявлення на трасі поширення інверсійних шарів (рис. 5).

Сезонні та добові зміни коефіцієнта заломлення тропосфери та іоносфери під впливом сонячної радіації призводять до появи пов'язаних з ними сезонних та добових похибок вимірювання висоти (рис. 6) та псевдодальності за сигналами ГНСС (рис. 7). Взимку додатковий приріст псевдодальності за рахунок тропосфери суттєво

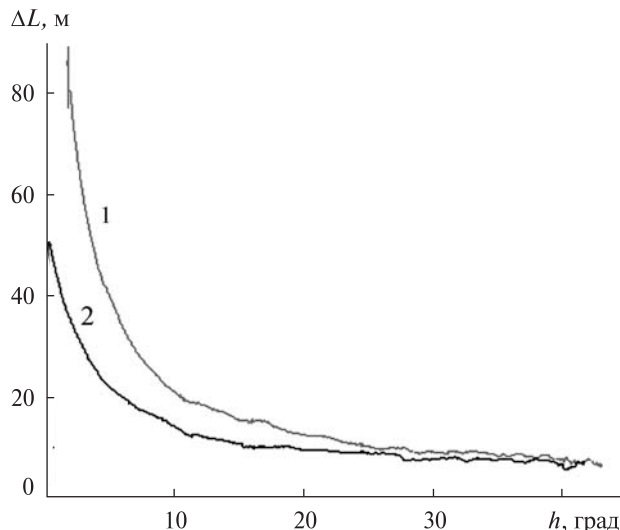


Рис. 7. Сезонні прирости псевдодальності ΔL (1 — літо, 2 — зима)

більший, ніж влітку. Аналіз змін вимірюваної висоти і псевдодальності протягом року показав, що сучасні зараз моделі тільки частково дозволяють компенсувати сезонні зміни цих параметрів. Тому потрібна їхня модернізація для врахування добових змін.

МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ АТМОСФЕРИ ТА ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Розглянуто можливість використання кутів приходу сигналу на заобрійній трасі для оцінки рефракційних властивостей тропосфери. Розроблено методику оцінки градієнта коефіцієнта заломлення тропосфери за кутами приходу сигналу ШСЗ (рис. 8, 9).

Для вивчення сезонної та добової залежностей коефіцієнта заломлення тропосфери, а також встановлення зв'язку між ним та рівнями сигналів ШСЗ і телевізійного центру проаналізовано метеорологічні характеристики (дані взяті з сайтів метеоцентрів) для різних регіонів країни. Порівняння цих даних дозволило визначити вплив тропосферної рефракції на умови поширення УКХ та ГНСС сигналів і їхні характеристики. Все це вкрай необхідно для підвищення точності визначення координат, моніторингу підстильної поверхні та атмосферних процесів і виявлення небезпечних метеоявищ.

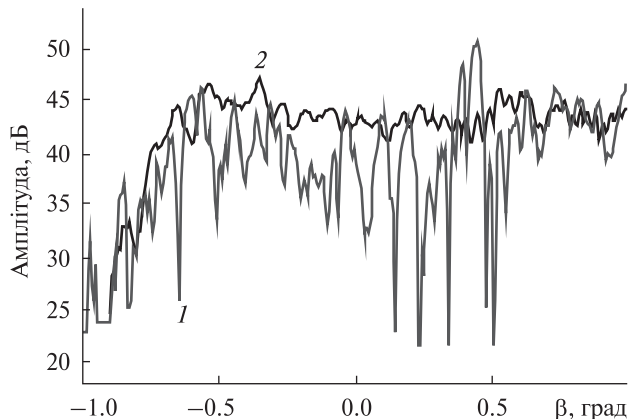


Рис. 8. Залежність рівня сигналу ШСЗ від кута β : 1 — літо, 2 — зима

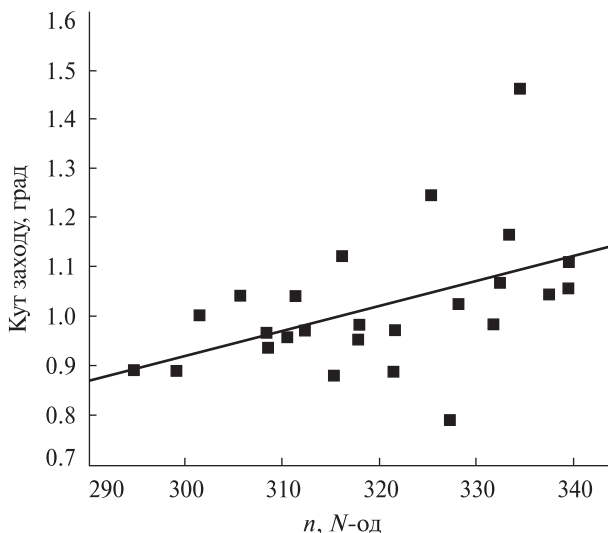


Рис. 9. Кут радіозаходу при різних коефіцієнтах заломлення n

Продемонстровано можливості діагностики атмосфери та підстильної поверхні за прийнятими ГНСС-сигналами. Окрім того, рівень флуктуацій сигналу ГНСС може використовуватись для визначення шорсткості підстильної поверхні. Для цього потрібне виділення з прийнятої амплітуди сигналу флуктуаційної та трендової складових, за якими і оцінювати як величину тропосферної рефракції, так і ступінь шорсткості поверхні розподілу.

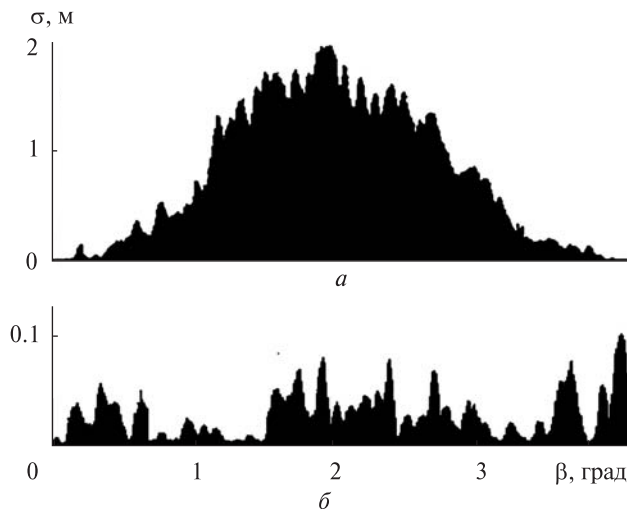


Рис. 10. Середнє квадратичне значення σ флуктуацій псевдовідстані від кута спостереження супутника ГНСС: *a* — шарувато-купчасті хмари 6 балів, нижній край основного ярусу 1000 — 1500 м; *б* — ясно, 0 балів

Встановлена залежність кутів радіозаходу та радіосходу ШСЗ може використовуватися для прогнозування дальності дії радіосистем.

Вимірювання псевдовідстаней та змін координат вимірювального пункту були використані для виявлення вологонасичених хмар на трасі поширення сигналу (рис. 10).

Експериментально встановлений вплив зон опадів на характеристики сигналів ГНСС дозволив розробити методику оцінки інтенсивності опадів [2, 5—8, 10]. За даними, отриманими за допомогою ШСЗ, проведено аналіз зміни запасів вологи в атмосфері та інтенсивності дощу.

Теоретично показано можливість використання сигналу підсвічування ГНСС для дистанційного зондування атмосферних неоднорідностей як природного так і штучного характеру, а також підстильних поверхонь [3, 4].

ВИСНОВКИ

Вивчення сезонних змін характеристик тропосфери для різних регіонів України дозволило встановити, що для коефіцієнта заломлення характерна наявність сильних добових і сезонних залежностей, обумовлених змінами температури, тиску й вологості. Показано, що взимку

для всіх міст, незалежно від їхнього місцезнаходження, коефіцієнт заломлення тропосфери має значення близько 310 N-одиниць, тоді як влітку його максимальні значення залежать від місця розташування міста. Закони розподілу коефіцієнта заломлення відрізняються від стандартних гауссівських моделей і для їхнього опису можна використовувати напівмарківські вкладені процеси.

Запропоновано методику діагностики рефракційних властивостей тропосфери, яка базується на аналізі рівня й характеру поведінки сигналу УКХ на заобрійних трасах. Сформульовано класифікаційні критерії для визначення типу тропосферної рефракції за поведінкою прийнятого протягом доби сигналу. За результатами обробки систематичних вимірювань отримано дані про наявність різноманітних рефракційних ситуацій у різні сезони. Встановлено кореляцію рівня сонячної радіації з трендовими багаторічними змінами коефіцієнта заломлення тропосфери.

Запропоновано метод оцінки тропосферної рефракції над сушею з використанням радіосходів та заходів навігаційних супутників систем GPS і ГЛОНАСС. Показана наявність кореляційного зв'язку між кутами радіозаходу (сходу) супутника і коефіцієнтом заломлення (його градієнтом) у приповерхневому шарі. Запропоновано використовувати кути радіозаходів супутників ГНСС для діагностики дальності дії радіосистем, зокрема радіолокаційних, що дозволяє проводити діагностику дальності дії радіосистем без випромінювання.

Встановлено залежність рівня флуктуацій обчисленої псевдодальності та вимірної висоти від наявності на трасі поширення ГНСС-сигналу зон дощу.

Розроблені методики діагностики атмосферної рефракції та виявлення небезпечних метеоявищ з використанням випромінювання ГНСС можуть використовуватись для розширення функціональних можливостей приймачів ГНСС-сигналів та підвищення їхньої конкурентоспроможності.

Розроблена модель функції відображення зенітної тропосферної затримки, яка враховує рі-

вень тропосферної рефракції. Її використання дозволяє знизити похибки визначення псевдовідстаней до супутників при малих кутах місця (до 2°) з 10 до 2 м. Модель може також використовуватись для вирішення зворотної задачі — оцінки тропосферної рефракції на трасі поширення за вимірними значеннями поправки псевдовідстані.

Сезонні та добові зміни коефіцієнта заломлення тропосфери під впливом сонячної радіації призводять до появи пов'язаних з ними сезонних та добових похибок вимірювання висоти та псевдовідстані за сигналами ГНСС.

Встановлено, що сучасні моделі атмосферних (тропосферних та іоносферних) зенітних затримок дозволяють лише частково компенсувати похибки визначення висоти та псевдовідстані, що потребує встановлення причин таких розбіжностей з експериментом та модернізації моделей атмосферних корекцій (тропосфери та іоносфери).

Запропоновано використовувати підсвічування об'єктів випромінюванням систем супутникової навігації для вирішення задач їхнього виявлення і визначення координат. Оцінено можливі дальності їхнього виявлення. Запропонований підхід відкриває нові можливості для створення системи глобального моніторингу та радіолокації з використанням випромінювань ГНСС.

Робота виконується відповідно до Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр. та розпоряджень Президії НАН України № 56 від 01.02.13 р. та № 140 від 04.03.14 р.

1. Кравченко В. Ф., Кравченко О. В., Луценко В. И. и др. Восстановление информационных параметров природных сред с использованием атомарных и WA-систем функций. Обзор. Часть I. Применение теории полумарковских полей и финитных функций для описания нестационарных процессов // Физ. основы приборостроения. — 2014. — 3, № 2. — С. 3—17.
2. Кутуза Б. Г., Кравченко В. Ф., Луценко В. И. и др. Использование излучений ГНСС (GPS, ГЛОНАСС) для дистанционного зондирования окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — Москва, 2014. — Электронный ресурс [Режим доступа]: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=91&thesis=4381.
3. Лауш А. Г., Луценко В. И., Луценко И. В. и др. Использование излучений глобальных навигационных спутниковых систем для решения задач радиолокации и дистанционного зондирования // 14-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): Матер. конф. — Севастополь, 2014. — С. 1149—1150
4. Лауш А. Г., Луценко В. И., Луценко И. В. и др. Освещение воздушной и надводной обстановки с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем // 5-й Междунар. Радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Междунар. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии»: сб. науч. тр. — Харьков, 2014. — Т. 1. — С. 45—48.
5. Левченко С. А., Луценко В. И., Луценко И. В. и др. Мониторинг атмосферы и поверхности океана при помощи приемников систем глобальной спутниковой навигации GPS, ГЛОНАСС // Science and echnology as a Basis of Modernization for Future Sustainable Development (SSF-2014): Proc. Int. Humboldt conf. — Minsk, 2014. — P. 26—30.
6. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов Д. О. Влияние метеобразований на изменение координат потребителей в ГНСС // 14-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014): Матер. конф. — Севастополь, 2014. — С. 1125—1126.
7. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов Д. О. Диагностика атмосферы и подстилающей поверхности с использованием излучений глобальных навигационных спутниковых систем // 14-а Укр. конф. з космічних досліджень: тези доп. — Ужгород, 2014. — С. 33.
8. Луценко В. И., Луценко И. В., Попов Д. О. Обнаружение метеорологических образований при помощи систем глобальной навигации // 5-й Междунар. Радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (МРФ-2014), Междунар. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии»: сб. науч. тр. — Харьков, 2014. — 1. — С. 207—210.
9. Kravchenko V. F., Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., et al. Statistical model of the refractive index of the troposphere // Univ. J. Phys. and Appl. (UJPA). — 2014. — 2 (4). — P. 206—212.
10. Lutsenko V. I., Lutsenko I. V., Popov D. O., et al. Simulation of the mapping function for calculation of tropospheric zenith delay // Telecommunications and radio engineering. — 2014. — 73, N 5. — P. 413—424.

Стаття надійшла до редакції 12.12.14

О. В. Кривенко¹, А. Г. Лауш², В. И. Луценко¹,
І. В. Луценко¹, Д. О. Попов¹, І. В. Попов¹, А. В. Соболяк³

¹ Институт радиофизики и электроники
им. А. Я. Усикова Национальной академии наук
Украины, Харьков

² ООО «Навис-Украина», Харьков

³ Харьковское конструкторское бюро машиностроения
им. А. А. Морозова, Харьков

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ
ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ
И ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ЦЕНТРОВ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния солнечной радиации на сигналы телевизионных центров на загоризонтной трассе и сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Предложены новые способы и методики оценивания рефракционных свойств атмосферы и определения зон осадков. Разработан метод определения рефракционных свойств тропосферы с использованием углов прихода сигналов УКВ и ГНСС. Предложенные подходы позволят развить методы дистанционного зондирования и могут использоваться при создании системы глобального мониторинга Земли и атмосферы.

Ключевые слова: атмосферная рефракция, глобальные навигационные спутниковые системы, дистанционное

зондирование, опасные метеорологические явления, УКВ-сигналы, тропосфера.

О. В. Kryvenko¹, А. G. Laush², V. I. Lutsenko¹,
I. V. Lutsenko¹, D. O. Popov¹, I. V. Popov¹, O. V. Sobolyak³

¹ O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of
the National Academy of Science of Ukraine, Kharkiv

² «LLC Navis - Ukraine»

³ Kharkiv Morozov Machine Building Design Bureau

USE OF SATELLITE AND TV RADIATION
FOR STUDY OF ATMOSPHERIC PROCESSES

The results of experimental studies of the effect of solar radiation on television centers signals in beyond-the-horizon track and signals of global navigation satellite systems (GNSS) are presented. New methods and techniques of estimating refractive properties of the atmosphere and determining areas of precipitation are offered. The method for determining the refractive properties of the troposphere using angles of arrival of VHF and GNSS signals is worked out. The proposed approach will permit to develop methods of remote sensing techniques, and it can be used in developing the system of global monitoring of the Earth and its atmosphere.

Key words: atmospheric refraction, global navigation satellite systems, remote sensing, dangerous meteorological phenomena, VHF signals, troposphere.