

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.04.073>

УДК 528.3

**Н. Каблак<sup>1</sup>, С. Савчук<sup>2</sup>, М. Калюжний<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет,  
пл. Народна 3, м. Ужгород, Україна, 88000  
e-mail: nataliya.kablak@uzhnu.edu.ua

<sup>2</sup>Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. Ст. Бандери 12, м. Львів, Україна, 79013  
e-mail: ssavchuk@polynet.lviv.ua

<sup>3</sup>Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія»,  
вул. Обсерваторна 1, м. Миколаїв, Україна, 54017  
e-mail: nikalyuzhny@ukr.net

## **Дослідження та аналіз просторово-часової нестабільності атмосфери Землі на основі оперативного опрацювання GNSS-даних**

*Одним з варіантів практичного застосування GNSS-технологій, крім геодезичних і навігаційних потреб, є дистанційне зондування атмосфери радіосигналами навігаційних супутників з метою поліпшення якості та деталізації прогнозів погоди. Поширення радіосигналу від GNSS-супутників до наземних приймальних пристроїв (GNSS-приймачів) крізь нейтральну атмосферу супроводжується зменшенням фазової швидкості радіохвиль (додаткові атмосферні затримки). Це пов'язано з наявністю в атмосфері молекул азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари. Тому вимірювання додаткової затримки радіосигналу в атмосфері (тропосферної затримки) дають інформацію про інтегральні властивості атмосфери уздовж траєкторії поширення радіосигналу. В результаті первинної обробки результатів GNSS-вимірювань визначають відстані від станції спостережень до GNSS-супутників. Вторинна обробка GNSS-вимірювань полягає у вирішенні навігаційної задачі і дає інформацію про місцезнаходження станції. Для отримання метеорологічної інформації необхідна розробка спеціальних методів вторинної обробки даних, які базуються на розв'язанні обернених задач. Сукупне об'єднання даних первинної і вторинної обробки разом з метеорологічною інформацією дає можливість отримати глобальну модель атмосфери практично в режимі*

*реального часу. Оперативність даного підходу, повна автоматизація і відсутність витратних матеріалів при здійсненні дистанційного зондування відкривають можливості для широкого впровадження в практику оперативного контролю стану атмосфери з метою поліпшення деталізації даних і підвищення точності регіональних короткострокових прогнозів погоди. На даний час завдяки транскордонній співпраці з європейськими країнами під час проведення спільних GNSS-спостережень у мережі станцій UA-EUPOS/ZAKPOS ми отримуємо можливість мати точну, щільну і безперервну вибірку значень тропосферної затримки, що дозволяє визначити і прогнозувати динаміку зміни стану атмосфери в реальному часі. Основна мета роботи — дослідження просторово-часової нестабільності атмосфери над територією покриття активними референційними станціями. Результати дослідження можна використати для підвищення якості передбачення погоди.*

**Ключові слова:** тропосферна затримка, карта ізоповерхонь, просторово-часова нестабільність, водяна пара, GNSS-метеорологія.

## 1. ВСТУП

Одним з варіантів практичного застосування GNSS-технологій, крім геодезичних і навігаційних потреб, є дистанційне зондування атмосфери радіосигналами навігаційних супутників з метою поліпшення якості та деталізації прогнозів погоди.

Поширення радіосигналу від GNSS-супутників до наземних приймальних пристроїв (GNSS-приймачів) крізь нейтральну атмосферу супроводжується зменшенням фазової швидкості радіохвиль (додаткові атмосферні затримки). Це пов'язано з наявністю в атмосфері молекул азоту, кисню, вуглекислого газу і водяної пари. Тому вимірювання додаткової затримки радіосигналу в атмосфері (тропосферної затримки) дають інформацію про інтегральні властивості атмосфери уздовж траєкторії поширення радіосигналу.

З огляду на різні умови поширення радіосигналів GNSS атмосферу Землі можна поділити на дві області:

— тропосфера — нейтральний шар атмосфери — простягається від поверхні Землі до висоти 10 км, але не вище 20 км.

— іоносфера — іонізований шар атмосфери — лежить на висотах вище 90 км над поверхнею Землі.

Через те що іоносфера є плазмою і відповідно дисперсним середовищем, то є можливість виключення впливу іоносфери на поширення радіосигналу при проведенні спостережень на двох частотах.

Особливістю нейтральної атмосфери є те, що вона не є дисперсним середовищем для радіохвиль з частотою, меншою за 15 ГГц. Частота радіосигналів GNSS менша за 15 ГГц, тому тропосферну затримку не можна усунути за допомогою лінійної комбінації частот, як

іоносферну затримку. Поширення радіосигналів GNSS залежить головним чином від температури, тиску та вмісту водяної пари у тропосфері. У такому випадку тропосферну затримку потрібно змодельювати або визначити з аналізу GNSS-вимірювань.

Завдяки щосекундним (безперервним) GNSS-вимірюванням слід очікувати високої точності визначення тропосферної затримки. При цьому необхідно зауважити, що радіосигнал при GNSS-спостереженнях проходить крізь атмосферу Землі протягом кількох мілісекунд. Тобто, з урахуванням темпу вимірювань характеристики сигналу відображають щосекундний поточний стан нестабільної атмосфери.

Атмосферні процеси розвиваються хаотично. Це означає, що для прогнозу різних явищ в змінному просторово-часовому масштабі потрібні різні підходи, зокрема для прогнозу поведінки великих циклонів помірних широт і локальних сильних дощів, а також для довгострокових прогнозів.

Таким чином, є необхідність подальшого розвитку методів і засобів дистанційного зондування атмосфери, які давали б високу точність вимірювань, були доступними, надійними, простими і економічними в експлуатації.

## 2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогодні найбільшим проєктом у Центральній Європі, у рамках якого провадиться визначення зенітних тропосферних затримок у майже реальному часі (час визначення дорівнює 15 хв) на регіональній мережі GNSS-станцій є E-GVAP, а основний обчислювальний центр розташований у Королівській обсерваторії Бельгії (ROB) (<http://egvar.dmi.dk>). Мережа налічує на даний момент близько 200 станцій, більшість з яких належать до перманентної мережі EPN від EUREF та Міжнародної GNSS-служби IGS. Розвинута інфраструктура даних мереж дозволяє використовувати GNSS-вимірювання для потреб фізики атмосфери та метеорології.

На даний час дослідження тропосфери із використанням GNSS-спостережень проводяться з метою глибшого розуміння погодних і кліматичних процесів, і у кінцевому рахунку — з метою поліпшення прогнозування погоди.

Отже, з одного боку для підвищення точності GNSS-позиціонування потрібні надійні параметри атмосфери. З іншого боку, точні фіксовані геодезичні координати GNSS-станцій, надійні технології і моделі інших джерел похибок (зміна фазового центра антени, багатопроменевого поширення тощо) в оберненій задачі позиціонування є необхідною умовою для оцінки отриманих тропосферних параметрів на основі опрацювання та аналізу GNSS-даних. Ці параметри отримуються завдяки визначенню численних тропосферних затримок на похилих трасах спостережень (STD), приведених до зенітного напрямку

з кожної станції для всіх видимих супутників в один момент часу. Отримана в такий спосіб повна зенітна тропосферна затримка (ZTD) віддзеркалює умови поширення GNSS-сигналів в конусі тропосфери. Діаметр основи цього конуса залежить від кута відсічки на станції спостережень і приблизно відповідає радіусу в 25...50 км від зенітного напрямку на висоті 5 км [10].

Отримані величини ZTD традиційно розділяють на дві складові: зенітну гідростатичну (або суху) затримку ZHD і зенітну вологу затримку ZWD. Перша обумовлена дією сухого повітря і становить не менше 90 % від повної тропосферної затримки. Друга дорівнює приблизно 10 % від ZTD. Саме ця складова зумовлена вмістом водяної пари та її розподілом у тропосфері. Гідростатична складова ZHD змінюється відносно повільно в часі і може бути достатньо точно оцінена, тоді як волога складова ZWD змінюється не прогнозовано як у просторі, так і в часі, а тому її складно змодельювати не лише через мінливість водяної пари, але й через значні похибки визначення її із безпосередніх метеорологічних вимірювань [4, 13, 22].

Маючи повну зенітну тропосферну затримку ZTD із GNSS-вимірювань та обчисливши гідростатичну складову ZHD, зенітну вологу складову ZWD визначають відніманням значень ZHD від ZTD. Отримана величина ZWD характеризує інтегральний вміст водяної пари в тропосфері (IWV), від якого досить легко переходять до осаджуваної водяної пари (PWV) [6, 7]. Обидві величини IWV і PWV відображають загальну кількість води у вертикальному стовпі повітря, яка могла б випасти на земну поверхню.

Таким чином, у високоточних задачах позиціонування тропосферна затримка є похибкою, яку необхідно усунути або мінімізувати. З іншого боку, в обернених задачах GNSS-застосування ця величина є надзвичайно цінною інформацією для задач фізики атмосфери, метеорології та кліматології.

Наприкінці минулого століття був розроблений метод для оцінки та визначення інтегрованої водяної пари в атмосфері (IWV) на основі GNSS-спостережень [8]. Метод ґрунтується на оцінці тропосферної затримки сигналів GNSS-супутників. Єдиним обмеженням є те, що за допомогою використання наземних GNSS-станцій визначаються тільки значення IWV, тобто GNSS-вимірювання не дають інформації про вертикальний розподіл водяної пари в атмосфері. Тому на початку наукових досліджень в напрямку GNSS-метеорології учені зосередили увагу тільки на 2D-оцінках водяної пари. В роботі [9] наведено просторовий розподіл вологості над досліджуваною територією. Пізніше дослідження велися у напрямку вертикального розподілу водяної пари, тобто провадився 3D-моніторинг розподілу водяної пари на основі GNSS-вимірювань. В роботі [11] відмічено, що для побудови 3D-поля зміни тропосферної затримки, а отже і 3D-поля зміни водяної пари в атмосфері слід застосовувати методику під назвою томографія. Однак томографічний підхід у дистанційному зондуванні атмосфери не вра-

ховує наявності горизонтальних градієнтів в атмосфері, які виникають внаслідок атмосферних збурень.

Наявність горизонтальних градієнтів свідчить про відхилення стану атмосфери від сферичної симетрії. В роботах [14, 15] подано методику дослідження азимутальної асиметрії атмосфери, тобто відхилення реального стану атмосфери від сферично-симетричної моделі. В працях [16, 17] наведено результати дослідження азимутальної асиметрії атмосфери з використанням даних радіозондування атмосфери. Слід відмітити, що усі ці дослідження проведено на основі невеликої кількості даних.

Дослідження впливу азимутальної асиметрії шарів атмосфери на похибку визначення координат пункту наведено в роботах [5, 12, 19]. Похибки у плані від сухої складової затримки сигналу в нейтральній атмосфері становлять 1 см, а від вологої — близькі до 0.5...4 см.

В роботі [21] наведено аналіз досліджень горизонтальних градієнтів на основі великої бази даних, зібраних під час виконання проєкту COST GNSS4SWEC із 430 GNSS-станцій у центральній Європі за травень та червень 2013 р. Авторами зроблено висновок, що градієнти тропосфери в глобальному масштабі у північному напрямку зміни широти спричиняють систематичну похибку до 0.3 мм. Локальні градієнти, спрямовані, як правило, у напрямку підвищення вологості, можуть спричинити похибки від 1 до 3 см (у окремих випадках — навіть більше). І саме для короткострокового прогнозу погоди (наукастінгу) більшу увагу слід приділити дослідженням горизонтальних градієнтів у тропосфері та їхнім часовим варіаціям.

### 3. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Наявність горизонтальних градієнтів температури, тиску і вологості свідчать про відхилення стану атмосфери від сферичної симетрії.

Мета роботи — дослідження просторово-часової нестабільності атмосфери над територією покриття активними референцними GNSS-станціями в реальному часі спостережень.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести дослідження збурень в атмосфері, застосовуючи алгоритм побудови ізоповерхні тропосферних затримок;
- скласти динамічну карту ізоповерхонь тропосферних затримок.

### 4. ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРИ ЗЕМЛІ НА ОСНОВІ ОПЕРАТИВНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ GNSS В МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦНИХ СТАНЦІЙ UA-EUPOS/ZAKPOS

При дистанційному GNSS-зондуванні атмосфери для виявлення збурень у тропосфері (просторово-часової нестабільності) ми використо-



ували діючі інфраструктури національних мереж активних референсних GNSS-станцій. Однією з них була Закарпатська служба визначення положення ZAKPOS (Transcarpathian Positioning Service). За своєю суттю це регіональна GNSS-система наземного базування, що працює за європейськими стандартами і забезпечує споживачів даними GNSS-спостережень та поправками до них в реальному часі (RTK) для високоточного визначення місцеположення [27].

Як вже зазначалося вище, сукупне об'єднання даних первинної та вторинної GNSS-обробки разом із додатковою метеорологічною інформацією дозволяє отримати асиміляційну модель атмосфери практично в режимі реального часу, що дасть можливість здійснювати:

- високоточний метеорологічний моніторинг розподілу температури, вологості і тиску, розподілу водяної пари;
- спостереження розподілу турбулентних потоків різної природи в атмосфері;
- моніторинг стану атмосфери.

Подальше використання отриманих даних сприяє більш ефективним метеорологічним і кліматичним дослідженням, вивченню впливу сонячної активності та антропогенних чинників на стан атмосфери, аналізу зв'язків сейсмічної активності зі станом атмосфери.

В рамках Програми транскордонного співробітництва Угорщина — Словаччина — Румунія — Україна 2007—2013 було реалізовано проєкт „Space Emergency System” SES (HUSKROUA/1101/252) для моніторингу небезпечних погодних явищ в Карпатському регіоні за даними спостережень мережі GNSS-станцій [25].

З метою отримання просторово-часового розподілу водяної пари над зазначеним регіоном на основі зенітних тропосферних затримок в рамках проєкту SES було розроблено та апробовано програмне забезпечення Alberding GNSS Status Software. Одним із тропосферних продуктів цього програмного забезпечення є часові ряди ZTD від 37 активних референсних станцій мереж країн-сусідів [18, 23, 24, 26, 27]:

- GNSS-мережа України — ZAKPOS/UA-EUPOS, сайт <http://195.16.76.195/>
- GNSS-мережа Словаччини — SKPOS, сайт [www.skpos.gku.sk](http://www.skpos.gku.sk)
- GNSS-мережа Румунії — ROMPOS, сайт [www.rompos.ro](http://www.rompos.ro)
- GNSS-мережа Угорщини — GNSSnet.hu, сайт [www.gnssnet.hu](http://www.gnssnet.hu)

Наразі дані спостережень, зібрані стаціонарними GNSS-приймачами, на шляху до Центру аналізу проходять через такі компоненти GNSS-інфраструктури:

*Станція спостереження* (Tracking Station, TS) — постійна GNSS-станція, що складається із приймача та антени, встановленої на відповідному геодезичному центрі.

*Операційний центр* (Operational Centre, OC) виконує перевірку GNSS-даних та генерує потоки даних у реальному часі у Центр аналізу або кастер мережі через інтернет; перетворює вихідний формат приймача у незалежний стандартизований формат (RINEX) та здійс-

нює архівацію даних. Для деяких станцій ОС ідентифікується з організацією, що відповідає за роботу станції (тобто ОС збігається з TS).

*Мережа GNSS-станцій* (GNSS Network): сукупність станцій спостереження, що охоплюють певну локальну область земної поверхні, об'єднану спільним Центром аналізу та кастером (локальна чи регіональна мережа).

*Центр аналізу даних* (AC): збирає GNSS-дані від всіх станцій, що перебувають у локальній мережі.

*Кастер мережі* (Broadcaster): отримує в режимі реального часу потоки GNSS-даних від станцій локальної мережі.

Далі ці потоки опрацьовуються, і ми отримуємо щільну і часту вибірку значень тропосферної затримки. Це, в свою чергу, дає можливість визначати просторово-часову нестабільність атмосфери, прогнозувати збурення та оцінювати горизонтальні градієнти в реальному часі на значних територіях.

## 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИЯВЛЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ АТМОСФЕРИ У МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ UA-EUPOS/ZAKPOS

У подальших описах будуть використані такі позначення:

- $S$  — кількість активних референційних станцій ( $i = 1, 2, \dots, S$ );
- $B_i, L_i, H_{i0}$  — зенітна тропосферна затримка та координати референційної станції (геодезична широта, град, геодезична довгота, град, геодезична висота, м);
- $k$  — рівень висот на кожній станції ( $k = 1, 2, \dots, M$ );
- $t_{i0}$  — тропосферні затримки на поверхні землі ( $k = 0$ ) кожної референційної станції.

З метою дослідження стабільності атмосфери в реальному часі спостережень було розроблено алгоритм побудови ізоповерхні тропосферних затримок.

Технологія побудови ізоповерхонь атмосферних затримок полягає у знаходженні висот над референційними станціями з однаковими значеннями атмосферних затримок.

Для цього було обрано одну референційну станцію (умовно назвемо її опорною), для якої значення атмосферної затримки є мінімальним на конкретний момент часу, тобто коли  $t_{i0} = \min_{i=1,2,\dots,S} t_{i0}$ . Її геодезичні координати (широта, довгота і висота) позначимо як  $B_{\text{оп}}, L_{\text{оп}}$  і  $H_{\text{оп}}$ .

### а) Ізоповерхня тропосферної затримки.

Для побудови ізоповерхні спочатку будувалася апроксимація просторового розподілу тропосферної затримки (ZTD) лінійною функцією по широті  $B$  і довготі  $L$ , і експоненціальною — по висоті  $H$ , тобто знаходився мінімум функції  $S$  від чотирьох невідомих  $c_0, c_1, c_2$  і  $c_3$ :

$$S = \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_{i, \text{оп}} - Z_{i, \text{оп}})^2, \quad (1)$$

де  $N$  — кількість станцій GNSS,  $\hat{Z}_{i, \text{оп}} / Z_{i, \text{оп}}$  — відношення вимірних значень ZTD, отриманих  $i$ -ю і опорною станціями GNSS,  $Z_{i, \text{оп}}$  — модельне значення, отримане із виразу

$$Z_{i, \text{оп}} = [c_0 + c_1(B_i - B_{\text{оп}}) + c_2(L_i - L_{\text{оп}})] \exp \frac{H_i - H_{\text{оп}}}{c_3},$$

а  $c_0, c_1, c_2$  і  $c_3$  — невідомі коефіцієнти, які знаходяться чисельно як розв'язки рівняння (1) методом Ньютона. За опорну вибиралася станція з мінімальним значенням ZTD.

Ізоповерхня  $h(B, L)$  як функція широти і довготи знаходиться в результаті числового розв'язку оберненої задачі, заданої виразом

$$Z_{\text{оп}} = [c_0 + c_1(B_i - B_{\text{оп}}) + c_2(L_i - L_{\text{оп}})] \exp \frac{h - H_{\text{оп}}}{c_3},$$

де  $Z_{\text{оп}}$  — заданий рівень тропосферної затримки,  $c_0, c_1, c_2$  і  $c_3$  — відомі коефіцієнти, широта і довгота точки змінюються з кроком 0.25 від 46 пн. ш. до 52 пн. ш. і від 22 сх. д. до 29 сх. д. відповідно, а  $h$  — шукана невідома висота.

Для побудови ізоповерхні використано таблиці  $h(B, L)$  та функцію scatter з бібліотеки matplotlib (Python).

#### б) 3D-поверхня та ізолінії тропосферної затримки.

Для побудови 3D-поверхонь та ізоліній тропосферної затримки використовувалися коефіцієнти апроксимації  $c_0, c_1, c_2$  і  $c_3$ , отримані згідно з алгоритмом, наведеним вище. Значення обчислювалися за формулою

$$Z_{\text{оп}} = [c_0 + c_1(B_i - B_{\text{оп}}) + c_2(L_i - L_{\text{оп}})] \exp \frac{H_i - H_{\text{оп}}}{c_3}$$

для  $B$  і  $L$ , що змінювалися з кроком 0.0044 і 0.0052 в інтервалах 48.2724 ... 48.7212 пн. ш. і 22.3498 ... 23.5820 сх. д. Висоти  $H$  точок з координатами  $B$  і  $L$  обчислювалися лінійною інтерполяцією значень із таблиці (карти) висот Закарпатської області. Ця карта висот має крок 0.0022 по широті і довготі.

Відповідні зображення отримано з використанням таблиць  $(B, L)$  та функцій plot sub surface (3D-поверхня) і contourf (ізолінії) з бібліотеки matplotlib (Python).

#### в) 3D-поверхня та ізолінії IWV.

Початкові значення IWV обчислювалися для місць розташування станцій GNSS згідно з формулою



$$i_{wv} = \frac{w}{10^{-8} R (k_2 - k_3 / \bar{T})},$$

де  $i_{wv}$  — шукане значення IWV (в кг м<sup>-2</sup>),  $w$  — волога складова тропосферної затримки (в м),  $R_w = 461.525 \text{ м}^2 \text{с}^{-2} \text{К}^{-1}$  — газова постійна водяної пари,  $k_2 = 17 \text{ К гПа}^{-1}$  і  $k_3 = 3.776 \cdot 10^5 \text{ К}^2 \text{ гПа}^{-1}$  — емпіричні коефіцієнти, а  $\bar{T}$  — середня температура:

$$\bar{T} = a + b(t - 273.15), \text{ К}$$

Тут  $t$ , °С — температура атмосфери в точці розташування станції GNSS, а емпіричні коефіцієнти  $a$  і  $b$  залежать від регіону, і для України дорівнюють  $a = 53.0244 \text{ К}$  і  $b = 0.7873$ .

Для побудови 3D-поверхонь та ізоліній IWV знайдені значення  $i_{wv_i}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) в місцях розташування станцій GNSS апроксимувалися з використанням ітераційного методу Шепарда [3]. Опис алгоритму, що реалізує метод, наведено нижче у п. 4. Апроксимація виконувалася для таких значень параметрів: кількість вузлових точок  $N$  дорівнює кількості станцій GNSS, розмірність  $M = 3$ , початкові похибки (нев'язки)  $\epsilon_0 = 20$ , параметр  $q = 0.95$ , кількість ітерацій  $I = 100$ . Отримані в результаті апроксимації коефіцієнти використовувалися для обчислення таблиць значень  $IWV(B, L)$  в точках з координатами  $B, L$  і  $H$ , що змінювалися так, як описано в п. 2, а саме,  $B$  і  $L$  змінюються з постійними кроками в заданих діапазонах, а висота  $H$  є функцією  $B$  і  $L$  і визначається по карті Закарпатської області.

Відповідні зображення будувались з використанням таблиць  $IWV(B, L)$  та функцій `plot sub surface` (3D-поверхня) і `contourf` (ізолінії) з бібліотеки `matplotlib` (Python).

#### д) Ітераційний метод Шепарда.

Для визначення в довільній точці простору  $\mathbf{x}$  розмірності  $M$  згладжених ітераційним методом Шепарда значень  $\hat{F}(\mathbf{x})$  за відомими значеннями  $M$ -вимірної функції  $F_n = F(\mathbf{x}) = F(x_0^n, \dots, x_{M-1}^n)$  в  $N$  вузлах  $\mathbf{x}_n$  виконується така процедура.

1. Для кожної розмірності  $m = 0, \dots, M - 1$  по формулах (2) і (3) визначаються коефіцієнти лінійного перетворення координат:

$$x_m = \frac{2}{x_m^{\max} - x_m^{\min}}, \quad (2)$$

$$x_m = 0.5 (x_m^{\max} + x_m^{\min}), \quad (3)$$

де  $x_m^{\max} = \max_{n=0}^{N-1} (x_m^n)$ ,  $x_m^{\min} = \min_{n=0}^{N-1} (x_m^n)$ .

2. У відповідності до виразу (4) координати вузлів  $\mathbf{x}_n$  ( $x_m^n: n = 0, \dots, N - 1; m = 0, \dots, M - 1$ ) лінійно зводяться до інтервалу  $[-1, 1]$ .

$$\tilde{x}_m = \frac{x_m - x_m^{\min}}{x_m^{\max} - x_m^{\min}}, \quad (4)$$

3. Для заданої кількості ітерацій  $I$  і лінійно перетворених координат вузлових точок та у відповідності з виразами (5) — (7) розраховуються значення  $\hat{f}_n^i$  ( $i = 0, \dots, I; n = 0, \dots, N - 1$ ):

$$\hat{f}_n^0 = F_n, \quad (5)$$

$$\hat{f}_n^i = \hat{f}_n^{i-1} \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\hat{f}_k^{i-1}}{d(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_k) {}_0q^{i-1}}}{\sum_{k=0}^{N-1} 1}, \quad \text{для } i > 0, \quad (6)$$

$$d(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_k) = \sum_{m=0}^{M-1} (x_m^n - x_m^k)^2, \quad (7)$$

де  $I$ ,  ${}_0$  і  $q$  — відповідно кількість ітерацій, значення початкових нев'язок ( ${}_0 > 0$ ) та коефіцієнт нев'язок ( $0 < q < 1$ ).

4. Шукане значення  $\hat{F}(\mathbf{x})$  обчислюється за формулами (8) і (9), де відстань  $d$  визначається між точками, координати яких перетворювались у відповідності з виразом (4):

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^I f^i(x), \quad (8)$$

$$f^i(x) = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \frac{\hat{f}_k^{i-1}}{d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_k) {}_0q^{i-1}}}{\sum_{k=0}^{N-1} 1}. \quad (9)$$

Якщо при побудові ізоповерхонь перепад висот з однаковою тропосферною затримкою незначний, то стан атмосфери описується сферично-симетричною моделлю. Якщо перепад висот великий, то атмосфера є нестабільною, спостерігаються збурення і відхилення реального фізичного стану від сферично-симетричної моделі.

Отже, побудувавши ізоповерхні атмосферних затримок на кожний момент часу спостережень, можна визначити області стабільного стану атмосфери на певних висотах протягом певного інтервалу часу.

Для дослідження було обрано два періоди: коли спостерігався град, тобто стан атмосфери був збуреним, та у ясну погоду, коли стан атмосфери можна описати сферично-симетричною моделлю.

Для побудови поверхні зміни тропосферної затримки на території покриття мережею активних референціальних станцій в реальному часі було використано вимірювання тропосферної затримки на 16 станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS. Технологія визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті і на будь-якій висоті над пунктами мережі станцій UA-EUPOS/ZAKPOS опублікована в роботах [1, 2, 20].

Для прикладу на рис. 1 і 2 наведено поверхню зміни тропосферної

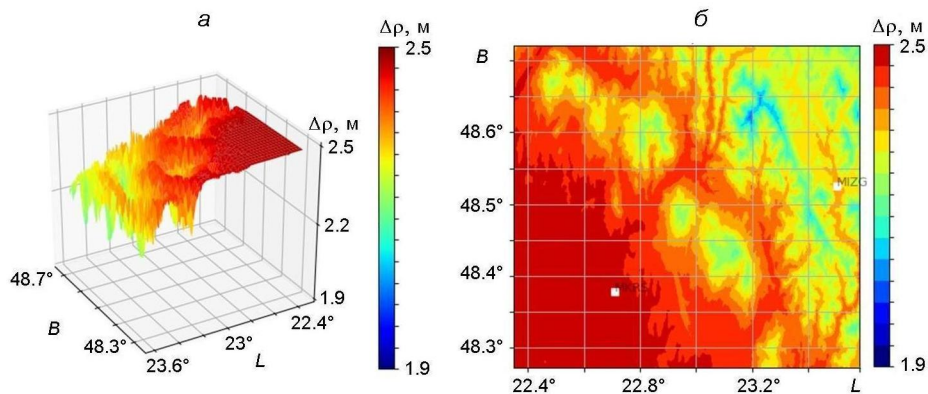


Рис. 1. Зміна тропосферної затримки на 26 травня 2018 р.,  $UT = 21^h00^m$ : а — 3D-поверхня, б — ізолінії

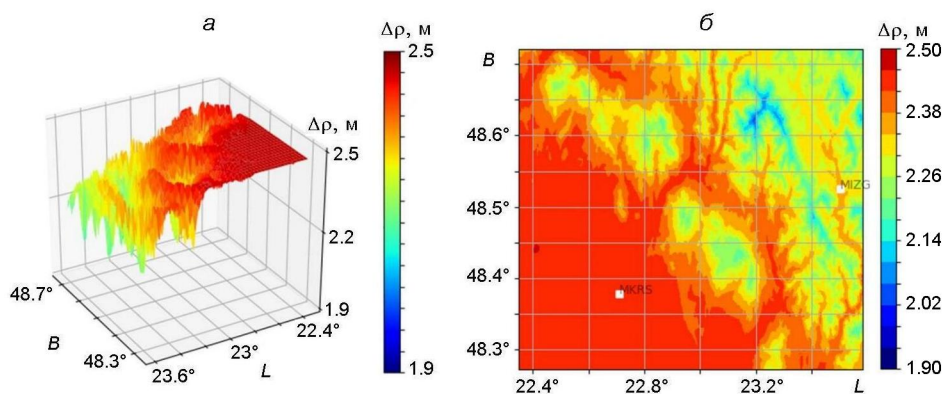


Рис. 2. Те ж для  $UT = 00^h00^m$

затримки на частині території Закарпаття на 26 травня 2018 року,  $UT = 21^h00^m$ , коли спостерігався град, а також 26 травня 2018 р.,  $UT = 00^h00^m$ , коли була ясна погода. Якщо будувати карти тропосферних затримок через певний інтервал часу, наприклад 15, 30 хв або (якщо потрібно) 1 хв, то можна визначити динаміку зміни стану тропосфери над територією покриття мережі референцних станцій. Переваги даної методики не лише в оперативності, наочності та неперервності (через 1 хв), але й у тому, що вона не потребує знання метеопараметрів на рівні розташування референцних станцій чи проведення аерологічного зондування атмосфери. Достатньо знайти тропосферні затримки на референцних станціях мережі. При цьому так само оперативно можна знайти тропосферну затримку для будь-якого пункту за відомими геодезичними координатами.

З метою дослідження стабільності атмосфери в реальному часі спостережень за описаним вище алгоритмом побудовано ізоповерхні тропосферних затримок. На рис. 3а і 3б відповідно наведено ізоповерхні на  $UT = 21^h00^m$  та  $00^h00^m$  26 травня 2018 р.

Порівняння ізоповерхонь та значень тропосферних затримок на

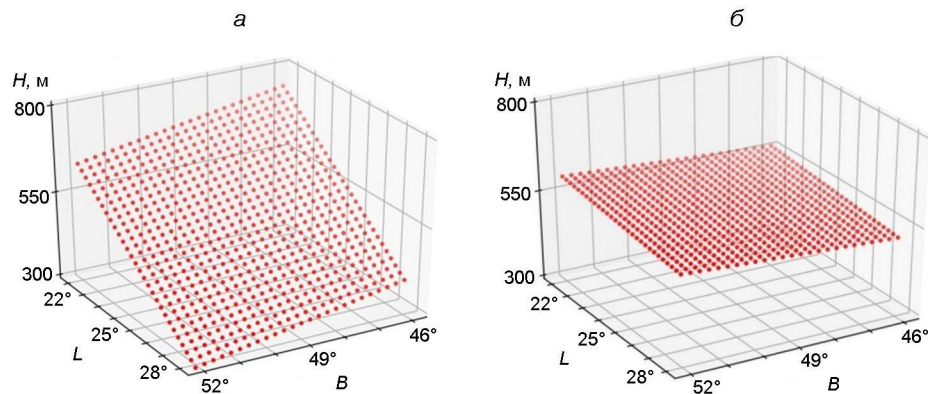


Рис. 3. Ізоповерхні тропосферної затримки станом на 26 травня 2018 р.: а —  $UT = 21^h00^m$ , б —  $UT = 00^h00^m$

конкретні моменти часу дає підстави стверджувати, що 26 травня 2018 р.,  $UT = 00^h00^m$  у тропосфері ситуація була стабільною, тобто над різними пунктами покриття мережі активних референцних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS ізоповерхня тропосферних затримок  $H_{\min} = 2.325$  м мала перепад висот  $H \sim 55$  м, а у момент  $UT = 21^h00^m$ , очевидно, тропосфера була нестабільною, перепад висот, на яких  $H_{\min} = 2.318$  м, був надзвичайно великим ( $H \sim 500$  м).

Ізоповерхні характеризують стабільність атмосфери. Якщо перепад висот з однаковою тропосферною затримкою незначний, то стан атмосфери описується сферично-симетричною моделлю. Якщо перепад висот великий, то атмосфера є нестабільною, спостерігаються збурення і відхилення реального фізичного стану від сферично-симетричної моделі.

Для прогнозу виникнення атмосферних збурень, а відповідно зливових дощів, потрібно використовувати дані зі станцій, що охоплюють значну територію. На вибраній території визначатиметься значення тропосферної затримки з метою виявлення напрямку та швидкості переміщення збурень. Окрім ізоповерхонь, для кращого прогнозу погоди також необхідно мати вертикальний розподіл метеопараметрів (тиску, температури, вологості) з частою вибіркою як у просторі, так і у часі.

## 6. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ АТМОСФЕРИ

Динамічна карта ізоповерхонь зенітної тропосферної затримки ZTD (над мережею референцних станцій дає можливість передбачити не лише відхилення реального стану атмосфери від сферично-симетричного стану, а й виникнення та переміщення тропосферних збурень.

Якщо побудовані ізоповерхні вказують на просторово-часову нестабільність атмосфери, потужність якої з часом зростає, то це означає

перенесення тропосферних збурень над даною територією.

Подальші дослідження направлено на визначення вертикальних профілів метеопараметрів та горизонтальних градієнтів в ті моменти часу, коли ізоповерхні мають великий перепад висот.

## 7. ВИСНОВКИ

В епоху розвитку активних GNSS-мереж кількість перманентних станцій невідомо зростає, тому часто значно перевищує кількість метеостанцій у певному регіоні. Така велика щільність GNSS-станцій може використовуватися для отримання динамічних карт ізоповерхонь у режимі реального часу. Жодна інша метеорологічна методика наземного вимірювання не дає такої можливості. GNSS — єдина методика, яка може надати тропосферні дані незалежно від погодних умов.

На основі GNSS-спостережень у мережі станцій ZAKPOS/UA-EUPOS визначено атмосферні затримки на певний момент часу спостережень під час небезпечних погодних умов та при хорошій погоді у травні — липні 2018 р. на території Карпатського регіону.

За даними вимірювань побудовано динамічні карти ізоповерхонь для значень тропосферних затримок на весняно-літній період 2018 р. Виявлено перепад висот тропосфери над референцними станціями у період, коли спостерігались сильні зливові дощі, що свідчить про нестабільність атмосфери у цей момент спостережень.

Отже, побудувавши ізоповерхні атмосферних затримок на кожний момент часу спостережень, можна визначити області стабільного стану атмосфери на певних висотах протягом певного інтервалу часу.

Якщо побудовані ізоповерхні вказують на просторово-часову нестабільність атмосфери, потужність якої з плином часу зростає, то це означає перенесення атмосферних збурень над даною територією. Звідси висновок, що динамічна карта ізоповерхонь над мережею референцних станцій дає можливість передбачити не лише сферично-симетричний стан атмосфери, а й виникнення та переміщення атмосферних збурень. 4D-поля атмосферних затримок можна використовувати для передбачення стихійних явищ, тобто застосовувати для потреб метеорології.

1. Каблак Н. И. Технология определения тропосферных задержек в сети активных референционных станций ZAKPOS/UA-EUPOS/. Кинематика и физика небес. тел. 2013. 29, № 4. С. 73—80.
2. Каблак Н., Калюжний М., Шульга А., Вовк В. Практична реалізація виявлення просторово-часової нестабільності атмосфери у мережі активних референціальних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS/. Косм. наука і технологія. 2017. 23, № 1. С. 54—62.
3. Калюжний М. П., Александров О. П. Апроксимація функцій кількох змінних, заданих на розсіяних точках, ітераційним методом Шепарда (ISMNAO)/ Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 57976, від 05.01.2015.



4. Савчук С., Каблак Н., Хоптар А. Порівняння підходів до визначення затримки зенітної тропосфери на основі даних атмосферного радіозвуку та спостереження за GNSS. Міжвідомчий науково-технічний огляд «Геодезія, картографія та аерофотозйомка». 2018. № 8, С. 24—32 <https://doi.org/10.23939/istegcap2018.02.024>
5. Bar-Sever Y. E., Kroger P., Borjesson J. A. Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *J. Geophys. Res.* 1998. 103. P. 5019—5035.
6. Baker H. C., Dodson A. H., Penna N. T., Higgins M., Offiler D. Ground-based GPS water vapour estimation: potential for meteorological forecasting. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001. 63. P. 1305—1314.
7. Benevides P., Catalao J., Miranda P., Chinita M. J. Analysis of the relation between GPS tropospheric delay and intense precipitation, *SPIE Remote Sensing, Inter. Soc. Optics and Photonics*. 2013. P. 88900Y—88900Y.
8. Bevis M., Businger S., Herring T. A., et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.* 1992. 97, Issue D14. P. 15787—15801.
9. Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T. A., Anthes R. A., Rocken C., Ware R. H. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *J. Appl. Meteorol.* 1994. 3(3). P. 379—386.
10. Bock O., Bouin M. N., Walpersdorf A., Lafore J. P., Janicot S., Guichard F., Agusti-Panareda A. Comparison of groundbased GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2007. 133. P. 2011—2027.
11. Bosy J., Rohm W., Borkowski A., et al. Integration and verification of meteorological observations and NWP model data for the local GNSS tomography. *Atmos. Res.* 2010. 96, № 4. P. 522—530.
12. Davis J. L., Elgered G., Niell A. E., et al. Ground-based measurements of gradients in the wet radio refractive index of air. *Radio Sci.* 1993. 28. P. 1003—1018.
13. Dousa J., Václavovic P. Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Adv. Space Res.* 2014. 53, № 9. P. 1347—1358.
14. Gardner C. S. Effects of horizontal refractivity gradients on the accuracy of laser ranging to satellites. *Radio Sci.* 1976. 11. № 12. P. 1037—1044.
15. Gardner C. S. Correction of laser tracking data for the effects of horizontal refractivity gradients. *Appl. Optics*. 1977. 16, № 9. P. 2427—2432.
16. Hauser J. Effects of deviations from hydrostatic equilibrium on atmospheric corrections to satellite and lunar laser range measurements. *J. Geophys. Res.* 1989. 94, Issue B8. P. 10182—10186.
17. Herring T. A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. Proc. Symp. Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy. Eds J. C. de Munck, T.A.Th. Spoelstra. 1992. № 36. P. 157—164.
18. Hungary's GNSS Network - GNSSnet.hu. URL: [www.gnssnet.hu](http://www.gnssnet.hu).
19. Ichikawa R., Ohkubo H., Koyama Y., et al. An evaluation of atmospheric gradient using water vapor radiometers in Kashima, Japan. *J. Commun. Res. Lab.* 2001. 48, № 1. P. 97—103.
20. Kablak N., Reity O., Ştefan O., Rădulescu A.T.G.M., Rădulescu C. The Remote Monitoring of Earth's Atmosphere Based on Operative Processing GNSS Data in the UA-EUPOS/ZAKPOS Network of Active Reference Stations. *Sustainability*. 2016. 8(4), 391; doi:10.3390/su8040391.
21. Kacmarík M., Douša J., Zus F., Václavovic P., Balidakis K., Dick G., Wickert J.

- Sensitivity of GNSS tropospheric gradients to processing options. *Ann. Geophys.* 2019. 37. P. 429—446, <https://doi.org/10.5194/angeo-37-429-2019>
22. Müller G., Landskron D. Atmospheric bending effects in GNSS tomography. *Atmos. Meas. Tech.* 2019. 12. P. 23—34, <https://doi.org/10.5194/amt-12-23-2019>
23. Poland's GNSS Network - ASG-EUPOS. URL: [www.asgeupos.pl](http://www.asgeupos.pl)
24. Romania's GNSS Network - ROMPOS. URL: [www.rompos.ro](http://www.rompos.ro)
25. SES Project: <http://www.meteognss.net/>
26. Slovakia's GNSS Network - SKPOS. URL: [www.skpos.gku.sk](http://www.skpos.gku.sk)
27. Western Ukraine GNSS Network - UA-EUPOS/ZAKPOS. URL: [www.zakpos.zakgeo.com.ua](http://www.zakpos.zakgeo.com.ua)

## REFERENCES

1. Kablak N. I. (2013) Procedure for determining tropospheric delays in the ZAKPOS/UA-EUPOS network of active reference stations. *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* 29(4). 73—80. (In Russian).
2. Kablak N., Kalyuzhny M., Shulga A., Vovk V. (2017) Practical realization of detection of space-time instability of the atmosphere in the network of active reference stations UA-EUPOS/ZAKPOS/. *Space Sci. and Technol.* 23(1). 54—62. (In Ukrainian).
3. Kaliuzhnyi M. P., Aleksandrov O. P. (2015) Approximation of Functions of Multiple Variables Given at Scattered Dots by Iterative Method of Shepard (ISMNAO) / Certificate of Copyright Registration of Work No. 57976, 05.01.2015. (In Ukrainian).
4. Savchuk S., Kablak N., Hoptar A. (2018) Comparison of approaches to the determination of the antiaircraft troposphere delay based on atmospheric radio data and GNSS observation Interdepartmental Scientific and Technical Review "Geodesy, Cartography and Aerial Photography". 8. 24—32 <https://doi.org/10.23939/istegcap2018.02.024> (In Ukrainian).
5. Bar-Sever Y. E., Kroger P., Borjesson J. A. (1998) Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *J. Geophys. Res.* 103. 5019—5035.
6. Baker H. C., Dodson A. H., Penna N. T., Higgins M., Offiler D. (2001) Ground-based GPS water vapour estimation: potential for meteorological forecasting. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 63. 1305—1314.
7. Benevides P., Catalao J., Miranda P., Chinita M. J. (2013) Analysis of the relation between GPS tropospheric delay and intense precipitation, SPIE Remote Sensing, Intern. Soc. Optics and Photonics. 88900Y—88900Y.
8. Bevis M., Businger S., Herring T. A., et al. (1992) GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.* 97(D14). 15787—15801.
9. Bevis M., Businger S., Chiswell S., Herring T. A., Anthes R. A., Rocken C., Ware R. H. (1994) GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteorol.* 3(3). 379—386.
10. Bock O., Bouin M. N., Walpersdorf A., Lafore J. P., Janicot S., Guichard F., Agustí-Panareda A. (2007) Comparison of groundbased GPS precipitable water vapour to independent observations and NWP model reanalyses over Africa. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 133. 2011—2027.
11. Bosy J., Rohm W., Borkowski A., et al. (2010) Integration and verification of meteorological observations and NWP model data for the local GNSS tomography. *Atmos. Res.* 96(4). 522—530.

12. Davis J. L., Elgered G., Niell A. E., et al. (1993) Ground-based measurements of gradients in the wet radio refractive index of air. *Radio Sci.* 28. 1003—1018.
13. Dousa J., Václavovic P. (2014) Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Adv. Space Res.* 53(9). 1347—1358.
14. Gardner C. S. (1976) Effects of horizontal refractivity gradients on the accuracy of laser ranging to satellites. *Radio Sci.* 11(12). 1037—1044.
15. Gardner C. S. (1977) Correction of laser tracking data for the effects of horizontal refractivity gradients. *Appl. Optics.* 16(9). 2427—2432.
16. Hauser J. (1989) Effects of deviations from hydrostatic equilibrium on atmospheric corrections to satellite and lunar laser range measurements. *J. Geophys. Res.* 94(B8). 10182—10186.
17. Herring T. A. (1992) Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data / Proc. Symp. Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy. Eds J. C. de Munck, T.A.Th. Spoelstra. 36. 157—164.
18. Hungary's GNSS Network GNSSnet.hu. URL: [www.gnssnet.hu](http://www.gnssnet.hu).
19. Ichikawa R., Ohkubo H., Koyama Y., et al. (2001) An evaluation of atmospheric gradient using water vapor radiometers in Kashima, Japan. *J. Commun. Res. Lab.* 48(1). 97—103.
20. Kablak N., Reity O., Ștefan O., Rădulescu A.T.G.M., Rădulescu C. (2016) The remote monitoring of Earth's atmosphere based on operative processing GNSS data in the UA-EUPOS/ZAKPOS network of active reference stations. *Sustainability.* 8(4), 391; doi:10.3390/su8040391.
21. Kacmarik M., Douša J., Zus F., Václavovic P., Balidakis K., Dick G., Wickert J. (2019) Sensitivity of GNSS tropospheric gradients to processing options. *Ann. Geophys.* 37. 429—446 (<https://doi.org/10.5194/angeo-37-429-2019>)
22. Müller G., Landskron D. (2019) Atmospheric bending effects in GNSS tomography. *Atmos. Meas. Tech.* 12. 23—34 (<https://doi.org/10.5194/amt-12-23-2019>)
23. Poland's GNSS Network - ASG-EUPOS. URL: [www.asgeupos.pl](http://www.asgeupos.pl)
24. Romania's GNSS Network - ROMPOS. URL: [www.rompos.ro](http://www.rompos.ro).
25. SES Project. URL: <http://www.meteognss.net/>
26. Slovakia's GNSS Network - SKPOS. URL: [www.skpos.gku.sk](http://www.skpos.gku.sk).
27. Western Ukraine GNSS Network - UA-EUPOS/ZAKPOS. URL: [www.zakpos.zakgeo.com.ua](http://www.zakpos.zakgeo.com.ua).

Н. Каблак<sup>1</sup>, С. Савчук<sup>2</sup>, Н. Калюжный<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина

<sup>2</sup>Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина

#### ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ОПЕРАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ GNSS-ДАННЫХ

Одним из вариантов практического применения GNSS-технологий, кроме геодезических и навигационных потребностей, является дистанционное зондирование атмосферы радиосигналами навигационных спутников с целью улучшения качества и детализации прогнозов погоды. Распространения радиосигнала от GNSS-спутников к наземным приемным устройствам (GNSS-приемников) через нейтральную атмосферу сопровождается уменьшением фазовой скорости радиоволн (дополни-

тельные атмосферные задержки). Это связано с наличием в атмосфере молекул азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара. Поэтому измерения дополнительной задержки радиосигнала в атмосфере (тропосферной задержки) дают информацию о интегральных свойствах атмосферы вдоль траектории распространения радиосигнала. В результате первичной обработки результатов GNSS-измерений определяют расстояния от станции наблюдений к GNSS-спутникам. Вторичная обработка GNSS-измерений заключается в решении навигационной задачи и дает информацию о местонахождении станции. Для получения метеорологической информации необходима разработка специальных методов вторичной обработки данных, основанные на решении обратных задач. Совокупное объединение данных первичной и вторичной обработки вместе с метеорологической информацией дает возможность получить глобальную модель атмосферы практически в режиме реального времени. Оперативность данного подхода, полная автоматизация и отсутствие расходных материалов при осуществлении дистанционного зондирования открывают возможности для широкого внедрения в практику оперативного контроля состояния атмосферы с целью улучшения детализации данных и повышения точности региональных краткосрочных прогнозов погоды. В настоящее время благодаря трансграничному сотрудничеству с европейскими странами при проведении совместных GNSS-наблюдений в сети станций UA-EUPOS / ZAKPOS мы получаем возможность иметь точную, плотную и непрерывную выборку значений тропосферной задержки, позволяет определить и прогнозировать динамику изменения состояния атмосферы в реальном времени. Основная цель работы — исследование пространственно-временной неустойчивости атмосферы над территорией покрытия активными референсными станциями. Результаты исследования можно использовать для повышения качества предсказания погоды.

**Ключевые слова:** тропосферная задержка, карта изоповерхностей, пространственно-временная неустойчивость, водяной пар, GNSS-метеорология.

*N. Kablak<sup>1</sup>, S. Savchuk<sup>2</sup>, M. Kaliuzhnyi<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

<sup>2</sup>Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>3</sup>Research Institute «Mykolaiv Astronomical Observatory», Mykolaiv, Ukraine

#### INVESTIGATION AND ANALYSIS OF SPATIAL-TEMPORAL INSTABILITY OF AN ATMOSPHERE BASED ON THE OPERATIONAL PROCESSING GNSS DATA

One of the options for the practical application of GNSS technology, in addition to geodetic and navigation needs, is remote sensing of the atmosphere by radio signals from navigation satellites in order to improve the quality and detail of weather forecasts. The propagation of a radio signal from GNSS satellites to a ground receiving device (GNSS receiver) through a neutral atmosphere is accompanied by a decrease of the phase velocity of the radio waves (additional atmospheric delays). This is due to the presence of nitrogen, oxygen, carbon dioxide and water vapor molecules in the atmosphere. Therefore, measurements of the additional delay of the radio signal in the atmosphere (tropospheric delay) provide information on the integral properties of the atmosphere along the propagation path of the radio signal. As a result of the primary processing of the GNSS measurement results, the distances from the observation station to GNSS satellites are determined. Secondary processing of GNSS measurements consists in solving a navigation problem and provides information on the location of the station. In order to obtain meteorological information, it is necessary to develop special methods of secondary data processing based on solving inverse problems. The combination of primary and secondary data along with meteorological information makes it possible to obtain a global model of the atmosphere in near-real time. The efficiency of this approach, the complete automation and the absence of

consumables during remote sensing provide opportunities for the widespread implementation of operational monitoring of the state of the atmosphere in order to improve the data detail and accuracy of regional short-term weather forecasts. Currently, due to cross-border cooperation with European countries in conducting joint GNSS observations in the UA-EUPOS / ZAKPOS network of stations, we are able to have an accurate, dense and continuous sampling of tropospheric delay values, which allows us to determine and predict the dynamics of atmospheric changes in real time. The main goal of the work is to study the spatio-temporal instability of the atmosphere over an area covered by active reference stations. The results of the study can be used to improve the quality of weather prediction.

**Keywords:** tropospheric delay, isosurface map, spatio-temporal instability, water vapor, GNSS meteorology.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2019

Після доопрацювання 06.02.2020

Прийнята до друку 13.10.2020