

УДК 629.056.88+551.51

С. Г. САВЧУК, Ф. Д. ЗАБЛОЦЬКИЙ

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38(032)2582181, ел. пошта: ssavchuk@polynet.lviv.ua

МОНІТОРИНГ ТРОПОСФЕРНОЇ ВОДЯНОЇ ПАРИ У ЗАХІДНІЙ ТРАНСКОРДОННІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ

Мета. Виявлення достовірних оцінок зенітних тропосферних затримок (ZTD) за даними GNSS-спостережень (дистанційний моніторинг тропосфери) на активних референційних станціях західної транскордонної зони України. **Методика.** Важливим продуктом, який отримують в GNSS-метеорології, є зенітні тропосферні затримки, а їхній безпосередній зв'язок із інтегрованою /осаджуваною водяною парою дає змогу отримати оперативну інформацію для числового прогнозування погоди. Однією із основних проблем у процесі використання таких результатів є достовірність отриманих оцінок величин інтегрованої/осаджуваної водяної пари із аналізу GNSS-даних. Відповідно стратегія аналізу GNSS-даних повинна забезпечувати такі оцінки ZTD, які відповідають вимогам GNSS-метеорології. Визначення величин ZTD традиційно ґрунтувалося на аналізі даних в режимі пакетного мережевого розв'язку з використанням методу найменших квадратів і способу спостереження, що спирається на утворення подвійних різниць (DD), та у режимі, близькому до реального часу (NRT). Абсолютний метод точного позиціонування (PPP), для реалізації якого був необхідний доступ до точних поправок супутникових годинників разом з прогнозованими орбітами, фактично не використовувався. З точки зору стратегії аналізу GNSS-даних метод PPP є популярним завдяки створенню у режимі реального часу (RT) Міжнародною службою GNSS (IGS) та іншими організаціями таких продуктів, як точні орбіти супутників і поправки годинників. З метою порівняння були вибрані дані ZTD, отримані програмними пакетами NRT-DD Bernese GNSS software та RT-PPP ALBERDING GNSS STATUS Software за період лютий–березень 2016 року. Критерієм вибору була максимальна кількість даних на кожній станції спостережень (2880 значень) за вказаний період. Усього для порівняння були вибрані 17 GNSS-станцій. Для кожної станції були побудовані графіки зміни ZTD за вказаний період спостережень, а також обчислена часова зміна різниць ZTD, отримана двома програмними пакетами. **Результати.** За результатами порівнянь виявлено, що використання різних стратегій опрацювання GNSS-даних не вносить істотного впливу на точність визначення зенітних тропосферних затримок. Отримані оцінки в 1–2 см цілком задовольняють вимоги до отримання зазначеного продукту у метеорології та кліматології. **Наукова новизна.** Проведені дослідження двох принципово різних стратегій опрацювання GNSS-даних дали змогу виявити реальну точність визначення зенітних тропосферних затримок, що дає змогу вважати отримані результати достовірнішими порівнянно з результатами, отриманими іншими дослідниками. **Практична значущість.** Отримані оцінкові величини ZTD з регіональної мережі перманентних GNSS-станцій західної транскордонної зони України можуть бути цінною інформацією у задачах числового прогнозування погоди.

Ключові слова: GNSS-метеорологія; зенітна тропосферна затримка; водяна пара; числове прогнозування погоди.

Вступ

Сучасний стан глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) та технологій опрацювання та аналізу дає змогу досягати точності місцезнаходження від міліметра до сантиметра, залежно від режиму проведення вимірювань: пост-опрацювання або опрацювання у режимах реального або близького до реального часу. Щоб досягти такого рівня точності, вплив усіх джерел похибок, що впливають на GNSS-сигнали, повинен бути усунений

Або, принаймні, зведений до мінімуму. Атмосфера Землі є одним із основних джерел таких похибок, що істотно обмежують точне GNSS-позиціонування [Hofmann-Wellenhof та ін., 2008]. Оскільки GNSS-сигнали перетинають різні шари атмосфери, взаємодіючи з ними, то це викликає зміну швидкості радіосигналу, а також скривлення його траєкторії (рефракцію). В результаті цього виникають помилки у позиціонуванні у кілька метрів. Атмосферний вплив на GNSS-сигнали пов'язаний, з одного боку, впливом іонізованої частини атмосфери

(іоносфери), з іншого, – впливом нейтральної атмосфери (стратосфери і тропосфери).

Іоносфера – це шар атмосфери, що простягається від 70 км над поверхнею Землі до більш ніж 1000 км, заповнений електронами і електрично зарядженими атомами і молекулами. Оскільки цей шар атмосфери є дисперсним середовищем, то викликана ним затримка GNSS-сигналів може бути фактично усунена завдяки лінійній комбінації частот цих сигналів.

Оскільки у нейтральній атмосфері тропосфера має домінуючий вплив на формування величини затримки GNSS-сигналу, то цю величину називають здебільшого тропосферною затримкою. Так, тропосфера є найнижчим шаром атмосфери, що простягається від земної поверхні до 8–10 км на полюсах і до 16–18 км – на екваторі. Незважаючи на те, що цей шар є доволі тонким порівняно з висотою усієї атмосфери, він є найщільнішим шаром стосовно повітряних мас і містить близько 75 % від загальної маси атмосфери і майже усю водяну пару (за винятком полярних регіонів).

Особливістю нейтральної атмосфери є те, що вона не є дисперсним середовищем для радіохвиль з частотою, меншою, ніж 15 ГГц. У такому випадку тропосферна затримка не може бути усунута за допомогою лінійної комбінації частот як іоносферна затримка, а тому повинна бути змодельована або визначена у процесі опрацювання та аналізу результатів GNSS-вимірювань. Що ж стосується моделювання тропосферної затримки, то, як відомо, її залишкова пост-модельована величина, викликана переважно вмістом водяної пари в тропосфері. Ця величина може бути оцінена, з одного боку, за даними атмосферних радіозондів, радіометрів водяної пари, лазерних локаційних систем (лідарів), а також числових моделей погоди, а з другого, – за даними наземних мереж активних GNSS-станцій, включаючи технологію радіозатемнень (GNSS-супутник – низькоорбітальний супутник).

Отже, з одного боку, для підвищення точності GNSS-позиціонування потрібні надійні параметри атмосфери. З іншого, – точні фіксовані геодезичні координати GNSS-станцій та надійні технології і моделі інших джерел похибок (зміна фазового центра антени, багато-

променевого поширення тощо) в оберненій задачі позиціонування, є необхідною умовою для оцінки отриманих тропосферних параметрів на основі опрацювання та аналізу GNSS-даних. Ці параметри отримують завдяки численним тропосферним затримкам на похилих трасах спостережень (STD), приведених до зенітного напрямку з кожної станції до усіх видимих супутників в один момент часу. Отримана в такий спосіб повна зенітна затримка (ZTD) віддзеркалює умови поширення GNSS-сигналів ніби 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 [Bock та ін., 2007].

Отримані величини ZTD традиційно розділяють на дві складові: зенітну гідростатичну затримку (ZHD або суху) і зенітну вологу (ZWD). Перша зумовлена дією сухого повітря і становить за величиною не менш ніж 90 % від повної тропосферної затримки. Друга становить приблизно 10 % від ZTD. Саме ця складова зумовлена вмістом водяної пари та її розподілом у тропосфері. Гідростатична складова ZHD змінюється відповідно повільно у часі і може бути доволі точно оцінена, у той час, як волога складова ZWD змінюється не прогнозовано як у просторі, так і в часі, а тому її складно змодельовати не лише через мінливість водяної пари, але й через значні похибки визначення її із безпосередніх метеорологічних вимірювань.

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 доволі легко переходять до осаджуваної водяної пари (PWV) [Baker та ін., 2001; Benevides та ін., 2013]. Обидві величини IWV і PWV відображають загальну кількість води у вертикальному стовпі повітря, яка могла б випасти на земну поверхню [Zablotsky, 2013].

Отже, у високоточних задачах позиціонування тропосферна затримка є помилкою, яку необхідно усунути або мінімізувати. З іншого боку, в обернених задачах GNSS-

застосування ця величина є надзвичайно цінною інформацією для метеорології та кліматології. Такі задачі стали надзвичайно актуальними з появою наземних геодезичних GNSS-мереж, що складаються з активних референсних станцій (з точно відомими координатами), і які забезпечують довгостроковий моніторинг атмосферної водяної пари. Однією із основних проблем у процесі використання результатів моніторингу є достовірність отриманих оцінок величин IWV і PWV. Власне на розв'язок цієї проблеми скеровані дослідження, висвітлені у цій роботі.

Методика та результати робіт

Існують вимоги до точності вимірювання багатьох параметрів у нижній атмосфері, що стають критеріями для виконання подальших завдань. Ці вимоги можуть змінюватися залежно від сфер використання: глобального чи регіонального прогнозу погоди, короткострокового прогнозу, синоптичної метеорології, гідрології, безпеки життєдіяльності тощо [Böhm та ін., 2007; Saastamoinen, 1972]. Одним із найважливіших параметрів, що підлягають періодичному контролю тривалий час, є водяна пара. Загальний вміст її потрібно визначати з оптимальною і граничною похибками 1 і 5 кг/м², відповідно, і з горизонтальним розрізненням 5/50 км (короткостроковий прогноз погоди на 2–3 години), 10/250 (регіональний прогноз) і 50/500 км (глобальний прогноз) [Kuo та ін., 1993].

Існують різні методи, що уможливають контактну або дистанційно вимірювати окремі параметри атмосфери, зокрема і вміст водяної пари. Використання майже усіх методів пов'язане з організаційними труднощами і значними матеріальними затратами. Зазначене стосується і використання GNSS-сигналів, оскільки створення та експлуатація мережі активних GNSS-станцій є доволі затратним проектом. Якщо б він був направлений лише на виконання задач GNSS-метеорології, то його реалізація не мала б особливих переваг порівняно з іншими методами, за винятком безперервності вимірювань і незалежності від погодних умов.

Оскільки мережі активних GNSS-станцій створюються насамперед з метою призначення

GNSS-послуг для координатного забезпечення топографо-геодезичних і кадастрових робіт як у режимі реального часу, так і пост-опрацювання, то повторне використання фактично тих самих GNSS-послуг у завданнях GNSS-метеорології є значно менш затратним. Такими послугами є власне результати вимірювань на GNSS-станціях у вигляді “сирих” даних і готових продуктів – тропосферних затримок. Отже, оцінювання параметрів тропосфери можна проводити двома шляхами:

- із опрацювання “сирих” даних GNSS-вимірювань, отриманих з мережі активних референсних станцій;
- за готовими тропосферними затримками, отриманими з мережевого програмного забезпечення, під управлінням якого функціонують такі мережі.

Перший підхід надає більше ступенів свободи для дослідника, але вимагає спеціалізованого програмного забезпечення. Наявність тропосферних затримок у другому випадку знімає проблему щодо програмного забезпечення, але при цьому виключає можливість втручання у процес визначення таких затримок за допомогою використання конкретних моделей, форматів даних тощо.

Основною метою GNSS-метеорології є отримання величин ZTD з регіональної мережі перманентних GNSS-станцій для числового прогнозування погоди (NWP) [Bevis та ін., 1994; Businger та ін., 1996]. Відповідно, стратегія аналізу GNSS-даних повинна забезпечувати такі оцінки ZTD, які відповідають вимогам GNSS-метеорології [Dousa., Vaclavovic, 2014]. Для NWP застосувань є неявні вимоги, а саме: похибки спостережень не повинні бути корельованими як у просторі, так і в часі, і в результатах спостережень не повинно бути будь-яких систематичних похибок. Це накладає жорсткі вимоги щодо їх визначення з точки зору надійності і точності. Узагальнені вимоги до точності такої інформації становлять 6–30 мм. Що стосується короткострокового прогнозу погоди (наукастінгу), то тут більше значення мають відносні значення ZTD (горизонтальні градієнти у тропосфері та їх часові варіації), ніж їх абсолютні величини. Вважається, що оцінка точності ZTD в GNSS-метеорології знаходиться теоретично у межах від 3 до 10 мм.

Отже, вимоги NWP до оцінки точності ZTD для прогнозування поточної погоди становлять від 6 до 30 мм, що є значно меншими порівняно з вимогами GNSS-метеорології.

Процес визначення вмісту водяної пари (PWV) із GNSS-спостережень у тропосфері можна подати у вигляді триетапної процедури. Визначення тропосферних затримок проводиться на першому етапі. Оскільки сигнали від супутників надходять до GNSS-приймача переважно похилими напрямками, то величина тропосферної затримки залежить від кута піднесення супутника або його зенітної відстані [Böhm та ін., 2009; Böhm та ін., 2006].

Приведення похилої тропосферної затримки STD до зенітного напрямку у заданий момент часу виконується за допомогою функції відображення (MF):

$$ZTD = STD \cdot (MF)^{-1}. \quad (1)$$

Оскільки величина ZTD являє собою зенітну гідростатичну і вологу складові, то на другому етапі величина зенітної гідростатичної затримки обчислюється (за точно вимірним атмосферним тиском на висоті антени GNSS-приймача або отриманим його значенням з моделей NWP за допомогою, наприклад, формули Saastamoinen) [Saastamoinen, J., 1972]. Далі, зенітну вологу затримку отримують як різницю між повною зенітною затримкою та зенітною гідростатичною складовою:

$$ZWD = ZTD - ZHD. \quad (2)$$

На третьому етапі величина ZWD перетворюється в інтегровану водяну пару та осаджувану водяну пару з використанням коефіцієнта перетворення Π :

$$PWV = ZWD \cdot \Pi^{-1}. \quad (3)$$

Цей коефіцієнт визначається за середньою температурою T_m зваженої водяної пари у стовпі тропосфери. Значення T_m може бути доволі точно визначене за поверхневою температурою у пункті спостережень, використовуючи модель MB [Bevis та ін., 1992; Global Forecast System (GFS)] або інші моделі.

На основі аналізу джерел, наприклад, [Herring, T. Та ін., 2015, Rocken, C. Та ін., 1993, Tregoning, P. Та ін., 1998, Vedel, H. Та ін., 2001], дію основних джерел похибок, що впливають на оцінювання величини PWV, а саме: фазовий центр антени-обтічника, функції відображення, специфічні впливи, що можуть виникати внаслідок розташування станції спостереження (багатошляховість, азимутальна асиметрія локального підвищення тропосфери тощо), іоносферні впливи вищих порядків, модельні значення температури T_m і атмосферного тиску P , можна розділити на систематичні і сезонні впливи та вказати максимально можливі їх оцінкові значення (табл. 1).

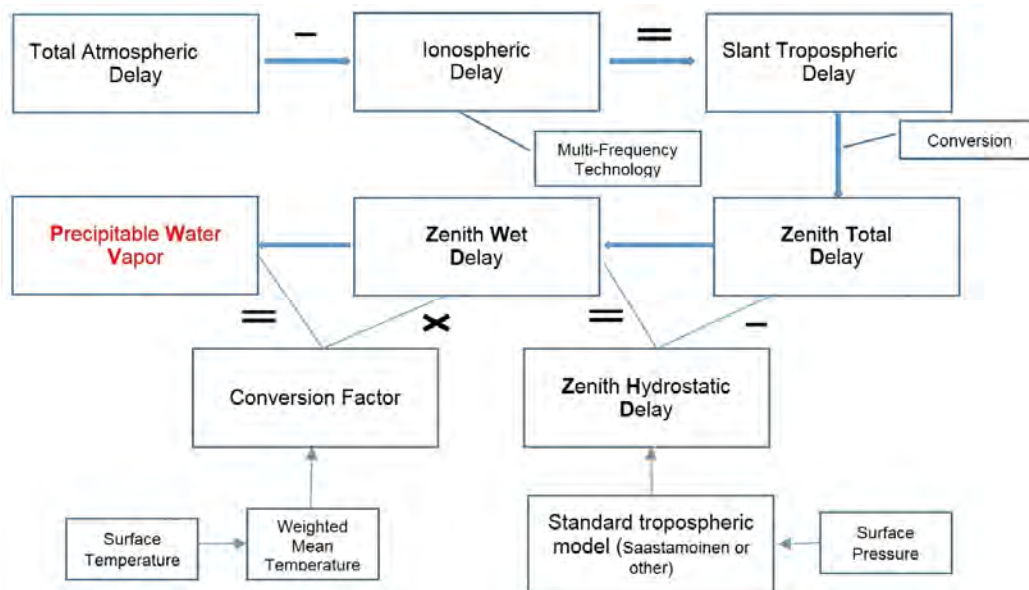


Рис. 1. Схема триетапної процедури визначення GNSS-PWV із ZTD-величини
Fig. 1. Chart of three stages determination procedure of GNSS-PWV from ZTD values

Таблиця 1

Основні джерела помилок, що впливають на оцінку PWV, виведену із GNSS-вимірювань

Table 1

Main error sources affecting the estimation of GNSS-derived PWV

Параметри	Джерела похибок	Систематичні ефекти, мм	Сезонні ефекти, мм
ZTD	Фазовий центр антена-покриття	1-2	<0.1
	Функція відображення	0.5	0.5
	Ефекти, пов'язані із розташуванням станції	1	0.5
	Ефекти іоносфери вищих порядків	0.1	<0.1
температура T_m	$\sigma_{T_m} = 2 K$	0.5	0.3
тиск P	$\sigma_P = 2 hPa$	0.8	0.2
PWV		~2	~1

Точність отримання величини PWV у результаті дії похибок рівнянь (2) та (3) можна розрахувати на основі такого рівняння:

$$\sigma_{PWV}^2 = (ZWD \cdot \sigma_{\Pi})^2 + (\Pi \cdot \sigma_{ZHD})^2 + (\Pi \cdot \sigma_{ZTD})^2 \quad (4)$$

Отже, беручи до уваги декларовану точність визначення ZTD від 3 до 10 мм, а також помилки тиску $\sigma_P = 2 hPa$ і температури $\sigma_{T_m} = 2 K$, отримаємо середньоквадратичне значення оцінок PWV від 1.2 до 1.9 мм.

Визначення величин ZTD традиційно ґрунтувалося на аналізі даних в режимі пакетного мережевого розв'язку з використанням методу найменших квадратів і способу спостереження, що спирається на утворення подвійних різниць (DD) [Seeber, G. N., 2003]. Абсолютний метод точного позиціонування (PPP) [Zumberge, J.F. та ін., 1997], для реалізації якого був необхідний доступ до точних поправок супутникових годинників разом з прогнозованими орбітами, фактично не використовувався. Проте в останні роки ці два різні підходи аналізу GNSS-даних почали інтенсивно розроблятися саме у GNSS-метеорології.

Сьогодні обидва геодезичні підходи до опрацювання GNSS-даних та даних метеорологічних спостережень для визначення величин ZTD близькі до оперативної реалізації. Так, наприклад, у Європі існує безперервний потік ZTD-даних, що опрацьовуються кількома центрами аналізу GNSS-даних від більш ніж 500 станцій спостережень [Dousa J., Vaclavovic P.,

2014, Vedel, H. Та ін., 2004]. З погляду застосування даних ZTD у метеорологічних задачах прогнозування погоди є кілька проблемних питань, пов'язаних насамперед з процедурою чітко попередньо опрацьованих GNSS-спостережень:

- складно отримати достовірні статистичні дані про похибки спостереження, необхідні для оптимальності асиміляції даних;
- для різних станцій спостережень систематичні похибки змінюються по-різному;
- правомірність нехтування малою кореляцією похибок спостережень у значних просторових і часових масштабах.

При цьому зазначимо, що дані ZTD у континентальному масштабі є комбінацією від багатьох центрів аналізів, що мають різні стратегії опрацювання, в яких процедури отримання величин ZTD не обов'язково узгоджуються одна з одною.

Отже, узагальнений європейський підхід до отримання ZTD не є оптимальною стратегією у сфері оперативного числового прогнозування погоди і, особливо, наукастингу. На нашу думку, регіональна стратегія опрацювання GNSS-спостережень у режимі реального часу або близького до реального є привабливішою.

Оцінка тропосферної затримки за фактичною похилою траєкторією поширення сигналу є іншим підходом опрацювання GNSS-даних, що призводить до отримання похилих тропосферних затримок. Методи опрацювання,

які здебільшого використовують оцінки ZTD замість STD, вважаються значно ефективнішими, оскільки можуть відфільтрувати випадкові похибки спостережень, а отже, точність визначення величин ZTD буде кращою від точності STD-величин.

Методи опрацювання і асиміляції даних STD усе ще знаходяться на стадії експериментальних досліджень [Kuo, Y. та ін., 1993, Seco, A. та ін., 2012, Vedel H. та ін., 2004, Yan, X. та ін., 2009, Yuan, L.L. та ін., 1993]. Потенційна перевага оцінок STD полягає у їх здатності охоплювати дрібні масштаби анізотропних характеристик атмосфери, наприклад, значні горизонтальні градієнти вологості. Такі анізотропні особливості найтипівіше пов'язані з мезомасштабними метеорологічними явищами і часто супроводжуються великою кількістю опадів. За цих умов використання STD-даних замість ZTD може виявитись оптимальнішим вибором.

Оцінювання значень STD, які можна отримати із опрацювання GNSS-спостережень, є доволі складним завданням, оскільки фактично немає альтернативних підходів до їх визначення. Стосовно оцінювання величин ZTD, то для цього добре підходить би метод радіозондування атмосфери. Проте через значний часовий інтервал між зондуваннями і просторову обмеженість їх, а також через залежність якості масиву даних від висоти вимірювань і відмінності у конструкціях радіозондів інтерпретація даних радіозондувань втрачає свою об'єктивність. Тому тут порівнюються два різні підходи до опрацювання GNSS-спостережень, а саме DD і PPP у їх реалізаціях: Bernese GNSS Software та Alberding GNSS Status Software відповідно.

Програмний пакет Bernese використовується здебільшого для опрацювання великих мереж перманентних GNSS-станцій. Під час його застосування невідомими є такі величини: координати станцій, фазові неоднозначності, значення ZTD і ZWD, IPWV та горизонтальні градієнти тропосфери. Оскільки координати станцій тісно корелюються з величинами ZTD, то отримані значення координат (перший крок стратегії аналізу DD) направляються у подальшому за вплив величин ZTD (другий крок) в режимі, близькому до реального часу. На додаток до цього створено кілька процедур для підготовки до аналізу і контролю якості та

цілісності оцінок ZTD у режимі, близькому до реального часу.

З погляду стратегії опрацювання GNSS-даних метод PPP є популярним завдяки створенню у режимі реального часу (RT) Міжнародною службою GNSS (IGS) та іншими організаціями таких продуктів, як точні орбіти супутників і поправки годинників. Цей метод забезпечує таку саму точність, як і мережеві DD-розв'язки, але він є гнучкішим, оскільки дані спостережень кожної станції опрацьовуються окремо. Пересилання даних GNSS-спостережень і продуктів здійснюється у режимі RT у форматах, визначених Спеціальним комітетом 104 (SC104) Технічної комісії з радіозв'язку для морських служб (RTCM) (<http://www.rtc.org/>), використовуючи мережевий зв'язок через Інтернет-протокол (NTRIP). Сервіс реального часу IGS і пов'язані з ним центри аналізу роблять RT-орбіти і поправки годинників доступними продуктами для GNSS-спільноти з грудня 2012 року. Ці продукти містять бортові ефемериди і поправки до орбіт і годинників усіх доступних GPS/GNSS супутників. IGS разом з RTCM-SC104 визначив різні формати для поширення в RT-режимі даних спостережень і поправок. Сьогодні прийнятним форматом повідомлень цих спостережень є формат RTCM-3, а щодо бортових орбіт і поправок – формат RTCM-SSR. Потоки RTCM-SSR складаються у режимі реального часу з різних типів повідомлень (табл. 2).

Саме наявність RT-продуктів у вигляді повідомлень RTCM-SSR і потоків даних GNSS-спостережень дає змогу використовувати стратегію PPP. Деякі характеристики потоків продуктів, що використовуються у сучасних програмних пакетах, наведені в табл. 3 (<http://igs.bkg.bund.de/ntrip/ppp~HEAD=pobj>).

Програмний пакет Alberding GNSS Status Software [Alberding GNSS Status Software] використовує потоки вихідних даних референціальних GNSS-станцій у режимі реального часу та підхід PPP опрацювання для визначення величин ZTD кожної станції спостережень (<https://www.alberding.eu/en/GNSSStatus.html>). Цей пакет ґрунтується на програмному модулі ALBERDING EURONET і використовує додаткові зовнішні програмні компоненти RTCM3EPH, IGS01, CLK11.

Таблиця 2

Вибрані типи повідомлень RTCM-SSR. Третя версія

Table 2

Selection of RTCM-SSR Version 3 message types

Тип повідомлення	Опис	GNSS
1057	Поправки орбіт	GPS
1063	Поправки орбіт	GLONASS
1058	Поправки годинника	GPS
1064	Поправки годинника	GLONASS
1059	Кодові різниці	GPS
1065	Кодові різниці	GLONASS
1060	Комбіновані поправки орбіт та годинника	GPS
1066	Комбіновані поправки орбіт та годинника	GLONASS

Таблиця 3

**Коригування потоків, що використовуються у програмних пакетах RT-PPP
(Референсна система: ITRF2008)**

Table 3

**RT Correction Streams used in RT-PPP software packages
(Reference System: ITRF2008)**

Зміст	GNSS	Орбіти	Потік	Провайдер
Орбіта/годинник	GPS	Broadcast	RTCM3EPH	BKG, Alberding GmbH
Поправка орбіти/годинника	GPS	IGS Ultra Rapid	IGS01	ESA
Поправка орбіти/годинника	GPS	IGS Ultra Rapid	IGS02	BKG
Поправка орбіти/годинника	GPS+GLO	CODE Ultra Rapid	IGS03	BKG
Поправка орбіти/годинника	GPS+GLO	CODE Ultra Rapid	CLK11, CLK12 CLK91	BKG BKG Alberding GmbH
Поправка орбіти/годинника	GPS	IGS Ultra Rapid	CLK93	CNES

Таблиця 4

Конфігурація програмних пакетів NRT-DD і RT-PPP

Table 4

Configuration of the NRT-DD and RT-PPP software packages

Опція	Програмне забезпечення	
	Bernese GNSS software	Alberding GNSS Status Software
Використання GNSS	GNSS	GNSS
Введення "сирих" даних	RINEX	RTCM-3
Введення орбіт/годинників	CODE Ultra Rapid	RTCM3EPH
Формат поправок до орбіт/годинників	Hi/Hi	CLK91
Поправки фазового центра приймача/ супутника	Так/Так	Так/Так
Розв'язування неоднозначності	Так	Так
Апріорна модель ZHD	Saastamoinen з NMF	Saastamoinen з VMF1
Тропосферна функція відображення	Wet Niell	VMF1
Інтервал на виході	30 с	1 с
Величини ZTD	10 хв усереднення	15 хв усереднення
Величини IPW	Так	Так

Отже, визначення ZTD можна проводити у режимі реального часу, використовуючи дані спостережень і продукти RT. При цьому постає питання щодо різних оцінок ZTD, викликаних використанням різних стратегій аналізу даних і появою різних джерел похибок, які можуть впливати на точність GNSS-оцінок ZTD.

Так, наприклад, під час застосування стратегії PPP значення ZTD є чутливішими до радіальної складової похибки орбіти, тоді як для стратегії DD вони є чутливішими до тангенціальної складової похибки орбіти.

Що стосується іоносферної затримки, то її величина першого порядку усувається за допомогою лінійної комбінації вимірювань на двох і більше частотах. Проте залишається ще деякий ефект від членів вищого порядку цієї затримки, особливо у періоди високої сонячної активності.

Фіксування цілочислових фазових неоднозначностей підвищує, як відомо, точність координат станції спостереження. У стратегії DD завдяки методичному усуненню багатьох похибок легше визначати і виправляти такі цілі неоднозначності, а за нерізнитцевих спостережень не було можливості фіксувати кількість фазових неоднозначностей до недавнього часу. Нещодавно були проведені лише окремі дослідження (Deutsches GeoForschungsZentrum), скеровані на вивчення впливу розв'язків неоднозначності на оцінки ZTD, що проводились на основі RT-PPP.

Конфігурація і характеристики програмних пакетів, які тут використовувались, наведені у табл. 4.

Центр аналізу SGO (Satellite Geodetic Observatory) в Угорщині проводить оперативне опрацювання даних GNSS-спостережень програмним пакетом Bernese GNSS software із більш як 100 станцій Угорщини, України, Румунії, Словаччини та інших сусідніх країн. Одним із пріоритетних напрямків цього опрацювання є отримання тропосферного продукту ZTD на основі годинних наборів GNSS-даних.

У рамках Програми транскордонного співробітництва Угорщина–Словаччина–Румунія–Україна 2007–2013 рр. був реалізований проект Space Emergency System – SES (HUSKROUA/1101/252) для моніторингу небезпечних погодних явищ у Карпатському регіоні

за даними спостережень з мережі GNSS-станцій [SES Project]. Така мережа була обрана з метою просторового охоплення Карпатського регіону з акцентом на Borsod-Abaúj-Zemplén область (Угорщина), регіон Prešov (Словаччина), Maramures county (Румунія) і Південно-Західну частину України (Закарпатська, Івано-Франківська і частина Львівської області) (рис. 2).

З метою отримання просторово-часового розподілу водяної пари над зазначеним регіоном на основі зенітних тропосферних затримок у межах проекту SES було розроблене та апробоване програмне забезпечення ALBERDING GNSS STATUS Software. Одним із тропосферних продуктів цього програмного забезпечення є часові ряди ZTD від майже 40 GNSS-станцій, що включені у проект SES.

Основні дані про тропосферні продукти, що отримуються в режимах реального часу (RT-PPP ALBERDING GNSS STATUS Software) і режимі, близькому до реального (NRT-DD Bernese GNSS software), наведені у табл. 5.

З метою порівняння були вибрані дані ZTD, отримані зазначеними вище програмними пакетами за період лютий–березень 2016 року. Критерієм вибору була максимальна кількість даних на кожній станції спостережень за вказаний період, що сягала 2880 значень. Усього для порівняння було вибрано 17 GNSS-станцій. Для кожної станції були побудовані графіки зміни ZTD за вказаний період спостережень, а також часова зміна різниць ZTD, отримана двома програмними пакетами.

Як приклад, на рис. 3 показані для станції SULP у графічному вигляді ряди значень ZTD, а на рис. 4 – різниці ZTD.

За результатами порівнянь були обчислені середні значення різниць та їх середньоквадратичні відхилення для кожної станції. Отримані значення наведені у табл. 6.

Отже, за результатами порівнянь можна стверджувати, що використання різних стратегій опрацювання GNSS-даних не вносить істотного впливу на точність визначення зенітних тропосферних затримок. Отримані оцінки у 1–2 см цілком задовольняють вимоги до отримання зазначеного продукту.



Рис. 2. Схематичне розташування GNSS-станцій в Угорщині, Україні, Румунії і Словаччині
 Fig. 2. Map with GNSS Station in Hungary, Ukraine, Romania, Slovakia

Таблиця 5

Тропосферні продукти, оцінені з використанням GNSS програмного забезпечення SGO і проекту SES

Table 5

Tropospheric products estimated using GNSS Software at SGO and SES project

Тип	Програмне забезпечення	Запізнення	Продукт	Інтервал усереднення
NRT	Bernise GNSS Software v.5.2	15 min	ZTD, ZWD, Gradients,	30 min
RT	ALBERDING GNSS STATUS SOFTWARE	real time	ZTD, IPVW	15 min

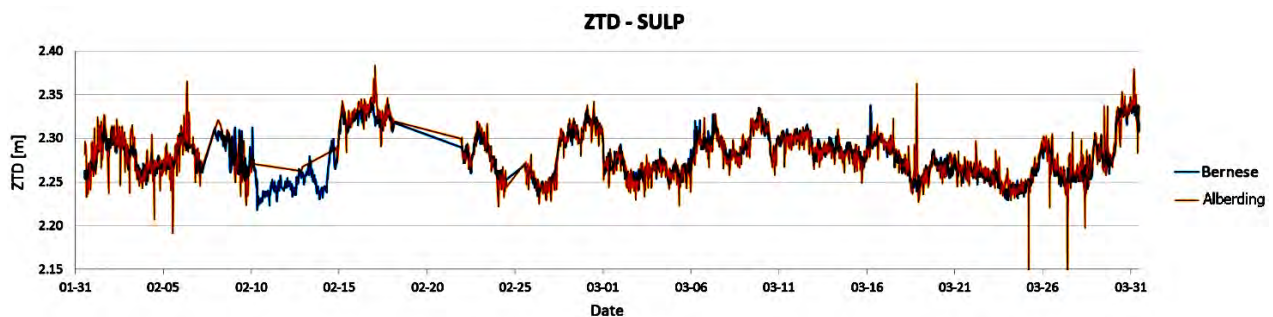


Рис. 3. Поточні величини ZTD на станції SULP
 Fig. 3. Current ZTD comparison at the SULP station

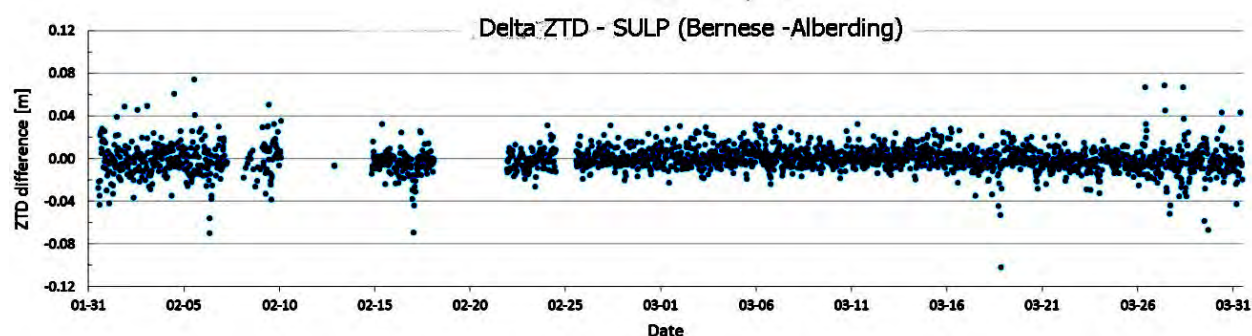


Рис. 4. Поточні різниці ZTD на станції SULP

Fig. 4. Current Delta ZTD at the SULP station

Таблиця 6

Середні значення і стандартні відхилення (σ) порівняння Zenітної тропосферної затримки

Table 6

Mean and standard deviation (σ) of the zenith tropospheric delay comparison

Станція	Середнє, [см]	σ , [см]
BAIA	1.3	4.2
DEBR	1.6	2.3
FUZE	1.4	2.3
MISC	1.9	2.3
MUKA	-0.2	2.3
NYL2	-0.2	3.1
ORAD	2.2	2.6
PUSP	1.7	2.3
RJNT	0.6	2.6
SALG	1.7	2.3
SAMB	0.1	2.6
SATU	1.4	2.3
SKOL	0.3	2.9
STRY	0.1	2.4
SULP	-0.1	2.5
VASA	-0.2	2.3
VRHV	0.1	2.8

Наукова новизна та практична значущість

Проведені дослідження двох принципово різних стратегій опрацювання GNSS-даних дали змогу виявити реальну точність визначення Zenітних тропосферних затримок, що дає можливість вважати отримані результати достовірнішими порівняно з результатами, отриманими іншими дослідниками.

Моніторинг тропосферної водяної пари за допомогою визначення Zenітних тропосферних затримок у режимі реального часу може бути організований на будь-якій мережі активних референціальних станцій. Отримані оцінкові величини ZTD з регіональної мережі перманентних GNSS-станцій західної транскордонної зони України можуть бути цінною інформацією у задачах числового прогнозування погоди цього регіону.

Висновки та рекомендації:

1. Для отримання просторово-часового розподілу водяної пари над конкретним регіоном можна використовувати Zenітні тропосферні затримки, що визначаються із GNSS-спостережень на активних референціальних станціях.

2. Максимально можливі оцінкові значення PWV з врахуванням дії основних джерел похибок отримання Zenітних тропосферних затримок становлять від 1.2 до 1.9 мм.

3. В останні роки у GNSS-метеорології інтенсивно почали використовуватися два різні підходи аналізу GNSS-даних, а саме: режим пакетного мережевого розв'язку з використанням методу найменших квадратів і способу спостереження, що спирається на утворення подвійних різниць (DD) та використання потоків вихідних даних референціальних GNSS-станцій у режимі реального часу на основі абсолютного методу спостережень (підхід PPP).

4. За результатами порівнянь між двома типами програмного забезпечення були обчислені середні значення різниць (близько 1 см) та

їх середньоквадратичні відхилення (близько 2 см) для кожної станції.

5. Використання різних стратегій опрацювання GNSS-даних не має істотного впливу на точність визначення зенітних тропосферних затримок і визначення вмісту водяної пари (PWV) із GNSS-спостережень.

6. Для використання у сфері оперативного числового прогнозування погоди (NWP) та наукастингу обидві стратегії аналізу GNSS-даних забезпечують такі оцінки ZTD, які відповідають вимогам GNSS-метеорології.

7. Враховуючи сучасні можливості отримання такого GNSS-продукту, як вміст водяної пари у тропосфері на мережі супутникових станцій України, ми рекомендуємо відповідним службам і насамперед Українському гідрометцентру використовувати цей продукт для оперативного числового прогнозування погоди.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 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, 1305–1314.
- Benevides, P., Catalao, J., Miranda, P., Chinita, M. J. (Analysis of the relation between GPS tropospheric delay and intense precipitation, *SPIE Remote Sensing, International Society for Optics and Photonics*, 88900Y–88900Y, 2013.
- 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, 2011–2027.
- Bevis, B. G., S. Bussinger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 1992, 97, 15787–15801.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., and Ware, R. H. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 3(3):379–386.
- J. Böhm, R. Heinkelmann, and H. Schuh. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *J. Geodesy*, 2007, 81(10):679–683.
- J. Böhm, J. Kouba, and H. Schuh. Forecast Vienna mapping functions 1 for real-time analysis of space geodetic observations. *J. Geodesy*, 2009, 83(5).
- J. Böhm, A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh. Global mapping function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33:L07304.
- Businger, S., S. R. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. A. Anthes, C. Rocken, R. H. Ware, M. Exner, T. Van Hove, and F. S. Solheim. The Promise of GPS in Atmospheric Monitoring, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77, 5–18.
- Dousa J, Vaclavovic P. Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Advances in Space Research*. 2014, Vol. 53, No 9, pp 1347–1358.
- Herring, T., King, R. W., Floyd, M. A., McClusky, S. C. *GAMIT Reference Manual – GPS Analysis at MIT – Release 10.6*, Dep. of Earth, Atm. and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2015.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E. *GNSS: Global Navigation Satellite Systems: GPS, GIONASS, Galileo, and More*, ISBN-10: 3211730125, Springer, Wien, 2008.
- Kuo, Y., Y. Guo, and E.R. Westwater. Assimilation of Precipitable Water Vapor Measurements into a Mesoscale Numerical Model, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121, 1215–1238.
- A. Niell. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(B2):3227–3246.
- Rocken, C., R. H. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, and M. G. Bevis. Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System, *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20, 2631–2634.
- Saastamoinen, J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, *The use of artificial satellites for geodesy*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 1972, 15, 247–251.
- Seco, A., Ramírez, F., Serna, E., Prieto, E., García, R., Moreno, A., Cantera, J. C., Miqueleiz, L., Priego, J. E. Rain pattern analysis and forecast model based on GPS estimated atmospheric water vapor content, *Atmos. Environ.*, 2012, 49, 85–93.
- Seeber, G. N. *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*, ISBN-10: 3110175495, Walter de Gruyter, 2003
- Steigenberger, P., Boehm, J., and Tesmer, V. Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(10):943–951.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D., Hendy, M. Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations, *J. Geophys. Res.*, 1998, 103, 28701–28710, doi:10.1029/98JD02516.
- Vedel H., Huang X.-Y. Impact of ground based GPS data on numerical weather prediction. *J. Met. Soc. Japan*, 2004, 82(1B):459–472.

- Vedel, H., Huang, X. Y., Haase, J., Ge, M., Calais, E. Impact of GPS zenith tropospheric delay data on precipitation forecasts in Mediterranean France and Spain, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31.
- Vedel, H., Mogensen, K. S., and Huang, X. Calculation of zenith delays from meteorological data comparison of NWP model, radiosonde and GPS delays. *Physics and Chemistry of the Earth A*, 2001, 26(6–8):497–502.
- Yan, X., Ducrocq, V., Poli, P., Hakam, M., Jaubert, G., Walpersdorf, A. Impact of GPS zenith delay assimilation on convective scale prediction of Mediterranean heavy rainfall, *J. Geophys. Res.*, 2009, 114, D03104, doi:10.1029/2008JD011036.
- Yuan, L. L., R. A. Anthes, R. H. Ware, C. Rocken, W. D. Bonner, M. G. Bevis, and S. Bissinger. Sensing Climate Change Using Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**, 14925-14937.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 1997, 102, 5005-5018.
- Alberding GNSS Status Software: http://194.42.206.27/cgi-bin/beacon.cgi?mod=show_map&lang.
- Global Forecast System (GFS): <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.
- SES Project: <http://www.meteognss.net/>
- Zablotskyj F. D. *GNSS-meteorologia. Navchalnyy posibnyk* [Meteorology. Textbook]. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013, 96 p.

САВЧУК С. Г., ЗАБЛОЦКИЙ Ф. Д.

Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Львов, Украина, 79013, эл. почта: ssavchuk@polynet.lviv.ua

МОНИТОРИНГ ТРОПОСФЕРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА В ЗАПАДНОЙ ТРАНСГРАНИЧНОЙ ЗОНЕ УКРАИНЫ

Цель. Выявление достоверных оценок зенитных тропосферных задержек (ZTD) по данным GNSS-наблюдений (дистанционный мониторинг тропосферы) на активных референсных станциях западной трансграничной зоны Украины. **Методика.** Важным продуктом, который получают в GNSS-метеорологии, являются зенитные тропосферные задержки, а их непосредственная связь с интегрированным /осаждаемым водяным паром позволяет получать оперативную информацию для числового прогнозирования погоды. Одной из основных проблем в процессе использования таких результатов является достоверность полученных оценок величин интегрированного/осаждаемого водяного пара из анализа GNSS-данных. Соответственно, стратегия анализа GNSS-данных должна обеспечивать такие оценки ZTD, которые соответствуют требованиям GNSS-метеорологии. Определение величин ZTD традиционно базировалось на анализе данных в режиме пакетного сетевого решения с использованием метода наименьших квадратов и способа наблюдений, опирающихся на создание двойных разностей (DD) в режиме, близком к реальному времени (NRT). Абсолютный метод точного позиционирования (PPP), для реализации которого был необходим доступ к точным поправкам спутниковых часов вместе с прогнозированными орбитами, практически не использовался. С точки зрения стратегии анализа GNSS-данных метод PPP является популярным благодаря созданию в режиме реального времени (RT) Международной службой GNSS (IGS) и другими организациями таких продуктов, как точные орбиты спутников и поправок часов. С целью сравнения были отобраны данные ZTD, полученные программными пакетами NRT-DD Bernese GNSS software и RT-PPP ALBERDING GNSS STATUS Software за февраль–март 2016 года. Критерием отбора было максимальное количество данных на каждой станции наблюдений (2880 значений) в указанный период. Всего для сравнения было выбрано 17 GNSS-станций. Для каждой станции были построены графики изменения ZTD за указанный период наблюдений, а также вычислено часовое изменение разностей ZTD, полученное двумя программными пакетами. **Результаты.** По результатам сравнений выявлено, что использование разных стратегий обработки GNSS-данных не влияет существенно на точность определения зенитных тропосферных задержек. Полученные оценки 1–2 см удовлетворяют полностью требованиям для получения указанного продукта в метеорологии и климатологии. **Научная новизна.** Проведенные исследования двух принципиально различных стратегий обработки GNSS-данных позволили выявить реальную точность определения зенитных тропосферных задержек, которые разрешают считать полученные результаты более достоверными в сравнении с результатами, полученными другими исследователями. **Практическая значимость.** Полученные оценочные величины ZTD с региональной сети перманентных GNSS-станций западной трансграничной зоны Украины могут стать ценной информацией в задачах числового прогнозирования погоды.

Ключевые слова: GNSS-метеорология; зенитная тропосферная задержка; водяной пар; числовое прогнозирование погоды.

S. SAVCHUK, F. ZABLITSKYI

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, тел. +38(032)2582181, e-mail ssavchuk@polynet.lviv.ua

MONITORING OF THE TROPOSPHERIC WATER VAPOR
IN THE WESTERN CROSS-BORDER ZONE OF UKRAINE

Aim. Identifying of reliable estimates of zenith tropospheric delay (ZTD) by the data of GNSS observations (remote monitoring of the troposphere) on the active reference stations of the west cross-border zone of Ukraine. **Methods.** The zenith tropospheric delays, and their direct link with integrated / precipitated water vapor are important products that are obtained in GNSS-meteorology. They allow to get the rapid information for numerical weather prediction. The reliability of the estimates of the integrated / precipitated water vapor from the GNSS data analysis is one of the main problems in the use of these results. Accordingly, strategy of analysis GNSS data should provide such ZTD estimations, which meet requirements of GNSS-meteorology. The determination of ZTD values was grounded traditionally on data analysis in the mode of packet network solution using least square method and observation technique which based on double differencing (DD) in the NRT mode. The absolute method of PPP which required precise corrections for satellite clocks together with predicted orbits, wasn't applied practically. From point of view of analysis strategy of GNSS data the PPP method is popular thanks to creating by the International GNSS Service (IGS) and others institutions of a such products as accurate satellite orbits and clock corrections in RT mode. For comparing the ZTD data, obtained by the packages NRT-DD Bernese GNSS software and RT-PPP ALBERDING GNSS STATUS Software were selected for the February-March of 2016. The maximum amount of data at each observation station (2880 values) was by the selection criterion in this period. 17 GNSS stations were selected for comparison. The graphs of ZTD change over this period have been constructed for each station, as well as the hour changes of ZTD differences obtained by two packages. **Results.** Comparison results established the following: the use of different processing strategies GNSS data not significantly affect on the accuracy of zenith tropospheric delay. The obtained estimates of 1-2 cm fully satisfy the requirements for the indicated product in meteorology and climatology. **Scientific novelty.** The realized studies of two fundamentally different processing strategies GNSS data revealed the real accuracy of the zenith tropospheric delay, which allows to consider the results more reliable in comparison with results obtained by other researchers. **Practical significance.** Estimated values of ZTD obtained from a regional network of permanent GNSS stations of the western cross-border zone of Ukraine can become a valuable information in problems of numerical weather prediction.

Key words: GNSS meteorology; zenith tropospheric delay; water vapor; numerical weather prediction.

Надійшла 23.05.2016 р.