



GNSS Network. – www.net.tnt-tpi.com

15. GNSS-мережа Польщі – ASG-EUPOS. – www.asgeupos.pl

16. GNSS-мережа Словаччини – SKPOS. – www.skpos.gku.sk

17. GNSS-мережа Румунії – ROMPOS. – www.rompos.ro

18. GNSS-мережа Угорщини – GNSSnet.hu. – www.gnssnet.hu

19. GNSS-мережа Молдови – MOLDPOS. – www.moldpos.md

20. Guidelines for New and Existing Continuously Operating Reference Stations (CORS) // National Geodetic Survey, National Ocean Survey, NOAA. – January 2013, Silver Spring, MD 20910. – http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/CORS_guidelines.pdf

CORS_guidelines.pdf

21. Pierre DESJARDINS / Multipurpose Nation-wide Real-Time Reference Station Network – From Geodetic Control to Precise Positioning and Much More... // FIG Working Week 2011. – http://www.fig.net/pub/fig2011/papers/ts02a/ts02a_desjardins_5377.pdf

22. Schrock G. The Birthplace of VRS // The American Surveyor Magazine Online. – Vol. 7. – No 3. – <http://www.amerisurv.com/content/view/7259/153/>

23. Standards and Guidelines EUPOS. – <http://www.eupos.org>

24. Solar Cycle Progression // Space Weather Prediction Center, NOAA. – Updated April 2011. – <http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle>

Надійшла 08.05.13

* * *

УДК 528.3

Н. І. Каблак, С. Г. Савчук

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ АТМОСФЕРИ ТА ЇЇ ВПЛИВУ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ У МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ UA-EUPOS/ZAKPOS

Изложена сущность технологии построения изоповерхностей тропосферных задержек в режиме реального времени наблюдений в сети активных референционных станций UA-EUPOS / ZAKPOS. Доказано, что из-за пространственно-временной нестабильности атмосферы при построении изоповерхностей необходимо в координаты роверного приемника вводить значения поправок остаточных некомпенсированных тропосферных задержек.

It is considered the technology of creation of isosurfaces of tropospheric delays on the basis of real-time observations in the network of active reference stations UA-EUPOS/ZAKPOS. It is shown that because of spatio-temporal instability of the atmosphere, when creating the isosurfaces it is necessary to input in the coordinates of a rover receiver the correction for uncompensated residual tropospheric delay.

Постановка проблеми. Поява RTK-технології в процесі розвитку систем точного супутникового позиціонування забезпечило широке впровадження її у різні сфери – навігацію, геодезію, кадастрування тощо. Вона дає змогу добиватися сантиметрового рівня точності визначення координат безпосередньо в ході спостережень у режимі реального часу, у т. ч. й на пунктах мережі активних референційних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS [5,8].

Мережа UA-EUPOS/ZAKPOS з обчислювальним центром у м. Мукачеве (Закарпатська область) пропонує користувачам технологічні послуги RTK з 2008 р. Сервери мережі обробляють дані від 13-ти GNSS-станцій, розташованих на території Західної України, а також від 12-ти станцій своїх партнерів у Польщі, Словаччині, Угорщині, Румунії та Молдові. Мережа покриває територію восьми західних областей України [8-12].

Одною з технічних проблем, яка на сьогодні ще не вирішена при використанні технології RTK, є обмеження на відстані між GNSS-станціями, викликане впливом земної атмосфери.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій. Багатий досвід створення та організації роботи

інфраструктури в режимі реального часу мають деякі країни Європи, США, Австралія. Серед європейських країн у цьому питанні передує Німеччина. Її досягнення фактично стали стандартами у справі функціонування RTK-технологій.

Густота розташування базових станцій у GNSS-мережах насамперед визначається рекомендаціями фірм-виробників обладнання й мережевого програмного забезпечення. В інструктивних документах про налаштування програмного забезпечення, як правило, за замовчуванням, вказується відстань у 100 км між користувачем та найближчою базовою станцією. Проте в основних положеннях стосовно розміщення та експлуатації постійно діючих референційних GNSS-станцій немає конкретних вказівок на відстані між ними та їх взаємне розташування. Вказується лише, що коли відстані між станціями не перевищують 70-80 км, то це може практично гарантувати отримання достовірною результату щодо точності [2,13,14].

У працях [4,6] на основі експериментального дослідження на активній мережі UA-EUPOS/ZAKPOS доведено залежність якості мережевого рішення од відстані між базовими станціями GNSS. Одержані результати свідчать про фактичну придатність алгоритмів моделювання мережевого

© Н. І. Каблак, С. Г. Савчук, 2013



розв'язку на відстанях близько 100 км між базовими станціями та пунктом спостережень.

Теоретичними і практичними питаннями отримання та передавання поправок у реальному часі в Україні займалися і продовжують займатися науковці Харкова, Львова та інших міст. У ході експериментальних досліджень виявлено, що використання даних від активних референційних станцій мережі UA-EUPOS/ZAKPOS для пунктів, розмічених на відстанях понад 100 км, дає задовільні результати для розв'язання геодезичних задач у режимі RTK [7]. Оскільки на території країни відстані між станціями мережі змінюються в межах від 50 до 250 км і більше, зараз все ще залишається актуальною проблема врахування атмосферної затримки проходження сигналу від супутника до спостерігача в реальному часі спостереження.

Постановка завдання. Основна мета дослідження – проаналізувати характер просторово-часової стабільності атмосфери над територією покриття активними референційними станціями, а ще її впливу на точність визначення координат у мережі GNSS-станцій.

Виклад основного матеріалу. Величина тропосферної затримки на конкретний момент часу $\delta\rho_i$ визначається із розв'язку рівняння псевдовідстані після вилучення інших похибок [1]. Поправка $\delta\rho_i$ до псевдовідстані через випадкові зміни в даний момент часу визначається практично без похибки за стан атмосфери, якщо враховуються всі інші похибки вимірювання.

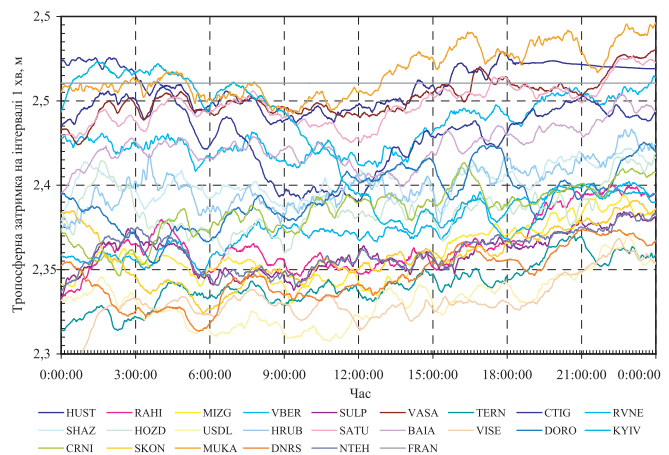
Залежно від просторово-часових змін стану атмосфери на шляху проходження сигналу від супутника до спостерігача референційної станції та від супутника до роверного приймача може виникнути додатковий ефект від некомпенсованої тропосферної затримки, що впливає на точність визначення координат, а особливо на її висотну складову. Все залежатиме головним чином од відстаней "база – ровер".

Ми провели такі експериментальні дослідження. На одній з референційних станцій мережі UA-EUPOS/ZAKPOS здійснили серію визначень координат ближньої до неї точки з використанням технології RTK у двох режимах: 1) з включенням даних по вибраній станції у загальномережевий розв'язок (відстань між об'єктами становить декілька десятків метрів); 2) з виключеною опцією врахування даних по цій станції (відстань між станцією мережі та експериментальною точкою становила близько 100 км).

Зважаючи на конфігурацію мережі, для досліджень було обрано станцію FRAN (Івано-Франківськ). Відстань від неї до найближчих станцій мережі UA-EUPOS/ZAKPOS становить майже 100 км. Було обчислено різниці між координатами референційної станції FRAN та отриманими зі щохвилинних RTK-спостережень координатами на дані моменти часу. Всього було отримано близько 200-от таких різниць координат за чотири сеанси спостережень.

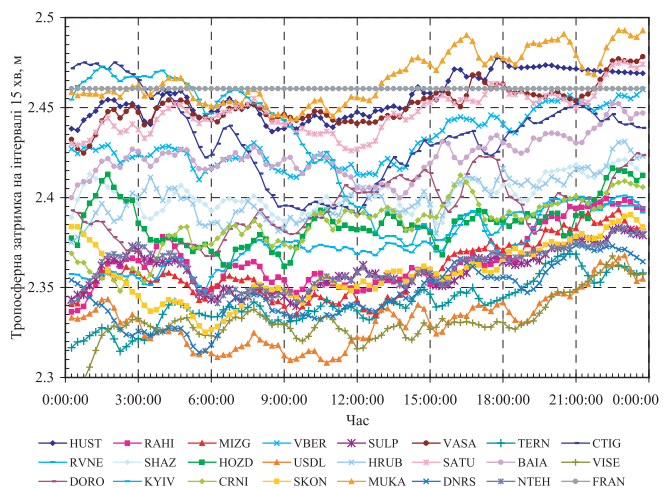
Результати експерименту засвідчили, що при врахуванні всіх можливих впливів тропосферна поправка в 3-D координати для відстані "база – ровер" порядку 100 км може досягати 10 см при проведених GNSS-спостережень у режимі реального часу. При стандартній похибці цього методу в 2-5 см вона може бути недопустимою у багатьох застосуваннях та вимагати уведення відповідних поправок [3]. Тому слід продовжувати дослідження з метою покращення моделювання тропосферних затримок у мережі активних референційних станцій.

Щоб оцінити вплив атмосфери на точність визначення координат на території покриття спостережень мережею активних референційних станцій в реальному часі, було використано 845 часових вимірювань тропосферної затримки на 19-ти станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS (мал. 1).

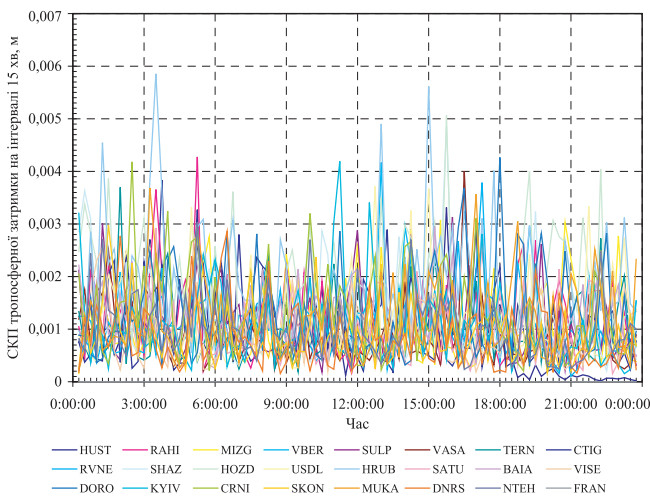


Мал. 1. Криві тропосферних затримок на станціях мережі з кроком 1 хв (06.07.2012 р.)

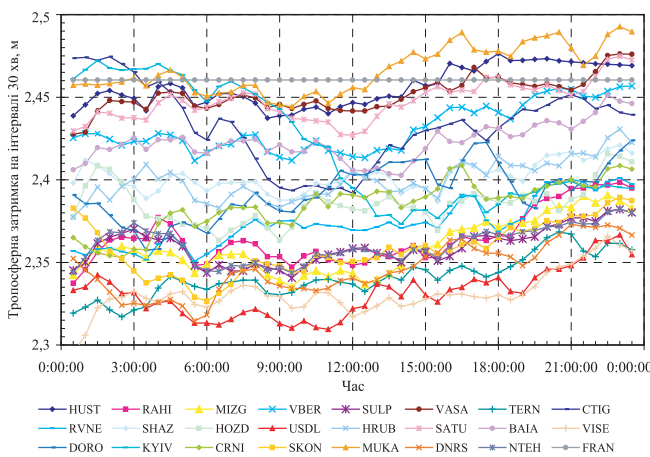
Для зменшення кількості вимірювань щохвилинні значення тропосферних затримок було усереднено на п'ятнадцятихвилинному, півгодинному та годинному інтервалах для кожної з 19-ти активних референційних GNSS-станцій мережі.



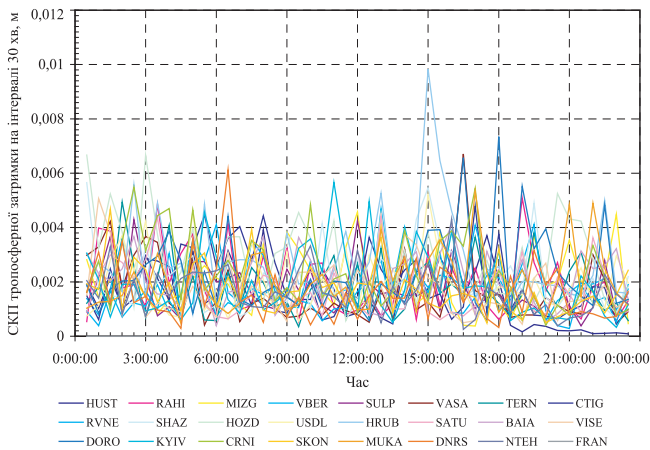
Мал. 2. Усереднені значення тропосферних затримок на інтервалі 15 хв (06.07.2012 р.)



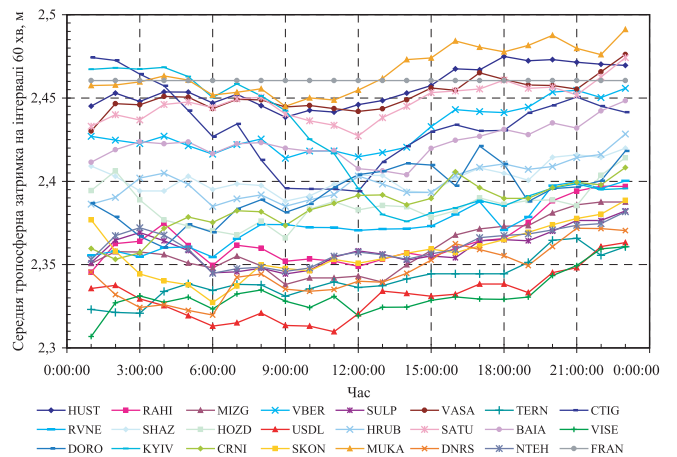
Мал. 3. Середньоквадратичні відхилення усереднення на інтервалі 15 хв (06.07.2012 р.)



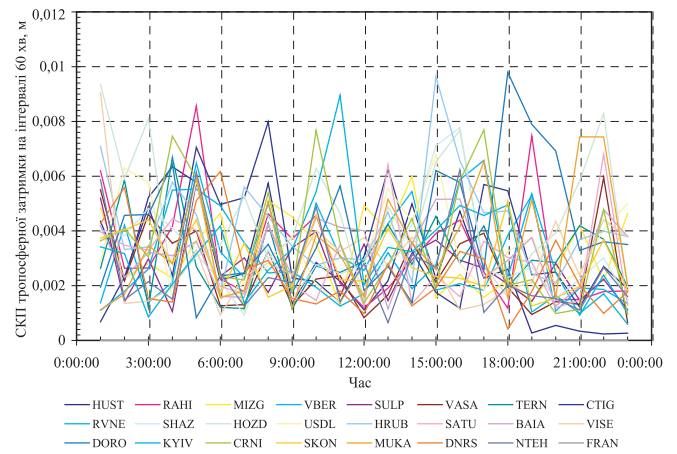
Мал. 4. Усереднені значення тропосферних затримок на інтервалі 30 хв (06.07.2012 р.)



Мал. 5. Середньоквадратичні відхилення усереднення на інтервалі 30 хв (06.07.2012 р.)



Мал. 6. Усереднені значення тропосферних затримок на інтервалі 60 хв (06.07.2012 р.)



Мал. 7. Середньоквадратичні відхилення усереднення на інтервалі 60 хв (06.07.2012 р.)

Точність визначення тропосферної затримки в RTK-режимі становить близько 2 см. Тому при усередненні приймали, що середньоквадратична похибка не перевищує 0,5 см. Як видно з дослідження, усереднення тропосферних затримок можна проводити з кроком 15 або 30 хв. Після цього для кожного усередненого значення було проведено інтерполяцію тропосферних затримок на точку розміщення роверного приймача. Спочатку обрали референцну станцію, що знаходиться найближче до уявного роверного приймача, і позначили її умовно як опорну. Потім для мінімальної кількості (5-6) активних референцних GNSS-станцій, розташованих поблизу роверного приймача, було складено систему рівнянь:

$$\frac{\delta\rho_i}{\delta\rho_{оп}} = c_0 + c_1(B_{оп} - B_i) + c_2(L_{оп} - L_i) + c_3(H_{оп} - H_i); \quad (1)$$

$$\frac{\delta\rho_i}{\delta\rho_{оп}} = c_0 + c_1(B_{оп} - B_i) + c_2(L_{оп} - L_i) + c_3(H_{оп} - H_i) + c_4(H_{оп} - H_i)^2, \quad (2)$$



де $\delta\rho_i$, B_i , L_i , H_i – зенітна тропосферна затримка та координати i -ї референційної станції; $\delta\rho_{оп}$, $B_{оп}$, $L_{оп}$, $H_{оп}$ – зенітна тропосферна затримка та координати опорної референційної станції. Для кожного моменту часу методом найменших квадратів обчислювались коефіцієнти c_1 , c_2 , c_3 , c_4 . Кількість рівнянь обмежувалась кількістю вибраних активних референційних станцій у мережі.

Одним із важливих аспектів дослідження параметрів атмосфери було визначення проміжку часу відносної стійкості атмосфери – τ_{const} . Даний проміжок – це час, протягом якого зміна основних параметрів атмосфери відбувалася спонтанно і не спостерігалися систематичні тренди. Значення тропосферних затримок по 19-ти перманентних GNSS-станціях дали можливість оцінити τ_{const} як за внутрішньою збіжністю тропосферних затримок на кожній станції, так і за стійкістю поля затримок відносно апроксимаційної поверхні, що визначається на основі методу Шепарта – Александрова.

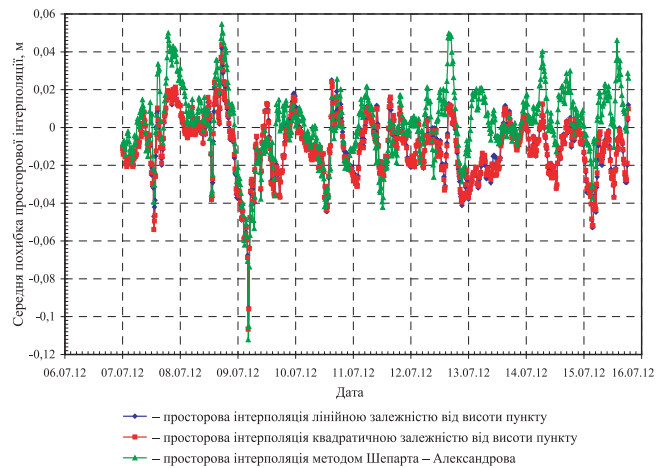
Як зазначалося вище, для виявлення масштабу впливу атмосфери на точність визначення координат пунктів у реальному часі було використано 845 вимірювань тропосферної затримки на 19-ти станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS. Після цього для кожного усередненого значення провели інтерполяцію тропосферних затримок на точку розміщення роверного приймача трьома методами: методом Шепарта – Александрова, лінійною залежністю (1) через зміну геодезичних координат та залежністю (2) із врахуванням квадрата висоти.

Усі розрахунки виконувалися з нормуванням аргументів і функції. В даному випадку функція – це тропосферна затримка, аргументи – широта, довгота і висота. За роверний приймач було взято станцію Міжгір'я (MIZG) (усього 15 відліків), а в другому – одержані для інших 19-ти станцій (усього 285 відліків). Результати оцінювання величини похибки просторово-часової інтерполяції різними методами за 9 діб (з 06 по 17.07.2012 р.) подано на малюнках 8-11.

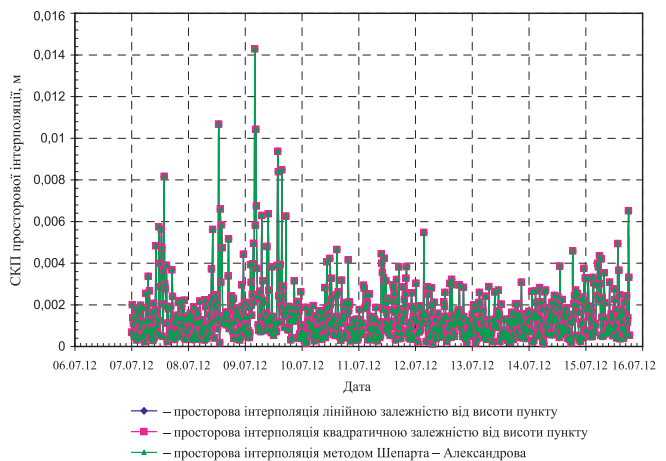
Результати виконаних досліджень показали, що середнє значення різниць тропосферних затримок становить порядку 2 см із середньоквадратичним відхиленням 0,2 см.

За цими результатами і на основі даних GNSS-спостережень було розроблено технологію визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті та на будь-якій висоті над пунктами мережі станцій UA-EUPOS/ZAKPOS.

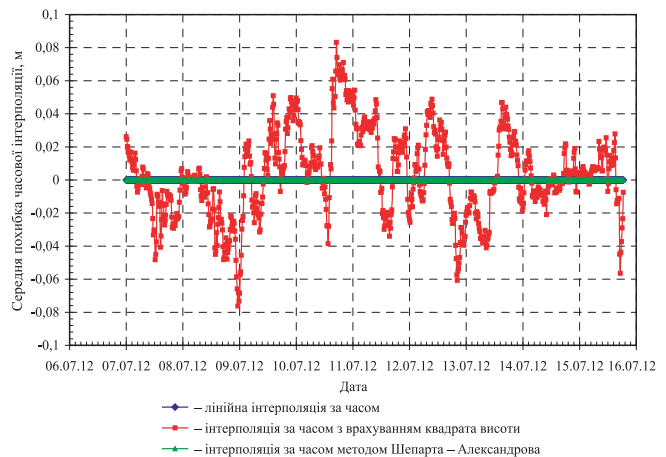
Щоб дослідити стан атмосфери в реальному часі спостережень, було побудовано ізоповхні



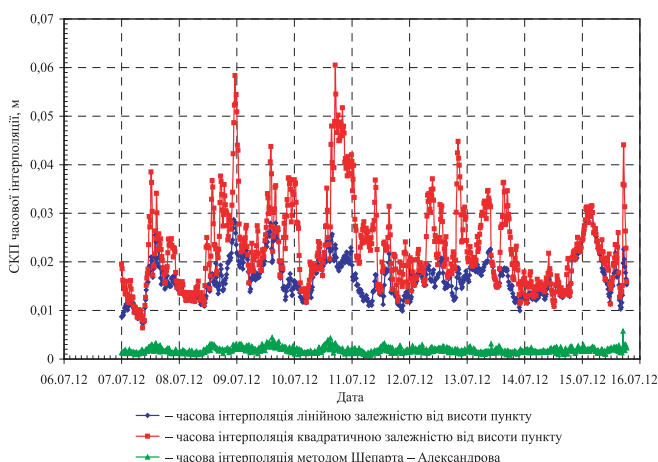
Мал. 8. Похибки просторової інтерполяції тропосферних затримок, виконаної на середину липня 2012 р.



Мал. 9. Середньоквадратична похибка просторової інтерполяції тропосферних затримок



Мал. 10. Похибка часової інтерполяції тропосферних затримок

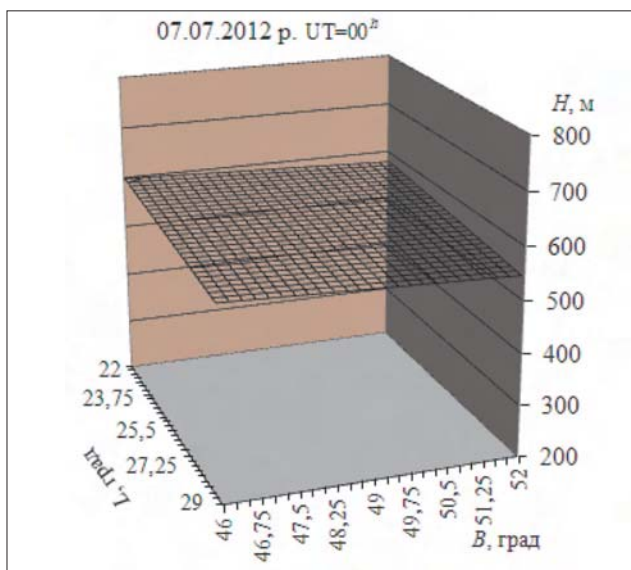


Мал. 11. Середньоквадратична похибка інтерполяції за часом тропосферних затримок

тропосферних затримок. Для цього обрали референцну станцію, для якої значення тропосферної затримки було мінімальним на конкретний момент часу, тобто, коли $\delta\rho_i = \delta\rho_{\min} = \delta\rho_{\text{оп}}$. Геодезичні координати станції (широта, довгота і висота) позначили як $B_{\text{оп}}, L_{\text{оп}}, H_{\text{оп}}$ та умовно назвали її опорною станцією. Склали систему рівнянь (2).

Для побудови ізоповерхонь розбили площину, де розташована опорна референцна станція (висота площини дорівнює висоті опорної станції $H_{\text{оп}}$), на сітку зі сторонами $\Delta B, \Delta L$. Прийняли, що довжина сторін дорівнює $0,25^\circ$. У вершинах сітки квадратів визначили $B_r = B^* \pm m\Delta B, L_r = L^* \pm n\Delta L$; де $n, m = 1, 2, 3, \dots, G$; G – кількість квадратів. Знаючи B_r, L_r , знаходимо висоту H_r , на якій $\delta\rho_r = \delta\rho_{\min} = \delta\rho_{\text{оп}}$.

По висотах H_r спроєктували ізоповерхню із $\delta\rho_{\min}$. На мал. 12 показано ізоповерхню з мінімальним значенням тропосферної затримки: $\delta\rho_{\min} = 2,323$ м станом на 07.07.2012, UT=00^h. Перепад висот на цю дату знаходиться в межах від



Мал. 12. Ізоповерхня для мінімального значення тропосферної затримки

504 до 572 м. Тому напрошується висновок про достатньо високу стабільність атмосфери на конкретний момент часу на визначених висотах над мережею UA-EUPOS/ZAKPOS.

Для побудови інших ізоповерхонь вибираємо крок зміни тропосферної затримки на опорній станції $\Delta(\delta\rho) = 0,1$ м. Позначимо: $\delta\rho_{1H} = \delta\rho_{\text{оп}} + \Delta(\delta\rho)$, (тобто вниз (н) і вверх (в) від поверхні опорної станції). Розбиття по висоті проводимо від висоти опорної референцної станції вверх і вниз до потрібної висоти атмосфери.

Побудувавши ізоповерхні тропосферних затримок на кожен момент часу спостережень, можна визначити області стабільного стану атмосфери.

Якщо перепади висот з однаковим значенням у мережі активних референцних станцій (висоти різних точок сітки ізоповерхні) значні й змінюються з часом, то це свідчить про нестабільність атмосфери і необхідність врахування некомпенсованої тропосферної затримки в координати X, Y, Z , яку знаходять інтерполяцією на точку розміщення роверної станції (приймача):

$$\begin{aligned} X &= (N + H' + \Delta(\delta\rho)) \cos B \cos L; \\ Y &= (N + H' + \Delta(\delta\rho)) \cos B \sin L; \\ Z &= \left(\frac{b^2}{a^2} N + H' + \Delta(\delta\rho) \right) \sin B, \end{aligned} \quad (3)$$

де H' – еліпсоїдална координата, що її отримує роверна станція від референцної; $\Delta(\delta\rho)$ – різниця між значенням $\delta\rho_i$ для найближчої до роверної референцної станції та інтерпольованим значенням тропосферної затримки на точку розміщення станції $\delta\rho$; $N = a^2 / \sqrt{a^2 \cos^2 B + b^2 \sin^2 B}$ – радіус кривини в першому вертикалі; a, b – півосі референчного еліпсоїда в метрах.

Висновки. Розроблено технологію побудови ізоповерхонь тропосферних затримок у режимі реального часу спостережень у мережі активних референцних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS. Через велику кількість вимірювань (щохвилини) досліджено можливість усереднення тропосферних затримок у межах похибки. Виявлено, що за 15 хв середньоквадратична похибка досягає значення порядку 3 мм. Для досліджень просторово-часової стабільності атмосфери достатньо використовувати усереднені на 15-хвилинному інтервалі тропосферні затримки. Доведено таке: при просторово-часовій нестабільності атмосфери, яка визначається із побудованих ізоповерхонь, необхідно вводити в координати роверного приймача значення залишкової некомпенсованої тропосферної затримки.

Література

1. Гофманн-Велленгоф, Б. Глобальна система визначення місцеположення (GPS): теорія і практика / Б. Гофманн-



Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз. – К.: Наук. думка, 1996. – 376 с.

2. *Евстафьев, О.* Наземная инфраструктура для точного позиционирования / О. Евстафьев // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 21-24; № 2. – С. 24-28; № 3. – С. 15-18.

3. *Каблак, Н.І.* Оцінка впливу атмосфери у мережі активних референсних GNSS-станцій / Н.І. Каблак // Геодез., картогр. і аерофотознім. – 2010. – Вип. 73. – С. 17-21.

4. *Ланьо, О.В.* Дослідження точності RTK-вимірювань у мережі UA-EUPOS/ZAKPOS / О.В. Ланьо, С.Г. Савчук // Геодез., картогр. і аерофотознім. – 2012. – Вип. 75. – С. 8-13.

5. *Савчук, С.* Перша мережа активних референсних станцій в Україні ZAKPOS. Етапи становлення та початок діяльності / С. Савчук, І. Проданець, І. Калинич // Геопрофиль. – 2010. – № 1. – С. 16-23.

6. *Савчук, С.Г.* Аналіз якості мережевого розв'язку в активних GNSS-мережах / С.Г. Савчук, О.В. Ланьо // Геодез., картогр. і аерофотознім. – 2011. – Вип. 74. – С. 23-29.

7. *Савчук, С.* Дослідження точності визначення координат в активних референсних станціях UA-EUPOS/ZAK-

POS на території Рівненської області / С. Савчук, А. Охрімчук // Сучас. досягн. геодез. науки та вир-ва: зб. наук. пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – Л.: Вид-во Львівської політехніки, 2011. – Вип. I. – С. 73-76.

Інтернет-джерела

8. *GNSS-мережа* Західної України – UA-EUPOS/ZAKPOS. – www.zakpos.zakgeo.com.ua

9. *GNSS-мережа* Польщі – ASG-EUPOS. – www.asgeu-pos.pl

10. *GNSS-мережа* Словаччини – SKPOS. – www.skpos.gku.sk

11. *GNSS-мережа* Румунії – ROMPOS. – www.rompos.ro

12. *GNSS-мережа* Угорщини – GNSSnet.hu. – www.gnssnet.hu

13. *EPN* – Європейська перманентна мережа. – <http://www.epncb.oma.be/>

14. *Standards and Guidelines EUPOS*. – <http://www.eu-pos.org>

Надійшла 08.04.13

* * *

КАЛЕНДАР ПОДІЙ

Назва заходу	Дата і місце проведення	Веб-сайт (контактна адреса)
Міжгалузевий геоінформаційний форум	2-5 липня Зальцбург, Австрія	http://www.gi-forum.org/
Міжнародна конференція користувачів продуктів ESRI	8-12 липня Сан-Дієго, США	http://www.esri.com/events/user-conference
Міжнародний симпозіум з ГІС та ДЗЗ	21-26 липня Мельбурн, Австралія	http://www.igarss2013.org/
26-та Міжнародна картографічна конференція Міжнародної картографічної асоціації	25-30 серпня Дрезден, Німеччина	http://www.icc2013.org
Міжнародний симпозіум Digital Earth (Електронна Земля)	26-29 серпня Кучінг, Малайзія	http://isde2013kuching.com/
IV Конгрес EUGEO – Асоціації географічних товариств Європи	5-7 вересня Рим, Італія	http://www.eugeo2013.com/
15-й Міжнародний конгрес ISM (Міжнародної маркшейдерської асоціації)	16-20 вересня Аахен, Німеччина	http://www.ism-germany-2013.de
Конференція і торгова виставка "Intergeo"	8-10 жовтня Ессен, Німеччина	http://www.geospatialworldforum.org/
Франкфуртський книжковий ярмарок	9-13 жовтня Франкфурт, Німеччина	http://www.buchmesse.de/en/
10-та Міжнародна промислова виставка "GeoForm+'2013"	15-17 жовтня Москва, Росія	http://www.geoexpo.ru/home/default.aspx