

ВПЛИВ АБСОЛЮТНОЇ ВОЛОГОСТІ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПУНКТІВ GPS-ПРИЙМАЧАМИ

Мета. Дослідити вплив абсолютної вологості на точність визначення положення пунктів супутникових геодезичних мереж під час спостереження різної тривалості GPS-приймачами. **Методика.** Вихідними даними для дослідження послужили результати спостережень різної тривалості протягом 50 діб з квітня по жовтень місяць на 17 перманентних станціях Франції та 8 станціях Швейцарії. З цих спостережень сформовано чотири мережі з різною кількістю пунктів (від 8 до 5) та довжинами векторів (середня довжина сторін змінюється від 48,6 км до 5,1 км). Визначено значення абсолютної вологості, використовуючи середні значення температури повітря, атмосферного тиску та відносної вологості, отриманими за показниками з 6 по 22 год. Підібрані такі дні, коли значення абсолютної вологості, суттєво відрізнялися, тобто були найменшими та найбільшими. Опрацювання спостережень виконувалось програмним забезпеченням Trimble Business Center, змінюючи тривалість спостережень (4, 2, 1 год). Загалом нами опрацьовано 1200 сеансів. Порівнявши значення істинних та визначених за результатами спостережень планових координат пунктів мереж, отримані середні квадратичні помилки положення пунктів. **Результати.** Аналіз отриманих значень середніх квадратичних помилок положення пунктів, отриманих за результатами спостережень, показав що спостерігається тенденція погіршення точності визначення положення пунктів мереж за зростання абсолютної вологості. Порівнювалися значення СКП, отримані за найменших значень абсолютної вологості та найбільших для всіх мереж та різній тривалості спостережень. Таким чином, за зміни абсолютної вологості від $7,0 \text{ г/м}^3$ до $13,8 \text{ г/м}^3$ та тривалості спостережень 4 год, отримане середнє значення СКП зросло у 1,6 рази (від 4,4 мм до 7,0 мм), за тривалості сеансів 2 год значення СКП зросло у 1,8 рази (від 4,7 мм до 8,3 мм), а для тривалості 1 год – у 2,1 рази (від 6,1 мм до 13,0 мм). **Наукова новизна та практична значущість.** Середовище поширення супутникових сигналів і досі залишається одним з основних джерел помилок, зокрема тропосфера, у якій по суті «формується» погода. Хоча сьогодні більше увагу акцентують на прогнозуванні погоди використовуючи супутникові навігаційні системи, але існує і зворотній зв'язок. У дослідженні запропоновано враховувати метеорологічні умови, зокрема абсолютну вологість як спосіб зменшення впливу зовнішнього середовища на точність GPS-вимірювань, тобто підвищити їхню якість. Одержані результати проведених досліджень є досить достовірними, оскільки використано значну кількість даних, вони дають змогу рекомендувати вибирати такі дні для спостережень, коли значення вологості є мінімальними (не більшими ніж 12 г/м^3). З практичного погляду – це можливість за відомими метеопараметрами, отриманими з прогнозу погоди, встановлювати доцільність виконання спостережень.

Ключові слова: GPS; абсолютна вологість; тривалість сеансів спостережень; точність положення пунктів.

Вступ

Супутникові технології широко використовуються в геодезії та навігації. Незважаючи на їхню оперативність та всепогодність, вони можуть забезпечувати досить високу точність отримуваних результатів. Ця точність, однак, регламентується цілою низкою похибок, величину яких або зменшують, або повністю усувають. Джерела помилок, які впливають на результати ГНСС-вимірювань можна поділити на три групи, а саме на пов'язані безпосередньо із: супутниками (неточність ходу годинника, зсув антени та зміна її фазового центру);

середовищем поширення (вплив тропосфери та іоносфери, багатошляховість); приймачем сигналів (неточність годинника та зміни положення фазового центру антени). Багато провідних вчених вважають вплив тропосфери одним із основних джерел похибок під час ГНСС-спостережень [Азизов та ін., 1997; Хуторова та ін, 2010; Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, Collins, 1994; Mendes, Langley, 1998]. На розповсюдження в тропосфері (яку називають також нейтральним шаром атмосфери) електромагнітних коливань, які застосовують в ГНСС, суттєвий вплив мають метеорологічні параметри: температура,

вологість і атмосферний тиск [Антонович, Фролова, 2003]. А точніше – затримка радіосигналу залежить передовсім від вмісту водяної пари (один із вирішальних факторів, що впливає на формування погоди), її просторово-часового розподілу та в меншій мірі від приземного значення температури повітря [Вахнин, 2012; Иванов та ін., 2012; Коворотный та ін., 2014].

Сьогодні досить мало приділяється увага такому питанню, як вплив метеорологічних параметрів на точність ГНСС-вимірювань, бо вважається, що спостереження можна виконувати за будь-якої погоди [Заблоцький, 2013]. Активніше вивчається питання використання ГНСС-технологій для досліджень погодних і кліматичних процесів, які спрямовані на поліпшення прогнозування погоди [Заблоцький та ін., 2011; Каблак, 2009; Каблак, 2011; Devis et al., 1992; Schueler, 2001]. З іншого боку, якщо дослідження клімату і метеорології можуть значною мірою опиратися на ГНСС-вимірювання, то можна поставити і зворотну задачу. Так як, зміна атмосферного тиску вздовж траєкторії сигналу супутника найменше змінює показник заломлення і швидкість цього сигналу, дещо більший вплив має температура повітря і найбільше – зміни пружності водяної пари. Відомо, що абсолютна вологість повітря – густина водяної пари в повітрі; практично – кількість водяної пари в грамах в 1 м³ повітря за даної температури є чисельно близькою до пружності водяної пари

[Вікіпедія – вільна енциклопедія]. Тому, основна увага в нашому дослідженні приділяється саме з'ясуванню впливу абсолютної вологості на точність визначення положення пунктів за відносними супутниковими спостереженнями.

Мета

Метою проведеного дослідження є виявлення впливу абсолютної вологості на точність визначення положення пунктів супутникових мереж за різної тривалості спостережень GPS-приймачами.

Методика

Нами проведені дослідження, в яких використано результати спостережень на перманентних станціях, що розташовані на території Швейцарії і Франції. Дані взяті з <http://www.swipos.ch> та <http://rgp.ign.fr>, де також наводяться просторові координати цих станцій, за якими обчислені їх планові координати в проекції Гауса-Крюгера. Вони прийняті за істинні, з ними порівнювались координати пунктів врівноважених супутникових мереж, визначені зі спостережень різної тривалості.

Сформовано чотири мережі, схеми яких представлені на рис. 1. Перша з них складається з 8-ми перманентних станцій та 17-ти векторів з довжинами від 32,9 до 74,2 км, а середнє значення довжини вектора – 48,6 км. Друга мережа складається з 7-ми станцій та 14-ти

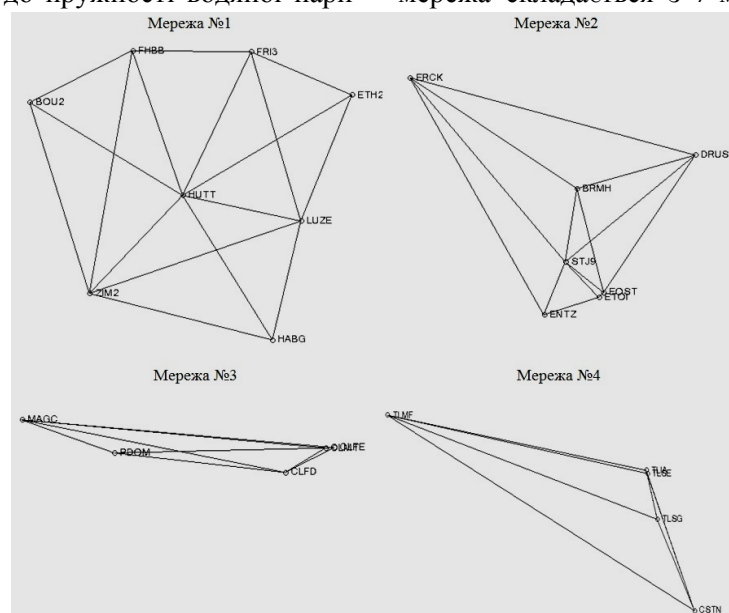


Рис. 1. Схеми мереж.

векторів, довжини яких змінюються від 8,6 до 46,7 км (середнє значення довжини векторів 20,2 км). Третя – з 5-ти перманентних станцій та 9 векторів з довжинами від 0,5 до 20,9 км

Опрацювання результатів спостережень за однаковою методикою виконано програмним забезпеченням Trimble Business Center. При цьому використовувалися точні та бортові ефемериди, а кут відсікання встановили рівним 15°. Дискретність сигналу становить 30 секунд. Варто зауважити, що також аналізувався стан іоносфери, виконувалася перевірка якості отриманих результатів спостережень (необхідну інформацію отримували з <http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline>), аналізувався параметр GDOP.

Зі спостережень односистемними мультисистемними приймачами сформовано сеанси різної тривалості, а саме 4, 2 та 1 години, використані результати вимірювань, проведених вдень. Так, для кожної мережі отримано по вісім сеансів тривалістю 4, 2 і 1 год, загалом ми отримали 1200 сеансів.

Крім того, визначені значення абсолютної вологості використовуючи середні значення температури повітря, атмосферного тиску та відносної вологості за показниками з 6 по 22 год за певний проміжок часу. Ці значення були взяті з <http://www.eurometeo.com>. Для мережі №1 визначена абсолютна вологість за два місяці липень та серпень 2014 р. та вибрані такі дні, коли ці значення були найбільшими та найменшими. Отже, вибрано сім днів, коли абсолютна вологість змінювалася від 13,7 до 16,3 г/м³ та сім днів, коли ці значення коливалися в межах від 8,7 до 11,1 г/м³. Для мережі № 2 вибрано п'ять днів, а саме: по два дні в серпні та вересні 2016 р. і один день в жовтні цього ж року, коли абсолютна вологість

(середнє значення довжини векторів 11,0 км). І четверта – з 5-ти перманентних станцій та 10 векторів з довжинами від 0,9 до 11,4 км (середнє значення довжини векторів 5,1 км). була рівною 16,6, 14,2, 10,6, 11,1 та 11,8 г/м³. А також п'ять днів: три дні в жовтні 2016 р. та два дні в січні 2017 р., коли ці значення були рівними 6,3, 6,4, 6,6, 2,6 та 2,9 г/м³. Для мережі № 3 проаналізовані метеопараметри з квітня по червень 2017 р. Визначена абсолютна вологість та вибрано сім днів, коли значення були рівними 12,9, 13,8, 13,9, 14,0, 14,2, 14,9, 15,6 г/м³ і сім днів, коли ці значення були рівними 4,5, 5,1, 5,7 6,2, 6,5, 6,6 та 8,4 г/м³. Для мережі № 4 визначено як змінювалася абсолютна вологість у квітні, травні та червні 2017 р. та підібрано по шість днів, коли абсолютна вологість була рівною 14,6, 14,5, 13,0, 12,8, 11,3 11,2 г/м³ та 4,5, 4,7, 5,2, 6,3, 6,3 6,7 г/м³.

Для вказаного вище діапазону зміни значень вологості за всі дні (14 діб) для мережі № 1 – середнє значення буде рівним 12,7 г/м³, аналогічно визначили ці значення для інших мереж. Для мережі № 2 воно буде рівним 9,6 г/м³, для мережі № 3 – 10,1 г/м³ і для мережі №4 – 9,6 г/м³. Різниця між найбільшим та найменшим значеннями абсолютної вологості для мережі № 1 становить 7,6 г/м³, для мережі № 2 – 14,0 г/м³, для мережі № 3 – 11,1 г/м³, а для останньої – 10,1 г/м³.

За результатами спостережень тривалістю 4, 2 та 1 год для кожної мережі визначені СКП положення пунктів. У таблиці наведені межі їх зміни, тобто найменше та найбільше значення (Δ), а також середні значення. Необхідно зауважити, що в стопчику "в" таблиці вказані результати, отримані за високої абсолютної вологості, тобто вище середнього значення для кожної мережі, а в стопчику "н" – низької.

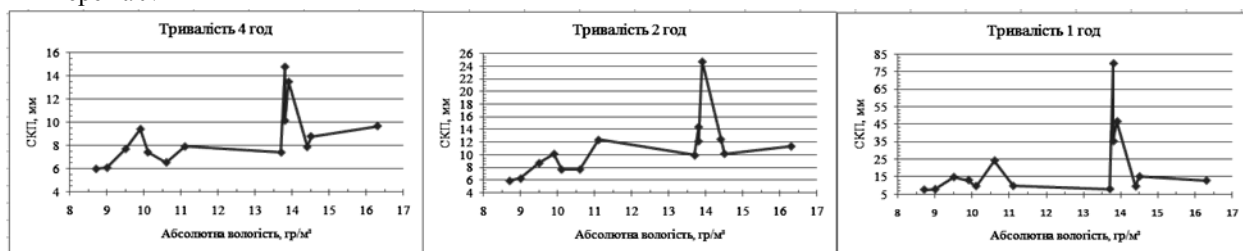
Таблиця

СКП положення пунктів в мм, отримані за низької та високої абсолютної вологості

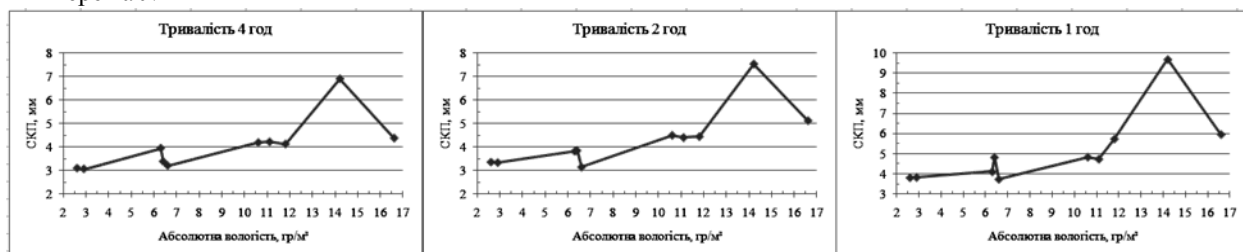
Тривалість сеансу, год		мережа №1		мережа №2		мережа №3		мережа №4	
		в	н	в	н	в	н	в	н
4	Δ	20,2-2,2	12,2-1,6	10,8-1,1	6,3-1,3	15,6-0,5	7,0-0,8	11,5-0,0	7,7-0,0
	сер	10,3	7,3	4,8	3,3	6,3	3,5	5,3	3,7
2	Δ	28,8-4,4	15,2-2,2	12,6-1,2	7,0-1,4	15,8-0,7	7,4-0,6	11,6-0,4	7,5-0,4
	сер	13,6	8,4	5,2	3,5	6,4	3,6	5,5	3,8
1	Δ	84,1-4,8	27,9-2,7	15,1-1,2	7,7-4,1	17,7-0,6	8,4-0,5	13,7-0,0	8,0-0,5
	сер	29,5	12,3	6,2	4,1	6,6	3,8	6,1	4,0

Крім того, визначені середні значення отриманих СКП положення пунктів мереж за кожної тривалості спостережень (4, 2 та 1 год) кожного вибраного дня. Таким чином, для мережі № 1 ми отримали 14 значень СКП за кожної тривалості спостережень (загалом

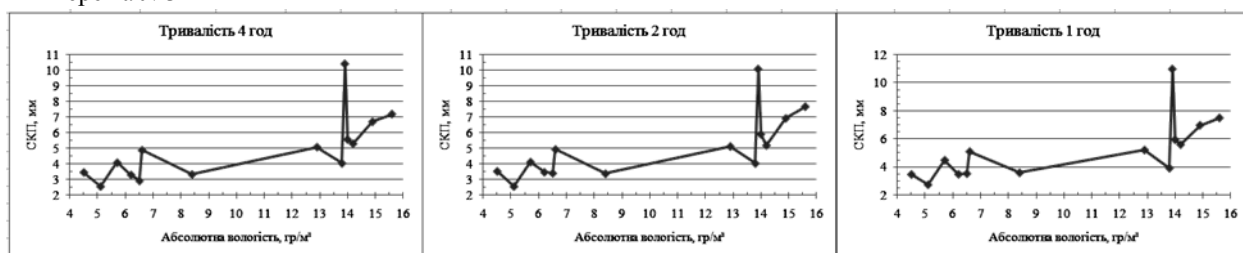
Для всіх мереж за різної тривалості спостережень отримані мінімальні значення СКП визначення положення пунктів для Мережа №1



Мережа №2



Мережа №3



Мережа №4



Рис. 2. Графіки залежності точності положення пунктів від абсолютної вологості при різній тривалості спостережень двочастотними GPS-приймачами

Порівнявши найменше та найбільше значення СКП, отримані за тривалості сеансів 4 години за нижчої ($8,7 \text{ г/м}^3$) та вищої ($13,8 \text{ г/м}^3$) вологості, встановили, що точність погіршується у 2,5 раз, тривалості сеансів 2 год і вологості $8,7 \text{ г/м}^3$ та $13,9 \text{ г/м}^3$ – 4,2 раз, за тривалості 1 год і абсолютній вологості $8,7$

найменших значень абсолютної вологості. Згідно графіку (рис. 2) для мережі № 1 за тривалості спостережень 4 год та абсолютної вологості більшої середнього значення ($12,7 \text{ г/м}^3$) гіршу точність отримано в п'яти випадках з семи, а тривалості сеансів 2 год – в шести випадках, тоді як при тривалості 1 год тільки у чотирьох випадках.

г/м^3 та $13,8 \text{ г/м}^3$ – 10,7 разів. Для мережі № 2 за тривалості спостережень 4 та 2 год і абсолютній вологості більшої середнього значення ($9,6 \text{ г/м}^3$) гіршу точність отримано в усіх випадках, а тривалості сеансів 1 год – в чотирьох випадках з п'яти. Порівнявши найменше та найбільше значення СКП, отримані за нижчої ($6,6 \text{ г/м}^3$) та

вищої ($14,2 \text{ г/м}^3$) вологості, встановили, що точність погіршується у 2,3 раза за тривалості сеансів 4 години, 2,4 раза – 2 год та 2,6 раза – 1 год. Для мережі № 3 згідно графіку (рис.2) за тривалості спостережень 4, 2 та 1 год і абсолютній вологості більшій середнього значення ($10,1 \text{ г/м}^3$) гіршу точність отримано в шести випадках з семи. Порівнявши найменше та найбільше значення СКП, отримані за нижчої ($5,1 \text{ г/м}^3$) та вищої ($13,9 \text{ г/м}^3$) вологості, встановили, що точність погіршується у 4,1 раза за тривалості сеансів 4 години, 3,9 раза – 2 год та 4 раза – 1 год. Для мережі № 4 за тривалості спостережень 4 та 2 год і абсолютній вологості більшій середнього значення ($9,6 \text{ г/м}^3$) гіршу точність отримано в шести випадках з семи, а для тривалості сеансів 1 год – у всіх випадках. Порівнявши найменше та найбільше значення СКП, отримані за тривалості сеансів 4 години за нижчої ($6,3 \text{ г/м}^3$) та вищої ($11,2 \text{ г/м}^3$) вологості, встановили, що точність погіршується у 1,9 раза, тривалості сеансів 2 год і вологості $4,5 \text{ г/м}^3$ та $11,2 \text{ г/м}^3$ – 2 раза за тривалості 1 год і абсолютній вологості $6,3 \text{ г/м}^3$ та $11,2 \text{ г/м}^3$ – 2,2 раза.

Крім того, ми порівняли значення СКП, отримані за найменших значень абсолютної вологості та найбільших для всіх мереж та різній тривалості спостережень. Таким чином, для мережі № 1 за тривалості спостережень 4 год значення СКП, отримане за низької абсолютної вологості є на 47,1% меншим від значення, отриманого для найвищої вологості. За тривалості сеансів 2 год відповідно на 47,8 % меншим, а тривалості 1 год – 34%. Для мережі № 2 за тривалості сеансів 4 год, значення СКП, визначене за найнижчої вологості є тільки на 0,2% меншим від СКП, визначеної за найвищого значення абсолютної вологості. Аналогічно визначені ці величини для тривалості 2 год – 9,7% та 1 год – 23,3%. Для мережі № 3 за тривалості спостережень 4 год це значення становить 41,4%, 2 год – 45,6% та 1 год – 39,8%. І для мережі № 4 аналогічно отримали для тривалості 4 год – 38,2%, 2 год – 43,3%, 1 год – 38,9%.

Наукова новизна та практична значущість

Середовище поширення супутникових сигналів і досі залишається одним з основних

джерел помилок, зокрема тропосфера. У земній тропосфері зосереджено понад 4/5 усієї маси атмосферного повітря й майже вся атмосферна водяна пара, відбуваються основні метеорологічні процеси, тобто по суті «формується» погода. В дослідженні запропоновано враховувати метеорологічні умови, зокрема абсолютну вологість, як спосіб зменшення впливу зовнішнього середовища на точність GPS-вимірювань, тобто підвищити їх якість. Одержані результати проведених досліджень є досить достовірними, оскільки використано значну кількість даних та дають змогу рекомендувати вибирати такі дні для спостережень, коли значення вологості є мінімальними (не більшими 12 г/м^3). З практичного погляду – можливість за відомими метеопараметрами, отриманими з прогнозу погоди, встановлювати доцільність виконання спостережень.

Висновки

Проаналізувавши отримані результати, бачимо що спостерігається тенденція погіршення точності визначення положення пунктів мереж при зростанні абсолютної вологості. За зміни абсолютної вологості від $7,0 \text{ г/м}^3$ до $13,8 \text{ г/м}^3$ та тривалості спостережень 4 год, отримане середнє значення СКП зросло у 1,6 раза (від 4,4 мм до 7,0 мм), за тривалості сеансів 2 год значення СКП зросло у 1,8 раза (від 4,7 мм до 8,3 мм), а для тривалості 1 год – у 2,1 раза (від 6,1 мм до 13,0 мм). Сьогодні більше увагу акцентують на прогнозуванні погоди використовуючи супутникові навігаційні системи, але як бачимо існує і зворотній зв'язок. Отже, за необхідності досягнення більшої точності при визначенні положення пунктів рекомендується враховувати погодні умови, зокрема рівень абсолютної вологості, тобто вибирати такі дні для спостережень, коли значення вологості є мінімальними (не більшими 12 г/м^3).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Абсолютна вологість: [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Абсолютна_вологість_повітря

- Азизов А. А. Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы / А. А. Азизов, К. П. Гайкович, С. С. Кашкаров, М. Б. Черняева // Изв. ВУЗов. – Радиофизика, 1997. – Т. XLI, № 9. – С. 1093–1110.
- Антонович К. М. Совместное использование метеоданных наземных и аэрологических наблюдений при обработке спутниковых измерений / К. М. Антонович, Е. К. Фролова // Вестник СГГА. – 2003. – Вып. 8. – С. 8-13.
- Вахнин А. В. Применение метеорологической информации в навигационных системах ГЛОНАСС/GPS: МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ / Вахнин Антон Вячеславович. – Санкт-Петербург, 2012. – 68 с
- Заблоцкий Ф. Д. ГНСС-метеорологія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 96 с.
- Заблоцкий Ф. Суха і гідростатична складові зенітної тропосферної затримки / Ф. Заблоцкий, Б. Паляниця, Л. Матвієнко, Н. Турчин // Сучас. досягн. геодез. науки та вир-ва: зб. наук. пр. Зах. геодез. т-ва УТГК. – Л.: Вид - во Львівської політехніки, 2011. – Вип. II. – С. 92-95.
- Иванов В. А. Влияние климатических и геофизических явлений на помехоустойчивость приема радионавигационных сигналов систем ГЛОНАСС/GPS / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А.В. Зуев, А. А. Кислицын, П. М. Ершов // II Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26-28 июня 2012 г.) – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012. – 567 с.
- Каблак Н. І. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних / Н. І. Каблак // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. – № 4. – С. 65-73.
- Каблак Н. І. Сучасні підходи до визначення та використання тропосферних затримок GNSS сигналів / Н. І. Каблак // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2009. – Вип. 72. – С. 22–27
- Коворотный А. Л. Сравнительный анализ моделей для оценки полного влагосодержания тропосферы над Харьковским регионом посредством GPS-измерений / А. Л. Коворотный, Ф. В. Кивва, Ю. В. Гончаренко, В. Н. Горобец, А. И. Горб // Радіофізика та електроніка. – 2014. – Т. 5(19), № 4. – С. 21-26
- Хуторова О. Г. О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS-ГЛОНАСС / О. Г. Хуторова, А. А. Васильев, В. Е. Хуторов // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – 23. – № 6. – С. 510–514.
- Devis M. S. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System / M. S. Devis, S. Businger, T. A. Herring [et al.] // J. Geophys. – 1992. – V. 97. – P. 15787-15801.
- Hofmann-Wellenhof B. Global Positioning System. Theory and Practice / B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins. – Wien; N.Y.: Springer-Verlag, 1994. – 356 p.
- Mendes V. B. Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for Airborne GPS High-Precision Positioning / V. B. Mendes, R. B. Langley // Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, U.S.A., 1–3 June 1998. – P. 337–347.
- Schueler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation Dissertation / T. Schueler. – Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation Universität der Bundeswehr München, February 2001, online: <http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index.html>.

Надійшла 15.02.2018 р.