

ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛЕЙ РОЗПОДІЛУ СКЛАДОВИХ ЗЕНІТНОЇ ТРОПОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Мета цієї роботи – побудувати 3D-моделі складових зенітної тропосферної затримки (ZTD) за даними приземних вимірів метеорологічних величин, отриманих на 100 пунктах, що майже рівномірно розташовані на території України. Методика. Суха та волога складові зенітної тропосферної затримки були обчислені за формулами Saastamoinen. За отриманими результатами складено поля сухої і вологої складових тропосферної затримки, побудовано поля їхньої зміни із використанням різної кількості досліджуваних пунктів. Також за допомогою графічного редактора побудовано 3D-моделі одномоментного розподілу величини сухої та вологої складових зенітної тропосферної затримки для території України. Результати. Результатом роботи є побудовані 3D-моделі складових ZTD; побудовані поля зенітної тропосферної затримки для території України; виконане порівняння розподілу складових затримки для вказаної території та її зміни протягом доби. Встановлено, що суха складова набуває більшого значення на південній та центральній території України, де пункти спостережень розташовані нижче за висотою, і де є більшим атмосферний тиск, який домінує при обчисленні цієї складової. Відповідно волога складова є більшою також у південній частині України, але це зумовлено вищою відносною вологістю. У результаті ущільнення мережі до 100 пунктів отримано точніші моделі розподілу складових, що дало змогу Україні детальніше оцінити значення тропосферної затримки для території України. Подальше ущільнення мережі для території України не спричинило очікуваного підвищення точності визначення тропосферної затримки, оскільки недостатньо рівномірним є розташування метеостанцій на території країни, і деякі значення метеорологічних величин отримані не безпосередніми вимірюваннями, а методом інтерполяції. Для отримання детальнішої моделі необхідно рівномірно ущільнювати модель пунктами з надійними метеорологічними вимірюваннями, а для контролю використовувати обчислення складових інтегруванням за даними аерологічних зондувань, проведених на окремих пунктах. Наукова новизна та практична значущість. Наукова новизна полягає у побудові 3D-моделей складових тропосферної затримки для території України на певний момент часу. Практична значущість виконаних досліджень у тому, що вони можуть використовуватися як початковий крок для побудови просторово-часової моделі тропосферної затримки, яка відображала б просторові зміни затримки у реальному часі для певної території.

Ключові слова: тропосферна затримка; методи визначення тропосферної затримки; визначення складових тропосферної затримки; моделювання тропосферної затримки; GNSS-виміри.

Вступ

Одним із джерел помилок виміру псевдо-віддалей від супутника до GNSS-приймача, зумовлених впливом атмосфери, є нерівномірність проходження радіохвиль через нейтральну, неіонізовану частину атмосфери Землі, що містить шари тропосфери і стратосфери. І хоча вся атмосфера причетна до виникнення цієї помилки, вагома її частка формується саме нижньою частиною. Для прикладу: 10-ти кілометровий шар зумовлює приблизно 74 % її величини [Palianytsia B., 2001]. Тому помилку за вплив на супутникові виміри нижньої неіонізованої частини атмосфери називають тропосферною затримкою. Тропосферна затримка є вагомим чинником, що погіршує точність GNSS-вимірів.

Методи геодезичних вимірювань, що базуються на GNSS-технологіях, продовжують активно розвиватися. Вони широко застосовуються у різних галузях науки, серед яких: дослідження деформацій земної кори, моніторинг крупних інженерних об'єктів, гідроспоруд та ін. Все це вимагає проведення високоточних вимірів, а відповідно виникає питання можливості точного визначення величини тропосферної затримки та врахування її у результати вимірювань. Дослідження впливу тропосфери часто передбачає створення нових, вибір чи модифікацію існуючих моделей для визначення затримки [Mendes, 1999, Заблоцький Ф., et. al., 2000, Заблоцький Ф., et. al., 2004]. Моделюють також стан атмосфери, процеси, що у ній відбу-

ваються, розподіл метеорологічних величин з висотою, вертикальний розподіл водяної пари в тропосфері, кількість осаджуваної водяної пари в атмосфері або розподіл складових тропосферної затримки на певну територію [Yang, et. al. 2020; Palianytsia, et. al., 2020a; Palianytsia, et. al., 2020b].

Зараз існує велика кількість робіт, присвячених дослідженню впливу тропосфери на результати ГНСС-вимірювань. За останні роки багато досліджень стосуються визначення кількості осаджуваної пари в атмосфері за визначеною тропосферною затримкою, побудови моделей тропосфери для прогнозування погоди [Bevis, et. al., 1992; Каблак, 2011; Zablotskyi, et. al., 2017; Paziak, 2019].

У ряді статей виконана оцінка впливу тропосферної затримки на точність ГНСС вимірювань, проведених у різних частинах нашої планети з відмінними кліматичними умовами. Серед інших праці [Abdel-Ghany. et. al., 2019; Ashraf EL-Kutb Mousa, 2016; Заблоцький, і ін., 2004; Заблоцький, і ін., 2006], у яких дослідження виконувалися на пунктах Європи, Америки, Азії, Африки і Антарктиди. Результати проведених поблизу Пекіна метеорологічних досліджень із визначення ZTD для вимірів китайської навігаційної системи BeiDou (BDS) порівняли у роботі [Yang, et. al. 2020; Aigong X., et. al., 2013] із аналогічно визначеними з використанням програмних пакетів Міжнародної служби GNSS (IGS). Отримані зміщення та стандартне відхилення становлять близько 2 мм та 5 мм відповідно.

Крім цього, надзвичайно актуальними є дослідження, пов'язані зі створенням глобальних моделей тропосферної затримки. Останнім часом було розроблено багато підходів, спрямованих на моделювання тропосферної затримки та її складових, особливо вологої, яка доволі складно прогнозується і моделюється [Kablak, et. al., 2016]. Для прикладу, у геодезичній лабораторії Невади (NGL), використовуючи дані 16 000 метеостанцій за десятирічний період, було створено емпіричну модель тропосфери GPT3 (Global Pressure and Temperature), яку успішно застосовують для обчислень тропосферної затримки. Завдяки великій кількості станцій, тривалому часовому ряду отримання даних та різноманітному розташуванню станцій просторово-часові властивості емпіричної моделі дали хороші результати [Junsheng, et. al., 2020].

Мета

Метою роботи є побудова 3D-моделей складових тропосферної затримки за даними приземних вимірів метеорологічних величин отриманих на 100 пунктах, що майже рівномірно розташовані на території України.

Вхідні дані

Для дослідження зміни величини складових ZTD та побудови поля тропосферної затримки були використані сумарні дані наземних метеорологічних спостережень із ресурсу [National Climatic Data Center], і дані з архіву ресурсу [Raspisaniye Pogodi Ltd.], а саме: приземні метеорологічні виміри (температура повітря в °C, атмосферний тиск у гПа та відносна вологість повітря у %), проведені на метеостанціях та на території аеропортів у липні 2020 року. Вибір саме цього періоду обґрунтований найбільшими добовими коливаннями температури та вологості повітря.

Дані вибирались з оглядом на те, щоб пункти були рівномірно розташовані по території України. Для дослідження в першому випадку було використано метеорологічні дані з щільністю 240 км. Такій щільності приблизно відповідає розташування обласних центрів. Тому метеорологічні вимірювання взято із спостережень, проведених на метеостанціях в обласних аеропортах України. Проведені за цими даними розрахунки було використано для побудови моделей складових, які у подальшому названо «розрідженими». Для побудови «ущільнених» моделей використано мережу зі 100 пунктів, що знаходяться зі щільністю майже як районні центри в Україні (на сьогодні їх 136), і на яких проводять метеорологічні спостереження, а також пункти за межами України. У результаті отримано мережу, пункти в якій розташовані на відстані до 80 км (рис. 1).

Методика

Точність визначення тропосферної затримки безпосередньо залежить від обсягу метеорологічних даних, які можна використати для її розрахунку. Найкраще, якщо на момент проведення ГНСС-вимірів були б дані аерологічного зондування атмосфери, отримані недалеко від пункту спостережень. Але оскільки така можливість відсутня, то доводиться певним

чином моделювати метеорологічну ситуацію на момент проведення вимірів, використовуючи доступні для цього дані. Найчастіше для цього використовують приземні виміри метеорологічних величин та аналітичні моделі для обчислення складових тропосферної затримки. Таких аналітичних моделей на сьогодні відомо більше тридцяти. Але протягом кількох десятків років найпопулярнішою залишається модель Saastamoinen [Saastamoinen J., 1972]. Згідно з дослідженнями багатьох авторів, серед яких [Заблоцький, та ін., 2004; Паляниця, та ін. 2016], встановлено, що вона дає хороші результати для нашого регіону. Тому розрахунки складових тропосферної затримки обчислювалися саме за цією моделлю. Згідно з нею формула для сухої складової зенітної тропосферної має вигляд:

$$d_{hSA} = \frac{0.002277 \cdot P_s}{(1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 28 \cdot 10^{-8} H_s)} \quad (1)$$

а для вологої - такий:

$$d_{wSA} = 0.002277 \cdot \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) \cdot e_0 \quad (2)$$

У формулах (3) і (4): φ і H_s – географічна широта та висота станції спостережень; T_s, P_s, e_0 – приземні значення температури повітря, атмосферного і парціального тиску відповідно.

Результати досліджень

За обчисленими значеннями складових затримок було створено grid-файли (файли «сітки»), на основі яких були побудовані поля затримки для сухої та вологої складової. Також при побудові було оцінено різні методи інтерполяції та вибрано найоптимальніший.

На початку за метеорологічними даними, вибраними для сітки (grid), побудованої для пунктів у обласних центрах України (розрізана модель див рис. 1, а), побудовано поля затримки для сухої та вологої складової протягом двох діб з інтервалом в 12 годин, як у [Кладочний і ін., 2018].

Наступним кроком дослідження стало ущільнення мережі пунктів (побудова ущільненої моделі – рис. 1, б). Так, до вже існуючої мережі із 25 пунктів було додано ще 75 пунктів, розташованих на території України, а також метеостанцій, що розташовані поза її кордоном, але неподалік від нього. Це дає змогу уникнути екстраполяції на прикордонних ділянках, які не охоплені мережею пунктів, розміщених на

території нашої держави. Так було отримано мережу пунктів, відстань між якими у більшості випадків менша за 80 км. На рис. 1 зображені пункти спостереження, які використовувалися для побудови сітки (grid).

Щоб проілюструвати динаміку зміни сухої та вологої складової, а також відмінність ущільненої мережі пунктів, на рис. 2–17 показано зображення полів зміни сухої та вологої складових. Вони отримані протягом двох діб з інтервалом 12 годин, тобто на 00 год і 12 год 6 липня та на 00 год і 12 год 7 липня за Київським часом, тобто два зображення припадають на нічний період, а два – на денний. Порівнюючи результати, представлені на рисунках, можна зауважити, що ущільнення моделі позитивно вплинуло на результат. На правих рисунках отримано детальнішу картину розподілу складових по охопленій території.

Подальше ущільнення моделі не завжди спричиняло отримання кращого результату. Причина може бути у тому, що метеорологічні дані отримувалися простим інтерполюванням, і тому картина суттєво не змінилася. Крім цього, у досліджуваній період спостерігався антициклон на усій території країни, і тому за дві доби картина змінилася несуттєво. І все ж, при ущільненні мережі можна проводити оцінювання поля складових затримки з більшою точністю. Розглядаючи поле сухої складової, використання згущеної мережі дозволяє точніше оцінити ситуацію на територіях зі значними різницями атмосферного тиску (райони Карпат та Кримських гір).

У випадку вологої складової згущення моделі дає змогу детальніше оцінити ситуацію у районах із різкішими змінами температури та вологості повітря (регіони, які розташовані поблизу моря). Також можна побачити, що, використовуючи пункти за межами кордону, поле складових по всій території України можна оцінювати уникнувши екстраполяції.

Якщо розглядати динаміку зміни, то із наведених рисунків видно, що зміна сухої складової є незначною, і протягом двох днів її значення майже рівномірно знижуються незалежно від періоду доби. Стосовно вологої складової, то динаміка її зміни є більшою, а величина протягом досліджуваного періоду також помітно зменшується.



а) Розріджена мережа



б) Уціільнена мережа

Рис. 1. Порівняння розрідженої та уціільненої мережі

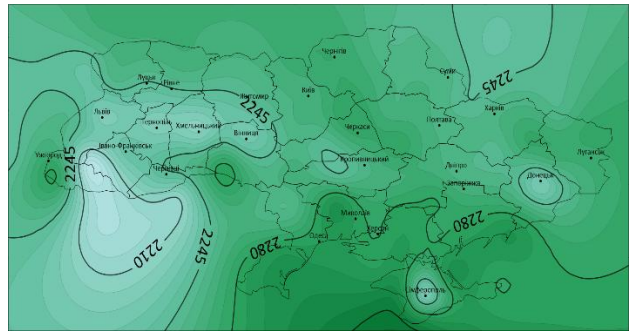
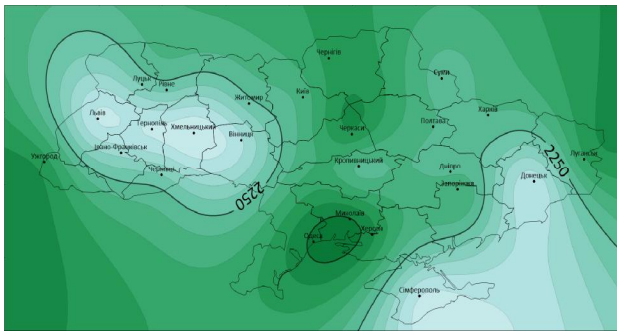


Рис. 2, 3. Поле сухої складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 00 год 6 липня 2020 р. Ізолії проведено через 7 мм

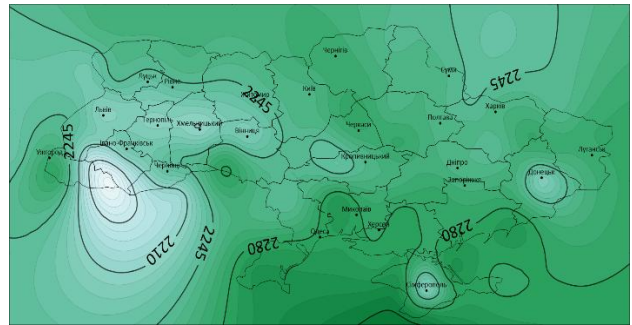
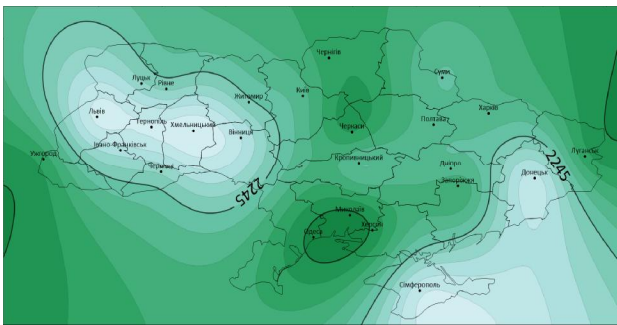


Рис. 4, 5. Поле сухої складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 12 год 6 липня 2020 р. Ізолії проведено через 7 мм

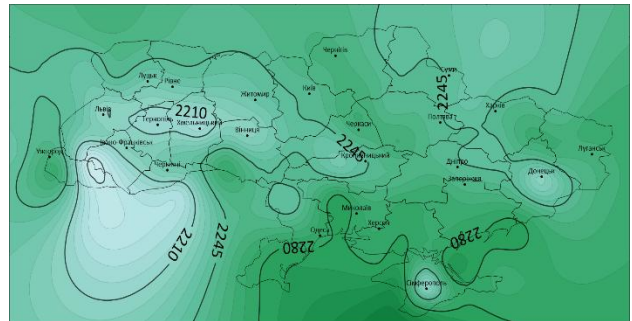
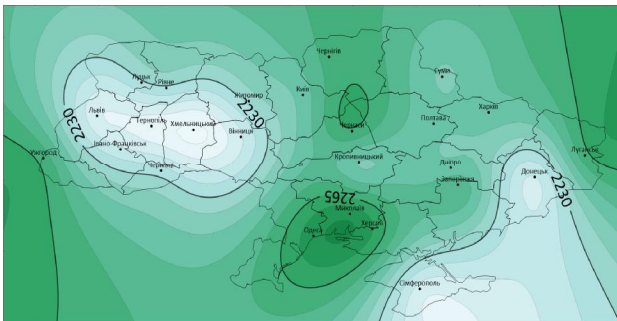


Рис. 6, 7. Поле сухої складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за згущеною моделлю (праворуч) станом на 00 год 7 липня 2020 р. Ізолії проведено через 7 мм

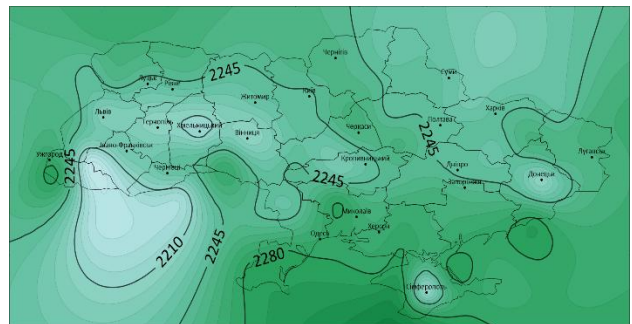
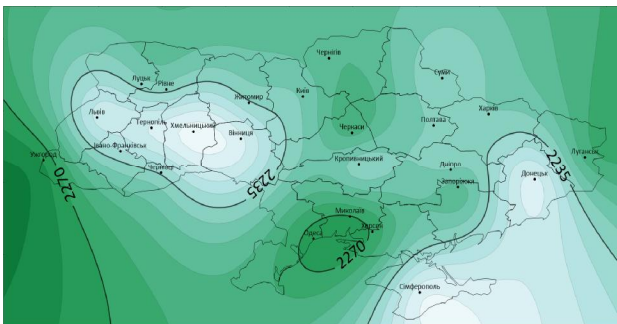


Рис. 8, 9. Поле сухої складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 12 год 7 липня 2020 р. Ізолії проведено через 7 мм

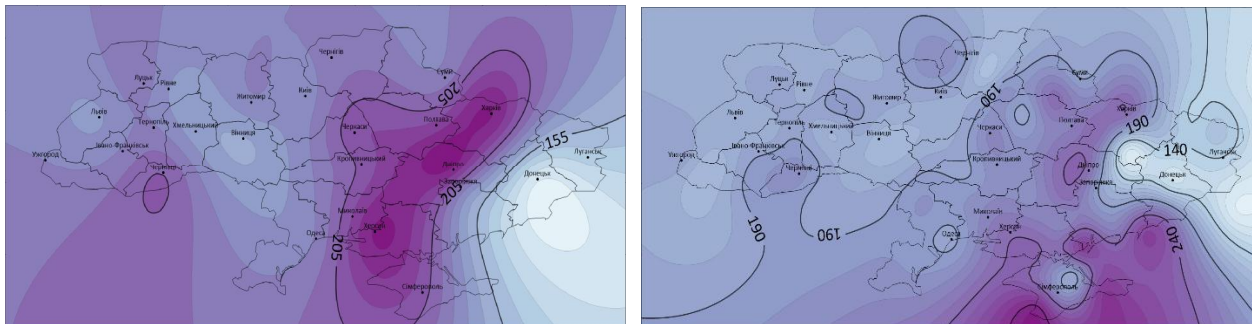


Рис. 10, 11. Поле вологості складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 00 год 6 липня 2020 р. Ізолінії проведено через 10 мм

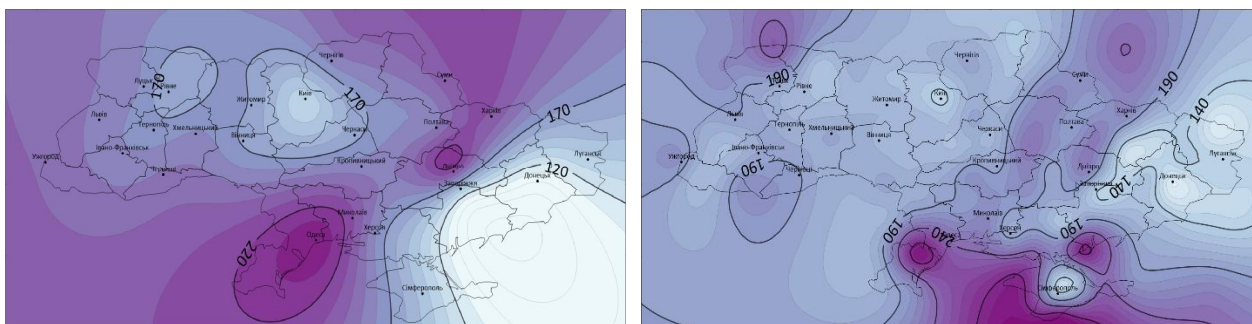


Рис. 12, 13. Поле вологості складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 12 год 6 липня 2020 р. Ізолінії проведено через 10 мм

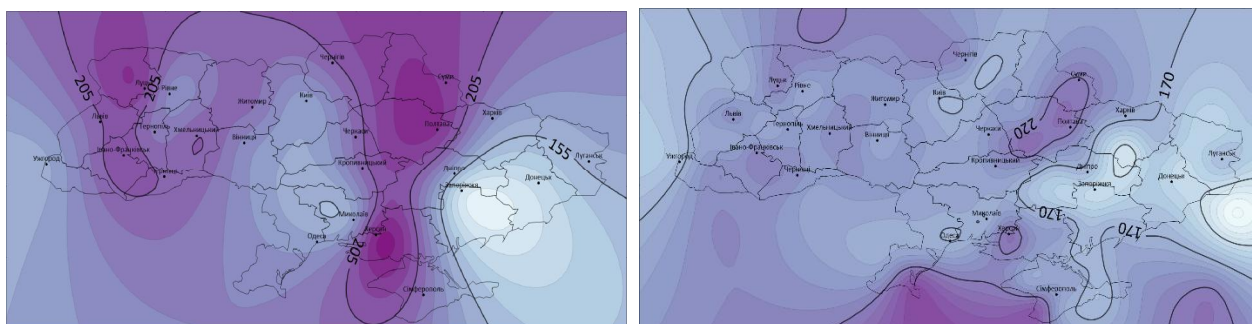


Рис. 14, 15. Поле вологості складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 00 год 7 липня 2020 р. Ізолінії проведено через 10 мм

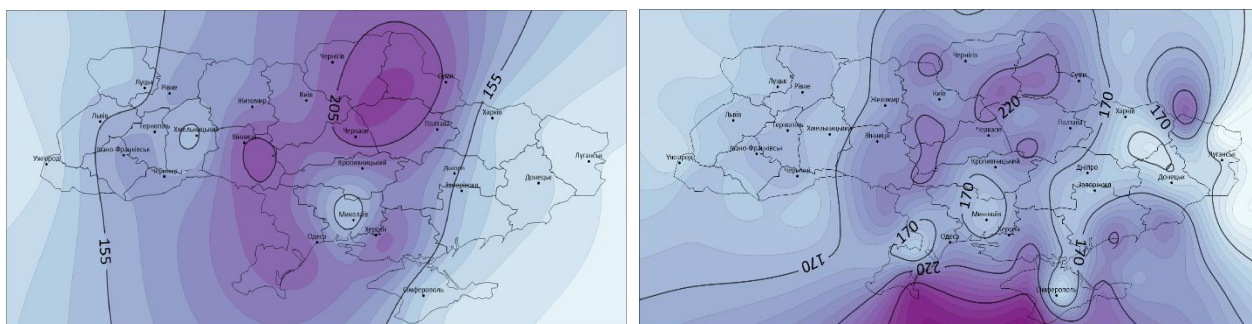


Рис. 16, 17. Поле вологості складової затримки (мм) за розрідженою моделлю (ліворуч) і за ущільненою моделлю (праворуч) станом на 12 год 7 липня 2020 р. Ізолінії проведено через 10 мм

Окрім загальної тенденції на зменшення, також помітно, що значення складових зростають у середині дня і зменшуються вночі, особливо це виражено на територіях, що розташовані на березі моря.

Для кращого порівняння результатів, отриманих із різною густотою пунктів, нами побудова-

но просторові 3D-моделі розподілу складових тропосферної затримки для території України на певний момент часу. На рисунках 19–20 представлені моделі гідростатичної (сухої), а на рис. 21–22 – негідростатичної (волоγοї) складової ZTD. Вони також побудовані на основі даних розрідженої моделі (ліворуч) і ущільненої (праворуч).

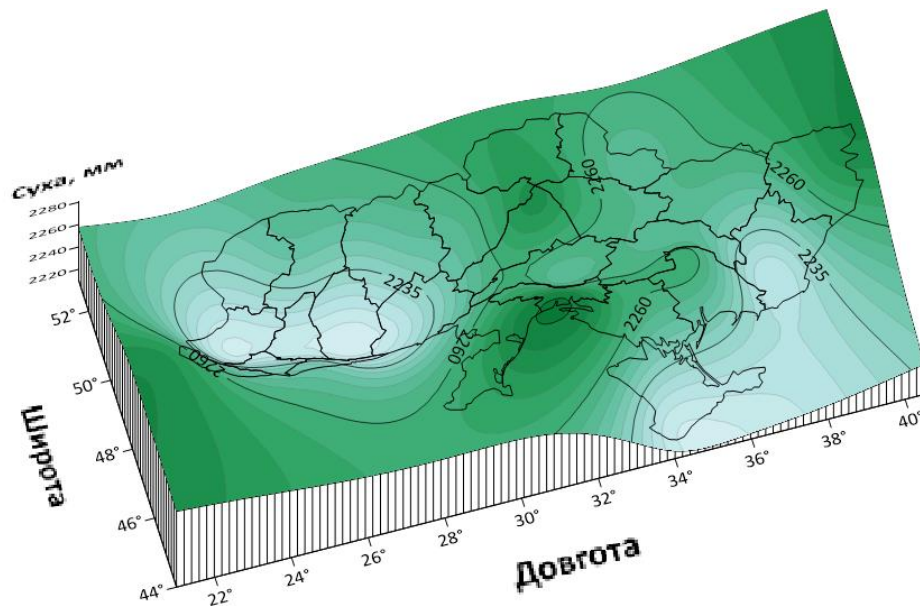


Рис. 19. 3D-модель сухої складової затримки (мм) за розрідженою моделлю. Ізолінії проведено через 7 мм

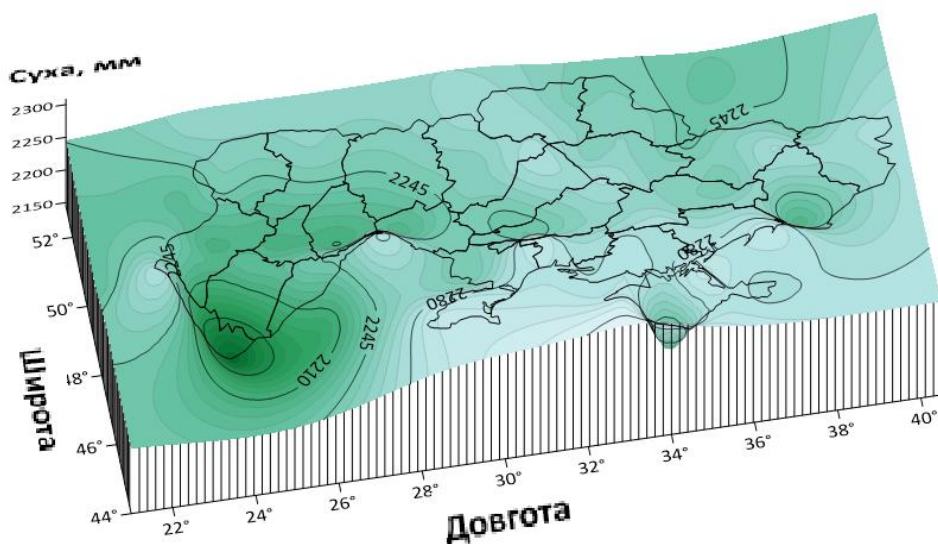


Рис. 20. 3D-модель сухої складової затримки (мм) за ущільненою моделлю. Ізолінії проведено через 7 мм

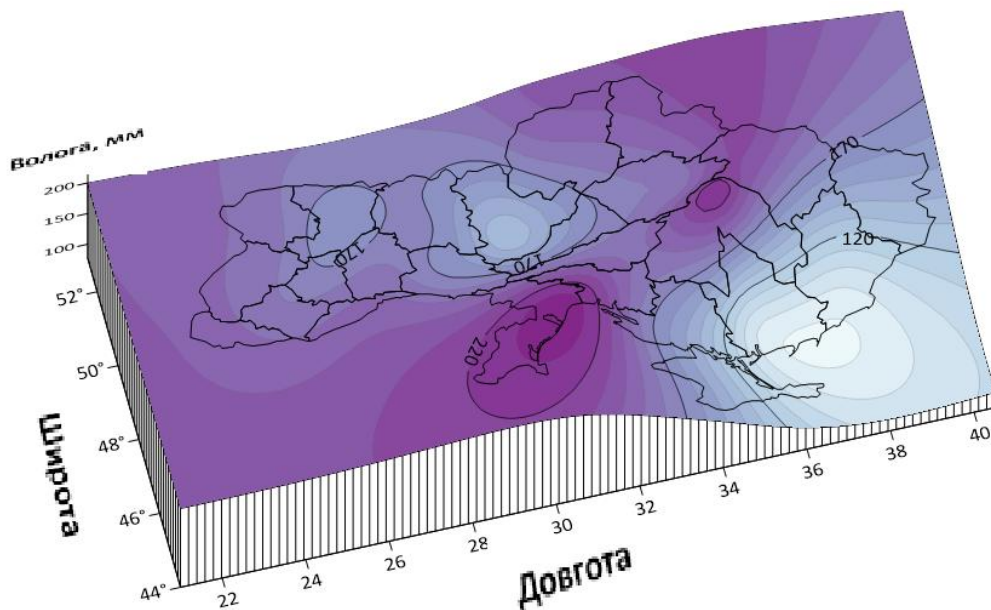


Рис. 21. 3D-модель вологої складової затримки (мм) за розрідженою моделлю. Ізолінії проведено через 10 мм

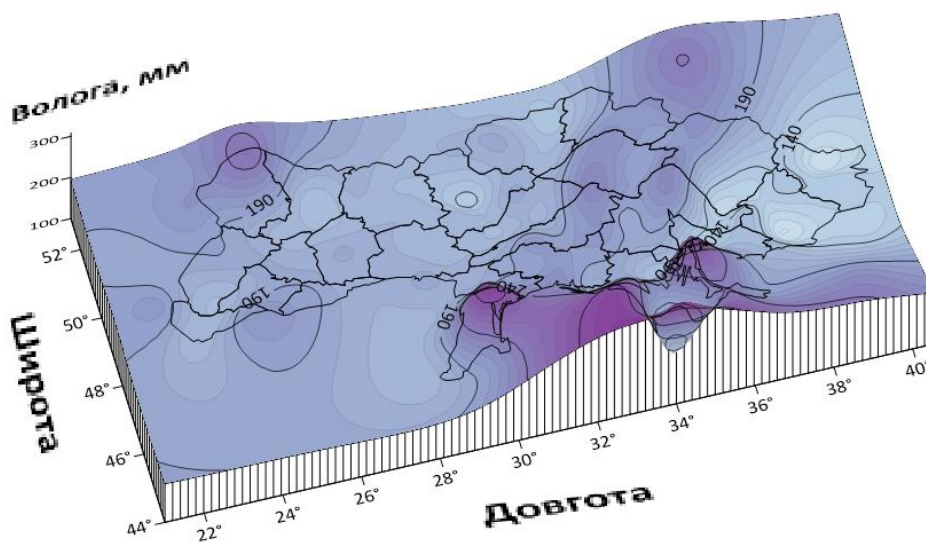


Рис. 22. 3D-модель вологої складової затримки (мм) за ущільненою моделлю. Ізолінії проведено через 10 мм

На моделях з ущільненою мережею включено пункти із значними перепадами висоти, а відповідно й значень метеорологічних величин (зокрема район Карпат), які через суттєві перепади значень метеорологічних величин суттєво ускладнюють дану модель і потребують окремого, більш детального розгляду.

Якщо порівнювати ліві і праві рисунки для обох складових, тобто моделі, збудовані за

ущільненою та розрідженою моделями, то очевидним є те, що згущена модель дає більш регулярну картину із меншими перепадами у південно-східній частині охопленої території.

Подальше ущільнення 3D-моделі також не спричинило очікуваного підвищення точності визначення тропосферної затримки, оскільки значення метеорологічних величин на деяких пунктах отримані не із безпосередніх вимірювань, а шляхом інтерполяції.

Незважаючи на це, для отримання детальнішої моделі необхідно рівномірно ущільнювати модель пунктами, де будуть проводитися надійні метеорологічні вимірювання, а для контролю використовувати обчислення складових інтегруванням за даними аерологічних зондувань проведених на окремих пунктах.

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна полягає у побудові 3D-моделей складових тропосферної затримки для території України на певний момент часу.

Практична значущість виконаних досліджень у тому, що вони можуть використовуватися як початковий крок для побудови просторово-часової моделі тропосферної затримки, яка відображала б просторові зміни затримки у реальному часі для певної території.

Висновки

Розглядаючи розподіл значень складових тропосферної затримки загалом по території України, можна зробити висновок, що суха складова набуває більшого значення на південній та центральній території України, де пункти спостережень розташовані нижче за висотою, і де є більшим атмосферний тиск, який домінує при обчисленні цієї складової.

Волога складова є більшою також у південній частині України, але це зумовлено більшою відносною вологістю. Цю складову значно важче прогнозувати, оскільки вона залежить від температури повітря і вологості, які по-різному впливають на величину складової.

У результаті ущільнення мережі до 100 пунктів отримано точніші моделі розподілу складових, що дало змогу для території України більш детально оцінювати значення тропосферної затримки.

Подальше ущільнення мережі для території України не спричинило очікуваного підвищення точності визначення тропосферної затримки, оскільки недостатньо рівномірним є розташування метеостанцій на території країни, і деякі значення метеорологічних величин отримані не безпосередніми вимірюваннями, а шляхом інтерполяції. Ущільнення моделей має сенс у випадку розгляду розподілу складових тропосферної затримки на невеликих гірських тери-

торіях. Там є суттєві перепади метеорологічних величин. Наприклад, дослідження складових у районі Карпатських чи Кримських гір, де, беручи до уваги значні перепади висоти, вони будуть різко змінюватись, або ж дослідження вологої складової у приморських районах, де її значення порівняно велике і суттєво змінюється за невеликі проміжки часу чи при різкій зміні погодних умов.

Незважаючи на це, для отримання детальнішої моделі необхідно рівномірно ущільнювати модель пунктами, де будуть проводитися надійні метеорологічні вимірювання, а для контролю використовувати обчислення складових інтегруванням за даними аерологічних зондувань, проведених на окремих пунктах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Заблюцький Ф. Д. До вибору моделей визначення складових зенітної тропосферної затримки при геодинамічних дослідженнях. *Геодинаміка*. Львів, 2000. № 1(3). С. 1–7.
- Заблюцький Ф., Паляниця Б. Модифіковані моделі для визначення сухої складової зенітної тропосферної затримки у Південно-Західному регіоні України. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, 2004. № 65. С. 51–56.
- Заблюцький Ф. Д., Довган Н. Р., Паляниця Б. Б. Особливості формування тропосферної затримки в Антарктиді (за даними станції Мак-Мердо). *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів: «Ліга-прес», 2006. С. 115–119.
- Паляниця Б. Б. Про визначення тропосферної затримки при обробці GPS-вимірів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. Львів, Ліга-прес, 2001. С. 48–52.
- Abdel-Ghany M. S., A. Mahrous, E. A. Farid, Robaa S. M. & Abdel-Wahab M. M. Zenith (2019). Tropospheric Delay Corrections of GNSS Satellite Signal. *Current Science International*, 8, 230–235.
- Aigong X., Zongqiu X., Maorong G., Xinchao X., Huizhong Z. & Xin S., Estimating Zenith Tropospheric Delays from BeiDou Navigation Satellite System Observations *Sensors* 2013, 13(4), 4514–4526; <https://doi.org/10.3390/s130404514>.
- Ashraf E. L., AbouAly N., Sharaf M., Zahra H. & Darrag M. (2016). Tropospheric wet delay estimation using GNSS: Case study of a permanent network in Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 5(1), 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.01.002>
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A. & Ware R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using

- the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15787–15801.
- Junsheng D., Junping C. Assessment of Empirical Troposphere Model GPT3 Based on NGL's Global Troposphere Products. *Sensors* 2020, 20(13), 3631; <https://doi.org/10.3390/s20133631>.
- Kablak N. I. (2011). Monitoring of the besieged water vapor on the basis of the processing of GNSS data. *Space Science and Technology*. 17, 4, 65–73. <https://doi.org/10.15407/knit2011.04.065>.
- Kablak Nataliya, Reity Oleksandr, Stefan Ovidiu, Radulescu Adrian T. G. M., Radulescu Corina. 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. V. 8. No. 4. 00391 (11 pp). DOI:10.3390/su8040391.
- Kladochnyi B., Palianytsia B. The research of change in the components of zenith tropospheric delay. Міжнародна науково-технічна конференція Geo Terrace-2018. Львів, Україна, 13–15 грудня 2018. С. 21–24.
- Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999. 353 pp.
- National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina, USA. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ncdc.noaa.gov/>.
- Palianytsia B., Oliynyk V., Boyko V. The research of change of zenith tropospheric delay's components. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2016, issue 83. Pp. 13–20.
- Palianytsia B. B., Kladochnyi B. V., Palianytsia O. B. Research of short-periodic changes in the components of zenith troposphere delay. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2020a, issue 91. Pp. 11–19.
- Palianytsia B. B., Kladochnyi B. V., Palianytsia Kh. B. Research of oscillations in the components of zenith tropospheric delay during the year in Ukraine. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2020b, issue 92. Pp. 5–14.
- Paziak M., Determination of precipitable water vapour, from the data of aerological and GNSS measurements at european and tropical stations. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2019, issue 89. Pp. 20–28.
- Raspisaniye Pogodi Ltd., St. Petersburg, Russia. / [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://rp5.ua/>.
- Saastamoinen J. (1972). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. *The use of artificial satellites for geodesy*, 15, 247–251.
- Yang Y. F., Chen X. P., Yao M. H., Zhou C. L. and Liao C. M.: Research On Zenith Tropospheric Delay Modeling of Regional CORS Network, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3/W10, 1197–1200, 2020.
- Zablotskiy F., Gresko Ju., Palanytsa B. Monitoring of water vapor content by radio sounding data at the Kyiv aerological station and by GNSS observation data at the GLSV station. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 2017, issue 85. Pp. 13–17.

Bohdan PALIANYTSIA^{1*}, Bohdan KLADOCHNYI¹, Olena PALIANYTSIA²

^{1*} Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: bohdan.b.palianytsia@lpnu.ua, bohdan.kladochnyi.mhd.2019@lpnu.ua.

² Department of Computational Mathematics, Ivan Franko National University of Lviv, 1, Universytetska Str., Lviv, 79000, Ukraine, e-mail: oksana.palianytsia@lnu.edu.ua.

CONSTRUCTION OF 3D-MODELS OF THE DISTRIBUTION OF ZENITHAL TROPOSPHERIC DELAY COMPONENTS FOR THE TERRITORY OF UKRAINE

The purpose of this work is to build 3D-models of components of zenith tropospheric delay (ZTD) according to surface measurements of meteorological values obtained at 100 points, which is almost evenly distributed throughout Ukraine. Method. Saastamoinen formulas calculated dry and wet components of the zenith tropospheric delay. According to the obtained results, the fields of dry and wet components of tropospheric delay were compiled, the fields of their change were constructed using a different number of studied points. Also, with the help of a graphic editor, 3D-models of the magnitude one-moment distribution of dry and wet components of the zenith tropospheric delay for the territory of Ukraine were built. Results. The work results are built 3D-models of ZTD components; constructed zenith tropospheric delay fields for the territory of Ukraine; a comparison of the distribution of delay components for the specified area and its change during the day. It is established that the dry component becomes more important in the southern and central territory of Ukraine, where the observation points are lower in height and where there is a higher atmospheric pressure, which dominates in the calculation of this component. Accordingly, the wet component is also higher in the southern part of Ukraine, but this is due to higher relative humidity. As a result of

the compaction of the network to 100 points, more accurate models of component distribution were obtained, which allowed Ukraine to assess in more detail the value of tropospheric delay for the territory of Ukraine. Further compaction of the network for the territory of Ukraine did not lead to the expected increase in the accuracy of tropospheric delay, as the location of meteorological stations in the country is not uniform enough, and some values of meteorological magnitudes are obtained not by direct measurements but by interpolation. It is necessary to compact the model with reliable meteorological measurements evenly and control the calculation of components by integrating according to aerological soundings carried out at individual points to obtain a more detailed model. Scientific novelty and practical significance. The scientific novelty is to build 3D-models of tropospheric delay components for the territory of Ukraine at a certain point in time. The practical significance of the performed research is that they can be used as an initial step to build a Spatio-temporal model of tropospheric delay, reflecting the spatial changes of the delay in real-time for a particular area.

Key words: tropospheric delay; methods for determining tropospheric delay; determination of tropospheric delay components; tropospheric delay modeling; GNSS observations.

Надійшла 05.04.2021 р.