

УДК 528.2

Янків-Вітковська Л. М., к.ф.-м.н., доцент, Савчук С. Г., д.т.н., професор (Національний університет «Львівська політехніка»),
Янчук Р. М., к.т.н. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ПРО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ НА GNSS-СТАНЦІЇ RVNE В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Розраховано параметри іоносфери за новою методикою для перманентної станції RVNE за допомогою створеного спеціального алгоритму згладження кодових спостережень фазовими у режимі реального часу.

Ключові слова: іоносфера, GNSS, перманентна станція.

Постановка проблеми. Дослідження структури іоносфери важливе для вирішення різноманітних радіофізичних задач, пов'язаних з поширенням радіохвиль. Врахування впливу іоносфери для геодезичних задач є важливим при високоточному визначенні координат пунктів відносним методом при великих відстанях між пунктами (більше 100 км) для двочастотних приймачів супутникових сигналів, а для одночастотних – при відстанях більше 10-15 км. Значний вплив іоносфери може виявитися при проведенні RTK-спостережень в режимі реального часу у мережах активних референціальних станцій. Тому у зв'язку з широким застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) особливої уваги набуває система визначення параметрів іоносфери на основі аналізу властивостей сигналів, що приймаються від GNSS-супутників. Реалізація цих можливостей представляє практичний інтерес лише в тому випадку, якщо вдається отримати вихідну вимірювальну інформацію без великих матеріальних і часових затрат та розробити відповідні методики та програми розрахунків параметрів іоносфери [1].

Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Використання навігаційних систем для вивчення та контролю стану іоносфери є науково-технологічним проривом в галузі дистанційного зондування верхньої атмосфери і володіє глобальною перспективою, що обумовлена великою кількістю GNSS-супутників і наземних станцій спостереження, їх можна використовувати для вивчення таких характеристик іоносфери, як інтегральна загальна електронна концентрація (*TEC*), профіль висотного розподілу електронної концен-

трації, іоносферні неоднорідності, вплив штучних збурень на іоносферу тощо.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми. Основні відомості про іоносферу отримують в даний час від установок, розташованих на Землі. Однак, вони у змозі дати інформацію лише про параметри нижнього шару іоносфери. Що стосується верхньої іоносфери, то відповідна інформація про висотний розподіл електронної концентрації раніше могла бути отримана тільки за допомогою іонозондів космічного базування [2], вертикальних запусків ракет [3] і нечисленних установок некогерентного розсіяння радіохвиль [4]. Це досить затратні технології, що вимагають значних коштів та часу.

Дані про характер зміни іоносфери (вміст загальної кількості електронів – TEC) залежно від різних фізичних умов використовуються в моделях, які застосовуються в радіотехнічних системах, що використовують іоносферний канал, і дозволяють враховувати вплив середовища поширення сигналу на якість роботи таких систем [5].

GNSS-технології дають унікальну можливість отримати висотний розподіл електронної концентрації іоносфери Землі в будь-який час доби і будь-якій точці земної поверхні, включаючи океани і моря, північний і південний полюси.

Мережі мультиспостережуваних GNSS-станцій, що працюють у режимі реального часу, дозволяють безперервно отримувати дані радіонавігаційних супутникових вимірювань – псевдовідстані до супутників, а, відповідно, і можливість безпосереднього визначення загального вмісту електронів TEC . Прикладом мережі мультиспостережуваних GNSS-станцій, що працюють на території Західної України, є мережа ZAKPOS/UA-EUPOS [7].

Перманентна станція RVNE є складовою частиною мережі ZAKPOS/UA-EUPOS і передає дані супутникових спостережень в реальному часі по окремо виділеній лінії для опрацювання в спеціалізованих центрах. Обладнання станції включає в себе двочастотний приймач Trimble 5700, високоточну антену Zephyr Geodetic та спеціальний сервер для збереження та передачі даних. Антена приймача розташована на даху навчального корпусу № 7 Національного університету водного господарства та природокористування в м. Рівне.

Невирішені частини загальної проблеми. Існуючі емпіричні моделі електронної концентрації не враховують вплив протоносфери Землі, а методи прямого моделювання забезпечують (з похибкою 30-50%) прогнозування величин TEC лише при спокійному стані іонос-

фери і не завжди коректно відображають просторово-часовий розподіл параметрів іоносфери в конкретних геофізичних умовах. Тому задача розробки іоносферної моделі, що забезпечує достовірне та оперативне прогнозування *TEC*, яка може бути використана для підвищення ефективності і якості функціонування сучасних радіотехнічних систем, залишається актуальною.

Постановка завдання. Основною метою проведених досліджень було визначення параметрів іоносфери – похилих (*STEC*) і вертикальних (*VTEC*) значень загальної електронної концентрації для перманентної станції RVNE, використовуючи створену нами програму та реалізовану на практиці для станції SULP, яка розташована у м. Львові на території Національного університету «Львівська політехніка».

Виклад основного матеріалу. Відомо, що рівняння для визначення вмісту електронів – *STEC* для кодівих (1), та фазових (2) спостережень мають вигляд [8]:

$$STEC = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \left(P_{2j}^i - P_{1j}^i - b^i - b_j + \varepsilon_p \right) \quad (1)$$

$$STEC = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \left(L_{1j}^i - L_{2j}^i - B^i - B_j + \lambda_1 L_{1j}^i - \lambda_2 L_{2j}^i + \varepsilon_L \right)_{arc} \quad (2)$$

де f_1, f_2 – частоти GNSS-сигналів; P – псевдовідстані, визначені з кодівих спостережень; b^i, B^i – затримка сигналу в i -супутнику (так звані файли DCB); b_j, B_j – затримка сигналу на j -станції, пов'язана з типом антени, кабелю, приймача тощо; λ – довжина хвилі; N – цілочисельна фазова неоднозначність; L – псевдовідстані, визначені з фазових спостережень; ε – залишкові випадкові похибки.

Оскільки мова йде про обчислення *STEC* у режимі реального часу, то додаткове визначення фазових неоднозначностей дуже сильно ускладнює сам процес обчислень. Нами запропоновано практичну реалізацію рівняння (1) в системі реального часу із залученням спеціального алгоритму згладження кодівих спостережень фазовими. Для аналізу отриманих значень *STEC* їх, як правило, представляють приведені до зеніту точки спостереження, тобто вертикальними значеннями загальної електронної концентрації *VTEC*:

$$VTEC = M(el)^{-1} \cdot STEC \quad (3)$$

$$M(el) = \left[1 - \left(\frac{(R + h_s) \cdot \cos(el)^2}{R + H} \right) \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де $M(el)$ – функція відображення кута місця знаходження GPS-супутника; el – кут нахилу супутника над горизонтом; R – радіус Землі; H – висота одного шару (віддаль до іоносферного шару); h_s – висота LEO супутника (в нашому випадку $h_s = 450$ км).

Для безпосереднього обчислення $STEC$ та $VTEC$ на основі формул (1), (3), (4) та розробленого алгоритму згладження кодових спостережень фазовими була створена програма на C++.

Оскільки значення $VTEC$ і $STEC$ отримуються щосекунди, то використовується додатково розроблена програму, яка статистично опрацьовує великі масиви даних і приводить їх до зручного виду, застосувачи при цьому специфічні методи з бібліотеки нелінійної апроксимації Matlab.

Результати досліджень. Визначення $STEC$ відбувається внаслідок автоматизованого опрацювання годинних RINEX-файлів для окремої перманентної станції по кожному супутнику, що спостерігається, а $VTEC$ – шляхом їх приведення до зеніту.

За допомогою розробленого програмного забезпечення отримано значення $VTEC$ станцій RVNE починаючи з літа 2012 року. Як приклад, на рис. 1 представлено експериментально виміряні значення $VTEC$ за 348-351 GPS дні 2012 року, на рис. 2 – значення згладжених $VTEC$, розрахованих для виявлення їх добових змін. Для того, щоб подолати розриви, які виникають під час зміни кількості супутників виконується апроксимація отриманих значень $VTEC$. На рис. 3. представлено фрагменти $VTEC$ та їх апроксимація. На рис.4 наведено середні значення показників зміни $VTEC$ на станції RVNE за 30 днів 2012 року

Ми можемо одночасно отримувати дані зміни $VTEC$ для декількох станцій, що дасть можливість виконувати порівняльний аналіз зміни параметрів іоносфери в різні сезони, впродовж доби та визначити основні закономірності зміни з часом $VTEC$ в перспективі для усієї мережі ZAKPOS/ UA EUPOS.

Висновок. Основним завданням даного дослідження було використання створеного алгоритму визначення загальної електронної концентрації для станції RVNE у режимі реального часу. У період з кінця жовтня (302 GPS день) по кінець листопада (331 GPS день)

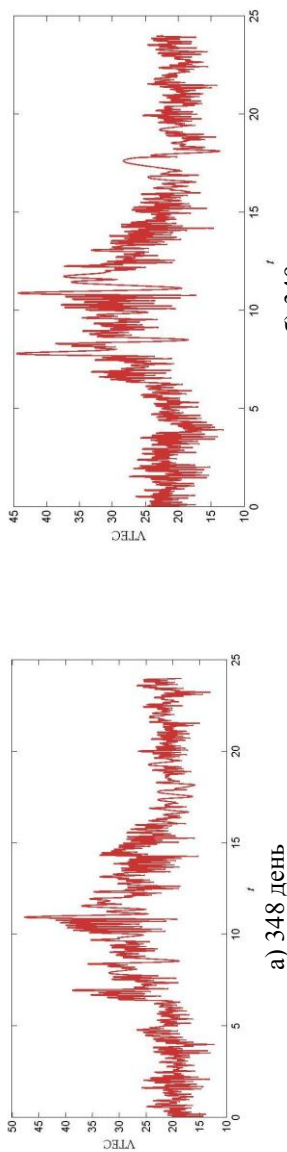


Рис. 1. Графіки експериментально вимірених VTEC (за 348, 349 дні 2012 року відповідно а), б)) для станції RVNE (по осі абсцис – години дня)

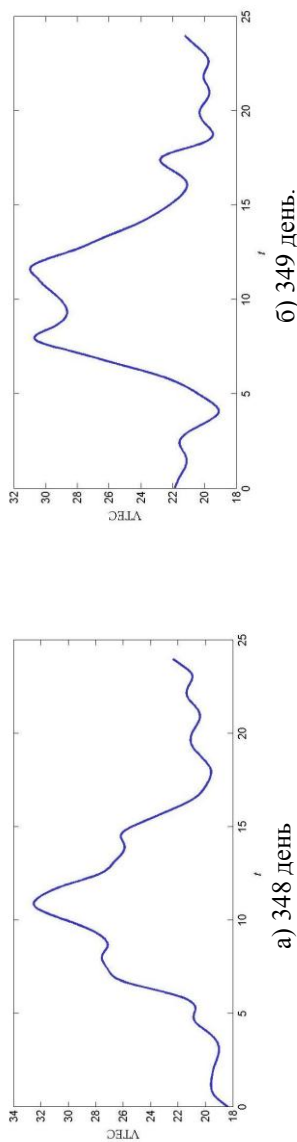


Рис. 2. Згладжене значення VTEC, враховане для виявлення його добових коливань (за 348, 349 дні відповідно)

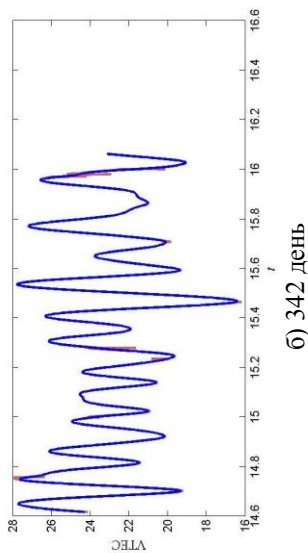


Рис. 3. Фрагменти VTEC і їх апроксимація

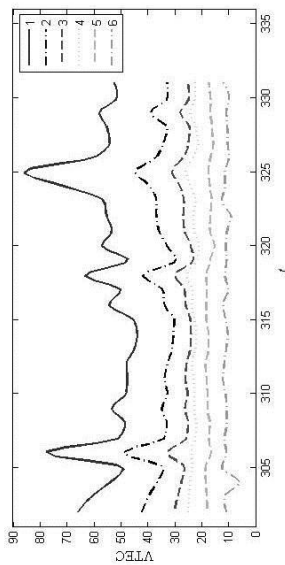
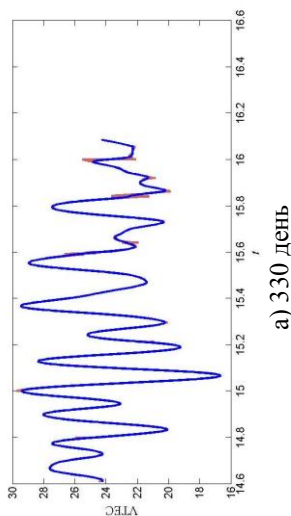


Рис. 4. Середні значення показників зміни VTEC 30 днів 2012 року (1 – максимальне значення за добу, 2 – середнє значення + дисперсія, 3 – середнє значення, 4 – медіана, 5 –



2012 р. середнє значення $VTEC$ склало $26,4 \text{ ел/м}^2$, при максимальних – $55,3$ та мінімальних $10,8$.

Отримані нами дані загальної електронної концентрації із безпосередніх GNSS-вимірювань дозволять моделювати іоносферні впливи на мінімально можливі проміжки часу та отримати максимальну точність координатного забезпечення для заданого регіону.

Результати обчислених $STEC$ та $VTEC$ для перманентної станції RVNE, представлені годинними файлами на сайті Національного університету «Львівська політехніка» <http://www.sulp.polynet.lviv.ua>.

1. Янків-Вітковська Л. М. Використання двочастотних GNSS-спостережень для визначення параметрів іоносфери / Л. М. Янків-Вітковська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2012. – Вип. 76. – С. 19-29.
2. Некогерентное рассеяние радиоволн / Брюнелли Б. Е., Терещенко Е. Д., Ткачев Г. Н., Ковалевская Л. В. – Апатиты, 1980.
3. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы / Фаткуллин Н. М., Зеленова Т. И., Козлов В. К. и др. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
4. Емельянов Л. Я. Региональная модель основных параметров ионосферной плазмы / Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. // VIII Украинская конференция по космическим исследованиям (Солнечно-земные связи и космическая погода): сборник тезисов. – Крым, Евпатория, 2008. – С. 34.
5. Klobuchar J., Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System,

1987, AES 23(3), 325-331. **6.** Янків-Вітковська Л. М. Про обчислення параметрів іоносфери за допомогою спеціального алгоритму: перші результати / Л. М. Янків-Вітковська // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18. № 6. – С. 73-75. **7.** Savchuk S. Creation of ZAKPOS active network reference stations for Transcarpatian Region of Ukraine / S. Savchuk, I. Kalynych, I. Prodanets // Int. Symp. Global Navigation Satellite Systems, Spacebased and Ground-based Augmentation. **8.** Key-Rok Choi Total Electron Content (TEC) Estimation Using GPS Measurements Onboard TerraSAR-X / Key-Rok Choi, E. Glenn Lightsey; Center for Space Research; The University of Texas, Austin, Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. – San Diego, CA, January 2008. – Pp. 923-934.

Рецензент: д.т.н., професор Третяк К. Р. (НУ „Львівська політехніка”)

Yankiv-Vitkovska L. M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Savchuk S. G., Doctor of Engineering, Professor (National University “Lviv Polytechnic”), Yanchuk R. M., Candidate of Engineering (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

REAL TIME DETERMINATION OF PARAMETERS FOR IONOSPHERE RVNE GNSS-STATION

The ionosphere parameters for permanent station RVNE using a special algorithm in real-time calculated.

Keywords: ionosphere, GNSS, permanent station.

Янків-Вітківская Л. М., к.ф.-м.н., доцент, Савчук С. Г., д.т.н., профессор (Национальный университет «Львовская политехника»), Янчук Р. М., к.т.н. (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ НА GNSS-СТАНЦИИ RVNE В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассчитаны параметры ионосферы по новой методике для перманентной станции RVNE с помощью созданного специального алгоритма сглаживания кодовых наблюдений фазовыми в режиме реального времени.

Ключевые слова: ионосфера, GNSS, перманентная станция.