

изысканий и проектирования. – 2012. – № 3(46). – С. 67–73. 4. Кучер О.В., Куриляк І.С., Марченко О.М. Про перетворення координат із системи СК-42 в систему УСК-2000 // Вісник геодезії та картографії. – 2009. – № 2. – С. 6–13. 5. Кучер О., Ренкевич О., Лепетюк Б., Заєць І. Науково-технічне забезпечення впровадження референційної системи координат для території України // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр. – Львів, 2003. – С. 23–31. 6. Карпінський Ю.О. Афіне трансформування координат методом скінченних елементів. – 2002. – № 4 – С. 23–27.

УДК 528.3

Л.М. Янків-Вітковська

Національний університет “Львівська політехніка”

## ПРО ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ ДЛЯ GNSS-СТАНЦІЙ SULP, RVNE ТА SHAZ

© Янків-Вітковська Л.М., 2013

*Определены основные закономерности изменения со временем вертикальных значений TEC для нескольких близких GNSS-станций.*

*The main regularities of changes over time vertical TEC values of a few close GNSS-stations.*

**Постановка проблеми.** Вимірювання параметрів супутникових сигналів у поєднанні з методами математичної обробки та моделювання знайшли широке застосування в зв'язку з впровадженням в практику досліджень сучасних обчислювальних засобів і методів експериментальних досліджень. Наявність штатних вимірів радіонавігаційних параметрів дає можливість використовувати глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) як вже існуючий, технічно досконалий інструмент отримання діагностичної інформації про атмосферу Землі. Зокрема GNSS-технології дають змогу визначати висотний розподіл електронної концентрації іоносфери Землі з використанням спеціального математичного апарату розв'язання так званих некоректних обернених задач [1–3]. Для встановлення відповідних закономірностей зміни параметрів іоносфери важливо вміти правильно врахувати їх зміну з часом. Для цього необхідно визначити основні закономірності щодо зміни стану іоносфери та встановити значення параметрів, що описують іонізацію атмосфери. Отже, дослідження характерних змін з часом показника *TEC* для GNSS-станцій є важливою проблемою, розв'язанням якої можна моделювати іоносферні впливи за мінімально можливими проміжками часу та отримати максимальну точність для розв'язання задач координатного забезпечення для заданого регіону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження параметрів іоносфери (вміст загальної кількості електронів – *TEC*) залежно від різних фізичних умов використовуються в моделях, які застосовуються в радіотехнічних системах, що використовують іоносферний канал, і дають змогу враховувати вплив середовища поширення сигналу на якість роботи таких систем [1, 2].

За останні десятиліття було створено різні моделі іоносфери для регулярних змін *TEC*. Ці моделі використовують різні методи, однак результати показують, що ні Глобальні іоносферні карти [3], ні модель Клобушара [1,2], ні модель НеКвіка [4] не спроможні відкоригувати іоносферні запізнення на 100 %.

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 [3]. 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  $TEC$ . Пряме визначення  $TEC$  на основі регулярних GNSS-спостережень дає змогу обійти існуючі моделі іоносфери для розв'язання сучасних задач, де вимагається висока точність результатів.

Під час оцінювання координат у різного роду системах (мережах) існувала можливість оцінити вплив іоносфери лише якісно, тобто обчислити вплив іоносфери на точність координатних визначень. З розвитком нових GNSS-технологій з'явилася можливість визначати кількісні показники параметрів іоносфери. В 2001–2004 роках створено відповідну методику моделювання параметрів іоносфери, яка була відпрацьована на аналізі досліджень на мережі ASG-EUPOS[5–8].

Прикладом мережі мультиспостережуваних GNSS станцій, що працюють на території Західної України, є мережа ZAKPOS/UA-EUPOS [9], до якої входять понад 15 станцій, що працюють у режимі реального часу. За допомогою спеціальної методики на станціях мережі можна визначати значення загальної електронної концентрації.

**Постановка завдання.** Метою наших досліджень було показати характерні зміни параметрів іоносфери з часом на частині станцій мережі, а саме на трьох станціях: RVNE, SHAZ, SUPL, які утворюють рівносторонній трикутник.

**Виклад основного матеріалу.** Для розв'язання поставленої задачі нами взято дані визначених вертикальних значень загальної електронної концентрації ( $VTEC$ ) для кожної вибраної нами станції за 2012 рік. Ці дані накопичуються під час роботи GPS-приймача і записуються у текстових файлах в ASCII кодах. У цих файлах за один день занесені понад 500 тисяч вимірювань. Щоб спростити обчислення характеристик  $VTEC$  на основі великих масивів значень, застосовано метод автоматичного генерування текстів програм мовою Matlab на основі текстових файлів (так званих “апаратних файлів”) з даними вимірювання. Розроблено програму, яка “зчитує” апаратний файл з даними вимірювання і за ними генерує вихідні тексти двох програм мовою Matlab. В першій з них виконано присвоєння значень масивам часу і  $VTEC$ . У другому обчислено коефіцієнти сплайн-апроксимації  $VTEC$ . Зокрема, по-перше, вираховано коефіцієнти інтерполяції  $VTEC$  на всіх вузлах вимірювання. По-друге, обчислено коефіцієнти згладжувальної апроксимації. Завдяки цьому зменшено обсяг файлів з даними для обчислень і спрощено визначення  $VTEC$  у будь-який момент часу. Завдяки застосуванню сплайн-апроксимації частково компенсовано характерні розриви у даних вимірювання, які виникають через зміну кількості супутників, залучених до вимірювань. Описане програмне забезпечення схематично показано на рис. 1.



Рис. 1. Схема програмного забезпечення визначення  $VTEC$  як функції часу

За допомогою розробленого програмного забезпечення встановлено значення  $VTEC$  для станцій RVNE, SHAZ, SULP за 2012 р. Графіки зміни з часом показника  $VTEC$  показано на рис. 2. З цього рисунка видно, що концентрація іонів в атмосфері змінюється з короткотривалими коливаннями, які протягом недовгих проміжків часу відбуваються синфазно на трьох близьких станціях.

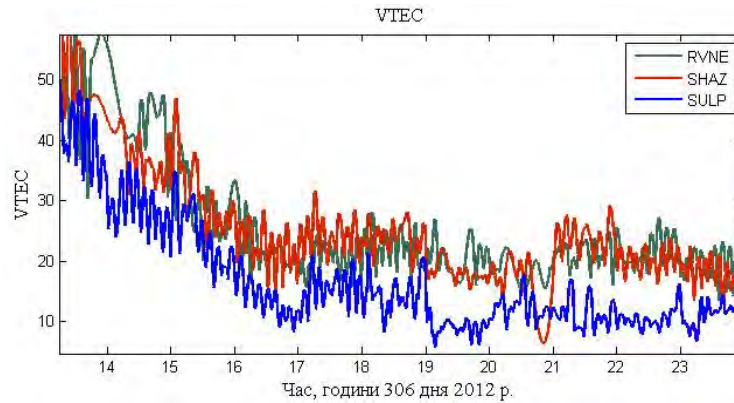


Рис. 2. Графіки зміни параметрів  $VTEC$  на станціях RVNE, SHAZ, SULP за 306 день 2012 р.

Щоби точніше встановити часові характеристики зміни показника  $VTEC$ , обчислено автокореляційні інтеграли від цього показника як функції часу для трьох станцій RVNE, SHAZ, SULP, а також – взаємні кореляційні інтеграли між ними.

На рис. 3, а, 4, а, 5, а показано графіки автокореляційних інтегралів від  $VTEC$  як функції часу для станцій RVNE, SHAZ, SULP, які обчислено за 306 день 2012 р. На цих графіках видно коливання з малим періодом і з великим періодом. Коливання з більшим періодом проявляються у перегині монотонних ділянок графіків.

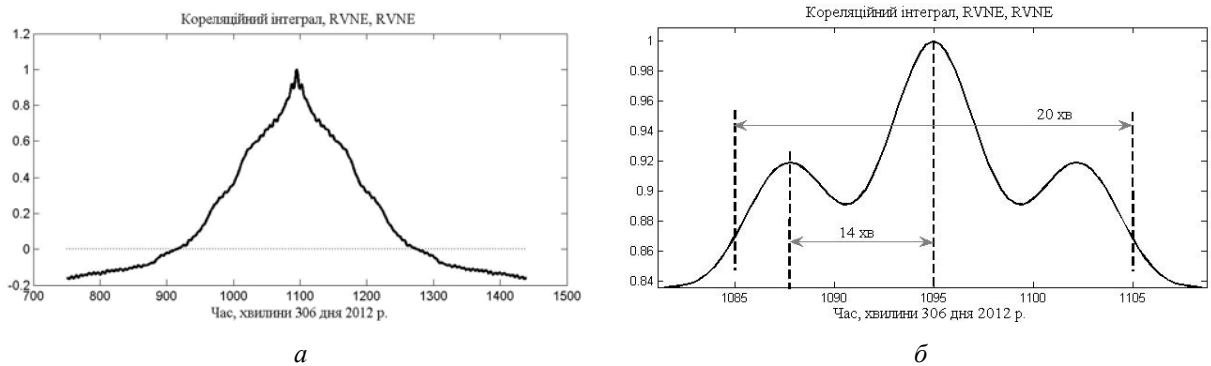


Рис. 3. Графік автокореляційного інтеграла, визначеного за даними  $VTEC$  на станції RVNE за 306 день 2012 р. (а) та його збільшений фрагмент (б)

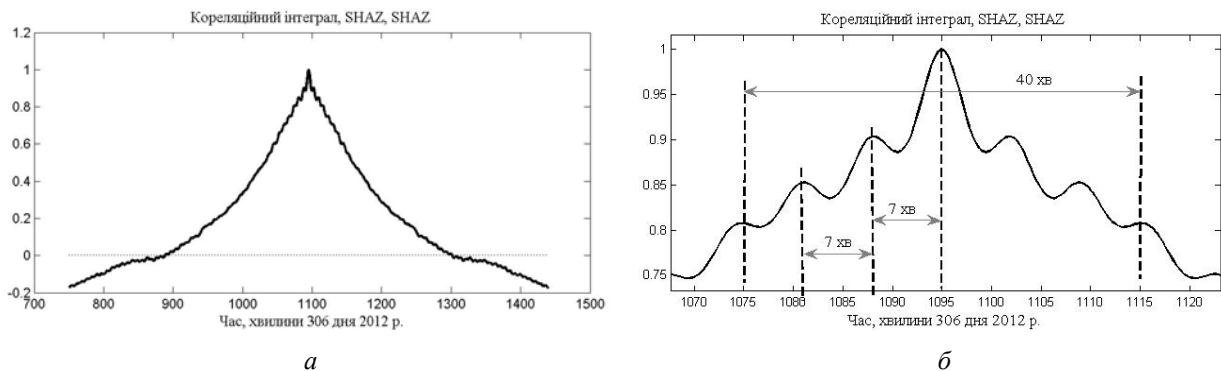


Рис. 4. Графік автокореляційного інтеграла, визначеного за даними  $VTEC$  на станції SHAZ за 306 день 2012 р. (а) та його збільшений фрагмент (б)

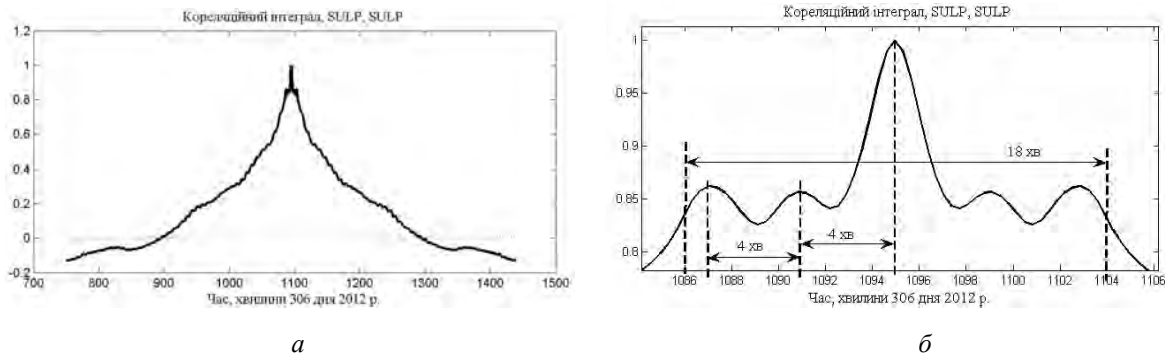


Рис. 5. Графік автокореляційного інтеграла, визначеного за даними VTEC на станції SULP за 306 день 2012 р. (а) та його збільшений фрагмент (б)

На рис. 3, а, 4, а, 5, а показано графіки вищезгаданих автокореляційних інтегралів у збільшеному масштабі. З цих графіків легко зауважити певні закономірності. На станції RVNE (рис. 3, а) показник VTEC (протягом 306 дня 2012 р.) коливався з характерним періодом приблизно  $T_1 = 14$  хв. Приблизна ширина центрального максимуму автокореляційного інтегралу на цій станції  $\Delta T_1 = 20$  хв. Це означає, що коливання VTEC на станції RVNE повторюються через проміжок часу 14 хв, але через проміжок часу приблизно 20 хв частота цих коливань помітно змінюються.

На станції SHAZ (рис. 4, а) протягом цього самого дня коливання VTEC повторювалися через  $T_2 = 7$  хв, а ширина центрального максимуму автокореляційного інтеграла становить приблизно  $\Delta T_2 = 40$  хв. На станції SULP протягом цього дня коливання VTEC повторювалися через  $T_3 = 4$  хв, а ширина центрального максимуму автокореляційного інтеграла становить приблизно  $\Delta T_3 = 18$  хв. З цього випливає, що на всіх станціях, взятих для спостереження в іоносфері відбуваються короткотривалі коливання (з періодом повторення 4–7 хвилин), а через проміжки часу тривалістю 18–40 хв ці коливання суттєво змінюють фазу, амплітуду і частоту. Це дає підстави припускати, що в них проявляється своєрідне переміщення цугів електромагнітних хвиль, які рухаються в плазмі іоносфери і впливають на її іонізацію. Протягом 306 дня 2012 року над досліджуваними станціями переміщення такого “ефективного цугу електромагнітних хвиль” з періодом 4–7 хв відбувалося за 18–40 хв. За цей час відбувалися зміни іоносферного середовища, в якому поширюються сигнали від GNSS-супутників.

Щоб виявити просторові характеристики переміщення таких хвиль, обчислено взаємні кореляційні інтеграли між показниками VTEC названих станцій. Їхні графіки показано на рис. 6, а, 7, а, 8, а. На цих графіках видно нечітко виражений центральний максимум і перегини графіків на областях монотонності. Ширина центральних максимумів взаємних кореляційних інтегралів (і відстань між перегинами графіків) відповідає тривалості синфазних коливань показників VTEC над двома станціями. Відстань між двома суміжними екстремумами малих коливань взаємних кореляційних інтегралів відповідає частоті коливань VTEC, яка найчастіше одночасно відбувалися над двома станціями.

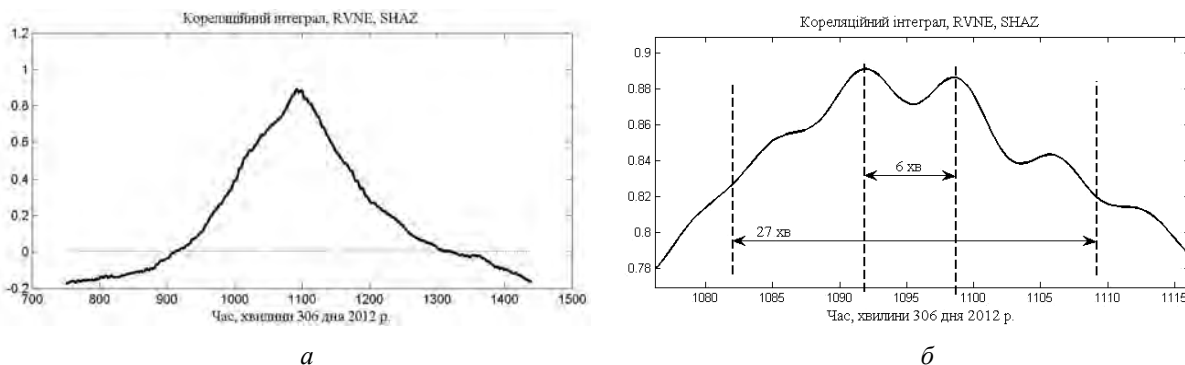


Рис. 6. Графік кореляційного інтеграла, визначеного за даними VTEC на станціях RVNE, SHAZ за 306 день 2012 р. (а) та його збільшений фрагмент (б)

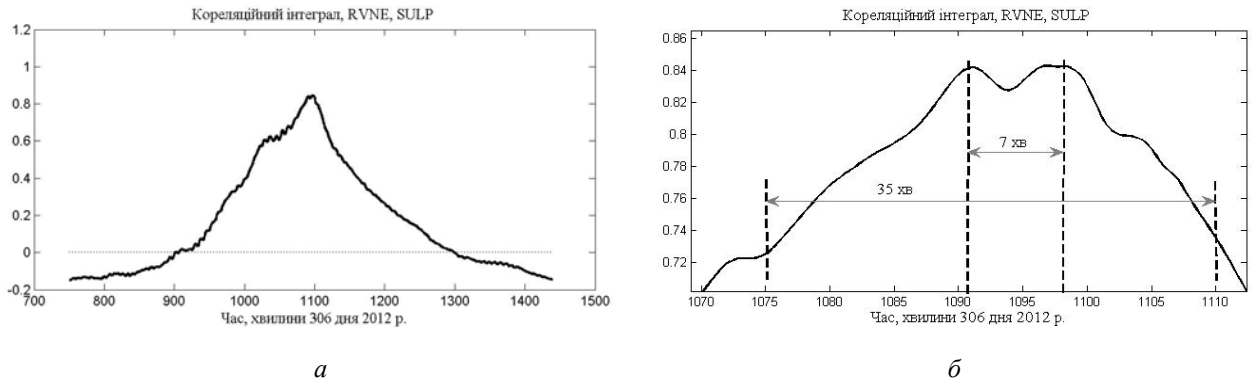


Рис. 7. Графік кореляційного інтеграла, визначеного за даними VTEC на станціях RVNE, Sulp за 306 день 2012 р. (а) та його збільшений фрагмент (б)

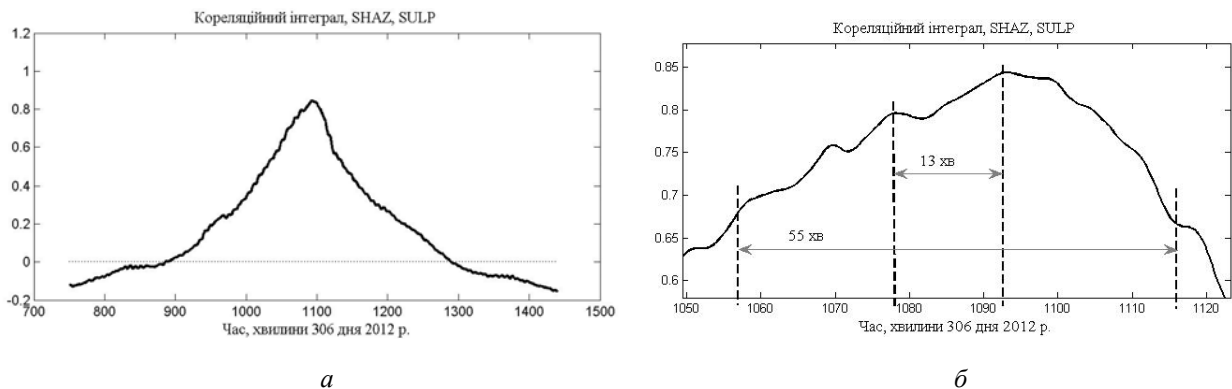


Рис. 8. Графік кореляційного інтеграла, визначеного за даними VTEC на станціях SHAZ, Sulp за 306 день 2012 р. (а) та його збільшений фрагмент (б)

З графіка на рис. 6, б видно, що над станціями RVNE і SHAZ найчастіше відбувалися одночасні коливання з періодом повторення 6 хв, а тривалість проміжку часу, протягом якого відбувалися приблизно синфазні коливання, становить 27 хв. З графіка на рис. 7, б видно, що над станціями RVNE і Sulp найчастіше відбувалися синфазні коливання з періодом повторення 7 хв тривалістю 35 хв. З графіка на рис. 7, б видно, що над станціями SHAZ і Sulp відбувалися синфазні коливання з періодом повторення 13 хв протягом приблизно 55 хв.

Отже, над близькими станціями RVNE, SHAZ, Sulp відбувалися приблизно синфазні коливання VTEC з періодом повторення 6–7 хвилин протягом проміжку часу приблизно 20–55 хвилин. Ці часові характеристики описують характерну тривалість дрібномасштабних і середньомасштабних просторово-часових змін VTEC над трьома станціями протягом одного дня, вибраного для спостережень.

Щоб виявити вплив добових коливань іонізації на значення показників VTEC, на трьох вибраних станціях вираховано згладжені значення цих показників. На рис. 9 показано графіки цих згладжених значень показників VTEC на станціях RVNE, SHAZ, Sulp за 307–311 дні 2012 р. З цих графіків легко зауважити, що добові коливання показника VTEC відбуваються синфазно, але в нічні години і ополудні ця синфазність порушена відносно короткотривалими випадковими відхиленнями.

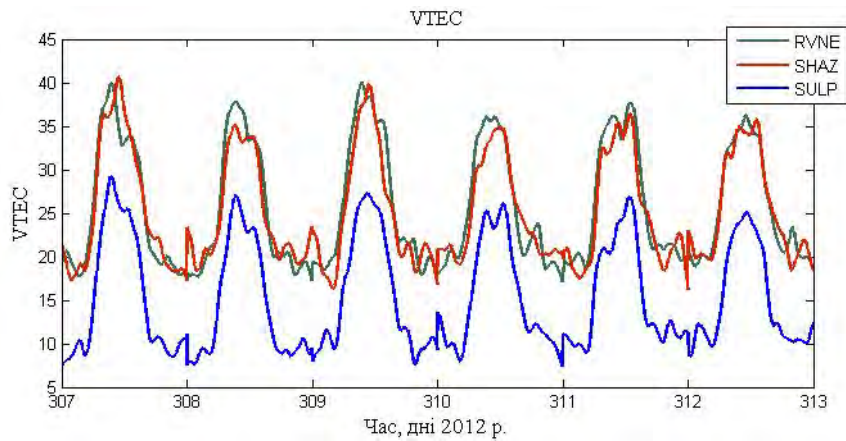


Рис. 9. Графіки згладжених значень VTEC на станціях RVNE, SHAZ, SULP за 307–311 дні 2012 р.

На рис. 10–12 показано графіки автокореляційних інтегралів згладжених значень показників VTEC на станціях RVNE, SHAZ, SULP за 307–311 дні 2012 р.

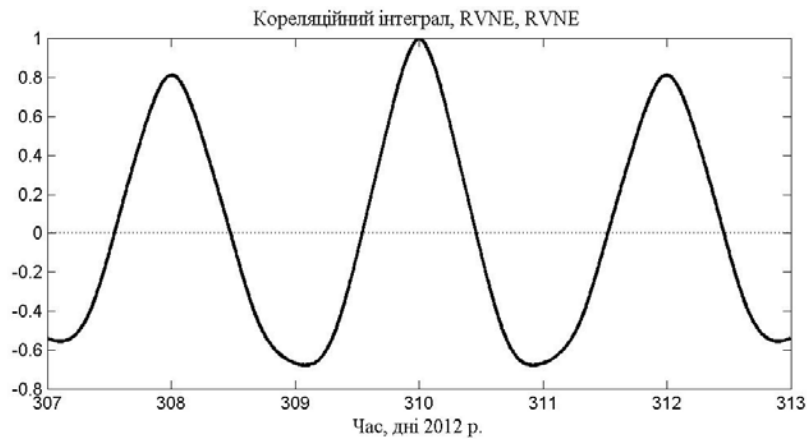


Рис. 10. Графік автокореляційного інтеграла, обчисленого за згладженими значенням VTEC на станції RVNE за 307–311 дні 2012 р.

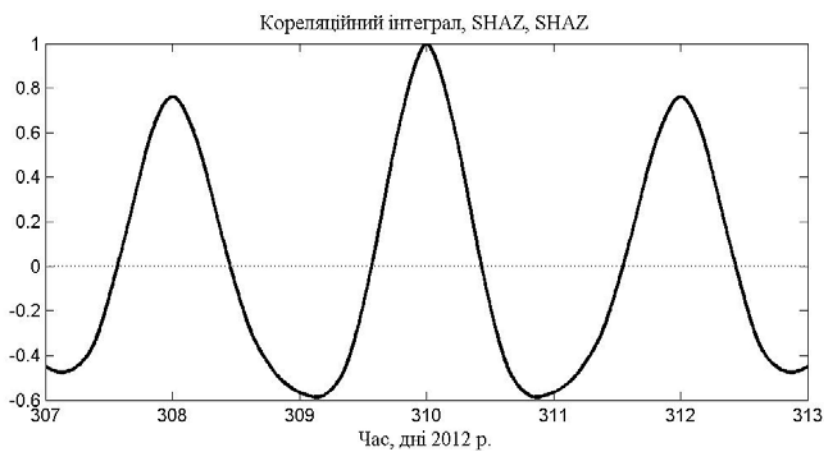


Рис. 11. Графік автокореляційного інтеграла, обчисленого за згладженими значенням VTEC на станції RVNE за 307–311 дні 2012 р.

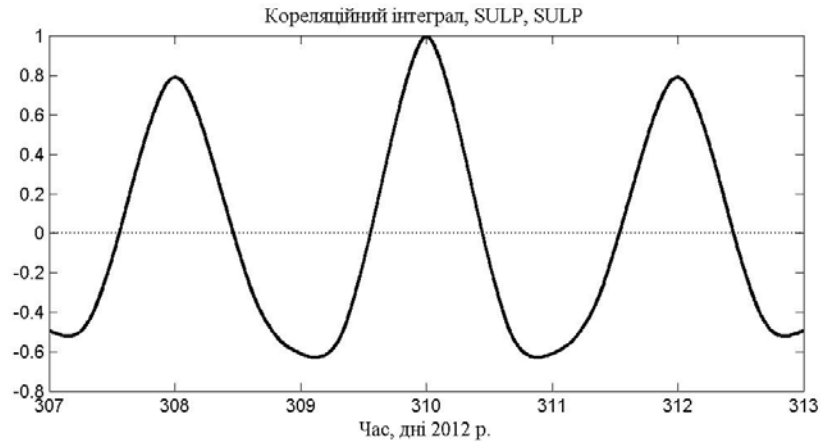


Рис. 12. Графік автокореляційного інтеграла, обчисленого за згладженими значеннями *VTEC* на станції *SULP* за 307–311 дні 2012 р.

На рис. 13–15 показано графіки взаємних кореляційних інтегралів, вирахованих між згладженими значеннями показників *VTEC* на станціях *RVNE*, *SHAZ*, *SULP* за названі дні. Видно, що автокореляційні та взаємні кореляційні інтеграли мають якісно й кількісно близькі характеристики. Звідси випливає висновок, що для розв'язання задач координатного забезпечення необхідно враховувати експериментально виміряні значення *VTEC* на близьких станціях.

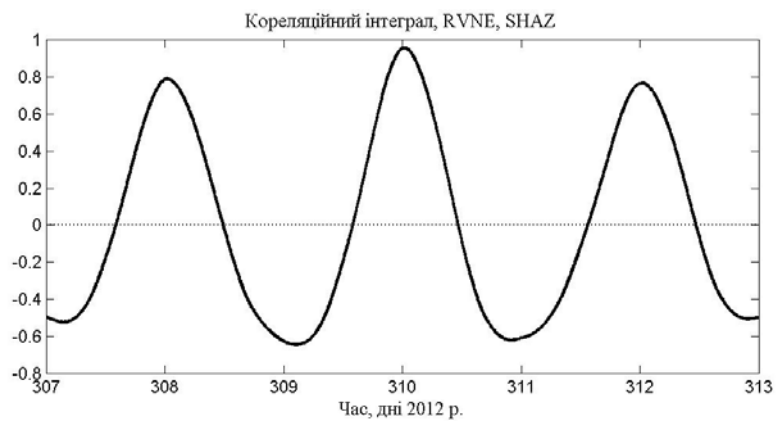


Рис. 13. Графік кореляційного інтеграла, обчисленого за згладженими значеннями *VTEC* на станціях *RVNE*, *SHAZ* за 307–311 дні 2012 р.

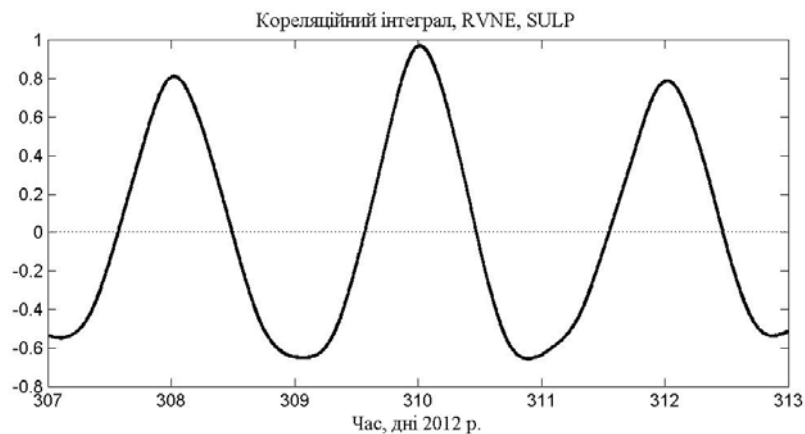


Рис. 14. Графік кореляційного інтеграла, обчисленого за згладженими значеннями *VTEC* на станціях *RVNE*, *SULP* за 307–311 дні 2012 р.

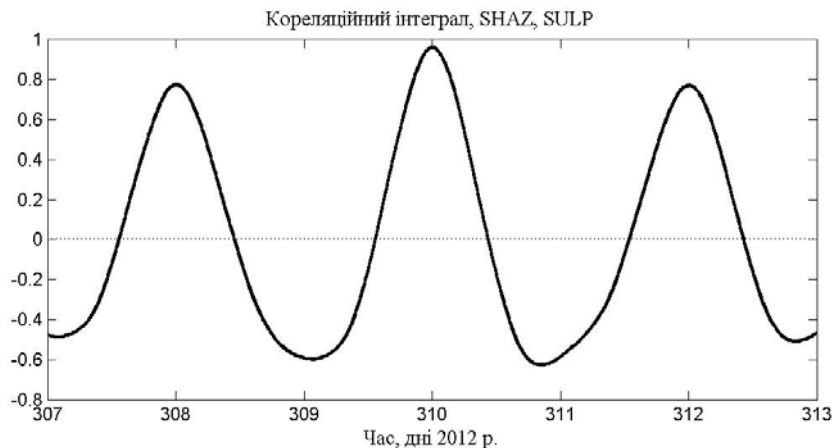


Рис. 15. Графік кореляційного інтеграла, обчисленого за згладженими значеннями VTEC на станціях SHAZ, SULP за 307–311 дні 2012 р.

**Висновки.** На основі проведених досліджень нами розроблено програмне забезпечення для регулярного обчислення параметрів іоносфери – похилих *STEC* та вертикальних *VTEC* значень загального вмісту електронів і доведено до практичного використання на перманентній станції SULP. Сьогодні у кожен годину визначається близько 3600 значень цих параметрів. У подальших наших планах є дослідження питань точності отриманих результатів, пошук нових алгоритмів згладження кодових спостережень, дослідження диференційної затримки для різних приймачів супутникових сигналів, розширення території досліджень шляхом опрацювання даних для мережі GNSS станцій західного регіону України.

1. Klobuchar J.A., Kunches J.M. (2000) *Eye on the ionosphere: the spatial variability of ionospheric range delay*. *GPS Solut* 3(3):70–74. doi:10.1007/PL00012808. 2. Klobuchar J., *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System*, 1987, AES 23(3), 325–331. 3. *Іоносферні карти: ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/*. 4. Bidaine B., Warnant R. (2010) *Assessment of the NeQuick model at mid-latitudes using GNSS TEC and ionosonde data*. *Advances in Space Research* 45(9):1122. 5. Krankowski A., Baran L.W. Shagimuratov I.I. *Influence of the northern ionosphere on positioning precision*. *Physics and Chemistry of the Earth* 27 (2002) 391–395. 6. Key-Rok Choi, Glenn Lightsey E. *Total Electron Content (TEC) Estimation Using GPS Measurements Onboard TerraSAR-X*. Center for Space Research, The niversity of Texas at Austin., *Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 2008*, pp. 923–934. 7. Andrzej Krankowski and all. *Ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC*. *J Geod DOI* 10.1007/s00190-011-0481-z. 8. Reinisch B.W., Huang X., Galkin I.A., Paznukhov V., Kozlov A. (2005) *Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes*. *J Atmos Solar-Terr Phys* 67:1054–1062. 9. ZAKPOS – *мережа референцих GNSS станцій*. – <http://zakpos.zakgeo.com.ua/>.