

УДК 528.2

Л. М. Янків-Вітковська

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ У МЕРЕЖІ СУПУТНИКОВИХ СТАНЦІЙ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

На основі визначення параметрів іоносфери із GNSS-спостережень на окремих станціях розроблено систему моніторингу іоносфери, що базується на мережі GNSS-станцій, розміщених у західній частині України та проведено регулярне відновлення просторового поля вертикальних значень інтегральної електронної концентрації (VTEC) у режимі реального часу.

Наземні методи дослідження стану іоносфери можуть дати інформацію про її параметри лише для нижнього шару. Висотний розподіл електронної концентрації верхньої іоносфери раніше міг бути отриманий тільки за допомогою іонозондів космічного базування, вертикальних запусків ракет і нечисленних установок некогерентного розсіяння радіохвиль. Це досить затратні технології, що вимагають значних коштів та часу.

АКТУАЛЬНІСТЬ

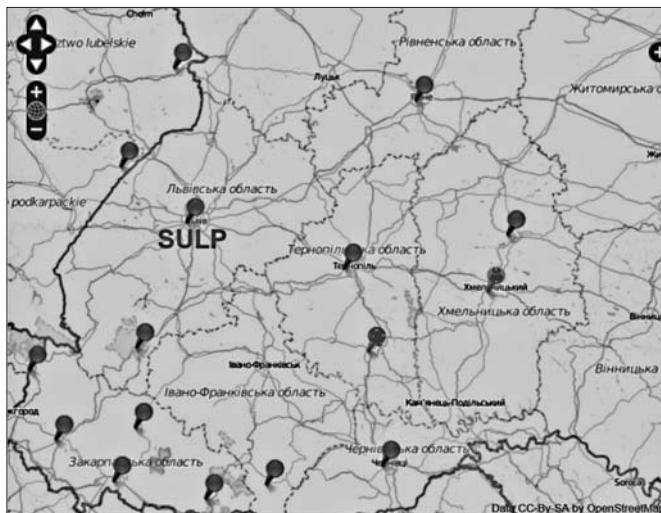
Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) в даний час є найбільш ефективним і перспективним засобом дистанційної діагностики іоносфери з усіх радіофізичних методів. Використання таких вимірювань має цілий ряд переваг порівняно з класичними радіофізичними засобами зондування іоносфери, зокрема – безперервність вимірювань, висока просторово-часова роздільна здатність та глобальність моніторингу іоносферних збурень різної природи. Метод діагностики іоносфери за допомогою GNSS-радіосигналів є найбільш економічним, оскільки ґрунтується на вже існуючій космічній GNSS-інфраструктурі та наземній мережі перманентних станцій. Його можна використовувати для вивчення таких характеристик іоносфери, як інтегральна електронна концентрація

(TEC), профіль висотного розподілу електронної концентрації, іоносферні неоднорідності, активність авроральної області іоносфери, перенесення великомасштабних неоднорідностей, вплив штучних збурень на іоносферу, реально-часові і азимутально-часові варіації параметрів іоносфери.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

При розв'язуванні задач координатного забезпечення у геодезії на даний час широкого використання отримали активні референсні GNSS-станції, які з допомогою спеціалізованого програмного забезпечення об'єднуються у мережі. Одним із прикладів таких мереж в Україні є мережа активних референсних станцій ZAKPOS [10]. Серед чинників, які суттєво впливають на точність координатного забезпечення, і які регулярно оцінюються на рівні мережі, є іоносфера. Оцінка іоносфери виконується лише якісно з використанням «Індексу-95». Цей показник визначає стан іоносфери у мережі GNSS-станцій аналогічно до показників геомагнітної чи сонячної активності. Для вивчення таких характеристик іоносфери, як інтегральна електронна концентрація (TEC) цього недостатньо, і саме тому ми створили відповідний алгоритм, за допомогою якого можемо визначати значення параметрів іоносфери для окремої GNSS-станції, яка працює в режимі реального часу [6].

Межа станцій



17 станцій:

CHTK
CRNI
HMEL
HOZD
HRUB
HUST
MIZG
MUKA
RAHI
RVNE
SHAZ
SKOL
SKON
SULP
TERN
VBER
VRHV

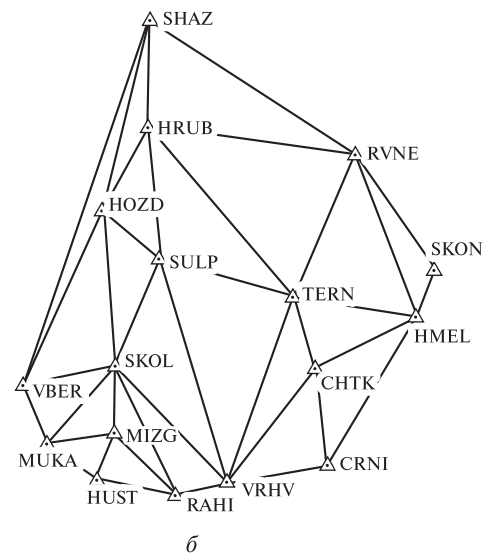


Рис. 1. Схема розміщення (а) та мережа (б) активних референсних станцій ZAKPOS

Цей алгоритм складається із таких основних кроків:

- отримання файлів спостережень на окремій станції (отримуємо кодові та фазові псевдовід-стані на двох частотах $L1$ і $L2$);
- введення додаткових параметрів на станції: її координат, кута відсічки супутників, значення диференційної затримки сигналу ($DCB_{ст}$) для конкретного типу приймача і антени станції;
- отримання із FTP-сервера CODE диференційних кодових затримок ($DCB^{суп}$) для всіх доступних супутників на момент обчислення;
- аналіз даних спостережень (наявність кодових та фазових вимірювань, виявлення та усунення циклічних стрибків фази, згладження кодових вимірювань фазовими);
- обчислення похилих значень інтегральної електронної концентрації ($STEC$) на фіксовані моменти спостереження для кожного GNSS-супутника;
- визначення значень $VTEC$ на фіксовані моменти спостереження з врахуванням даних $STEC$ від всіх доступних GNSS-супутників;
- формування файлів з результатами обчислень $STEC$ і $VTEC$ для GNSS-станції.

Отримані дані TEC із безпосередніх спостережень окремих станцій дозволили нам створити систему моніторингу іоносфери, що базується

на мережі GNSS-станцій, розміщених у Західній частині України (17 станцій на території семи областей) у режимі реального часу, починаючи з 24 січня 2013 р.

На даний час ми накопичуємо результати визначення параметрів іоносфери та проводимо їхній поточний аналіз. Однією із головних наших задач на цьому етапі досліджень є проведення регуляризованого відновлення просторового поля вертикальних значень інтегральної електронної концентрації ($VTEC$) за отриманими даними на GNSS-станціях у режимі реального часу.

Для розв'язання цієї задачі нами взято дані визначення $VTEC$ на 17 станціях мережі ZAKPOS (CHTK, CRNI, HOZD, HRUB, HUST, MIZG, MUKA, RAHI, RVNE, SHAZ, TERN, VBER, SULP, VRHV, SKOL, SKON, HMEL) за проміжок часу від 24 січня до 16 квітня 2013 р. (рис. 1).

Нехай

$$\varphi_i, \lambda_i \quad (1)$$

— відповідно широта і довгота i -ї станції, n — кількість станцій. Для кожної станції відомі значення $VTEC$, визначені через певні проміжки часу:

$$v_{ij}(t_k) \quad (i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m, k = 1, \dots, K), \quad (2)$$

де v_{ij} — значення $VTEC$ на i -й станції, визначене для j -го супутника, m — кількість супутників, t_k — час вимірювання, K — кількість вимірювань.

Для дослідження взято часовий ряд (2) з інтервалом визначення 15 с від всіх доступних супутників на 17 станціях.

Необхідно визначити *VTEC* у довільній просторовій точці, що входить територіально у зону покриття станціями:

$$v = v(\varphi, \lambda, t_k) \quad (3)$$

на області $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$, $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, де

$$\varphi_{\min} = \min_{i=1, \dots, n} \varphi_i, \quad \varphi_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} \varphi_i,$$

$$\lambda_{\min} = \min_{i=1, \dots, n} \lambda_i, \quad \lambda_{\max} = \max_{i=1, \dots, n} \lambda_i.$$

Для відновлення поля (3) за даними (1), (2) застосовано поліноміальну апроксимацію. Проте за даними (1), (2) безпосередньо відновити поле *VTEC* важко, оскільки мала кількість станцій обмежує степінь полінома для апроксимації залежності (3). Тому для розв'язання поставленої задачі застосовано метод, який описано нижче.

Щоб збільшити кількість апроксимованих даних, для всіх пар станцій

$$(\varphi_p, \lambda_p), (\varphi_q, \lambda_q) \quad (4)$$

визначено лінійну інтерполяцію показника *VTEC*. Для цього розраховано координати точок

$$\varphi_{pql}(t_k), \lambda_{pql}(t_k), \quad (5)$$

$$(p, q = 1, \dots, n, p \neq q, l = 1, \dots, L, k = 1, \dots, K),$$

де L — кількість вузлів розбиття відрізків (4). Значення показника *VTEC* в один момент часу

$$\bar{v}_i(t_k) \quad (6)$$

визначено двома методами. Або як середнє арифметичне від його значень, виміряних за окремими супутниками:

$$\bar{v}_i(t_k) = m^{-1} \sum_{j=1}^m v_{ij}(t_k),$$

або як середнє зважене

$$\bar{v}_i(t_k) = \sum_{j=1}^m w_{ij} v_{ij}(t_k)$$

з ваговими коефіцієнтами w_j , які є оберненими величинами до відстаней між шуканим середньозваженим значенням і значенням *VTEC* одного супутника [4]:

$$w_{ij} = \left(\sum_{k=1}^K [v_{ij}(t_k) - \bar{v}_j(t_k)]^2 \right)^{-1/2}.$$

Усереднені значення *VTEC* $\bar{v}_i(t_k)$ згладжено з допомогою апроксимації згладжувальними сплайнами

$$\tilde{v}_i(t_k) \approx \bar{v}_i(t_k). \quad (7)$$

За згладженими усередненими значеннями (6) параметра іоносфери двох різних станцій $\tilde{v}_p(t_k)$, $\tilde{v}_q(t_k)$ за допомогою лінійної інтерполяції визначено *VTEC* на прямій лінії, яка сполучає p -ту та q -ту станції, тобто у просторових точках (5). За допомогою такої інтерполяції знайдено значення параметра *VTEC* у l -й точці на всіх лініях між станціями p, q :

$$\tilde{v}_{pql}(t_k), \quad (8)$$

Дані (8) апроксимовано на вузлах (5) з допомогою степеневого полінома двох аргументів. Коефіцієнти цього полінома знайдено з задачі мінімізації регуляризаційного функціоналу Тихонова [4, 5]:

$$\min_{c_k} \left\{ \sum_{p,q=1}^{n,p \neq q} \sum_{l=1}^L [\tilde{v}_{pql}(t_k) - P_k(\varphi_{pql}, \lambda_{pql})]^2 + \alpha \sum_{i_x+i_y \leq r} (c_{i_x i_y}^k)^2 \right\}, \quad (9)$$

де P_k — степеневий поліном двох аргументів:

$$P_k(x, y) = \sum_{i_x+i_y \leq r} c_{i_x i_y}^k x^{i_x} y^{i_y}, \quad (10)$$

r — степінь цього полінома, $c_{i_x i_y}^k$ — коефіцієнти полінома, α — параметр регуляризації. Додатково під час розв'язування задачі (9) застосовано метод регуляризації з допомогою редукції апроксимаційного базису [1, 2, 8], який полягає у виявленні та видаленні «зайвих» доданків полінома (10). Під час першого розв'язування задачі (9) апроксимаційний базис встановлено для вибраних станцій. Під час наступних розв'язувань цієї задачі встановлено лише значення параметрів полінома (10) за раніше встановленого апроксимаційного базису. Завдяки цьому розроблений метод розв'язування задачі (9) придатний для застосування в засобах автоматизованого оброблення даних.

Розв'язок задачі (9) задає степеневе наближення показника *VTEC* в момент часу t_k в околі області $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$, $\lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$:

$$\bar{v}(\varphi, \lambda, t_k) = P_k(\varphi, \lambda). \quad (11)$$

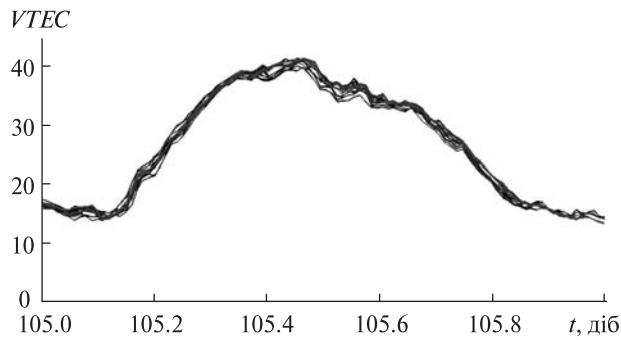


Рис. 2. Динаміка $VTEC$ на станціях ZAKPOS на 105-й день 2013 р.

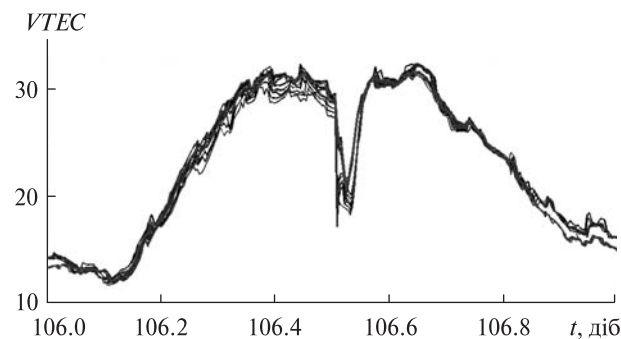


Рис. 3. Динаміка $VTEC$ на станціях ZAKPOS на 106-й день 2013 р.

На основі описаного методу визначено від 100 до 300 значень (7) протягом одного дня. За формулою (11) визначено показник $VTEC$ на території розміщення станцій ZAKPOS протягом окремих днів від 24 січня по 16 травня 2013 р. За окремими «часовими кадрами» $VTEC$ відновлено приблизну просторову зміну параметра іоносфери з часом.

Зокрема, для дослідження взято 100 вимірів $VTEC$ за 15 квітня (105-й день) і 300 таких вимірів за 16 квітня 2013 р. (106-й день). Цей часовий проміжок вибраний тому, що протягом 105-го дня відбувалася типова зміна іонізації (рис. 2), а протягом 106-го дня відбулося «нетипове» суттєве короткотривале зменшення іонізації у полудень (рис. 3).

На рис. 4 показано чотири типових фрагменти карти розподілу $VTEC$ по території досліджуваних нами станцій, отриманий з допомогою описаного методу.

На основі динаміки $\bar{v}(\varphi, \lambda, t)$ нами встановлено, що на досліджуваній території виникають області зростання іонізації атмосфери, інколи ці області утворюються безпосередньо на досліджуваній території, де іонізація поступово зростає аж до наступного переміщення області високої іонізації в іншу місцевість або її зниження без суттєвого переміщення. В інших випадках області високої іонізації переміщуються на досліджувану область із суміжних територій.

Характерний час утворення локального максимуму іонізації або його переміщення через територію досліджуваних GNSS-станцій в нічну і полуденну пору становить 15–20 хв. Під час ранкового (схід Сонця) зростання іонізації та її вечірнього спадання (захід Сонця) цей характерний час утворення або переміщення областей підвищеної іонізації скорочується в середньому до 5 хв, хоч трапляються випадки, що у полі $VTEC$ виникає своєрідна «бура», під час якої за декілька секунд повністю змінюється вид карти стану іоносфери.

Виконана ілюстрація зміни $VTEC$ з часом дозволяє зробити висновок, що для розв'язання задач координатного забезпечення на території між GNSS-станціями варто підбирати дані в ті моменти часу, коли на цій території не відбувається сильної зміни іонізації. Параметр $VTEC$ має невисокі значення і повільніше змінюється в нічну пору, також повільно змінюється у полуденну пору, хоча має тоді максимальне значення. Для розв'язання задач координатного забезпечення в момент, коли відбувається швидка зміна $VTEC$, необхідно брати до уваги більшу кількість даних вимірювання, щоб запобігти впливу даного типу похибки.

Характерний просторовий розмір неоднорідностей параметрів іоносфери має масштаб території досліджуваних станцій. Але в окремі моменти часу розмір цих неоднорідностей є меншим або значно більшим за розміри досліджуваних нами GNSS-станцій.

Описані закономірності збігаються з результатами дослідження характерного часу зміни показника $VTEC$, які були виконані за допомогою аналізу кореляційних інтегралів між значеннями $VTEC$ на різних станціях мережі ZAKPOS [9].

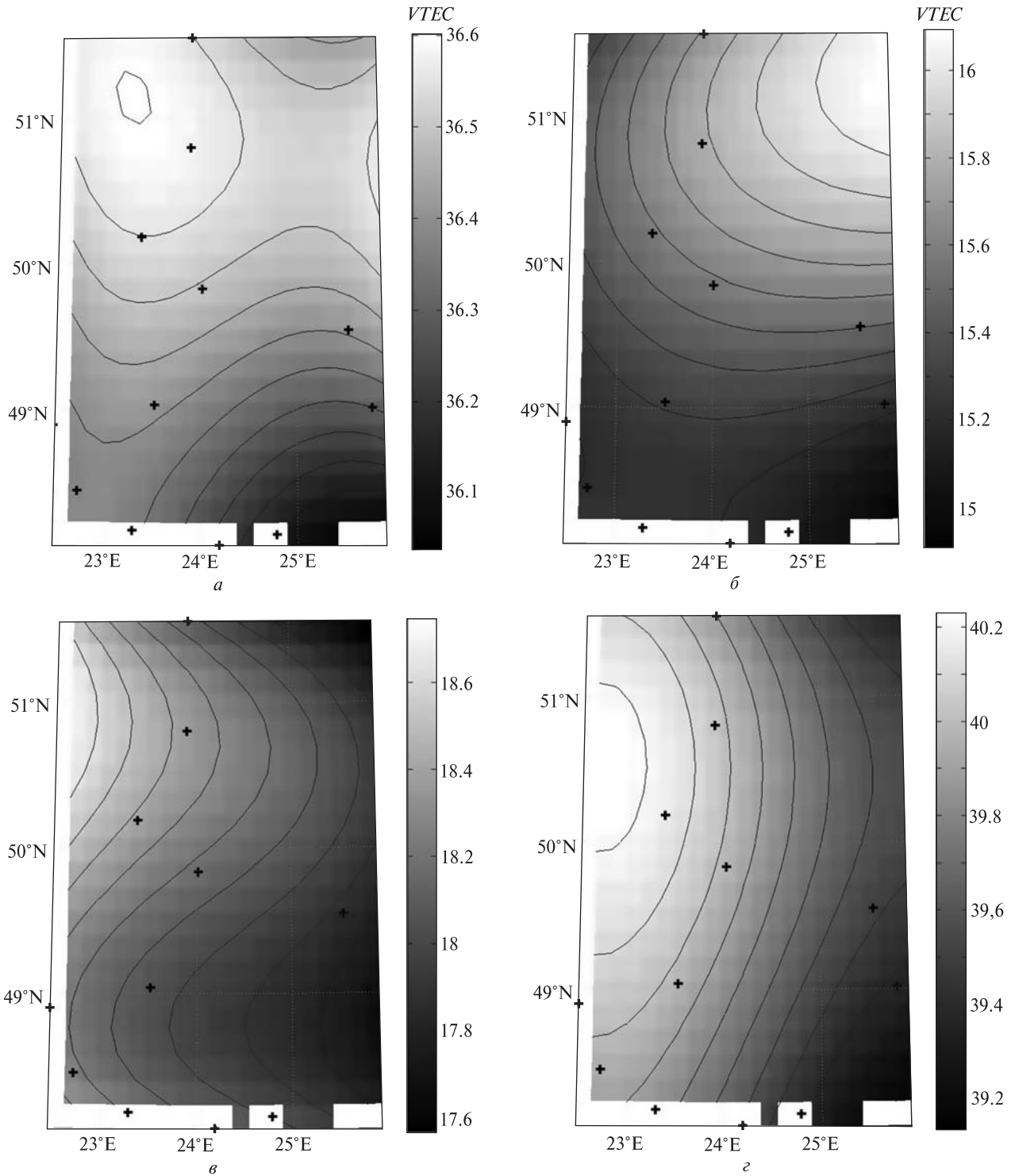


Рис. 4. Розподіл значень VTEC по території ZAKPOS, на яких видно границю областей з високим і низьким значенням VTEC і широкий локальний мінімум VTEC

ВИСНОВКИ

Програмне забезпечення, розроблене для відновлення поля *VTEC* для мережі GNSS-станцій ZAKPOS та його графічне відображення, може експлуатуватися в автоматизованому режимі реального часу, а також в системах опрацювання даних інших станцій. Тому запропонована методика дає можливість проводити детальний аналіз іоносфери на будь-якій території, дозволить здійснити короткотермінове прогнозування впливу іоносфери для високоточного визначення координат за допомогою GNSS-технологій.

Застосування даного алгоритму для опрацювання даних, що базуються на мережі GNSS-станцій, відкриває можливості для створення моделі іоносфери, аналізу особливостей параметрів іоносфери, дослідження зовнішніх впливів на їхню зміну з часом, а також для вдосконалення розв'язування задач координатного забезпечення.

1. Курганевич А., Матвійчук Я. Регуляризація задачі ідентифікації макромоделей нелінійних динамічних систем методом редукції апроксимаційного базису // Теоретична електротехніка. — 2000. — Вип. 55. — С. 31—36.
2. Матвійчук Я. М. Математичне макромоделювання динамічних систем: теорія та практика. — Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2000. — 215 с.
3. Матвійчук Я. М., Паучок В. К. Регуляризована ідентифікація динамічних прогностичних макромоделей // Теоретична електротехніка. — 2003. — Вип. 57. — С. 13—18.
4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 288 с.
5. Тихонов А. Н., Гончаровский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. — М.: Наука, 1983. — 200 с.
6. Янків-Вітківська Л. М. Про обчислення параметрів іоносфери за допомогою спеціального алгоритму: перші результати // Космічна наука і технологія. — 2012. — 18, № 6. — С. 73—75.

7. Янків-Вітківська Л. М. Про дослідження параметрів іоносфери для GNSS-станцій SULP, RVNE та SHAZ // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2013. — Вип. 78. — С. 169—172.
8. Янків-Вітківська Л. М., Матвійчук Я. М., Савчук С. Г., Паучок В. К. Дослідження змін координат GNSS-станцій методом макромоделювання // Вісник геодезії та картографії. — 2012. — № 3. — С. 9—17.
9. Янків-Вітківська Л. М., Паучок В. К. Про кореляційний зв'язок геодезичних і геосейсмічних процесів // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — 2012. — Вип.. — С. 188—190.
10. ZAKPOS — мережа референцних GPS станцій [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://zakpos.zakgeo.com.ua>.

Стаття надійшла до редакції 24.10.13

Л. Н. Янкив-Витковская

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ В СЕТИ СПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ

На основании определения параметров ионосферы из GNSS-наблюдений на отдельных станциях разработана система мониторинга ионосферы, базирующаяся на сети GNSS-станций, расположенных в Западной части Украины и проведено регуляризованное восстановление пространственного поля вертикальных значений интегральной электронной концентрации (*VTEC*) в режиме реального времени.

L. M. Yankiv-Vitkovska

A PROCEDURE FOR THE DETERMINATION OF IONOSPHERE PARAMETERS ON THE BASIS OF THE GNSS NETWORK IN WESTERN UKRAINE

We developed a system for monitoring the ionosphere which uses the GNSS network located in the western part of Ukraine. The system is based on determining the ionosphere parameters from GNSS observations performed at an individual station. Regularized restoration of spatial field of integral values of Vertical Total Electron Content (*VTEC*) in real time was carried out.