

УДК 528.18

## Про кореляцію між значеннями параметра іоносфери *VTEC* на GNSS-станціях України

С. Г. Савчук\*, Ф. Д. Заблоцький, Л. М. Янків-Вітковська, Б. Б. Джуман

*Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, Україна*

Оримання інформації про просторовий розподіл електронної концентрації є непростою задачею, оскільки висотні профілі розподілу параметра *TEC* змінюються як з часом, так і з довготою та широтою, і залежать від магнітної та сонячної активності. У зв'язку з цим актуальним є дослідження характерних кількісних параметрів, що описують динаміку іонізації атмосфери. Метою даної роботи є дослідження параметру іоносфери *VTEC*, а саме дослідження кореляційних зв'язків між цим параметром на різних GNSS-станціях, відстань між якими сягає від 100 до 400 км. Для розв'язання поставленої задачі спочатку було опрацьовано іонофайли із значеннями параметру *VTEC* на різних станціях, а також проведено їх фільтрацію за допомогою фільтру Кальмана. Далі знайдено коефіцієнти кореляції між значеннями параметру *VTEC* попарно для всіх досліджуваних GNSS-станцій. Запропоновано аналітичний зв'язок між коефіцієнтом кореляції значень параметру *VTEC* і відстанню між GNSS-станціями.

**Ключові слова:** глобальні навігаційні супутникові системи, іоносфера, загальна концентрація електронів, кореляційний зв'язок

© С. Г. Савчук, Ф. Д. Заблоцький, Л. М. Янків-Вітковська, Б. Б. Джуман. 2019

### Вступ

На сьогоднішній день глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS) є ефективним засобом дистанційної діагностики іоносфери. Це дозволяє проводити експериментальні дослідження при використанні існуючих мереж активних референтних GNSS-станцій. Тому особливої уваги набуває система визначення параметрів іоносфери на основі аналізу властивостей сигналів, що приймаються від супутників [1].

Дослідження впливу іоносфери є важливим для вирішення практичних завдань координатного забезпечення геодезичного класу точності. Під час роботи GNSS-станцій відбувається збір та накопичення даних про параметри навколоземного простору, зокрема, значення *VTEC* (вертикальної концентрації електронів) над окремими референтними станціями. Ці дані відображають стан іоносфери у момент проведення спостережень, а також є важливим інструментом для підвищення точності та надійності визначення координат місця проведення спостережень [7].

Метою даної роботи є дослідження кореляційних зв'язків між значеннями параметру іоносфери *VTEC* на GNSS-станціях України, а також знаходження аналітичної залежності між такими кореляціями і відстанню між GNSS-станціями.

### Обчислення параметрів іоносфери *VTEC* із використанням мережі мультиспостережуваних GNSS-станцій

Для виконання нашого дослідження використовувались дані GNSS спостережень, отриманих з референтних станцій України [3]. Вибір станцій ґрунтувався на можливості дослідження варіацій та динаміки змін електронної концентрації електронів з часом.

Для дослідження ми обрали 6 станцій [2], які розташовані на відстанях від 100 до 400 км одна від одної: SULP (м. Львів), NEMO (м. Немирів, Вінницька обл.), RIVNE (м. Рівне), SKON (м. Старокостянтинів, Хмельницька обл.), CRNI (м. Чернівці), FRAN (м. Івано-Франківськ). Схему цих станцій представлено на рис. 1.

Використовуючи дані з мережі мультиспостережуваних GNSS-станцій можна отримувати псевдовідстані до супутників і, безпосередньо, визначати параметри іоносфери *VTEC* [5].

Обчислення параметру *VTEC* відбувається внаслідок автоматизованого опрацювання файлів GNSS спостережень для окремої станції по кожному супутнику. Алгоритм опрацювання базується на використанні вимірних кодових і фазових псевдовідстаней у приймачі та калібрувальних коефіцієнтів (DCB дані) [6, 7]. Він дозволяє отримувати значення *VTEC* у двох варіантах:

- лише за фазовими вимірюваннями, попередньо використавши розв'язки фазових неоднозначностей у мережі в цілому;
- лише за кодовими вимірюваннями, попередньо згладивши їх.

\* E-mail: &lt;teojuman@gmail.com&gt;

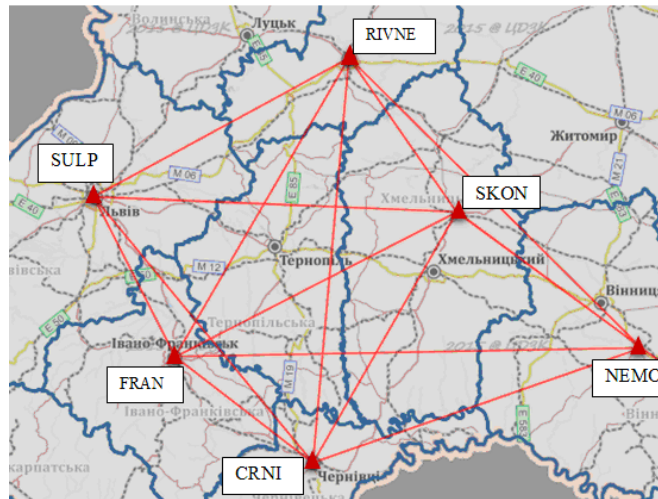


Рис.1. Схема досліджуваних станцій

Вхідними даними були файли за травень 2016 року, згенеровані програмним продуктом *Trimble Pivot Platform*, які містили обчислені значення показника *VTEC* для кожної станції мережі ZAKPOS через кожні 15 секунд [3]. Фрагмент такого файлу наведено на рис. 2.

```
Total Electron Content (TEC)
Filename: lpi_iono_1220.16TEC
Epoch rate (sec): 15

# [Year] [Month] [Day] [Hour] [Minute] [Second] [Number of stations]
# [Station code] [Number of satellites]
# [Satellite id]; [Vertical TEC value]; [Pierce point Lat[rad]]; [Pierce point Long[rad]]

#2016 05 01 00 00 00.0000000 24
NADA 9
G01;26.384;0.866012818;0.373716987
G03;23.845;0.806081345;0.260462792
G08;25.453;0.764863083;0.389931483
G10;16.650;0.888480717;0.654628300
G11;30.791;0.843043756;0.392970881
G14;26.925;0.856598900;0.50656317
G22;27.787;0.835010328;0.362903431
G27;18.205;0.641435022;0.444884647
G28;16.792;0.927295116;0.116565316
NKA 15
G01;25.120;0.862016165;0.344306045
G03;24.484;0.802143309;0.237991813
G08;24.148;0.762119664;0.363523188
G10;17.581;0.890850412;0.632752792
G11;28.955;0.839509626;0.363953257
G14;27.860;0.854873300;0.477818425
G22;27.337;0.831178049;0.334855111
G27;18.272;0.639329861;0.421237775
G28;12.870;0.918135192;0.098707331
R04;0.000;0.919386816;0.527776115
R05;10.936;0.853703267;0.397808976
R06;18.477;0.788547972;0.291303218
R19;0.965;0.695229915;0.481115546
R20;15.144;0.821102885;0.394068645
```

Рис. 2. Фрагмент іонофайлу

### Дослідження кореляційних зв'язків між параметрами *VTEC* на різних GNSS-станціях

Для подальшого аналізу за допомогою фільтру Кальмана знайдено значення параметра *VTEC* на кожні дві години і отримано їх статистичні характеристики (табл. 1).

Графіки параметру *VTEC* на досліджувані станції представлено на рис. 3.

Аналізуючи отримані графіки, можна говорити про подібність регулярних варіацій *VTEC* на досліджуваний період для різних станцій. Тому доцільно дослідити кореляцію між показниками параметру

іоносфери *VTEC* на різних GNSS-станціях, а також знайти аналітичну залежність між такою кореляцією і відстанню між GNSS-станціями [4].

Кореляційний зв'язок характеризується коефіцієнтом кореляції. Із математичного аналізу добре відомо, що відношення кореляційного моменту до добутку середніх квадратичних відхилень називають коефіцієнтом кореляції  $r$ :

$$r = \frac{\mu}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

де,  $X_i, Y_i$  — числові значення величин, між якими досліджується кореляційний зв'язок,  $\bar{X}, \bar{Y}$  — середні арифметичні значення цих величин.

Використавши формулу (1) було обчислено значення коефіцієнту кореляції між досліджуваними станціями. Також обчислено відстані між цими ж станціями. Отримані дані представлено у табл. 2.

Використовуючи дані з табл. 2, побудовано графік коефіцієнта кореляції як функцію відстані. Також побудовано модель коефіцієнта кореляції за допомогою степеневого поліному другого порядку. Отриманий результат показано на рис. 4.

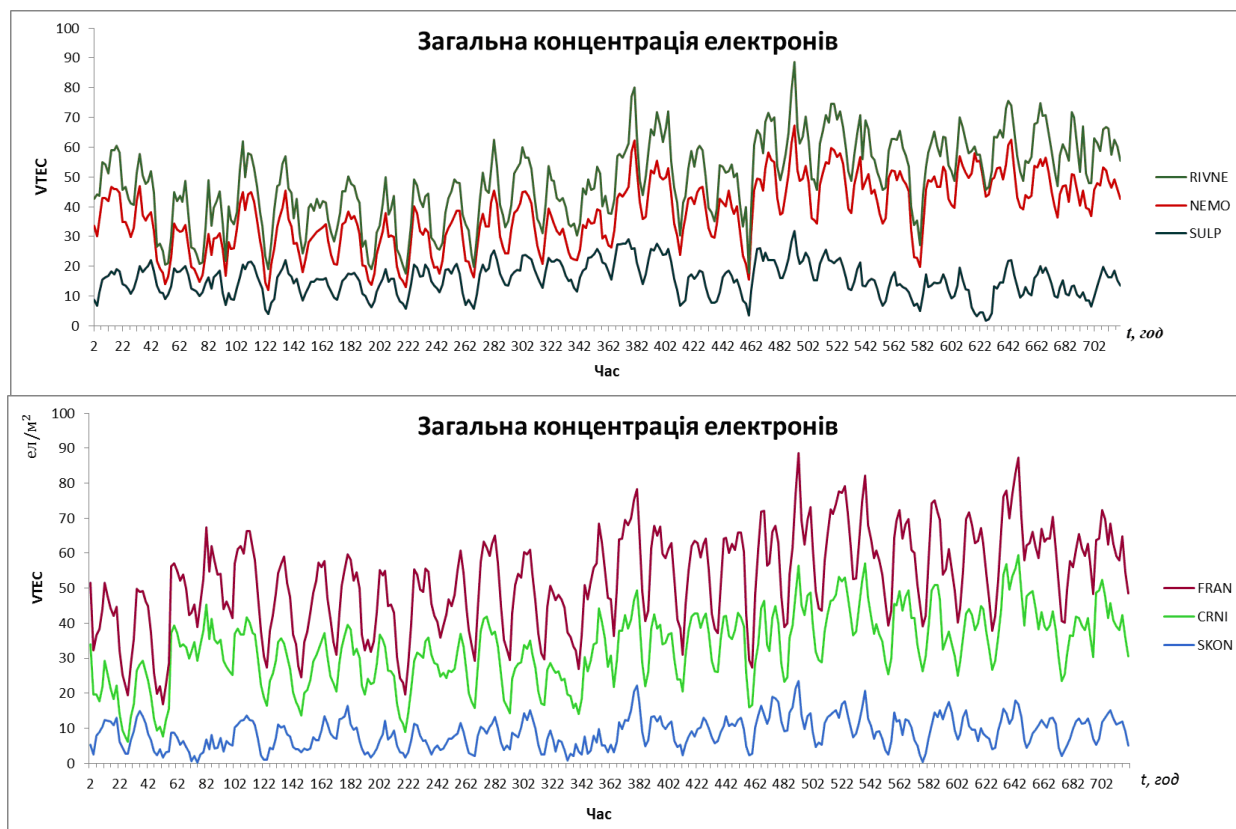
### Висновки

- проведено аналіз і бракування параметру *VTEC* на GNSS-станціях з використанням фільтру Кальмана;
- знайдено коефіцієнти кореляції між значеннями параметру *VTEC* на досліджуваних GNSS-станціях при відстанях між ними в діапазоні 100–400 км;
- запропоновано модель аналітичної залежності між коефіцієнтом кореляції і відстанню між GNSS-станціями.

Отримані результати можна використати для дослідження параметрів іоносфери для всієї мережі

**Таблиця 1.**  
Статистичні характеристики значення параметру *VTEC*

	SULP	NEMO	RIVNE	SKON	CRNI	FRAN
Кількість епох	360	360	360	360	360	360
Мін. значення <i>VTEC</i> , <i>TEC<sub>u</sub></i>	1.6	4.7	2.2	0.2	3.3	9.2
Макс. значення <i>VTEC</i> , <i>TEC<sub>u</sub></i>	32.0	54.0	21.5	23.5	43.4	32.1
Середнє арифметичне значення, <i>TEC<sub>u</sub></i>	15.6	22.2	11.1	8.7	24.3	19.6
Стандартна похибка середнього арифметичного, <i>TEC<sub>u</sub></i>	0.3	0.5	0.2	0.2	0.4	0.3
Дисперсія	30	100	12	19	62	20
Ексцес	-2.999	-3.000	-2.998	-2.995	-3.000	-2.999

**Рис. 3.** Графіки параметру *VTEC* на досліджуваних станціях**Таблиця 2.**  
Коефіцієнти кореляції та відстані між досліджуваними станціями

№	Назва станції	Відстань, км	Коефіцієнт кореляції	№	Назва станції	Відстань, км	Коефіцієнт кореляції
1	SULP – NEMO	363	0.03	9	NEMO – FRAN	302	0.48
2	SULP – RIVNE	181	0.61	10	RIVNE – SKON	117	0.50
3	SULP – SKON	229	0.58	11	RIVNE – CRNI	259	0.28
4	SULP – CRNI	220	0.17	12	RIVNE – FRAN	218	0.62
5	SULP – FRAN	113	0.77	13	SKON – CRNI	187	0.37
6	NEMO – RIVNE	261	0.31	14	SKON – FRAN	203	0.77
7	NEMO – SKON	147	0.63	15	CRNI – FRAN	113	0.40
8	NEMO – CRNI	226	0.51				



**Рис. 4.** Графік коефіцієнта кореляції (синя крива) і його моделі (червона крива) як функції відстані

референціальних GNSS-станцій України. Проведені дослідження не дають вичерпної відповіді, як змінюється іоносфера в регіональному масштабі, але згідно отриманих результатів можна змодельовувати варіації та динаміку змін концентрації електронів в просторі.

### Література

1. Янків-Вітковська Л. М. Про обчислення параметрів іоносфери за допомогою спеціального алгоритму: перші результати. *Космічна наука і технологія*. 2012. Т. 18. № 6. С. 73–75.
2. Янків-Вітковська Л. М. Про дослідження параметрів іоносфери для GNSS-станцій Sulp, RVNE та SHAZ. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2013. Вип. 78. С. 169–172.
3. Янків-Вітковська Л. М. Методика визначення параметрів іоносфери у мережі супутникових станцій Західної України. *Космічна наука і технологія*. 2013. Т. 19. № 6. С. 47–52.
4. Bidaine B., Warnant R. Assessment of the NeQuick model at mid-latitudes using GNSS TEC and ionosonde data. *Advances in Space Research*. 2010. 45(9). P. 1122.
5. Klobuchar J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System*. 1987. 23(3). P. 325–331.
6. Klobuchar J. A., Kunches J. M. Eye on the ionosphere: the spatial variability of ionospheric range delay. *GPS Solutions*. 2000. 3, Iss. 3. P.70–74.
7. Yankiv-Vitkovska L. M., Savchuk S. H., Pauchok V. K., Matviichuk Ya. M. and Bodnar D. I. M. Recovery of the Spatial State of the Ionosphere Using Regular Definitions of the TEC Identifier at the Network of Continuously Operating GNSS Stations of Ukraine. *Journal of Geodesy and Geomatics Engineering*. vol. 1(9). 37–48.
8. Yankiv-Vitkovska L. M. Operating GNSS Stations of Ukraine. *Journal of Geodesy and Geomatics Engineering*. 2016. vol. 1(9). pp. 37–48.

### References

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЯМИ ПАРАМЕТРА ИОНОСФЕРЫ *VTEC* НА GNSS СТАНЦИЯХ УКРАИНЫ

С. Г. Савчук, Ф. Д. Заблоцкий, Л. Н. Янкив-Витковская, Б. Б. Джуман

Получение информации о пространственном распределении электронной концентрации является непростой задачей, поскольку высотные профили распределения параметра *TEC* меняются как со временем, так и с долготой и широтой, и зависят от магнитной и солнечной активности. В связи с этим актуальным является исследование характерных количественных параметров, описывающих динамику ионизации атмосферы. Целью данной работы является исследование параметра ионосферы *VTEC*, а именно исследования корреляционных связей между этим параметром на различных GNSS-станциях, расстояние между которыми составляет от 100 до 400 км. Для решения поставленной задачи сначала было обработано ионофайлы со значениями параметра *VTEC* на разных станциях, а также проведения их фильтрацию с помощью фильтра Калмана. Далее найдены коэффициенты корреляции между значениями параметра *VTEC* попарно для всех исследуемых GNSS-станций. Предложено аналитическую связь между коэффициентом корреляции значений параметра *VTEC* и расстоянием между GNSS-станций. Полученные результаты позволяют моделировать вариации и динамику изменений концентрации электронов в пространстве.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, ионосфера, общая концентрация электронов, корреляционная связь

ABOUT THE CORRELATION BETWEEN THE VALUES OF THE *VTEC* IONOSPHERE PARAMETER ON GNSS STATIONS OF UKRAINE

S. Savchuk, F. Zablotskyi, L. Yankiv-Vitkovska, B. Dzhuman

Obtaining information about the spatial distribution of electronic concentration is a complicated task, since the high-rise distribution profiles of the *TEC* parameter vary both in time and in longitude and latitude, and depend on the magnetic and solar activity. In this regard, it is relevant to study the characteristic quantitative parameters describing the dynamics of ionization of the atmosphere. The purpose of this work is to study the parameter of the ionosphere *VTEC*, namely the study of correlation links between this parameter at different GNSS stations, the distance between them ranges from 100 to 400 km. To solve this problem, ionfiles were first processed with *VTEC* parameter values at different stations, and their filtration was performed with the help of the Kalman filter. Next, the correlation coefficients between the values of the *VTEC* parameter are found pairwise for all GNSS stations under investigation. The analytical connection between the coefficient of correlation of *VTEC* parameters and the distance between GNSS stations is proposed. The obtained results allow to simulate variations and dynamics of changes in the concentration of electrons in space.

**Keywords:** global navigation satellite systems, ionosphere, total electron content, correlation