

УДК 528.3

С.Г. Савчук, І.В. Савчук

Національний університет «Львівська політехніка», 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12

imsavchuk@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯРНИХ ВАРІАЦІЙ ЕЛЕКТРОННОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІОНОСФЕРИ ЗА ДАНИМИ GNSS ВИМІРЮВАНЬ НА МЕРЕЖІ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

Наведено результати експериментальних досліджень регулярних варіацій електронної концентрації іоносфери за даними GNSS вимірювань на референційних станціях Західної України. Наведено статистичні характеристики, побудовані графіки.

Ключові слова: іоносфера Землі, загальний вміст електронів (TEC), «іоносферний індекс I95», глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS).

Постановка проблеми. Дослідження іоносфери наземними радіофізичними методами обумовлені з однієї сторони необхідністю розвитку сучасних уявлень про характер сонячно-земних зв'язків та про ближній космос, а з іншої - іоносфера Землі є одним із основних джерел помилок для радіосигналів і, особливо, в застосуваннях, пов'язаних із використанням глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Важливість і актуальність цих досліджень підтверджується створенням глобальних і регіональних систем моніторингу "космічної погоди", куди входять спостереження за поведінкою Сонця, магнітосферою та іоносферою Землі. Дослідження стану навколоземного космічного середовища включають дослідження іоносферних процесів, у тому числі тих, що відбуваються як в нижніх її областях, так і на висотах більше 1000 км. Однією із важливих характеристик стану іоносфери є загальний вміст електронів (TEC). При GNSS вимірюваннях затримка сигналів в іоносфері майже пропорційна TEC уздовж шляху проходження супутникового сигналу і обернено пропорційна квадрату його частоти. Саме ця дисперсійна властивість іоносфери дозволяє дво (мульти) частотним приймачам GNSS з одної сторони компенсувати іоносферні затримки, а з другої - вимірювати TEC.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш поширеною

практикою врахування TEC є модельний підхід. Аналітичні моделі дають хорошу оцінку цього параметра за умови спокійного геомагнітного стану, але в разі збурення іоносфери оцінка TEC стає істотно менш точною, що негативно позначається на роботі різних (зокрема навігаційних) супутникових систем [1]. Дані про вміст загальної кількості електронів, в залежності від різних фізичних умов, використовуються в моделях, які застосовуються в радіотехнічних системах. Прикладом такого використання може бути модель іоносфери, запропонована Klobuchar [2], яка дає змогу враховувати вплив середовища поширення сигналів супутникової радіонавігаційної системи GPS під час роботи з одночастотними приймачами.

У багатьох реалізаціях моделювання іоносфери на густих мережах GNSS станцій кожна корекційна модель складається з двох наборів коефіцієнтів, які є диференційними іоносферними похибками у двох напрямках: з півдня на північ та з заходу на схід. Оскільки такі коефіцієнти створюються для кожного доступного супутникового сигналу на кожен епоху спостережень, то їхня кількість є такою значною, що вони узагальнюються за певний період часу, як правило, за годину [3]. Таке модельне представлення, що засноване на цих коефіцієнтах, у вигляді узагальненого показника отримало назву «іоносферний індекс». Іоносферний індекс визначає

іоносферний ефект (вплив, помилку) на визначення координат за допомогою GNSS з вірогідністю 95% (I95). Таким чином індекс I95 є статистичним показником, який надає інформацію про розмір диференційних іоносферних помилок [4].

Отримання інформації про просторовий розподіл електронної концентрації вздовж траси поширення радіохвиль представляє собою непросту задачу, оскільки висотні профілі розподілу електронної концентрації іоносфери істотно змінюються як з плином доби, так і з довготою і широтою, залежать від сезону, від сонячної та магнітної активності [5,6]. Для отримання повної інформації про іоносферу потрібно було б мати (рівномірно розподілені по поверхні

планети) дуже значну кількість технічних засобів вимірювання її показників [7].

Постановка завдання. Мета наших досліджень полягала у визначенні регулярних варіацій електронної концентрації іоносфери за даними GNSS вимірювань на мережі референцних станцій.

Виклад основного матеріалу.

Для нашого дослідження використовувались дані GNSS спостережень, отриманих з референцних станцій Західної України. Зважаючи на близькість розташування нами обрано 4 станції, а саме: SULP, TERN, SHAZ та MUKA (рис.1), які характеризують територію в цілому і достатньо віддалені одна від одної.

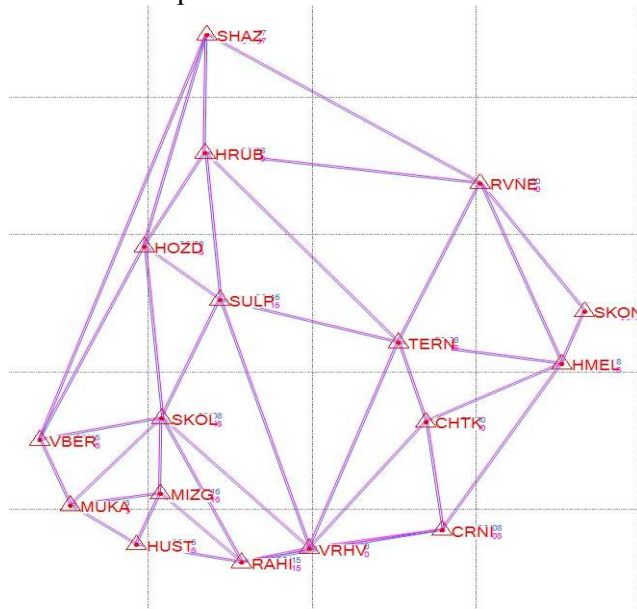


Рис. 1. Схема мережі станцій системи дистанційного моніторингу атмосфери

У файлах, фрагмент якого представлений на рис. 2, безпосередньо використати дані для аналізу було складно, через те, що дані наведені для кожного окремого супутника, а з плином часу супутники змінювали один одного. Тому нами було використано програму Station

TEC 07102013, яка створена на кафедрі вищої геодезії та астрономії. Ця програма виконує перетворення даних VTEC із файлу, наприклад: [LP_ATMO_2740.13TEC], у робочі файли по станціях спостережень. На рис.3 подано зразок такого файлу:

```

Total Electron Content (TEC)
FileName: LP_ATMO_2740.13TEC
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]]

#2013 10 01 00 00 00.0000000 14
HOZD 8
G03;8.393;0.982180979;0.689707569
G05;12.968;0.872077635;0.330979074
G07;12.693;0.889930355;0.458910075
G08;14.759;0.869035737;0.395936176
G09;14.866;0.869766363;0.388434037
G13;14.237;0.827836821;0.594923356
G26;10.127;0.905400917;0.258301191
G28;12.957;0.778530033;0.435427808
HMEL 8
G03;9.470;0.958831890;0.732816496
G05;13.287;0.861961883;0.387039819
G07;11.794;0.875930211;0.515835979
G08;13.845;0.856998870;0.453204871
G09;14.038;0.857950419;0.445722290
G13;14.360;0.814224479;0.635176907
G26;10.194;0.899198816;0.310773662
G28;13.226;0.767850063;0.485971960

```

Рис. 2. Фрагмент подобового файлу загального вмісту електронів (TEC)

```

% цей файл згенерований автоматично програмою station_TEC_07102013
% Програма виконує перетворення даних VTEC із файла [LP_ATMO_2740.13TEC]
% у робочі файли по станціях спостережень, які знаходяться в [c:\TEMP\]
% Робочий файл містить оператор присвоєння мовою Matlab
*****
% Sulp_VTEC - масив значень VTEC станції Sulp
*****
% Перший стовпчик масиву Sulp_VTEC - час [0 - 24], в долях годин доби
% Другий стовпчик масиву Sulp_VTEC - значення VTEC

0.000e+000 1.2573e+001
4.167e-003 1.2567e+001
8.333e-003 1.2564e+001
1.250e-002 1.2556e+001
1.667e-002 1.2553e+001
2.083e-002 1.2542e+001
2.500e-002 1.2537e+001
2.917e-002 1.2526e+001
3.333e-002 1.2523e+001
3.750e-002 1.2518e+001

```

Рис. 3. Фрагмент файлу по станціях спостережень

Використовуючи з отриманих файлів значення TEC за допомогою програмного забезпечення MYSTAT нами побудовано графіки та отримано статистичні характеристики. На рис. 4 зображені

регулярні варіації загального вмісту електронів за період травень – вересень 2013 року за даними референсних станцій Sulp, TERN, SHAZ, MUKA.

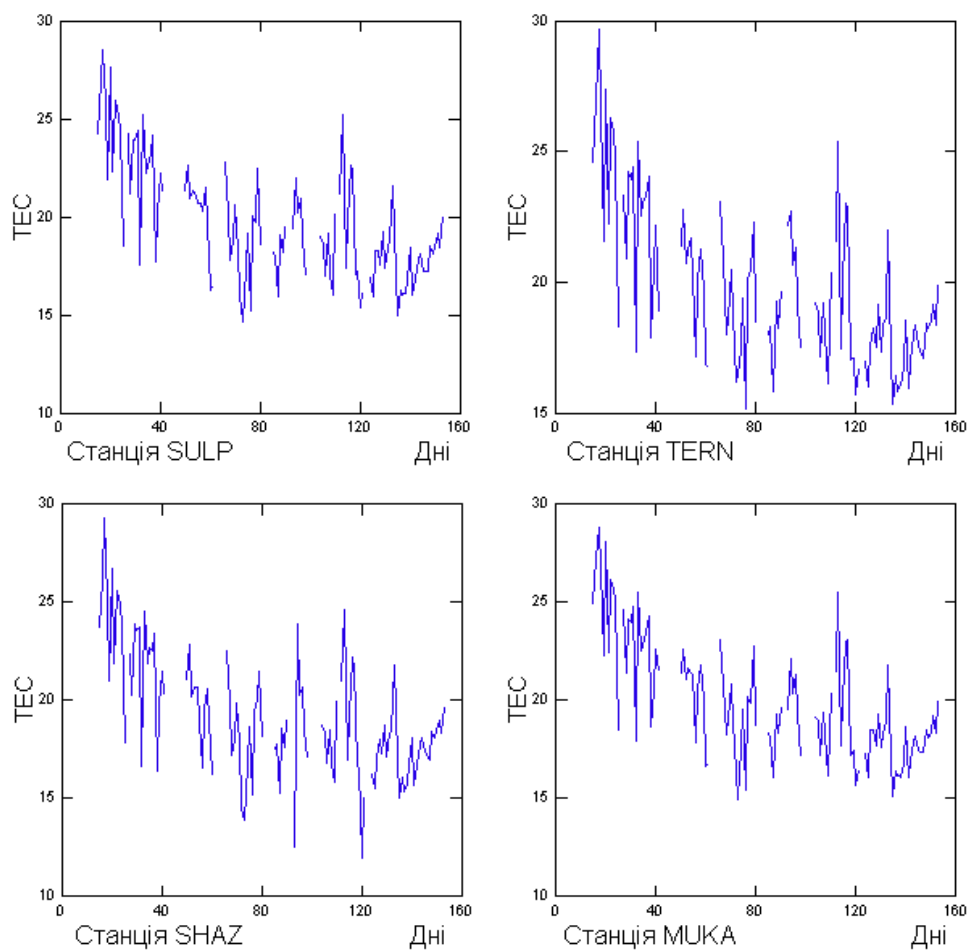


Рис. 4. Регулярні варіації загального вмісту електронів за період травень – вересень 2013 року за даними референсних станцій

В табл. 1 приведені статистичні характеристики вихідних даних.

Таблиця 1

Статистичні характеристики вихідних даних

	SULP	TERN	SHAZ	MUKA
Кількість	112	112	112	112
Мінімум	14,630	15,180	11,990	14,920
Максимум	28,550	29,660	29,310	28,790
Середнє арифметичне значення	19,749	19,838	19,195	19,950
Стандартна похибка середнього арифметичного	0,284	0,289	0,297	0,291
Дисперсія	9,065	9,364	9,901	9,506
Експес	-0,025	0,156	0,288	-0,288
Стандартна похибка експесу	0,453	0,453	0,453	0,453

Аналізуючи отримані графіки можна зробити висновок про подібність регулярних варіацій ТЕС за вибраний період дослідження для різних станцій. Це підтверджують також дані з табл. 1.

Отже, за період з травня по вересень 2013 р. зміни ТЕС для обраних станцій проходили в межах приблизно 12-15 TECU до 29 TECU із стандартним відхиленням 0,3. Проте, якоїсь територіальної відмінності нами не було виявлено. При цьому треба зазначити, що за даними «Індекса 95»

особливих збурень іоносфери для даної території не виявлено. Тому, для порівняно спокійного стану іоносфери для території покриття референцними станціями Західної України помітних змін величини ТЕС між станціями не спостерігалось.

Нами також було взято в опрацювання дані за 1, 2 та 3 жовтня 2013р., коли спостерігалися значні збурення іоносфери за даними «Індекса 95», що проілюстровано на рис. 5.

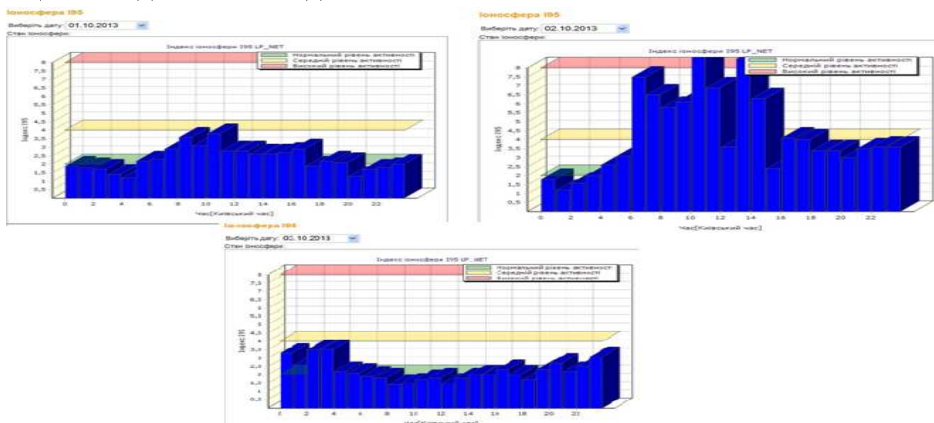


Рис. 5. Іоносферні збурення за період 1.10.- 3.10.2013 року

Виконуючи аналогічні дії нами побудовано графіки та отримано статистичні характеристики. На рис. 6, 7 та 8 зображені варіації загального вмісту електронів за

період з 1 по 3 жовтня 2013 року за даними референцних станцій SULP, TERN, SHAZ, МУКА, відповідно.

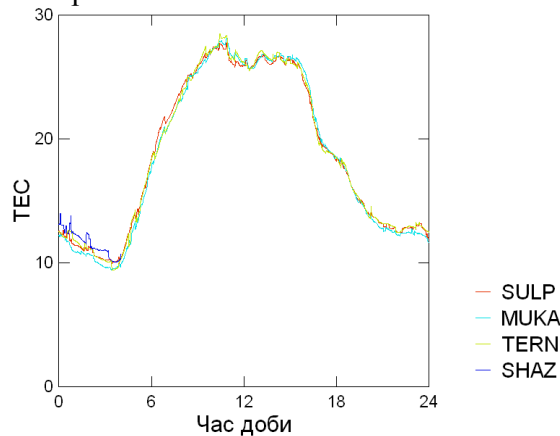


Рис. 6. Варіації загального вмісту електронів за 1 жовтня 2013 року

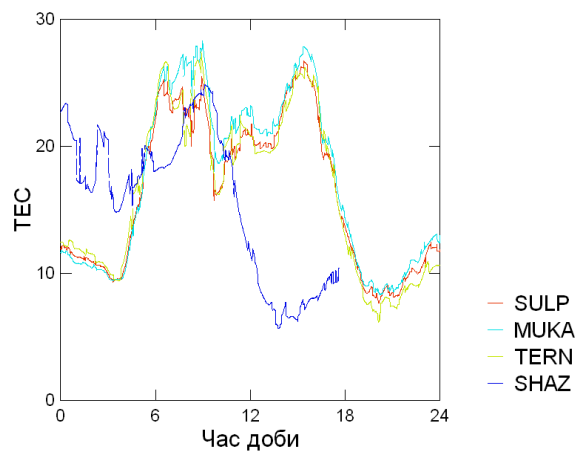


Рис. 7. Варіації загального вмісту електронів за 2 жовтня 2013 року

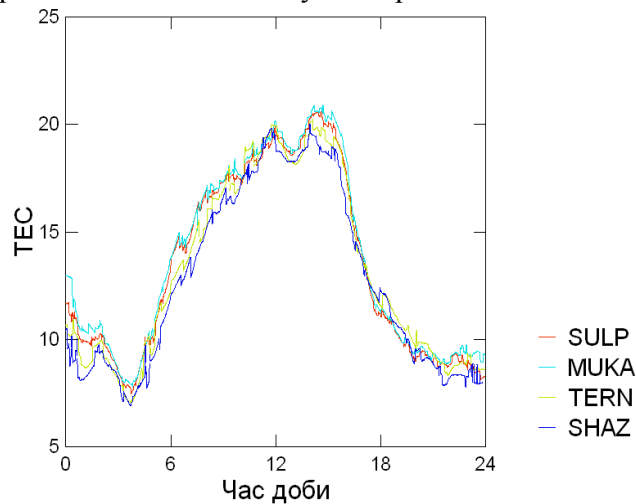


Рис. 8. Варіації загального вмісту електронів за 3 жовтня 2013 року

В таблицях 2, 3 та 4 приведені статистичні характеристики за 1, 2 та 3 жовтня, відповідно.

Таблиця 2

Статистичні характеристики за 1 жовтня

	SULP	TERN	SHAZ	MUKA
Кількість	5760	5757	5753	964
Мінімум	9,790	9,450	9,420	10,050
Максимум	27,770	28,130	28,500	14,180
Середнє арифметичне значення	18,756	18,575	18,776	11,603
Стандартна похибка середнього арифметичного	0,082	0,085	0,083	0,032
Дисперсія	6,208	6,463	6,273	1,000
Експес	-1,633	-1,619	-1,588	-0,856
Стандартна похибка експесу	0,065	0,065	0,065	0,157

Таблиця 3

Статистичні характеристики за 2 жовтня

	SULP	MUKA	TERN	SHAZ
Кількість	5 760	5 759	5 753	4 23
Мінімум	7,590	8,330	6,170	5,690
Максимум	26,710	28,370	27,470	24,860
Середнє арифметичне значення	16,362	17,313	16,422	15,621
Стандартна похибка середнього арифметичного	0,078	0,087	0,083	0,089
Дисперсія	34,666	43,717	39,408	33,820
Ексцес	-1,514	-1,579	-1,451	-1,274
Стандартна похибка ексцесу	0,065	0,065	0,065	0,075

Таблиця 4

Статистичні характеристики за 3 жовтня

	SULP	MUKA	TERN	SHAZ
Кількість	5 746	5 743	5 739	5 707
Мінімум	7,050	7,790	7,060	6,920
Максимум	20,600	20,910	20,240	20,020
Середнє арифметичне значення	13,436	13,738	13,223	12,781
Стандартна похибка середнього арифметичного	0,056	0,056	0,055	0,055
Дисперсія	18,122	18,098	17,592	17,449
Ексцес	-1,533	-1,516	-1,463	-1,462
Стандартна похибка ексцесу	0,065	0,065	0,065	0,065

При аналізі даних під час іоносферних збурень виявлено, що регулярні зміни TEC між станціями є несинхронними і для станції SULP різниця в мінімальних і максимальних значення становить приблизно 19 TECU, для станції MUKA – 20 TECU, для TERN складає 21 TECU, а для станції SHAZ 19 TECU. Це означає, що під час іоносферних збурень навіть на такій території проявляються суттєві зміни величини TEC.

Висновки. З досліджень регулярних варіацій TEC на референцних станціях Західної України виявлено подібність регулярних варіацій TEC для різних станцій за період з травня по вересень 2013 р. Зміни

ТЕС проходили в межах 12-15 ÷ 29 TECU із стандартним відхиленням 0,3. Оскільки, за даними «Індекса 95» особливих збурень іоносфери для даної території не виявлено, то і помітних змін величини TEC між станціями не спостерігалось. Проте, під час зафіксованих іоносферних збурень виявлено, що регулярні зміни TEC між станціями є несинхронними. Так для станції SULP різниця в мінімальних і максимальних значення становить приблизно 19 TECU для станції MUKA – 20 TECU, для станції TERN складає 21 TECU, а для станції SHAZ 19 TECU. Це означає, що під час іоносферних збурень навіть на такій території проявляються суттєві зміни величини TEC.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Memarzahed Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications, PhD thesis, 2009. -242 p.
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. Яковлев О.И. Космическая радиофизика / О.И. Яковлев .- М.: Научная книга, 1998.- 432 с.
4. Wanninger, L. (2004): Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning. Proc. ION GNSS 2004, Long Beach, CA, 2849-2854.
5. Сетевые спутниковые радионавигационные системы /под ред. П.П. Дмитриева, В.С. Шебшаевича .- М.: Радио и связь, 1992- 272 с.
6. Колосов, М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А Арманд, О.И. Яковлев.- М.: Связь, 1969.-155с.
7. Вікові варіації магнітних полів сонячних плям та їх прояви у міжпланетному просторі та геосфері: автореф. дис. канд. фіз.-мат. наук : 01.03.03 / Н. Й. Лозицька; НАН України, Голов. астрон. обсерваторія. - К., 2011. - 24 с. - укр.
8. «Магнітна активність Сонця і сонячно-земні зв'язки у новому 24-му циклі», №11БФ023-02, 2011-2012.

S.G. Savchuk, I.V. Savchuk

National University "Lviv Polytechnic", 79013, Lviv, S. Bandera st., 12

EXPLORATION OF THE REGULAR VARIATIONS OF ELECTRON DENSITY OF THE IONOSPHERE ACCORDING GNSS MEASUREMENTS ON THE NETWORK REFERENCE STATIONS OF WESTERN UKRAINE

It's the results of experimental studies of regular variations of ionospheric electron density according to the GNSS measurements on reference stations in Western Ukraine. Shows statistical characteristics and graphs.

Keywords: Earth's ionosphere, the total electron content (TEC), «ionospheric index I95», Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

С.Г. Савчук, И.В. Савчук

Национальный университет «Львовская политехника», 79013, г. Львов, ул. С.Бандеры, 12

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛЯРНЫХ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ GNSS ИЗМЕРЕНИЙ НА СЕТИ РЕФЕРЕНЦНЫХ СТАНЦИЙ ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ

Приведены результаты экспериментальных исследований регулярных вариаций электронной концентрации ионосферы по данным GNSS измерений на референцных станциях Западной Украины. Приведены статистические характеристики, построены графики.

Ключевые слова: ионосфера Земли, общее содержание электронов (TEC), «ионосферный индекс И95», глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS).