

УДК 528.2:629.78

І.В. САВЧУК

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, тел.099-32-01-857, ел. пошта [imsavchuk@ukr.net](mailto:imsavchuk@ukr.net).

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРИ ІЗ СОНЯЧНОЮ ТА МАГНІТНОЮ АКТИВНОСТЯМИ

Іоносфера Землі є середовищем, що формується під впливом геліогеофізичних чинників, тому під час її моніторингу необхідно зважати та враховувати вплив сонячної і геомагнітної активності. Параметри іоносфери можна визначити різними методами, зокрема і за кодovими і фазовими GNSS-спостереженнями. Тому встановлення зв'язків між визначеними параметрами іоносфери та показниками сонячної і магнітної активності становить значний інтерес в області сонячно-земних зв'язків та прогнозуванні "космічної погоди". На основі аналізу публікацій, в яких частково висвітлені питання, що стосуються цієї проблеми, наведені деякі числові характеристики зв'язків між тривалістю сонячного циклу і величиною магнітних полів, а також даними іонозонда за різної магнітної активності. У роботі розраховані числові характеристики кореляційних зв'язків між параметрами іоносфери, визначеними за даними кодovих і фазових GNSS-вимірювань на перманентній станції SULP, даними вертикального іонозонда та даними сонячної і магнітної активності. На основі отриманих даних: сонячної активності (з травня по серпень 2013 року), магнітної активності (з травня по серпень 2013 року), "Індексу 95" (червень, жовтень 2013 року), загального вмісту електронів TEC (з травня по вересень 2013 року) та вертикального іонозонда (вересень 2013 року) наведено результати практичної реалізації алгоритму визначення електронного розподілу іоносфери за даними кодovих і фазових GNSS-вимірювань і порівняння їх з даними вертикального іонозонда та сонячною і магнітною активністю. Наведено кореляційні матриці та графічні зображення точкових функціональних залежностей. Експериментально встановлено значущий коефіцієнт кореляції між даними загального вмісту електронів (TEC) і вертикального іонозонда; даними "Індексу 95" і магнітної активності та незначну кореляційну залежність між даними сонячної та магнітної активностей та "Індексу 95". Отримані результати кореляційних зв'язків вказують на можливість дослідження "космічної погоди" за даними мережі GNSS-станцій за вимірними значеннями TEC та "Індексу 95".

*Ключові слова:* кореляційна матриця; сонячна та магнітна активність; загальний вміст електронів (TEC); "іоносферний індекс I95"; вертикальний іонозонд.

### Вступ

Встановлення зв'язків між визначеними параметрами іоносфери (їх можна визначити різними методами, зокрема і за кодovими і фазовими GNSS-спостереженнями) та показниками сонячної і магнітної активностей становить значний інтерес в області сонячно-земних зв'язків, оскільки іоносфера Землі є середовищем, що формується під впливом геліогеофізичних чинників. Тому під час її моніторингу необхідно зважати та враховувати вплив сонячної і геомагнітної активності, зокрема, під час прогнозування "космічної погоди".

Термін "*космічна погода*" з'явився у 90-х роках ХХ ст., як такий, що охоплює фактично найважливіші аспекти науки про сонячно-земні зв'язки. Ця наука межує з фізикою Сонця, сонячної системи та геофізикою і займається дослідженням впливу сонячної мінливості та

сонячної активності через міжпланетне середовище на Землю, зокрема на магнітосферу, іоносферу, атмосферу Землі.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні відомості про іоносферу отримують від установок, розташованих на Землі. Проте вони дають інформацію тільки про параметри нижнього шару іоносфери. Щодо параметрів верхньої іоносфери, то таку інформацію про висотний розподіл електронної концентрації раніше отримували тільки за допомогою іонозондів космічного базування (Ратовский К.Г., 2004, Memarzhahed Y., 2009) установок некогерентного розсіяння радіохвиль (Захаров И.Г., Ляшенко М.В., 2003), вертикальних запусків ракет. Кореляційний аналіз за даними іонозонда за різної геомагнітної активності розглянуто в (Андреева Е.С., 2011).

Одним з показників стану іоносфери за даними GNSS-вимірювань в мережі станцій є так званий індекс "I95". Це – статистичний показник надання інформації про розмір диференційних іоносферних похибок; обчислюється за даними GNSS-спостережень (Wanninger L, 2004).

Практична важливість контролю стану плазмової оболонки Землі стимулювала інтенсивне вивчення іоносфери, насамперед як середовища поширення радіохвиль. Отримання інформації про просторовий розподіл електронної концентрації вздовж траси поширення радіохвиль являє собою непросте завдання, оскільки висотні профілі розподілу електронної концентрації іоносфери істотно змінюються як з плином часу, так і з довготою і широтою, залежать від сезону, від сонячної та магнітної активностей (Яковлев О.И., 1998, Klobuchar J.A., 1996). Для отримання повної інформації про іоносферу була б потрібна дуже велика кількість засобів, рівномірно розподілених по поверхні планети.

Проведено порівняльний аналіз ходу середньорічних значень індексів магнітних полів сонячних плям за магнітографічними та магнітометричними спостереженнями протягом 1970–2009 рр. Між цими індексами існує тісний кореляційний зв'язок, що вказує на синхронне підсилення магнітного поля як на усій площі плями, так і на осі трубок потоку за вимірюваннями у центрі плями. Виявлено достовірні міжрічні варіації потоку магнітного поля окремих сонячних плям (Van der Marel H., 1993).

На матеріалі візуальних вимірювань магнітних полів сонячних плям, зібраних і опрацьованих за даними багатьох обсерваторій світу, знайдено, що згладжені по трьох роках значення магнітних полів плям були найбільші протягом 2–4 років після максимуму кількості плям і були значно більшими ( $0,8 \pm 0,4$  сТл), ніж на початку циклу. Знайдена обернена кореляція ( $r = -0,68$ ) між тривалістю сонячного циклу і середньою величиною магнітних полів плям за 2–4 роки після максимуму циклу, що пояснює більшу (на два роки) тривалість 23 циклу сонячної активності (Н. Й. Лозицька., 2011).

Недостатньо вивчене питання безпосередніх зв'язків, визначених із GNSS-вимірювань параметрів іоносфери та показників сонячної і магнітної активностей. Як порівняння були взяті

виміряні значення параметрів іоносфери з використанням вертикальних іонозондів.

### Мета

Мета цього дослідження полягає у встановленні кореляційних зв'язків параметрів іоносфери, визначених за даними кодових і фазових GNSS-вимірювань, із даними вертикального іонозонда та даними сонячної і магнітної активностей.

### Методика

У роботі для дослідження та аналізу кореляційних зв'язків були використані дані: сонячної активності (з травня по серпень 2013 року), магнітної активності (з травня по серпень 2013 року), "Індексу 95" (червень, жовтень 2013 року), загального вмісту електронів ТЕС (з травня по вересень 2013 року) та вертикального іонозонда (вересень 2013 року). Необхідно зазначити, що дані сонячної та магнітної активностей взяті у планетарному масштабі, а значення "Індексу 95" та загального вмісту електронів ТЕС мають локальний характер. Для опрацювання даних використовувалось програмне забезпечення MYSTAT.

**1. Результати практичної реалізації алгоритму визначення електронного розподілу іоносфери за даними кодових і фазових GNSS-вимірювань і порівняння їх з даними вертикального іонозонда.** Під час виконання цього дослідження були опрацьовані дані загального вмісту електронів ст. Sulp (ТЕС) та дані вертикального іонозонда ст. Pruhonice (Чехія) – (ZOND\_PRUH) і ст. Rome (Італія) – (ZOND\_ROME). Вибір цих станцій був зумовлений наявністю даних іонозондувань на період наших досліджень:

- проведено кореляційний аналіз за даними ТЕС ст. Sulp та іонозонда ст. Pruhonice, використано подобові дані за вересень. Коефіцієнти кореляції наведені в табл. 1, графічне зображення точкової функціональної залежності показано на рис. 1;

Таблиця 1

**Кореляційна матриця за даними станцій Sulp та Pruhonice**

	ТЕС	ZOND PRUH
ТЕС	1,000	0,861
ZOND PRUH	0,861	1,000

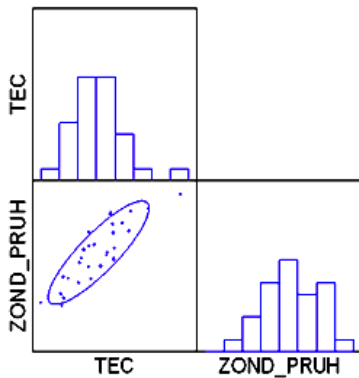


Рис. 1. Графічне зображення точкової функціональної залежності за даними станції SULP та Pruhonice

- проведено кореляційний аналіз за даними TEC ст. SULP та іонозонда ст. Rome, використано подібні дані за вересень. Коефіцієнти кореляції наведені у табл. 2, графічне зображення точкової функціональної залежності показано на рис. 2.

Таблиця 2

**Кореляційна матриця за даними станцій SULP та Rome**

	<b>TEC</b>	<b>ZOND_ROME</b>
<b>TEC</b>	1,000	0,665
<b>ZOND_ROME</b>	0,665	1,000

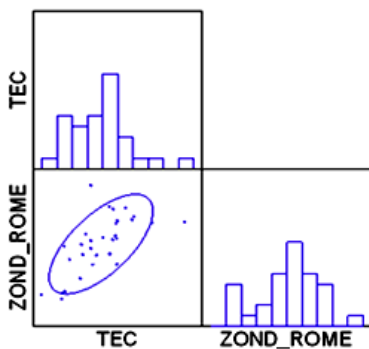


Рис. 2. Графічне зображення точкової функціональної залежності за даними станції SULP та Rome

На рис. 3 відображені варіації даних TEC та вертикального зондування ст. Pruhonice та ст. Rome протягом вересня 2013 року.

Як бачимо з наведених даних, кореляція між даними ст. SULP та іонозондів є доволі високою і зменшується з відстанню.

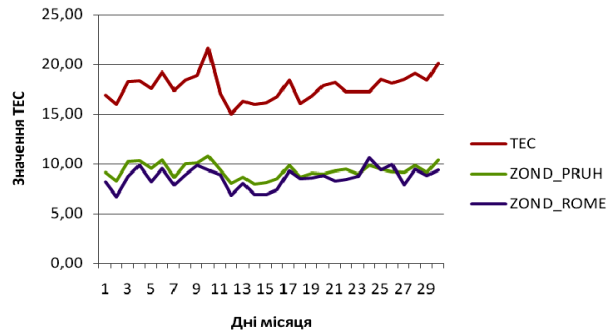


Рис. 3. Варіації даних TEC та вертикального зондування ст. Pruhonice та ст. Rome

**2. Результати практичної реалізації алгоритму визначення електронного розподілу іоносфери за даними кодових і фазових GNSS-вимірювань і порівняння їх з даними сонячної та магнітної активностей.** Під час виконання цього дослідження були опрацьовані дані загального вмісту електронів ст. SULP (TEC), “Індексу 95”, сонячної (KP\_SOLAR) та магнітної (KP\_MAG) активностей. Для обчислення коефіцієнтів кореляції були використані дані за різний період часу:

- проведено кореляційний аналіз за даними “Індексу 95” та сонячної і магнітної активностей, використано тригодинні дані за червень. Коефіцієнти кореляції наведені у табл. 3, графічне зображення точкової функціональної залежності показано на рис. 4.

Таблиця 3

**Кореляційна матриця за даними “Індексу 95” та сонячної і магнітної активностей (червень 2013 р.)**

	<b>I95</b>	<b>KP SOLAR</b>	<b>KP MAG</b>
<b>I95</b>	1,000	-0,120	-0,042
<b>KP SOLAR</b>	-0,120	1,000	0,901
<b>Kp_MAG</b>	-0,042	0,901	1,000

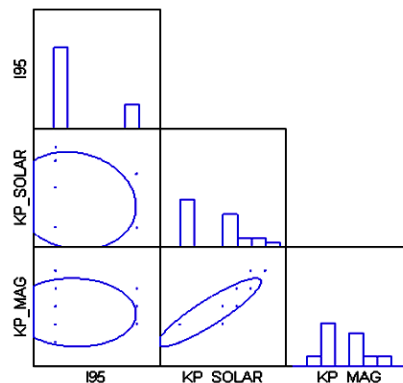


Рис. 4. Графічне зображення точкової функціональної залежності за даними “Індексу 95” та сонячної і магнітної активностей

На рис. 5 відображені варіації даних “Індексу 95” та сонячної і магнітної активностей за окремо вибрані дні червня 2013 року, де спостерігалась підвищена активність.

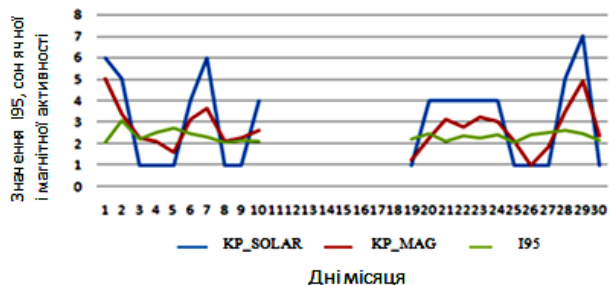


Рис. 5. Варіації даних “Індексу 95” та сонячної і магнітної активностей

Проведено кореляційний аналіз за даними TEC та сонячної і магнітної активностей, використано подібні дані за червень. Коефіцієнти кореляції наведені у табл. 4, графічне зображення точкової функціональної залежності показано на рис. 6.

Таблиця 4

**Кореляція за даними TEC та сонячної і магнітної активностей (червень 2013 року)**

	TEC	KP_SOLAR	KP_MAG
TEC	1,000	-0,304	-0,461
KP_SOLAR	-0,304	1,000	0,901
Kp_MAG	-0,461	0,901	1,000

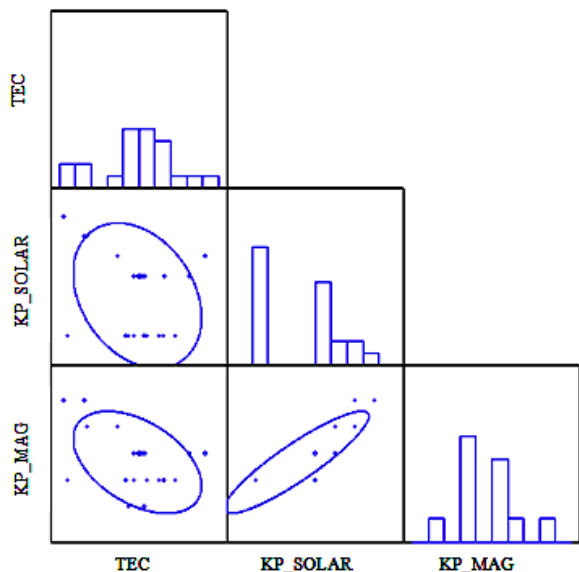


Рис. 6. Графічне зображення точкової функціональної залежності даних TEC та сонячної і магнітної активностей

На рис. 7 відображені варіації даних TEC та сонячної і магнітної активностей за червень 2013 року, де спостерігалась підвищена активність;

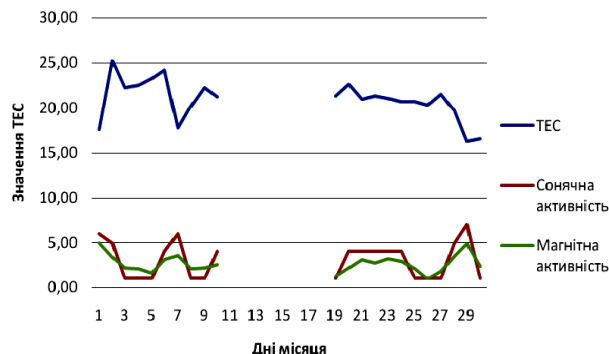


Рис. 7. Варіації даних TEC та сонячної і магнітної активностей

• проведено кореляційний аналіз, де спостерігалась висока активність за даними “Індексу 95” та магнітної активності, використано тригодинні дані за 2 та 10 жовтня. Коефіцієнти кореляції наведені в табл. 5 та 6, графічне зображення точкової матриці показано на рис. 8 та 9 відповідно;

Таблиця 5

**Кореляція за даними “Індексу 95” та магнітної активності (2 жовтня 2013 року)**

	I95	KP_MAG
I95	1,000	-0,675
KP_MAG	-0,675	1,000

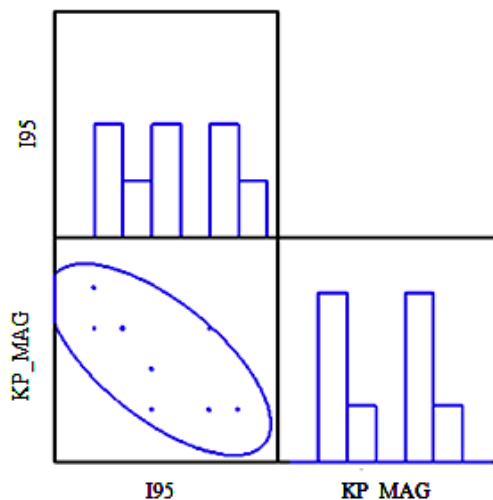


Рис. 8. Графічне зображення точкової функціональної залежності за даними “Індексу 95” та магнітної активності

Таблиця 6  
Кореляція за даними “Індексу 95”  
та магнітної активності  
(10 жовтня 2013 року)

	I95	KP_MAG
I95	1,000	0,579
KP_MAG	0,579	1,000

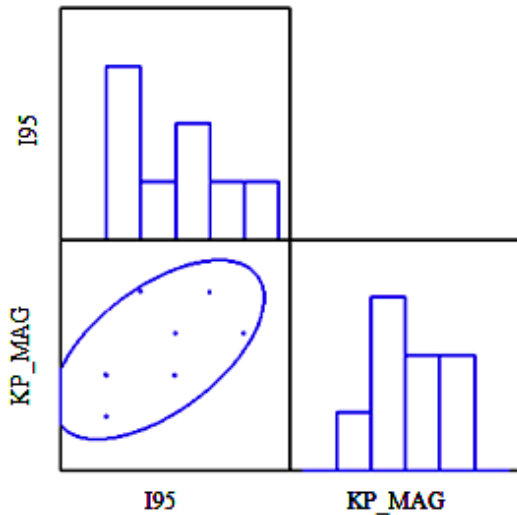


Рис. 9. Графічне зображення точкової функціональної залежності за даними “Індексу 95” та магнітної активності (10 жовтня 2013 року)

- проведено кореляційний аналіз за даними TEC та сонячної і магнітної активностей, використано кодові дані з травня по серпень. Коефіцієнти кореляції наведені в табл. 7, графічне зображення точкової функціональної залежності показано на рис. 10.

Таблиця 7  
Кореляція за даними TEC та сонячної  
і магнітної активностей з травня  
по серпень 2013 року

	TEC	KP_SOLAR	KP_MAG
TEC	1,000	-0,124	-0,109
KP_SOLAR	-0,124	1,000	0,786
KP_MAG	-0,109	0,786	1,000

На рис. 11 відображені варіації даних TEC та сонячної і магнітної активностей за період з травня по серпень 2013 року.

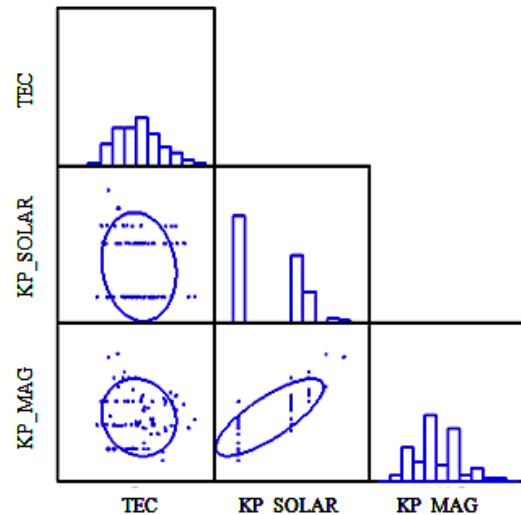


Рис. 10. Графічне зображення точкової функціональної залежності за даними TEC та сонячної і магнітної активностей з травня по серпень 2013 року

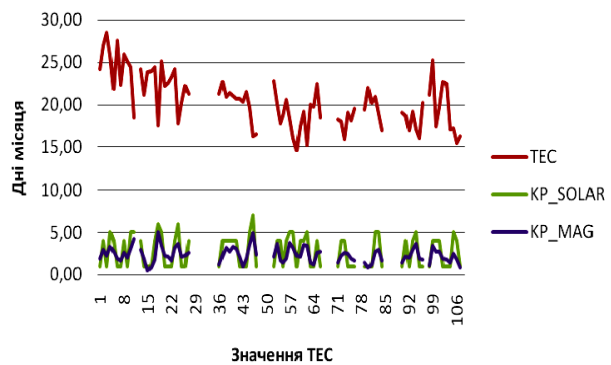


Рис. 11. Варіації даних TEC та сонячної і магнітної активностей за період з травня по серпень 2013 року

### Наукова новизна та практична значущість

Експериментально встановлено значущий коефіцієнт кореляції між даними загального вмісту електронів (TEC) і вертикального іонозонда; даними “Індексу 95” і магнітної активності та незначну кореляційну залежність між даними сонячної та магнітної активностей та “Індексу 95”.

Отримані результати кореляційних зв'язків вказують на можливість дослідження “космічної погоди” за даними мережі GNSS-станцій за вимірними значеннями TEC та “Індексу 95”.

### Висновки

З виконаних досліджень та отриманих результатів можна зробити такі висновки:

1) обчислена кореляція між даними загального вмісту електронів TEC ст. SULP та даними вертикального іонозонда ст. Puhonice становить 0,861, а між даними загального вмісту електронів TEC ст. SULP та даними вертикального іонозонда ст. Rome – 0,665. Зважаючи на те, що відстань між ст. SULP та ст. Puhonice приблизно дорівнює 860 км, а відстань між ст. SULP та ст. Rome становить близько 1900 км, можна сказати, що чим менша відстань між станціями, тим більшим є показник кореляції;

2) вибір місяця червня 2013 року був зумовлений тим, що саме у цей період спостерігалася висока магнітна та сонячна активність. Коефіцієнт кореляції між “Індексом 95” та сонячною активністю становить -0,120, між “Індексом 95” та магнітною активністю – -0,042. В обох випадках проявився низький коефіцієнт кореляції, близький до нуля. Це свідчить про те, що ці величини є незалежними, тобто між ними відсутній статистичний зв’язок;

3) коефіцієнт кореляції між TEC та сонячною активністю у червні становить -0,304, між TEC та магнітною активністю – -0,461. В обох випадках кореляція є значущою та від’ємною за знаком;

4) у дні, коли було зафіксовано різке іоносферне збурення як за даними “Індексу 95”, так за даними магнітної активності, коефіцієнти кореляції становили:

– -0,675 – 2 жовтня (кореляція від’ємна за знаком);

– 0,579 – 10 жовтня (кореляція додатна за знаком).

В обох випадках проявився значущий рівень кореляції;

5) кореляційний аналіз за увесь період наших досліджень показав такі результати:

– -0,124 між даними TEC та даними сонячної активності;

– -0,109 між даними TEC та даними магнітної активності;

– 0,786 між даними сонячної та магнітної активностей.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Андреева Е.С., Локота М.В. Параметры ионосферы: данные системы FormoSat-3/COSMIC, ионозондов и моделей IRI, NeQuick. – М., 2011.
- 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.
- Захаров И.Г., Ляшенко М.В. Сравнение экспериментальных и модельных значений полного электронного содержания в ионосфере над Восточной Европой // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, 3. – С. 280–286.
- Колосов, М.А. Распространение радиоволн при космической связи / М.А. Колосов, Н.А. Арманд, О.И. Яковлев. – М.: Связь, 1969. – 155 с.
- “Магнітна активність Сонця і сонячно-земні зв’язки у новому 24-му циклі”, №11БФ023-02, 2011–2012.
- Ратовский К.Г., Потехин А.П., Медведев А.В., Куркин В.И. Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности // Солнечно-земная физика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – Вып. 5 (118). – С.102–104.
- Сетевые спутниковые радионавигационные системы / под ред. П.П. Дмитриева, В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1992. – 272 с.
- Яковлев О.И. Космическая радиофизика / О.И. Яковлев. – М.: Научная книга, 1998. – 432 с.
- Klobuchar J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System, 1987, AES 23(3), 325–331.
- Klobuchar J. A., 1996. Ionospheric Effects on GPS. In: Global Positioning System: Theory and Applications, Volume 1, ed. by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 370 L’Enfant Promenade, SW. Washington DC, 20024.
- Memarzhahed Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications, PhD thesis, 2009. -242 p.
- Van der Marel H. (1993). Modelling of GPS ionospheric delays for geodetic applications. In *URSI commissie G meeting*, March 12, Eindhoven, The Netherlands.
- Wanninger L. (2004): Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning. Proc. ION GNSS 2004, Long Beach, CA, 2849–2854.

И.В. САВЧУК

Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры 12, Львов, Украина, 79013, тел.099-32-01-857, ел. почта [imsavchuk@ukr.net](mailto:imsavchuk@ukr.net).

### ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ С СОЛНЕЧНОЙ И МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Ионосфера Земли является средой, которая формируется под влиянием гелиогеофизических факторов, поэтому при ее мониторинге необходимо учитывать влияние солнечной и геомагнитной активности. Параметры ионосферы можно определить различными методами, в том числе и по кодовым и фазовым GNSS-наблюдениям. Поэтому установление связей между определенными параметрами ионосферы и показателями солнечной и магнитной активности представляет значительный интерес в области солнечно-земных связей и прогнозировании “космической погоды”. На основе анализа публикаций, в которых частично освещены вопросы, касающиеся данной проблемы, приведены некоторые числовые характеристики связей между продолжительностью солнечного цикла и величиной магнитных полей, а также данными ионозонда при разной магнитной активности. В работе рассчитаны числовые характеристики корреляционных связей между параметрами ионосферы, определенными по данным кодовых и фазовых GNSS-измерений на перманентной станции SULP, данным вертикального ионозонда и данными солнечной и магнитной активности. На основе полученных данных: солнечной активности (с мая по август 2013 года), магнитной активности (с мая по август 2013 года), “Индекса 95” (июнь, октябрь 2013 года), общего содержания электронов ТЕС (с мая по сентябрь 2013) и вертикального ионозонда (сентябрь 2013 года) приведены результаты практической реализации алгоритма определения электронного распределения ионосферы по данным кодовых и фазовых GNSS-измерений и сравнение их с данными вертикального ионозонда и солнечной и магнитной активностью. Приведены корреляционные матрицы и графические изображения точечных функциональных зависимостей. Экспериментально установлено значимый коэффициент корреляции между данными общего содержания электронов (ТЕС) и вертикального ионозонда; данными “Индекса 95” и магнитной активности и незначительная корреляционная зависимость между данными солнечной и магнитной активности и “Индекса 95”. Полученные результаты корреляционных связей указывают на возможность исследования “космической погоды” по данным сети GNSS-станций по измеренным значениям ТЭС и “Индекса 95”.

*Ключевые слова:* корреляционная матрица, солнечная и магнитная активность; общее содержание электронов (ТЕС), “ионосферный индекс И95”; вертикальный ионозонд.

I.V. SAVCHUK

Department “Higher geodesy and astronomy” of National university Lviv polytechnic, 12 Bandera street, Lviv, Ukraine, 79013, tel.099-32-01-857, e-mail: [imsavchuk@ukr.net](mailto:imsavchuk@ukr.net).

### RESEARCH SETTING CORRELATION IONOSPHERE WITH SOLAR AND MAGNETIC ACTIVITY

Ionosphere is an environment that is influenced by factors heliogeophysical, so when monitoring it is necessary to consider and take into account the influence of solar and geomagnetic activity. Parameters of the ionosphere can be determined by various methods, including code and phase GNSS observations. Therefore, to establish links between certain parameters of the ionosphere and indices solar and magnetic activity is of considerable interest in solar-terrestrial relations and predicting “space weather”. Based on the analysis of publications in which issues relating to this problem are partially covered, some numerical characteristics of relationships between solar cycle length and quantity of magnetic fields and data from ionozond at different magnetic activity are presented. In the paper it is calculated numerical characteristics of correlations between the parameters of the ionosphere determined according to the code and phase measurements on permanent GNSS stations SULP, data from vertical ionozond and the data of solar and magnetic activity. Based on the obtained data: solar activity (from May to August 2013), magnetic activity (from May to August 2013), “Index 95” (June, October 2013), the total electron content TEC (May to September 2013) and vertical ionozond (September 2013) the results of practical implementation of the algorithm for determining ionospheric electron distribution according to the code and phase GNSS measurements are shown and

compared with data from vertical ionozond and solar and magnetic activity. The correlation matrix and graphics of point functional dependencies are shown. It was experimentally proved the significant coefficient of correlation between the total electron content (TEC) and vertical ionozond, according to “Index 95” and magnetic activity and insignificant correlation dependence between the data and the solar magnetic activity and “Index 95”. The obtained results of correlations suggest the possibility in the researches “space weather” according to the network GNSS stations measured values of TEC and “Index 95”.

*Key words:* correlation matrix and solar magnetic activity, total electron content (TEC); “ionospheric index I95”, vertical ionozond.

#### REFERENCES

- Ratovskiy K.G., Potekhin A.P., Medvedev A.V., Kurkin V.I. *Sovremennyy tsifrovoy ionozond DPS-4 i ego vozmozhnosti* [Modern Digital ionozond DPS-4 and ego abilities ]. Solnechno-zemnaya fizika.[Solar-earthly physics]. Novosibirsk: Edition SORAN, 2004. Issue 5 (118). pp.102–104
- Zakharov I.G., Lyashenko M.V. *Sravnenie eksperimentalnykh i modelnykh znacheniy polnogo elektronogo soderzhaniya v ionosfere nad Vostochnoy Yevropoy* [ Comparison of experimental and simulated values of the total electron content in the ionosphere over Eastern Europe]. Radiofizika i radioastronomiya [*Radio Physics and Radio Astronomy*]. 2003. part 8, 3. pp. 280–286
- Andreeva Ye.S., Lokota M.V. *Parametry ionosfery: dannye sistemy FormoSat-3/COSMIC, ionozondov i modeley IRI, NeQuick* [Ionosphere parameters: data system FormoSat-3/COSMIC, ionozond and models IRI, NeQuick]. Moscow, 2011
- Yakovlev O.I. *Kosmicheskaya radiofizika: Nauchnaya kniga* [ Radiophysics: Space Science Book]. Moscow 1998. 432 p.
- Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy /pod red. P.P. Dmitrieva, B.C. Shebshaevicha: Radio i svyaz, [Network satellite navigation systems]. Moscow Radio and communication, 1992 272 p.
- Kolosov M.A., Armand N.A, Yakovlev, Svyaz O.I. *Rasprostranenie radiovoln pri kosmicheskoy svyazi* [ Propagation of radio waves in space communications]. Moscow, Communication, 1969, 155 p.
- Vikovi variatsiyi magnitnikh poliv sonyachnikh plyam ta yikh proyavi u mizhplanetnomu prostori ta geosferi: avtoref. dis. kand. fiz.-mat. nauk : 01.03.03 / N. Y. Lozitska; NAN Ukraïni, Golov. astron. observatoriya. [Age-related variations in the magnetic fields of sunspots and their manifestations in interplanetary space and the geosphere: Author. Thesis. candidate. Sci. sciences: 01.03.03 / NY Lozitskaya, National Academy of Sciences of Ukraine, Chairman. Astron. Observatory] Kyiv, 2011, 24 p.
- “Magnitna aktivnist Sontsya i sonyachno-zemni zvyazki u novomu 24-mu tsikli”[“The magnetic activity of the Sun and solar-terrestrial relationships in the new 24th cycle”]. no.11BF023-02, 2011-2012
- Memarzahed Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications, PhD thesis. 2009. -242 p.
- Klobuchar J. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. 1987, AES 23(3), 325–331.
- Klobuchar J. A., 1996. Ionospheric Effects on GPS. *In: Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume 1, ed. by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, American Institute of Aeronautics and Astronautics. 370 L’Enfant Promenade, SW. Washington DC, 20024
- Wanninger L. (2004): Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning. Proc. ION GNSS 2004, Long Beach, CA, 2849-2854.
- Van der Marel H. (1993). Modelling of GPS ionospheric delays for geodetic applications. In *URSI commissie G meeting*, March 12, Eindhoven, The Netherlands.

Надійшла 20.03.2014 р.